

ISSN 1672-3880
CN64-1052/TD



神華科技

SHEN HUA SCIENCE AND TECHNOLOGY



神华科技

神华集团有限责任公司·中国神华能源股份有限公司 主管

2009.2 第7卷



编辑出版:《神华科技》编辑部
联系电话:0951-5039782
电子邮箱:shenhuakeji@163.com
广告经营许可证:6400004000103

地址:宁夏银川市北京东路立诚巷10号
邮编:750001 传真:0951-5039781
国际刊号:ISSN 1672-3880
国内刊号:CN64-1052/TD



Shenhua group

神华集团有限责任公司·中国神华能源股份有限公司 / 主管

2009. **2** 第7卷

www.shenhua.com.cn

《神华科技》编辑委员会

主任：张喜武

副主任：张玉卓 凌 文 彭苏萍 曹湘洪
蒋洪德 王梦恕

委 员：张喜武 张玉卓 凌 文 彭苏萍
曹湘洪 蒋洪德 王梦恕 韩建国
王晓林 李 东 孙文健 杨景才
郝 贵 王金力 薛继连 华泽桥
王品刚 黄 清 张克慧 许百川
顾大钊 崔洪明 王立杰 史士东
付忠广 包信合 卢春喜 许世森
许继刚 孙继平 刘振宇 朱德仁
吴 澎 屈晓辉 贾元平 钱立新
缪协兴

征 稿 启 事

《神华科技》是由神华集团有限责任公司、中国神华能源股份有限公司主管，面向国内、外公开发行的科技期刊，国际标准刊号 ISSN1672-3880，国内统一刊号 CN64-1052/TD，标准大 16 开规格，96 页，彩色封面印刷。

办刊的宗旨和目的：以科学发展观为指导，科技强企，人才优先，致力于全面提升神华科技创新水平，促进科技成果快速转化，进一步解放和发展神华的生产力；荟萃精华，凝聚智慧，为科技人才搭建展示才华的平台和事业成长的阶梯，营造良好的自主创新氛围；突出自主，博采广集，加大矿、电、路、港、油、化各主业领域关键技术科研攻关，加强知识产权保护，始终关注行业动态，引领行业发展，推动行业技术进步、产业结构升级和创新型国家建设。

办刊的方向和理念：立足神华，放眼全球，面向未来，走向世界；突出“权威性、前瞻性、学术性、专业性、实用性”。

办刊的标准和要求：坚持高起点、高质量、高品味、有特色、出精品。通过大胆探索，不断创新，把《神华科技》办成全国一流的科技期刊。

刊登的主要内容：在煤炭产业、电力产业、运输产业（包括铁路、港口）、煤制油与煤化工产业具有较高学术水平的最新研究成果、先进适用的技术应用成果及经验介绍、节能减排、信息化建设、企业经营管理等方面新技术及经验等。

欢迎广大科技、管理工作及现场技术人员踊跃投稿。稿件格式要求详见《神华科技》2009 年第 1 期《投稿须知》。稿件一经采用，将支付作者不低于国内一般正式期刊的稿酬。采用的稿件将收取不高于国内一般正式期刊的版面费。

投稿邮箱：shenhuakeji@shenhuachina.com(来稿请注明投稿《神华科技》)。

地 址：北京东城区安德路 16 号洲际大厦 1108 房间，神华集团有限责任公司(中国神华能源股份有限公司)科技发展部。

邮 编：100011

联系电话：010-58132379

传 真：010-58133105

《神华科技》编辑部



SHEN HUA SCIENCE AND
TECHNOLOGY

2009 年第 2 期

第 7 卷(总第 28 期) 双月刊

国内外公开发刊

总 编: 杨景才
副 总 编: 顾大钊 许百川
主 编: 李全生 俞太银
执行副主编: 杨惠民
编辑部主任: 张学文
责 任 编 辑: 杨 静 贺焯真
郝广杰

编辑出版:《神华科技》编辑部

地 址: 宁夏银川市北京东路
立诚巷 10 号

邮 编: 750001

联系电话: 0951—5039782

传 真: 0951—5039781

电子邮箱: shenhuakeji@163.com

设计制作: 华夏能源报社银川彩印公司

广告经营许可证: 6400004000103

出版日期: 2009 年 4 月 25 日

刊 号: ISSN 1672-3880
CN64-1052/TD

目 次

管理论坛

- 神华基于资源整合的技术创新模式研究 凌 文(3)
神华集团节能减排的特点及应把握的原则 顾大钊(8)

煤 炭

- 神东矿区 1.5~2.0m 煤层自动化开采技术方案研究
..... 杨景才 王继生 李全生(13)
褐煤提质技术现状及我国褐煤提质技术发展趋势初探 邵俊杰(17)
露天采矿机在胜利一号露天矿的应用研究 王启瑞(23)
复杂地质条件下急斜特厚煤层巷道松动圈监测分析
..... 张子飞 柴 鑫(26)
大型综采设备绿色维修的实践 王铁军 罗 宇(30)

电 力

- 特大型风力发电机组技术现状与发展趋势
..... 施跃文 高 辉 陈 钟(34)
国产 600MW 机组循环效率试验及性能优化分析
..... 杜劲松 李 强 包劲松(39)
国华盘电俄制 500MW 超临界锅炉低 NO_x 燃烧调整
..... 刘应文 高武军(46)
超超临界机组凝结水泵变频调节方案经济性分析 刘颖华 石 英(49)

运 输

- 大秦铁路重载运输发展对朔黄铁路的启示 李晓建(53)
神华集团铁路运输信息化建设研究 李 巍 杨 磊(57)
朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统的研究与探讨
..... 陈海滨 张智善 王建华(62)

煤制油与煤化工

- 煤化工过程中的 CO₂ 排放及 CCS 技术的研究现状分析
..... 任相坤 崔永君 步学朋 张翠清(68)
煤直接液化反应动力学模型研究 郭 治 王 勇 艾 军(73)
沉淀铁基催化剂助剂对费托反应性能影响的研究
..... 吕毅军 石玉林 宁文生 吕德义(77)

节能减排

- 600MW 火电机组湿法烟气脱硫系统 GGH 堵灰治理
..... 刘 毅 张 千(83)
神朔铁路污水的资源化利用技术研究
..... 郝小平 郭尽朝 彭 友 李红利(91)

科技动态

- 神华推广应用“加长工作面高强度开采技术”效益显著 (7)
神东煤炭分公司推广应用“6.3 米超大采高液压支架”成绩斐然 (16)
《煤矿安全生产风险预控体系及控制技术》项目通过中国煤炭工业协会
组织的专家鉴定 (90)

CONTENTS

Management Forum

- A Study on Shenhua's Resource-integration-based Technological Innovation Model Ling Wen(3)
The Characteristics and Principles of Shenhua Group's Energy Saving and Emission Reduction Gu Dazhao(8)

Coal

- A Technological Plan Study on the Mining Automation of Shendong Mining Zone's 1.5 ~ 2.0m Coal-bed
Yang Jingcai Wang Jisheng Li Quansheng (13)
The Development Status of Lignite Quality Improvement Technology and Development Trend of China's Lignite Quality Improvement Technology Shao Junjie(17)
A Study on the Application of Open Pit Mining Machine in Shengli No.1 Open-pit Mine Wang Qirui(23)
Monitoring and Analysis of Loose Zone in Steep Extra-thick Coal Seam under Complicated Geological Conditions
Zhang Zifei Chai Xin (26)
The Practice of Green Maintenance of Large-scale Fully Mechanized Mining Equipments Wang Tiejun Luo Yu(30)

Electric Power

- Technological Development Trends of Super-large Wind Generating Set Shi Yuewen Gao Hui Chen Zhong(34)
Circulating Efficiency Test of Domestic 600MW Units and Their Performance Optimization Analysis
Du Jinsong Li Qiang Bao Jinsong(39)
Low NO_x Combustion Adjustment of Guohua Panshan's Russian-made 500MW Supercritical Boiler Liu Yingwen Gao Wujun(46)
The Economical Evaluation of Frequency Conversion of Condensate Pump of Ultra-supercritical Generating Units
Liu Yinhua Shi Ying(49)

Transportation

- The Enlightenment of Daqin Railway's Heavy-haul Transportation Development on Shuohuang Railway Li Xiaojian(53)
A Study on the Informationalized Construction of Railway Transportation of Shenhua Group Li Wei Yang Kun(57)
Research and Discussion on Shuohuang Railway Transport Complex (Simulation) Training System
Chen Haibin Zhang Zhishan Wang Jianhua(62)

Coal Oil and Coal Chemical Industry

- CO₂ Emissions in the Process of Coal Chemical Industry and Analysis of the Research Status of CCS Technology
Ren Xiangkun Cui Yongjun Bu Xuepeng Zhang Cuiqing(68)
Direct Coal Liquefaction Reaction Kinetics Model Research* Guo Zhi Wang Yong Ai Jun(73)
A Study on the Influence of Precipitated Iron-based Catalyst for Fischer-Tropsch Reaction Performance
Lu Yijun Shi Yulin Ning Wensheng Lu Deyi(77)

Energy-saving and Emission Reduction

- GGH Clogging Prevention of 600MW Thermal Power Unit Wet-process Flue-gas Desulphurization System Liu Yi, Zhang Qian(83)
Shenshuo Railway Waste Water Utilization Hao Xiaoping Guo Jinchao Peng You Li Hongli(91)

Technology Dynamics

- Shenhua promotes the use of Longer face high-intensity mining technology and has gotten the significant benefits (7)
The Company of Shenhua Branch promotes the use of 6.3 meters high large mining hydraulic supports and has gotten the significant success (16)
The project Risk Control System and Technologies of Coal Mine Safe Production has been approved by the experts of China National Coal Association (90)

神华基于资源整合的技术创新模式研究

凌文

(中国神华能源股份有限公司, 北京, 100011)

摘要: 企业是技术创新的主体。神华技术创新的原动力在于对产业发展的把握和提升自身核心竞争力的需求。神华技术创新的实现过程,不仅是整合企业内部资源的结果,更是充分吸收利用外部资源的结果。神华基于资源整合的技术创新模式特点是形成以轮式辐射、链式集成和群式聚合为核心的技术创新网络,在整合内外部资源的管理体制协调下提升企业直接和间接的经济效益。神华基于资源整合的技术创新模式为企业保持持续竞争优势提供了有力保证。

关键词: 资源整合 技术创新 轮式辐射 链式集成 群式聚合

中图分类号: F273.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0003-05

1 引言

创新则兴,不创新则亡,这是市场经济条件下企业生存与发展的一条铁律,在经济全球化的背景下更是如此。一个企业要想在市场竞争中取得优势,其方式要么是利用研发优势不断改善产品的性能和质量,要么是利用先进工艺设备和流程创造同质低价产品,要么是利用品牌优势支配流通领域,而无论哪一种方式都离不开技术创新。进入21世纪,技术创新已经成为国家之间、企业之间竞争的焦点,成为提高国家、企业综合实力和核心竞争力的有效途径。

2 企业是技术创新的主体

企业应该成为技术创新的主体,主要体现在:
①企业是需求的主体。企业在生产经营活动中常常遇到技术瓶颈问题,不解决就制约自身发展。因此,企业的技术创新具有主动性和原动力。
②企业是投入的主体。不同于大学和科研院所的科研经费主要来源于国家拨款,而企业具有更大的自主性,可以从营业收入中提取一定比例用于技术创新。经过多年的改革发展,我国企业的整体经济效益大大提高,特别是我国国有经济结构不断优化,使中央企业具有了较强经济实力,为率先成为技术创新的主体提供了坚实的物质基础。
③企业是技术成果转化的主体。科技成果只有应用到实践中才能够实现转化,创造价值。企业技术创新的初衷就是为了解

决生产、经营上的关键难题,不存在寻找成果转化途径的问题。技术成果也将在企业实践中反复验证,不断改进,实现就地转化。最终的科技成果将直接运用到企业的生产、经营活动中,创造价值。因此,企业应该成为技术创新的主力军,中央企业更应该率先成为技术创新的主体。

3 神华技术创新的动力和原则

3.1 责任感和使命感

建设创新型国家,关键是要强化企业在自主创新中的主体地位,建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系。中央企业作为我国国有企业的骨干力量,作为国民经济的支柱,有责任也有条件成为技术创新的排头兵。中央企业大多集中在关系国家安全和国民经济命脉的重要行业和关键领域,是我国国民经济的支柱和骨干力量,是我国参与国际竞争的重要依托力量。神华认为自身有责任、有义务从国家长远发展的战略高度出发,在建设创新型国家中担当领军角色,发挥表率作用和带动作用,大力推进技术创新。

3.2 引领行业进步

神华大力推进技术创新,在提升企业竞争力的同时,以引领行业进步为己任。牵头组建“煤炭开发利用技术创新战略联盟”,带动我国煤炭行业从资源规模型、增长粗放型向资源节约型、内涵发展型发展模式转变。在煤、电、路、港、化的几个业务板块里,形成了很多原创性的创新成果,极大地

带动了煤炭行业和相关行业的发展。

随着产品结构升级和高新技术的应用，技术研究开发的难度越来越大，费用越来越高，单个企业的知识能力和资金能力都很难支撑一些综合性先进技术的开发。目前，在重大装备领域，除个别研发项目由国家指定依托工程外，大多数装备制造企业自主研发的新产品都处于“三无”困境，即因无运行业绩、无成熟技术而无法进入市场，背负着巨大的市场风险。如果大型企业之间不进行联合，实行优势互补，在激烈的国际竞争面前将会进一步丧失自主能力。因此，神华在重大技术装备国产化过程中，充分利用国内现有企业和科研机构的能力，采取多种方式进行联合，形成拳头，提高整体竞争力，引领了相关行业的技术进步。一是上下游企业纵向联合开发。这种情况多是发生在协作配套企业之间。主要是通过长期协议形式形成一个共同确定价格、共享利润的利益联合体。二是互相竞争的企业横向联合开发。竞争企业通常是在开发共性技术和共同标准时进行合作，合作企业间根据协议分享开发成果。在共同开发的基础上，再进行产品的差别性技术开发，形成先合作后竞争的机制。

3.3 提升核心竞争力

神华作为特大型中央企业，是我国煤炭行业排头兵，其竞争对手已经不再仅是国内企业，而是著名的国际跨国公司。这些国际大企业不仅资金雄厚、技术先进、体系完善，而且具有很强的研发力量和技术创新能力，控制了绝大多数行业的科技制高点。实践证明，没有核心技术和技术创新能力，我国企业很难突破发达国家及其跨国公司的技术垄断，很难向国际产业分工的高端移动，企业发展面临的国际竞争力和冲击力将日益加大。在这种情况下，进一步提高技术创新能力，尽快掌握核心技术和自主知识产权，就成为神华提高市场竞争力、参与国际竞争的必然选择。

从 2003 年开始，神华进一步明确科技投入政策，技术研发费不设限额、专款专用。近几年来，科技创新研发投入年投入增长率超过 30%。巨大的投入带来了巨大的回报。截至 2008 年底，仅采用本土化液压支架就节省开支 66 亿元。煤矿加长工作面、电厂等离子点火、海水淡化等技术成果的成功研发和应用，不仅带来了显著的经济效益，而且创造了巨大的社会效益。

3.4 技术创新的原则

神华的技术创新是在牢牢掌握技术创新管理关键环节和技术创新核心技术的两个前提下，积极利用社会资源。掌握技术创新管理关键环节就是要严格把握科研项目的立项、验收、成果转化、推广应用和后评估等流程，务必做到程序化、规范化。掌握技术创新核心技术是指在重大科研项目上抓住关键技术和知识产权，务必实现自主性、专有性。在此基础上，构建以神华技术研究院为枢纽，以北京低碳能源研究所及煤直接液化国家工程实验室为先导，以产业板块技术分中心、研究院为依托，以博士后科研工作站为窗口，以煤电油运各板块生产企业为平台，以科技投资类企业为技术成果孵化器，以充分利用外部科技资源为手段的具有神华特色的技术创新体系。

4 神华基于资源整合的技术创新模式

神华是大型综合能源企业，主营的煤、电、油、运产业都是国家能源保障的关键性基础产业，涉及行业多、领域广、门槛高、技术需求大。因此神华的技术创新工作有以下几个特点：①成立时间短，研发力量相对较弱；②行业跨度大，创新领域多；③技术需求大、技术含量高。以上情况促使神华在掌握技术创新管理关键环节和核心技术的原则下，形成了产学研相结合，以潜在市场为平台、以技术需求为导向、以合作共赢为纽带、以战略联盟为保障，最大程度调动和整合神华外部资源为己所用的自主性技术创新路径。神华在跨越式发展过程中，发挥企业作为技术创新主体的积极性、能动性、引导性和创造性，形成了以轮式辐射、链式集成和群式聚合为核心的基于资源整合的技术创新模式（见图 1），并以技术创新及管理创新为关键途径构建创新网络，获得超越同行业水平的创新绩效。

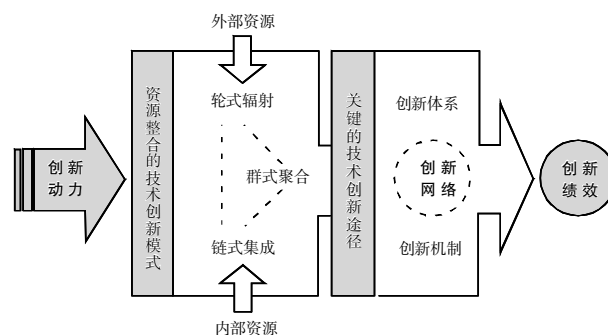


图 1 基于资源整合的技术创新模式图

4.1 轮式辐射

轮式辐射是指以一个创新主体为核心,各个没有直接关联的相关创新要素分别通过与创新主体不同的内在联系围绕在一起,形成一个创新群落。神华作为一个中心点(创新主体),通过设立技术标准、共享技术和资源、控制关键环节等多种方式,组织和协调相关创新要素之间的关系,带动了相关政府部门、企业、大学和科研院所,从而提升了整个创新群落的技术创新能力和绩效。

具体分析神华轮式辐射的外围结构,主要包括以下几个方面:①向相关政府部门辐射。与相关部委、行业协会的交流与合作,为神华发展和技术创新工作创造了良好的外部环境。2007年6月,神华向科技部、财政部、教育部、国资委、全国总工会和国开行申请牵头组建“煤炭开发利用技术创新战略联盟”,为神华煤、电、油、运各产业板块发展提供技术支持和服务。②向合作企业辐射。在重大装备本土化研发过程中,神华提出主要技术参数,以特殊采购方式与国内装备制造业龙头签订研发合同。③向高校和科研院所辐射。高校和科研院所是基础知识和技术的源头,通过产学研相结合的合作方式,有效地促进知识、信息和技术的扩散。

4.2 链式集成

新知识和新技术的问世、顾客需求的不断变化、市场竞争的新趋势等信息资源在未整合之前大多是零碎的、不系统的,要发挥这些信息和技术资源的最大使用价值,就必须对其进行整合,摒弃无用的和不相关的信息和知识,将有价值的资源融合起来,通过创新构思,使其产生经济效益。

神华通过自身一体化的运营模式最大程度地整合供应链条的上下游资源,分析、发现、解决生产、建设、经营、管理中的技术难题。这种模式主要表现为以神华的技术需求为出发点,带动供应链上下游企业进行相关技术创新,最终实现零部件、子系统以及整个产品的全面创新。在煤炭生产供应链中,神华作为生产者和煤炭装备的使用客户,充分发挥自身的市场导向作用,一直关注行业技术发展,及时提出相关技术的创新思路,通过生产工艺的突破性创新带动了上下游企业的创新和发展。

煤炭重大装备本土化项目的研发就很好地反映了神华这种链式创新的特点。煤炭行业对装备制造依赖程度很高,其技术水平和市场竞争力从根本

上取决于装备业所能提供的技术装备水平。高端液压支架等装备技术基本被国外企业垄断。近年来,虽然我国装备制造业有了长足发展。但随着产品结构升级和高新技术的运用,研究开发的难度越来越大,费用也越来越高,独立企业的资金能力以及知识储备很难进行一些大型装备的技术开发。神华是国内高端采掘装备的最大用户,但前几年绝大部分高端采掘装备都是依赖国外进口。由于国外企业产品价格的不断攀升和产量的限制,对神华的煤炭生产造成了一定的影响,也使生产成本不断提高。2004年初,神华决定以战略合作的方式联合国内知名的装备制造企业,以液压支架为突破口开展重大采掘装备和关键零部件的本土化研制。采取以研制代替采购的方式选择国内知名的5家煤机厂进行液压支架的研制。①神华充分发挥采掘装备使用企业的市场引导作用,向投标企业提出研制的目标和主要技术参数及技术标准。②对设计、制造的全过程进行监理,加强产品质量管理体系建设。③提供相关技术支持,并在样机研制后进行井下现场试验。④参与投标的制造单位先垫资组织设计和生产。首台样机试用成功后,神华按市场价格购买样机,并承认研制单位具有该产品的生产业绩,通过这样的方式,解决了研制企业“首台业绩”的难题。通过这种资金、技术、市场风险共担的机制极大地加快了本土化研制进程,不仅带动了上游企业的技术创新,而且推动了我国装备制造行业的发展。

4.3 群式聚合

产业链就是以市场前景比较好的、科技含量比较高的、产品的关联度比较强的优势企业和优势产品为链核,通过这些链核,以产品技术为联系,资本为纽带,上下链接、向下延伸、前后联系形成的链条。神华将与煤炭相关的多条产业链整合在一起,通过煤、电、油、运一体化和产、运、销一条龙的模式,使企业内部形成以煤为基础,其它业务板块为辅助和延伸的生产服务网络。而且,其创新不仅在每个节点上,更重点与点链接的环节中和环节之间的创新,将行业之间的摩擦和内耗消除,形成各个产业链条之间的聚合效应,推动整个网络的创新绩效。具体表现为:①煤、电、油板块的协同效应。神华从产煤、洗煤到运煤,再到下游的发电、煤制油和煤化工形成纵向一体化经营,形成了多种产品,使煤炭企业提高了资源利用率。煤、电

联营,一方面为公司的煤炭销售找到了稳定的市场,另一方面,使自营电厂的燃料得到了充分供应,使煤、电业务实现优势互补,煤、油板块协同发展将神华的业务领域进一步拓宽。②矿、路、港协同效应。神华的自有铁路使集中调配物质资源成为可能,且点对点的运输也确保了煤炭从矿井到港口快速有效地运送。矿、路、港形成闭环系统,大大减少外界干预,特别是避开了国铁由于各类物资运输比例的调整而带来的影响,减少了产品到市场过程中的不确定因素,保证了资源组织的均衡平稳。③煤、电、路、港的协同效应。煤炭为电力提供原料,电力反过来支持煤炭的生产运营;煤炭通过港口运输的便利和快捷,节约电力成本。依靠强大的资源供应和运输能力,神华才能够在电力紧缺的沿海地区获得越来越多的高质量电力业务投资机会,并形成成本电价的双重优势。

5 创新网络的绩效

神华通过轮式辐射、链式集成、群式聚合的三环创新体系,整合内外部资源形成了以神华为核心的技术创新网络。神华的技术创新是基于生产、经营中遇到的实际问题,因此科研成果能够迅速转化为推动企业发展的现实生产力,直接创造效益。据统计,神华技术研发投入产出比约 1:20。近 3 年,技术创新每年为神华创造的直接经济效益平均超过 100 亿元。

“神东现代化矿区建设与生产技术”首创高效安全开采技术,建成世界上唯一的千万吨级矿井(群),生产效率世界领先。该技术应用和推广近 3 年创造直接经济效益达 163 亿元。“采掘关键装备本土化技术研究”实现了液压支架的国产化,打破国外制造商在高端采掘设备上近 30 年的垄断地位。仅此一项,3 年节省设备投资 66 亿元。“神华煤安全高效燃烧技术”研究成果的应用为国内 8000 万 kW 机组燃用神华煤创造了技术可行性,仅 2005 年至 2008 年 3 年新增神华煤用量 1.79 亿 t,新增效益 138.5 亿元,使神华煤成为国内外最重要的动力煤种之一。“朔黄重载铁路建设与运营技术”解决了在煤矿采空区和滨海盐渍土上建设重载铁路等技术难题,近 3 年为神华创造直接经济效益已达 108 亿元。“黄骅港航道淤积防治技术”首创并成功解决具有世界级难度的淤泥粉砂质港—

黄骅港航道淤积问题,该技术带来直接经济效益 19 亿元。

神华技术创新不仅为自身的持续发展提供了可靠支撑,同时也履行了神华作为大型央企的社会责任。例如,“神华矿区资源与环境协调开采技术研究”涉及神东、万利、金烽、准能、乌达、包头 6 个矿区,研究内容涵盖矿区水资源保护性开采与综合利用、水土保持与生态重建、地下煤火预测与防治等技术。通过该项目的实施,神华主要矿区实现了资源开发与生态保护协调发展,为当地经济增长和环境保护做出了双重贡献。再如,“神华节水发电技术研究”包含的“低温多效海水淡化技术研究”成果应用后,实现了电厂淡水“零消耗”;“高寒地区直接空冷技术研究”使 600MW 机组每年节约用水 300 多万 m³;“海水冷却塔研究”有效解决了沿海电厂温排水对海洋环境的影响问题。

神华的技术创新不仅为自身带来显著的经济效益,还推动上下游企业、整个创新网络、相关产业的技术创新和绩效提升。技术创新的真正意义和实际价值,不在于创新本身,而在于这种创新知识的扩散。神华所聚合的创新网络创造的新知识、新技术和相关信息,不仅能够有效地在网络成员内部扩散,而且通过横向(同行竞争企业)、纵向(上下游企业)的链接使信息、技术、知识等资源在产业中进行流动和优化配置。这种有机整体包含 3 层:创新企业、基础企业、支撑网络,3 个层次不是相互独立的,而是基于商品交易、产业关联和知识共享等紧密联系在一起的。任何一个层次的情况改变都对其它层产生作用,各层网络结构中的诸要素的高度耦合在增加自身收益的同时,也可以获得各子层次乃至整个创新网络系统的改善和提高。例如,神东矿区高产高效模式和安全生产模式在全国的推广,采掘装备本土化研究以及“首台业绩”问题的解决,都极大地提升了我国煤炭行业的整体竞争力和经济效益,引领了相关行业的技术创新。

6 结论

回顾发展历程,神华通过技术创新不仅实现了规模扩张,而且在核心产业形成突出的技术优势,主要技术经济指标国内领先,世界先进,同时还取得一大批重要科技成果,在部分技术领域实现了历史性突破,从而使神华逐渐成长为引领能源技术领

域和国家产业发展方向的“风向标”。神华根据自身的情况,创造性地提出并构建了基于市场作用下的以整合社会科技资源为主的技术创新模式。实践表明,这种技术创新模式对于自身研发力量弱,而产业跨度大,技术需求多的大型基础能源企业十分有效,可以在牢牢掌握技术创新关键环节和技术创新核心技术的基础上,最大程度地调动和整合社会科技资源,达到科研投入产出的最大化,为企业突破发展瓶颈提供了新的技术创新模式借鉴。

神华基于资源整合的技术创新模式在发挥企业

自主创新优势的同时跨越企业边界,通过对企业内外部资源的轮式辐射、链式集成、群式聚合的整合过程,形成长期、稳定、互惠的创新网络,使内部能力和外部资源发挥协调作用,完成知识流动和资源活化的动态过程,达到提高企业自主技术创新能力和保持持续竞争优势的最终目地。

作者简介: 凌文 (1963-), 博士、教授。中国神华能源股份有限公司总裁, 中国人民大学、哈尔滨工业大学、中国矿业大学、人民银行研究生部等高校及科研机构兼职教授。

A Study on Shenhua's Resource-integration-based Technological Innovation Model

Ling Wen

(China Shenhua Energy Co., Ltd, Beijing, 100011, China)

Abstract: The enterprise is the main body of technological innovation. Shenhua's driving force for technological innovation resides in the grasp of industrial development trend and the needs for promoting the core competitiveness. Shenhua's realization process of technological innovation is not only the results of internal resources, but also the results of absorbing and using external resources. Shenhua's resource integration based model of technological innovation is characterized by a technological innovation network formed by radiation, chain-typed integration and group aggregation. In the integration of internal and external resources and under the coordination of the management system, direct and indirect economic benefits are enhanced. Shenhua's resource integration based model of technological innovation provides a strong guarantee for the enterprise's maintaining of competitive advantage.

Key words: resource integration, technological innovation, wheeled radiation, chain integration, group-type aggregation

(收稿日期: 2009-3-26 责任编辑: 杨静)

科技动态

神华推广应用“加长工作面高强度开采技术”效益显著

“加长工作面高强度开采技术”项目成功实现了工作面长度由 240 米增加到 300 米至 400 米,由此减少了割煤循环次数、提高了工作面的生产效率,减少了留设煤柱、提高了回采资源回收率,降低了巷道掘进量、减少了搬家倒面次数。据实际测算,加长工作面与 240 米相比:采高 5~5.3 米工作面平均月产量提高 6 万吨,万吨掘进率降低 3.2 米,年减少搬家倒面 0.24 次;采高 3.2~3.5 米工作面平均月产量提高 2.6 万吨,万吨掘进率降低 5.5 米,年减少搬家倒面 1.5 次。

目前,“加长工作面高强度开采技术”已经在中国神华股份公司神东、万利和金峰分公司全面推广应用。据统计,2006 年推广应用 15 个加长工作面,由于生产效率的提高,累计增加产量 426 万吨,2007 推广应用了 26 个工作面,累计增加产量 610 万吨,2008 年推广应用 43 个工作面,累计增加产量 963 万吨。3 年共计增加产量 1999 万吨,按平均吨煤销售价 400 元计,增加收入 79.96 亿元。

神华集团节能减排的特点及应把握的原则

顾大钊

(神华集团有限责任公司科技发展部, 北京, 100011)

摘要: 分析了神华集团节能减排工作取得的进展、特点及存在的主要问题,从进一步提高对节能减排重要性的认识,加快节约型、环保型产业体系建设,建立完善节能减排管理、统计监测、技术服务3个体系,以及责任评价考核激励、节能减排评估审查、投入保障3个机制建设,加大节能减排资金投入,加快节能减排重点工程和科研项目的实施,强化基础管理和培训,整体推进节能减排工作方面指出了节能减排工作应把握的原则。

关键词: 节能减排 政策要求 体制机制 科技创新 工程实施

中图分类号: TK01+8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0008-05

节约资源、保护环境是我国的一项基本国策。党的十七大报告明确指出,必须把建设资源节约型、环境友好型社会放在工业化、现代化发展战略的突出位置,落实到每个单位、每个家庭;基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式。中央经济工作会议指出,2009年要把加快发展方式转变和结构调整作为保增长的主攻方向,要全面加强节能、节水、节地、节材和资源综合利用工作,突出抓好节能减排、生态环境保护重点工程建设。国资委要求中央企业要成为节能减排的表率。神华集团作为中央直管的国有重要骨干中央企业,正确把握节能减排工作的规律及特点,全面落实国家关于节能减排的一系列政策要求,切实搞好节能减排工作,是神华集团履行中央企业政治责任、经济责任和社会责任的重要内容,也是推进神华集团科学发展和“五年左右再造一个神华,实现经济总量翻番”宏伟目标的早日实现的有效切入点和重要抓手。

1 节能减排工作的特点及取得进展

1.1 神华节能减排工作的特点

作为产运销一条龙,煤、电、油、运一体化经营的综合性能源公司,十几年来,神华集团依靠其独创的“神华模式”,实现了超常规、跨越式发展。在新的历史阶段,神华的持续健康发展面临新的机遇和挑战。神华集团的节能减排工作具有以下特点。

(1)煤电油运一体化开发、产运销一条龙经营的

模式,为发展循环经济,搞好节能减排工作奠定了重要基础。神华集团实施的大集团战略、煤电联营、煤电油运链条式发展等模式成为煤炭行业经济结构调整、产业链条延伸、发展循环经济和实现可持续发展的重要典范;对进一步发挥产业链完整的协同效益,搞好节能减排工作具有重要意义。同时,也为进一步搞好节能减排工作提出了更高要求。

(2)所运营的煤电油运主业行业跨度大、技术含量高、技术需求大。煤炭、电力、运输(铁路和港口)、煤制油(煤化工)分别对应了国民经济所属的四大行业,跨度大、领域多。煤电油运均是国家能源保障的基础性行业,门槛高、投资大,尤其对技术创新的需求大。如为保障国家能源安全、实现煤炭清洁利用、促进神华快速发展,需开发具有自主知识产权的煤直接液化工艺技术;在生态环境脆弱和水资源匮乏的“三西”(山西、陕西和内蒙古西部)及华北地区建设大型环保燃煤电站,需研究开发电站锅炉的安全清洁高效燃烧和节水发电技术等。这就要求神华集团的节能减排的目标,必须紧紧依靠科技创新来实现。

(3)所运营的煤、电、油产业都是高耗能、高排放产业。如神东电力公司装机规模从2005年的7.7万kW增长到2007年的74.4万kW,增加866%;二氧化硫排放总量由2005年的2600t增至2007年的5218t。按照发展规划到“十一五”末装机容量将达214万kW,二氧化硫排放总量将持续增加,已成为集团公司完成“十一五”减排任务的难点

和关键。目前从事的煤制油工程是国家能源替代战略的重要组成部分,是全世界瞩目的伟大事业,但在节能减排方面也面临全新的挑战,具有显著的特殊性和创新性。

(4)矿区循环经济发展还有待进一步提高。尽管神华集团循环经济建设取得了重要进展,但煤矸石废弃物低热值燃料发电,煤矸石及粉煤灰制砖等废弃物综合利用受政策影响大,部分矿区煤矸石、矿井水、粉煤灰、煤层气等的综合利用和循环利用率较低,煤建材等产业还未形成经济规模,矿区循环经济建设与环境协调发展方面有待加强。

(5)矿井煤炭资源回收率有待进一步提高。2007年,神华集团煤炭平均采区回采率为 78.4%(包括露天矿),2008 年约为 80%,远高于全国平均水平(国土资源部、国家发改委共同组织的 2005 年全国煤炭资源回采率专项检查数据,2004 年全国煤矿平均采区回采率为 64%)。但由于神华集团所属矿区厚煤层和薄煤层比例大,如神东矿区厚度在 0.80~1.35m 煤层储量占总储量的 11.5%;3.51~6.0m 煤层储量占总储量的 33.35%;大于 6m 的煤层储量占总储量的 31.27%,进一步提高煤炭资源回收率任务繁重。

1.2 神华节能减排工作取得的进展

(1)节能减排管理得到加强。集团公司成立了节能减排工作领导小组;设置了节能减排专职岗位,配备了管理人员;召开了节能减排工作电视电话会议,部署了节能减排工作;制定下发了《关于加强神华集团公司节能工作的通知》、《神华集团公司节能减排工作管理暂行办法》、《神华集团公司节能减排专项管理暂行办法》等规章制度,建立了节能减排指标报送制度。各子(分)公司都成立了节能减排工作领导小组,配备了节能减排管理人员,制定了管理制度,不断推进节能减排工作。

(2)强化了节能减排责任制的落实。集团公司建立了节能减排基础数据,分解、核定了“十一五”期间各子(分)公司节能减排考核指标。按照建设“五型企业”的要求,将节能减排考核指标作为各子(分)公司领导班子经营业绩考核内容,建立了责任制。各子(分)公司将节能减排考核指标和责任进行了分解落实。

(3)节能减排技术改造和科技创新稳步推进。2008 年全集团批复节能减排专项 70 项,投入资金 15.9 亿元,专项用于有关节能减排的重大工艺、设

备、技术的改造。国华电力分公司和原乌达矿业公司关停 9 台共计 1014MW 的小火电机组,启动了 CO₂ 捕集和处理技术方案及示范项目、亚临界机组提升经济性、机车信息监控系统开发,以及节能操控技术等重点节能减排科研项目。准格尔能源公司采用国际最先进的抛掷爆破—吊斗铲倒堆露天采矿工艺,比原单斗—卡车采矿工艺节约能耗成本 10.7 元/m³。煤制油公司在煤直接液化示范工程建设过程中,先期工程设计环保设施投资 64700 万元,采用先进的污水处理技术,实现全厂污水零排放。

(4)节能减排技术水平得到提高。2008 年股份公司推广应用加长共计 43 个,累计多出煤 963 万 t,增加收入 38.5 亿元,增加经济效益 11.6 亿元。国华电力分公司通过推广应用电厂锅炉等离子点火技术,仅在试运行期间就节省燃油 4 万多吨。准格尔能源公司通过选煤厂粉尘综合治理项目的实施,使选煤厂原煤系统粉尘浓度由最高时的 2660mg/m³ 降低到 20mg/m³ 以下,产品煤系统岗位粉尘浓度由 200mg/m³ 降低到 10mg/m³ 以下。

(5)能源消耗水平显著下降。2008 年全集团煤炭产业万元增加值综合能耗为 0.88t 标煤,比 2007 年下降 5.3%;国华电力公司供电煤耗继续保持 325g/kWh 的国内领先水平。

(6)主要污染物排放显著下降。全集团二氧化硫排放总量比 2007 年下降 9.5%,COD 排放总量下降 8.7%。

1.3 当前节能减排工作存在的主要问题

与国内外先进企业相比,神华集团的节能减排工作才刚刚起步。完成国家发改委、国资委对集团公司的刚性约束考核指标,任务十分艰巨。

一是部分单位、部分领导对节能减排重要性的认识有待进一步提高;

二是部分单位节能减排管理体系、统计体系、监测体系、考核体系尚未完全建立;

三是部分单位节能减排队伍建设、能耗和污染物排放计量、统计等基础工作严重滞后,管理工作亟待加强;

四是集团所属 9 家企业与国家发改委签订了“十一五”节能目标责任,其中宁煤公司、国华定州发电公司、国华徐州发电公司 3 家企业未完成 2007 年度的考核指标,占 17 家“未完成”中央企业的 18%。部分单位完成政府主管部门下达的节能减排考核指

标任务艰巨。

2 节能减排工作应把握的原则

要以科学发展观统领节能减排工作,进一步提高认识,加快节约型、环保型产业体系建设,抓好建立完善节能减排管理、统计监测、技术服务 3 个体系以及责任评价考核激励、节能减排评估审查、投入保障 3 个机制建设;加大节能减排资金投入,加快节能减排重点工程和科研项目的实施,强化基础管理和培训,整体推进节能减排工作。

2.1 进一步提高对节能减排工作重要性的认识

全面落实节能减排的基本国策,是科学发展观的题中应有之义。国内外经济社会发展的经验教训证明,靠过度消耗资源和牺牲环境支撑经济增长,将难以持久。我国经济社会进一步发展受到资源、能源、环境等瓶颈的制约。加强节能减排工作,利用节能减排的倒逼机制,能够有效促进产业结构调整,推进科技创新,逐步使我国经济实现从要素驱动型增长向创新驱动型增长的重大转变,构建“低投入、低消耗、低排放、高效率”节约型的经济增长方式,实现科学发展观提出的,“在节约资源、保护环境的前提下实现经济较快发展,促进人与自然和谐相处,提高人民生活水平 and 生活质量”的目标。正是基于上述认识,神华集团正在将“五型企业”建设作为贯彻落实科学发展观的重要举措之一,加紧推进。

节能减排是转变经济发展方式的重要途径。各种统计数据显示,中国综合能源利用效率约为 33%,比发达国家低 10 个百分点。单位产值能耗高出世界平均水平 2.4 倍,是德国的 4.97 倍,日本的 4.43 倍,美国的 2.1 倍,印度的 1.65 倍。这种状况与经济结构不合理、增长方式粗放直接相关。不加快调整结构、转变增长方式,资源支撑不住,环境容纳不下,社会承受不起,经济发展难以为继。节能减排是党中央站在我国经济社会发展全局、从人民群众根本利益出发作出的重大决策,是调整经济结构、转变增长方式的突破口和重要抓手。

节能减排是提高我国综合竞争力的重大举措。全面贯彻落实节能减排的基本国策,对于促进建设创新型国家与建设节约型社会、环境友好型社会的紧密结合,全面推进节能减排科技创新,攻克可再生能源与非化石能源技术难关,提高我国能源保障能力;突破当前节能减排的重大技术瓶颈,开辟信息、

纳米材料、分子生物等具有低碳经济特征的新兴产业群,发展现代产业体系,推进信息化与工业化融合,提升相关产业整体技术水平和发展后劲,增强综合国力具有重要的现实意义。

搞好节能减排工作是党中央、国务院对中央企业的基本要求。2008 年 4 月 1 日起实施的《节约能源法》从法律高度确立了刚性化的节能管理问责制、固定资产投资项目节能评估、审查和节能表彰奖励等制度。国资委将出台节能减排等单项奖励办法。国家的一系列政策都要求,中央企业必须首先肩负起节能减排的社会责任。神华集团作为国资委管理的节能减排重点中央企业,按时保质保量完成国家发改委和国资委下达的节能减排考核指标,是国家对神华集团的基本要求。

搞好节能减排工作是神华集团实现又好又快发展的必由之路。自主创新、节能减排、信息化建设是新型工业化道路的显著特点,是实现企业好字优先、科学发展的重要途径,是增强企业竞争力的关键。在新的历史阶段,神华的持续健康发展面临新的机遇和挑战。从企业内部看,神华核心生产矿区——神东矿区煤炭资源储量随着高强度开采逐年减少,获取资源的成本不断上升,煤炭自主运输和港口吞吐能力逐渐趋于饱和,电源点资源争取越发困难。从外部情况看,“神华模式”正被部分大型企业集团效仿,神华原有的市场和成本优势逐渐减弱。面对新的形势,惟有全面落实国家对中央企业实现科学发展的一系列政策要求发挥神华自身的优势,大力开展节能和环保型企业创建工作,以此带动企业改革、结构调整、技术创新和加强管理,才能够不断提高能源利用效率和环保水平,不断提高企业的核心竞争力,把神华建设成为国际一流的“资源节约、和谐发展”型的“百年老店”。

2.2 正确把握国家对节能减排的政策要求

党的十七大对建设资源节约型、环境友好型社会作出了全面部署。党的十六届五中全会提出把节约资源作为基本国策,“十一五”规划《纲要》提出了“十一五”期间单位 GDP 能耗降低 20%,主要污染物排放总量减少 10%的约束性指标。国务院印发的《节能减排综合性工作方案》提出了 45 条具体工作安排,要求“要把节能减排任务完成情况作为检验科学发展观是否落实的重要标准,作为检验经济发展是否好的重要标准,真正把节能减排作为硬任务,使经

济增长建立在节约能源资源和保护环境的基础上”。国家发改委规定从 2007 年 1 月 1 日起,所有固定资产投资项,必须通过节能评估和审查后,才能上报审批和核准;国资委新修订的《中央企业负责人经营业绩考核暂行办法》,已经把节能减排指标纳入企业经营业绩考核体系。这些都为我们做好节能减排工作、实现科学发展指明了方向。

进一步明确国家对神华节能减排工作的具体要求。国家发改委与神华集团签订的“十一五节能目标,要求神华集团所属国华定洲发电公司、准格尔能源公司等 8 家企业至 2010 年底,实现节能 76.37 万 t 标准煤。

国资委给神华集团下达的“十一五”节能减排目标:要求 8 户重点企业节能 76.37 万 t 标煤。井工矿薄煤层采区回采率不低于 85%,中厚煤层采区回采率不低于 80%,厚煤层采区回采率不低于 75%,露天矿资源回采率不低于 95%。国华电力公司供电煤耗比 2005 年下降 5g/kWh,达到 321g/kWh,处于国内领先水平,发电水耗 1kg/kWh,二氧化硫排放量比 2005 年下降 8.78%,减少 7697t。铁路万吨公里能耗、港口万吨吞吐量能耗分别比 2005 年下降 15%,港口压舱水复用率 50%。

2.3 积极发展节能环保型产业

发展节能环保型产业,是搞好节能减排的根本。①继续发挥自身煤炭资源产运销优势,建设坑口、路口、港口大容量、大参数、节能环保型电站,实现煤电联营,建设神华绿色煤电。②积极发展风力发电等绿色能源。贯彻落实国家可再生能源的发展方针,积极开发以风能为主的可再生能源发电。③积极推进煤制油、煤化工产业的发展。搞好拥有自主知识产权的煤直接液化工程建设,开创煤炭绿色清洁转化利用之路;同步推进煤间接液化和以及包头、宁东等煤制烯烃工程的建设。要在生产建设上,要优先考虑应用国际、国内最先进的节能环保技术成果、工艺装备;在经营管理上,要把节能和减排指标作为重要控制、考核指标,并通过政策和经济杠杆进行有效引导,推进节约型、环保型产业体系建设。

2.4 抓好节能减排 3 个体系和 3 个机制建设,推进节能减排管理科学化

3 个体系建设:管理体系建设。①推进有条件的节能减排重点企业,建立节能减排工作机构;②各子(分)公司必须设置节能和减排工作管理岗位,配齐

工作人员;③各子(分)公司要尽快建立健全 3 级节能减排组织体系;④要加强节能减排人才的培养和引进。

统计监测体系建设。以《国务院批转节能减排统计监测及考核实施方案和办法》为指导,抓好神东、准能矿区节能减排统计监测信息系统建设试点工作,推进集团公司监测网络体系建立完善,夯实能源消耗及污染物排放的定额、计量、统计等基础工作。

技术服务体系建设。以中机电公司现有技术力量为基础,引进充实相关技术人员,建立完善以节能减排技术研究、咨询服务、能源审计、合同能源管理(EMC)等为主的技术服务机构。

3 个机制建设:节能减排考核和激励约束机制建设。以“五型企业”考核为切入点,进一步完善节能减排激励约束机制,加大考核和奖惩力度,逐步建立问责制和一票否决制,形成“责任层层落实、压力层层传递”的工作机制。

节能减排评估审查机制建设。按照国家关于节能评估和环评的政策要求,建立完善新建、改扩建、技改项目节能减排的评估审查机制,加强对新建、改扩建、技改项目节能减排的评估审查,从源头上控制高耗能高排放项目。

节能减排投入保障机制建设。根据国家依据节能量给予节能奖励等一系列节能减排资金支持、财税优惠等政策,研究制定节能减排资金投入支持政策,建立投入保障机制,为节能减排工作提供物质保障。

要建立完善节能减排监测、统计、考核、奖惩等管理制度,建立健全减排计量、能源消费统计和能源利用状况分析制度,要与先进企业对标,建立对标管理系统,积极实施各生产工序、运营、管理环节和重要用能设备的定额管理,推进精细化管理。

及时向国资委、国家发改委及地方政府节能减排主管部门汇报沟通,争取他们的理解和支持,充分运用掌握国家节能减排的支持政策,为企业健康发展创造和谐的外部环境。

2.5 加大节能减排资金投入,搞好节能减排重点工程的实施

要坚持突出重点、典型示范、注重实效、整体推进的原则,按照《节能减排专项管理暂行办法》,抓好节能减排专项计划的制定和实施的管理,推进节能减排重点工程的实施。①提高煤炭回采率工程,要

优化煤炭生产系统和开采技术方案,推广应用加长工作面长度等科技成果,强化煤炭回采率的管理。②提高能源利用效率工程,各单位要因地制宜地推广应用高效节能装备和工艺技术,积极开展变频技术改造,不断降低能源消耗。③加快实施水资源节约利用和 COD 减排工程。坚持开源与节流并重,统筹生活、生产和生态用水,建设节水型企业。要搞好新污水处理厂的建设和在用污水处理厂的改造,提高污水处理能力、处理精度和中水复用率,有效控制 COD 排放。④加快实施二氧化硫和烟尘、粉尘减排工程。“十一五”期间,集团公司所有现役燃煤火电机组要完成脱硫改造,脱硫效率达到 90% 以上。要搞好小火电机组关停拆除,淘汰落后产能。要研究制定切实可行的煤火治理技术方案,搞好矿区煤火自燃灾害防治工作。⑤提高煤矸石、粉煤灰、焦炉煤气等废弃物的综合利用率工程。煤炭企业要进一步做好煤矸石、粉煤灰、煤泥以及劣质煤的综合利用,因地制宜地发展瓦斯发电技术;煤化工企业要抓好焦炉煤气发电和余热余能利用工程的实施。⑥节能监测统计信息系统建设。要认真贯彻落实《国务院批转节能减排统计监测及考核实施方案和办法》,搞好节能减排监测统计信息系统建设,逐步实现节能减排指标的实时监测与统计分析。

2.6 依靠科技创新,提高节能减排技术水平

煤炭产业要重点搞好薄煤层及 7m 以上厚煤层安全高效高回收率开采技术的开发,进一步提高煤炭回采率;积极开发矿区水资源综合利用、煤矸石零

排放和煤泥、瓦斯、煤层气、电厂粉煤灰以及产业延伸环节中废弃物的循环与综合利用等技术,为创建资源、环境、经济和谐发展的新型矿区提供技术支撑。

电力产业应加快节水环保发电技术、锅炉等离子点火、直接空冷技术、清洁煤发电技术、脱硫系统 GGH 堵灰技术、超超临界机组金属材料技术的开发应用。

运输产业要搞好高效运营技术、机车反向供电技术、提高港口淡水和压舱水利用率技术的开发应用。

煤制油(煤化工)产业要加强废弃物零排放和资源化利用技术的开发应用,搞好“二氧化碳捕集及处理方案研究”科技创新项目的实施。

2.7 加强宣传教育,推动全员节能减排行动

要认真落实国家 17 个部委关于开展节能减排全民行动的意见,广泛宣传节能减排的重要性和政策法规,增强员工的资源忧患意识、节约意识、环保意识和社会责任感,营造“节能减排,从我做起”的良好氛围,使节能减排工作真正落实到每个单位、每个家庭。要抓好节能减排政策法规、专项管理、统计方法及报表编制等为主要内容的节能减排培训,不断提高节能减排管理人员的知识水平和综合素质。

作者简介: 顾大钊(1958-),工学博士,教授,神华集团有限责任公司科技发展部总经理,长期从事矿井建设、煤炭生产技术研究和科技管理工作,享受政府特殊津贴。

The Characteristics and Principles of Shenhua Group's Energy Saving and Emission Reduction

Gu Dazhao

(Technology Development Department of Shenhua Group, Beijing, 100011, China)

Abstract: This paper analyzes the progress, characteristics and problems in the energy saving and emission reduction of the Shenhua Group. It is proposed that the principles for the work of energy saving and emission reduction should be followed include: further improve the awareness of the importance of energy saving and emission reduction, speed up the construction of energy-saving and environment-friendly industrial system, establish and perfect sound systems of energy saving and emission reduction management, statistical monitoring and technical services, as well as the three mechanisms of responsibility evaluation and incentives, energy saving and emission reduction assessment and funding guarantee, increase the investment in energy saving and emission reduction, speed up the implementation of key projects and research programs, strengthen the basis for management and training, and push the overall work of energy saving and emission reduction.

Key words: energy saving and emission reduction, features, policy requirements, energy saving and environment-friendly industries, institutional mechanisms, technological innovation, project implementation

(收稿日期: 2009-3-19 责任编辑: 杨静)

神东矿区 1.5 ~ 2.0m 煤层自动化开采技术方案研究

杨景才¹ 王继生² 李全生¹

(1.神华集团有限责任公司, 北京 10007; 2.中国神华能源股份公司神东分公司, 陕西 神木 7193155)

摘要: 根据国内外煤矿自动化开采技术以及我国薄和中厚偏薄煤层开采技术的现状,全面阐述了实现综采工作面自动化的关键技术和途径,在对神东煤炭分公司榆家梁煤矿 44305 工作面实现综合自动化开采的方案进行研究探索、综合分析的基础上,提出了适合神东矿区 1.5~2.0m 煤层自动化开采技术方案。

关键词: 神东矿区 1.5~2.0m 煤层 自动化开采 技术方案

中图分类号: TD823.25+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0013-04

1 综合自动化采煤技术综述

1.1 国内外自动化开采技术现状

目前,国内外长壁式中厚偏薄煤层开采主要有两种技术途径:①采用刨煤机、刮板输送机和液压支架的刨煤机综采机组;②采用滚筒采煤机、刮板输送机和液压支架配套的采煤机机组。英国和美国主要采用滚筒采煤机长壁式开采和连续采煤机房柱式工艺开采薄(0.8~1.3m)和中厚偏薄煤层(1.3~1.8m)。德国、法国、俄罗斯和比利时等国广泛采用刨煤机自动化割煤,尤其是德国研制和使用刨煤机的时间最长,技术水平最高。从各国的使用情况看,两种技术各有特点与适应性。刨煤机综采工艺简单,安全(能够实现无人工作面)、块煤率高,适于开采厚度较薄、硬度较低且地质条件变化不大的煤层;滚筒式采煤机综采对煤层硬度、厚度及地质条件适应能力强。美国 JOY、德国 DBT 和 EKF 公司都开发了具有自动化功能的滚筒采煤机,但目前尚未在煤矿生产中成功使用。德国 DBT 公司开发的全自动化无人刨煤机综采工作面成套设备已投入使用。

目前,世界上滚筒采煤机自动化割煤工艺主要有以下两种:

(1)采煤机尾滚筒随动割煤。该割煤方式需要设置 1 名采煤机操作人员,只操作顶滚筒,尾滚筒根据设定自动割煤。

(2)采煤机记忆割煤。该割煤方式通过操作人员手动进行示范割煤,采煤机按照示范刀自动记忆割煤,需有操作人员跟机监护运行。

国内许多煤炭企业为提高资源回收率,延长矿井寿命、实现资源均衡开采,对薄煤层开采技术进行了一系列研究和实践。铁法煤业集团于 2000 年引进德国自动化刨煤机综采系统,装备了国内第一个薄煤层刨煤机自动化工作面,在小青煤矿成功进行了工业性试验,年产达到 120~150 万 t。

1.2 薄及中厚偏薄煤层自动化开采的意义

我国薄煤层储量所占比重较大,仅国有煤矿薄煤层储量比重就占 20%左右,地方煤矿薄煤层储量比重更大,且分布广泛,局部集中。如:山东省薄煤层储量占 41%,四川省占 54.8%,贵州省占 46%。由于 1.5m 左右煤层开采空间狭小,人员行走及作业困难、劳动强度大,掘进率高,现场管理复杂等诸多问题,造成该类煤层的开采技术一直停留在机械化程度低、回采工效低、安全难以保障、经济效益差的一个较低水平。除特殊短缺煤种外,大部分薄煤层被暂时放弃开采,薄煤层安全高效开采一直是困扰我国煤炭行业的一个技术难题。

神东矿区是我国目前探明煤炭储量最大的煤田。神东煤炭分公司 2005 年原煤产量过亿吨,2007 年综采原煤产量过亿吨。2007 年全员工效为 124t/d,是国有重点煤矿平均水平的 30 多倍。根据神东矿区煤炭资源统计,煤层厚度在 1.36~2.20m 煤层保有资源储量占总资源量的 10.76%。由于薄及中厚偏薄煤层工作面空间狭小,人员行走及作业困难,安全保障程度低,如何安全、高效、高回收率地开采 1.36~2.20m 的煤层,直接关系到神东煤炭分公司的高产高效矿井建设和可持续发展,是神华集团及神东矿

区面临的新的技术问题。自 2004 年开始,神东煤炭分公司已累计试验了 5 个自动化综采工作面,对中厚偏薄煤层自动化开采的一系列关键技术进行了研究与实践,实现了神东矿区中厚偏薄煤层的安全和高产高效生产,取得了一定的经验,对我国薄及中厚偏薄煤层的安全高效开采具有重要指导和借鉴意义。

1.3 实现综采工作面自动化的途径

要实现一个综采工作面自动化开采,首先液压支架、采煤机应具备自动化功能,其次要解决好工作面采煤机、刮板运输机和液压支架这 3 种主要设备之间工作信号数据的有效传递,具体如下:

(1)液压支架采用电液控制系统,具备跟机自动拉架、推溜功能。支架控制系统通过红外线发射、接受装置或与 J0S 通讯来获取煤机位置信息,工作面支架根据采煤机(位置、牵引方向、牵引速度等)运行信息按照程序自动完成编组拉架、成组推溜等动作;

(2)采煤机具备记忆或随动割煤功能。所有实现自动化需要的参数,如采高、机身倾斜度、卧底量、位置等关键参数可准确测定并精确控制,同时可存储、读取;采煤机、支架运行参数在工作面运输机机头实时监控,必要时对采煤机、支架行为进行干涉;

(3)液压支架与采煤机、刮板机相互之间进行通信,防止煤机割支架顶梁或刮板运输机,采煤机速度过快时压死刮板。采煤机自动割煤;采煤机切割高度能够随煤层变化而自动调整,并且根据煤层变化自动调整滚筒位置,实现自动割煤;要求采煤机具备记忆或随动割煤功能,实现自动化需要的参数,如采高、机身倾斜度、卧底量、位置等关键参数可准确测定并精确控制。

2 试验综采自动化工作面概况

2.1 工作面自然条件

试验综采自动化工作面为中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司榆家梁煤矿 44305 工作面,开采 4-3 煤层,是 4-3 煤层的首采面,位于 4-3 煤 3 条大巷南翼。西侧为正在准备的 44304 工作面,东侧为实体煤,南侧为 4-3 煤薄基岩区,上部 17m 处有 44205 和 44206 工作面采空塌陷区。煤层赋存稳定、结构简单,地层为单斜构造,断层不发育,后生裂隙发育,煤层普斯系数 $f=3\sim 4$ 。煤层直接顶为泥岩,厚度 1.5m,老顶为细砂岩,厚度 11m。直接底为 1.2m 厚的粉砂质泥岩。基岩厚度 12~38m,覆盖层厚度 85~

175m。工作面回采充水主要为 4-2 煤层的上方采空塌陷区老塘积水、4-2 煤烧变岩富水及基岩裂隙水,正常涌水量 $5\text{m}^3/\text{h}$,最大涌水量 $200\text{m}^3/\text{h}$ 。矿井为低瓦斯矿井,煤尘具爆炸危险,属于易自燃煤层。工作面长度为 300.5m,推进长度 2298m,煤层厚度 1.7~2.0m,平均 1.85m,设计采高 1.7~2.0m。煤层倾角 1 度。工作面可采储量为 157.8 万 t。工作面主要技术参数见表 1。44305 工作面综合柱状图见图 1。

2.2 工作面设备配置

表 1 44305 综采工作面技术参数表

工作面名称	工作面长度 (m)	推进长度 (m)	煤层厚度 (m)	比重 (t/m^3)	储量 (万 t)	倾角 ($^\circ$)
44305	300.5	2298	1.5~2.0	1.3	161	1

岩石名称及岩性描述	厚度	累深	柱状
黄土:灰黄色-黄褐色,上部为粉土,粘粒成份较少,柱状节理,局部夹层状钙质结核。	85.51	85.51	
细粒砂岩,灰黄色-灰白色,成份以石英为主,长石次之,分选差,次棱角状,泥质及钙质胶结,水平层理,已风化。	6.43	91.94	
砂质泥岩:灰黄色,水平层理,夹细砂岩薄层。	2.65	94.59	
粉砂岩:深灰色-灰色,见少量植物化石碎片,水平层理。	8.06	102.65	
中粒砂岩:灰白色,成份以石英为主,长石次之,含少量岩屑,分选中等,次圆状,泥质胶结,斜层理。	6.87	108.52	
粉砂岩:灰色,水平层理及微波状层理,含少量云母碎屑,见植物化石碎片,下部夹砂质泥岩薄层。	7.47	115.99	
泥岩:灰色,水平层理,含大量植物化石碎片。	0.30	116.29	
4-2 煤:褐黑色,中条带结构,半暗型,层状。	3.70	119.99	
泥岩:深灰色,泥质结构,遇水膨胀变软。	3.85	123.84	
细粒砂岩:深灰色,细粒砂质结构,主要成分石英、长石,云母次之,泥质胶结,中夹岩屑,偶见植物茎、叶化石。	10.94	134.78	
泥岩:灰黑色,芯软,固结性差。	1.46	136.24	
4-3 煤:褐黑色,中条带结构,半暗-半亮型煤,裂隙较发育。	1.93	138.17	
泥岩:深灰色,泥质结构。	1.20	139.37	
粉砂质泥岩 15m 以上。			

图 1 榆家梁煤矿 44305 工作面综合柱状图

根据 44305 工作面地质赋存条件,及建设神华第一个高产高效中厚偏薄煤层自动化工作面的目标,经过多方论证后,决定主要回采设备选用加装了一套远程控制系统的美国 JOY 公司生产的 7LS-1A 滚筒采煤机。考虑到偏薄煤层空间狭窄,有压力显现时支架可能与采煤机或运输机干涉的情况,选用了

工作阻力富余系数较大波兰塔高公司生产的 1.1/2.2 掩护式液压支架,并配套德国 Marco 公司的 PM32

电液控制系统支持自动移架功能,主要设备配置情况详见表 2。

表 2 44305 自动化综采面主要设备配置表

设备名称	生产厂家	型号	数量	主要技术参数
采煤机	JOY	7LS-1A	1台	采高范围 1.5~3.021m,生产能力 2000t/h,装机功率 1162kW,截割电机 2×480kW,牵引电机 2×90kW,泵电机 2×11kW。滚筒直径 1.5m,截深 1000mm。采用 FACEBOSS 控制,变频牵引技术,牵引速度 22/32m/min,具备自动化功能,配置随机成像及远程遥控系统。
刮板输送机	JOY	2×1000KW	1台	功率 2×1000kW,电压 3.3kV,运输能力 2000t/h,链速 1.72m/s,机头 L1000EP,机尾平行布置 L1000BP,TTTF 软启动装置,溜槽内宽 1000mm,链条直径 42mm×128/164mm。
转载机	JOY	375KW	1台	铺设长度 25.75m,运输能力 2500t/h,链速 2.18m/s,装机功率 375kW,电压 1.14kV,溜槽内宽 1350mm,链条直径 38mm×126mm,整机高度 1.6m。
破碎机	JOY	375KW	1台	破碎能力 2500t/h,装机功率 375kW,电压 1.14kV。
液压支架	波兰 TAGOR	端头支架 1.3/2.6m	9台	双柱掩护式,支护高度 1.1~2.2m,有效工作阻力 9323kN,初撑力 7140kN,有效推移行程 1.0m,支架宽度 1.75m,立柱缸径 380mm,Marco PM32 控制系统,Marco 主阀和辅助阀。
		中间架 1.1/2.2m	167台	
乳化液泵	KAMAT公司	K35055M	4台	额定流量 430L/min,调定压力 37.5MPa,电机功率 4×315kW,电压 1.14kV。
喷雾泵	KAMAT公司	K16065M	3台	额定流量 500L/min,压力 14.3MPa,电机功率 3×160kW,电压 1.14kV。
控制开关	常州联力	KJZ/9+5	1台	开关选用:KJZ/9+5 组合开关,控制乳化泵、喷雾泵、转载机、破碎机;KJZ3/6 组合开关,控制采煤机、输送机。
		KJZ3/6	1台	
胶带输送机	西北二厂		1部	运输能力 2000t/h,胶带宽度 1.2m,带速 3.5m/s,CST 软启动装置,电压 1.14kV,功率 3×375kW。

3 44305 综采工作面自动化实施方案研究

3.1 前期及调试过程中自动化工作面实施方案

经研究论证,确定前期及调试过程中自动化工作面实施方案如下:工作面采煤机记忆割煤,通过 JOY 运输顺槽控制系统(简称 JOS)检测采煤机、工作面输送机各种运行参数,并远程控制采煤机;在采煤机摇臂上安设机头采煤机左右运行方向、左右滚筒方向监控摄像头,通过机头显示器实时监测采煤机运行情况。通过运输顺槽控制器对液压支架自动化程序的各种数据进行监视,实现远程遥控支架、自动化随机拉架推溜。为保证采煤机的安全运行,设置采煤机安全闭锁装置。在机头支架控制器安设采煤机远控停止旋钮,通过液压支架与采煤机的通讯,实现紧急情况下停止采煤机的运行。

3.2 实施方案试验研究

3.2.1 采煤机记忆割煤技术试验

目前,世界采煤先进国家主要采用记忆割煤方式、采煤机尾滚筒随动方式、煤岩识别等自动割煤方式。鉴于采煤机记忆割煤方式具有采煤机能够自动重复示范刀的切割过程,保持示范刀时的行驶方向、摇臂位置,包括割三角煤的过程,在示范刀后的记忆

生产中并可根据工作面地质条件的变化进行滚筒调节等优点,经过论证,榆家梁煤矿 44305 工作面采用了采煤机记忆割煤方式。

3.2.2 恒定采高模式试验

在工作面调试过程中,榆家梁煤矿也对恒定采高自动化采煤模式进行了试验。恒定采高自动化割煤方式,是指采煤机前滚筒由采煤机司机控制,后滚筒根据输入的工作面采高和采煤机位置,并依据采煤机机身长度和倾角,由计算机控制自动化割煤的过程。

3.2.3 液压支架与采煤机联动技术试验

实现支架与采煤机联动,要做到采煤机割煤过后,支架按照设定的程序完成自动移架和自动推移刮板输送机,并在工作面两端头,支架配合采煤机实现斜切进刀工作。这就要求将采煤机的位置和运行方向等信息传输给支架计算机,由支架计算机根据这些信息控制工作面支架的自动移架。

3.2.4 液压支架与采煤机的远程遥控技术试验

(1)采煤机远程操作技术。为进一步探索优化采煤自动化的方式,确保支架自动移架时的人员安全,减小工人劳动强度,榆家梁煤矿在实践中,在实现记忆割煤的前提下,在工作面控制系统中加装一套远

端控制系统,通过光缆将干涉用的采煤机遥控器移至控制台处,将人员从工作面移至控制台处,操作人员可以根据主控制台视频监视计算机及 J05 提供的数据和图像信息对煤机实施有线远程遥控。

(2) 液压支架的远程控制技术。为实现在工作面所有支架的直接手动远程操作,在液压支架主控机上设置一个控制器,通过机头控制台处的远端摄像系统实现对支架的人工干预,保证了采煤机正常割煤。

3.3 自动化工作面实施方案研究确定

44305 工作面于 2008 年 6 月底安装完成后,先后试验了采煤机尾滚筒随动割煤、采煤机记忆割煤、采煤机记忆割煤加有线远程干预 3 种自动化采煤工艺。3 种工艺优缺点对比如下:

3.3.1 采煤机尾滚筒随动割煤工艺

该工艺必须有操作人员跟机作业,在 1.8m 采高条件下,当采煤机速度超过 6m/min 时,人员跟机操作困难,安全隐患多,劳动强度大,采煤机割煤能力

得不到充分发挥。

3.3.2 记忆割煤工艺

该工艺通过采煤机自动重复示范刀割煤,该方式下不能有效对工作面内的设备和巡视人员的安全状况进行监测,且示范刀后不能根据煤层变化自动调整采高,难以保证煤质要求。

3.3.3 记忆割煤加有线远程干预割煤工艺

该工艺通过采煤机上的摄像系统对工作面进行远程监视,主要解决了工作面内设备和人员的安全问题,并可通过远程干预实时调整采高,适应煤层变化。

经技术研讨和论证,确定在榆家梁煤矿 44305 工作面采用采煤机记忆割煤加有线远程干预自动化割煤工艺。

作者简介: 杨景才 (1952-), 教授级高级工程师, 神华集团有限责任公司总工程师, 1977 年毕业于阜新矿业学院, 长期从事煤炭企业和技术管理工作。

A Technological Plan Study on the Mining Automation of Shendong Mining Zone' s 1.5 ~ 2.0m Coal-bed

Yang Jingcai¹ Wang Jisheng² Li Quansheng¹

(1. Shenhua Group Co., Ltd, Beijing, 10007, China; 2. Shendong Branch of China Shenhua Energy Co., Ltd, Shenmu, Shaanxi 7193155, China)

Abstract: According to the status quo of domestic and international coal mining automation technology as well as China' s thin and thick coal bed mining technology, this paper described the key technology and automation means for the realization of fully mechanized coal mining on comprehensive mining face. On the basis of a comprehensive analysis towards the comprehensive automatic mining on the 44305 coal face of Shendong Branch' s Yujialiang coal mine and to achieve the research program, a technological program of the automated mining of Shendong Mining Zone' s 1.5 ~ 2.0m coal seam is proposed.

Key words: Shendong mining area; 1.5 ~ 2.0m seam; automated mining

(收稿日期: 2009-4-01 责任编辑: 杨 静)

科技动态

神东煤炭分公司推广应用“6.3 米超大采高液压支架”成绩斐然

“6.3 米超大采高液压支架研制”是 2006 年中国神华能源公司科技创新项目。该支架是目前国内外支护强度最高、采高最大的液压支架。2007 年 5 月,首套在神东煤炭分公司上湾煤矿 51202 工作面试验并获成功。该支架的应用,将综采工作面采高,由以前的 5.2 米(采用 5.5 米支架)提高到了 6.0 米,有效地提高了煤炭资源回收率。

据统计,2007 年该支架应用了两个工作面,累计多回收煤炭 154 万吨。2008 年推广应用了 5 个工作面,累计多回收煤炭 284 万吨。两年合计多回收煤炭 338 万吨,按平均吨煤销售价 400 元计,创收 13.52 亿元。

褐煤提质技术现状及我国褐煤提质技术发展趋势初探

邵俊杰

(神华国际贸易有限责任公司, 北京, 100011)

摘要: 褐煤是我国东北地区未来可利用的主要能源,但褐煤水分高,易风化自燃,发热量低,直接利用效率低,不利于长途运输,要大规模开发利用必须对其加工提质。本文介绍了我国蒙东地区褐煤资源状况,分析了国内外褐煤提质技术的发展状况,对我国褐煤提质加工的总体发展方向与趋势进行了初步探讨。

关键词: 褐煤 提质技术 发展趋势

中图分类号:TD849+.2 文献标识码:A 文章编号:1672-3880(2009)02-0017-06

1 褐煤资源

1.1 世界的褐煤资源

据测算,全世界褐煤地质储量约为4万亿t,约占全球煤炭储量的40%。褐煤资源可分为硬褐煤和软褐煤两大类,主要分布在欧洲,其次为亚洲和北美洲。硬褐煤储量最多的国家分别是美国、俄罗斯和中国。软褐煤储量最多的国家是俄罗斯,约占世界软褐煤总储量的30%,德国、澳大利亚、美国、前南斯拉夫和波兰,软褐煤储量合计约占世界软褐煤总储量的40%^[1]。

1.2 我国的褐煤资源

据第三次全国煤炭资源调查(中国煤炭地质总局,1999年),我国煤炭资源总量为5.57万亿t,保有储量10032.6亿t,已探明的褐煤保有储量为1311.42亿t,约占煤炭保有储量的13%。^[2]

煤田地质勘探结果表明,我国褐煤资源主要分布在华北地区,约占全国褐煤资源量的3/4以上,其中又以内蒙古东部地区赋存最多,煤种以中生代侏罗纪硬褐煤为主。西南地区是我国仅次于华北地区的第二大褐煤基地,其储量约占全国褐煤总储量的1/8,其中大部分分布在云南省境内,主要是新生代第三纪软褐煤。东北、中南、西北和华东各区褐煤资源量均不到全国资源褐煤资源总量的3%。我国褐煤资源分布见表1。^[1]

表1 我国褐煤资源分布

地区	华北	东北	华东	中南	西南	西北
占全国褐煤储量(%)	77.8	4.7	1.3	2.0	12.5	1.7
占本区煤炭总储量(%)	16.2	19.5	2.6	7.6	15.8	2.9

2 我国褐煤资源的利用现状及其加工提质的必要性

2.1 褐煤是我国东北地区未来可利用的主要能源

东北地区经济以重工业为主导,对能源有高度依赖性。而东北三省煤炭资源总储量仅277.21亿t,除黑龙江省煤炭资源比较丰富(煤炭资源总储量211.92亿t),产能较大外,辽宁、吉林都是煤炭调入省,整体上属于煤炭资源调入地区,供求缺口较大。与其相邻的蒙东地区煤炭资源十分丰富,煤炭资源总储量达857.87亿t,是东北地区总储量的3倍以上,绝大部分是褐煤资源,只有呼伦贝尔市伊敏河矿区的五牧场区、河东区,以及扎赉诺尔矿区的灵东矿为长焰煤。

随着国家实行振兴东北老工业基地战略的深入,东北地区能源(主要是煤炭)需求量不断增加,使得本地区煤炭供求之间的矛盾更加突出。这就为距离东北地区较近的内蒙古东部褐煤提供了巨大市场,蒙东地区的褐煤资源必将成为我国东北地区未来可利用的主要能源。

2.2 褐煤提质的必要性

褐煤是煤化程度最低的煤种,煤化程度介于泥炭和烟煤之间,含水量高,在空气中易风化;含一定量的原生腐殖酸,碳含量低,氧含量高,氢含量变化大;挥发分一般在45%~55%。

由于褐煤水分高、热值低、易风化和自燃,单位能量的运输成本高,不利于长距离输送和贮存。褐煤直接燃烧的热效率较低,且温室气体的排放量也很

大,难以大规模开发利用。此外,褐煤作为原料转化利用也受到限制,褐煤液化、干馏和气化都需要把煤中水分降至 10% 以下。褐煤若不经提质加工,将难以满足多种用户的质量要求。褐煤提质加工成为褐煤高效开发利用的关键。这里所说的褐煤提质,是指褐煤在脱水、成型和热分解等过程中,煤的组成和结构发生变化,转化成具有近似烟煤性质的提质煤。褐煤脱水提质加工后,水分显著降低,发热量大幅度提高,既可防止煤炭自燃、便于运输和贮存,又有利于发电、造气、化工等使用。

3 国内外褐煤提质技术概况

德国作为褐煤资源大国和工业强国,是现代褐煤加工技术的发源地。上世纪 70 年代后,澳大利亚、美国等褐煤生产大国的褐煤提质技术研发也非常活跃。日本作为能源缺乏的国家对廉价褐煤的利用也非常重视。近年来,随着国内煤炭价格大幅上涨,价格相对低廉的褐煤资源又重新引起能源化工行业的重视,一批新建煤化工项目纷纷改用褐煤作为原料,开发出了多种褐煤提质加工技术。国内外褐煤提质加工技术归纳起来大体可分为非蒸发脱水提质技术、成型提质技术、热解提质技术三大类。

3.1 非蒸发脱水提质技术

以高温高压蒸汽(或高温热油)干燥技术为代表的褐煤非蒸发脱水提质技术,是一种通过高温高压等条件来改变褐煤的物理和化学结构,将之转变成洁净、高效的烟煤燃料的提质方法。这种新型提质技术是将褐煤与高温高压蒸汽(或高温热油)直接接触,使水分脱出,从而使褐煤收缩变得更加致密,疏水性增强。该方法热效率及其安全性都比较高。

3.1.1 K 燃料工艺(K-Fuel Process)

美国 KFx 公司在上世纪 80 年代中期开发了 K 燃料工艺(K-Fuel Process)技术,经过 20 年的完善已进入工业应用阶段。其提质过程(见图 1)是:煤经过粉碎之后,通过传送装置送入高压釜。高压釜内压力和温度分别维持在 3.7MPa 和 238℃。在高压釜中,煤块发生破裂,将硫化物从煤中分离出来,煤中的水分也随之蒸发掉。经过高温高压处理的煤粉和蒸发出来的水蒸汽可以直接送入锅炉进行发电或供热。

类似的技术还有乌克兰的热压处理工艺:将粒度为 13~100mm 的褐煤,在压力为 2MPa 的饱和蒸

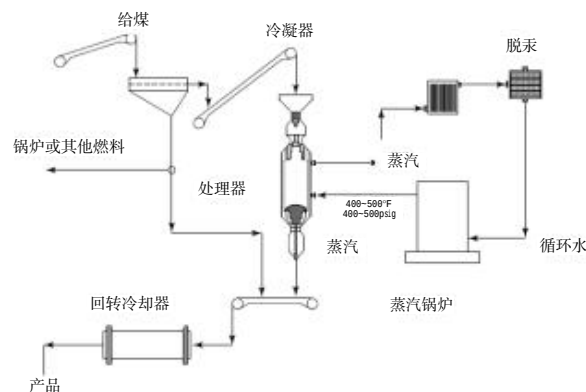


图 1 美国 K-Fuel 工艺流程

汽下处理 2~3h,使煤收缩而脱除其中水分。最终将其水分由 33%降至 15%~18%,热值则由 15.7MJ/kg 提高到 20.7MJ/kg。

3.1.2 D—K 工艺^[4]

日本电源开发公司(D)和川崎重工公司(K)从 1976 年开始研究并成功开发出了 D—K 非蒸发脱水工艺。D—K 脱水工艺可实现褐煤水分在非蒸发条件下加热,使水分以液体状态从褐煤中脱出,其煤质变化类似天然的煤化作用,其中试装置流程示意图见图 2。装置内有 4 台压力釜,可实现半连续运转,压力釜之间可实现排出蒸汽和热水的回收。

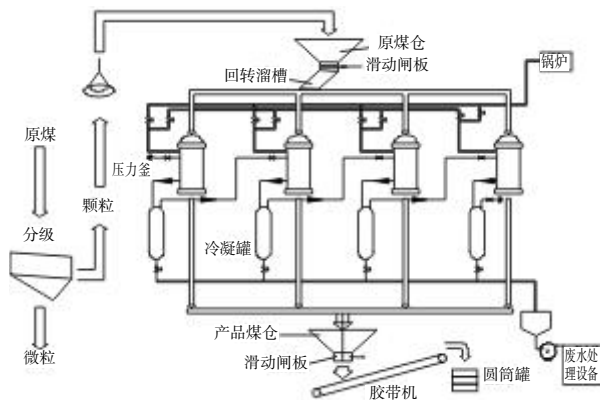


图 2 日本 D-K 工艺中试装置流程示意图

3.1.3 UBC 工艺^[3]

日本神户制钢所(Kobe Steel Group)于 1993 年开始研究 UBC(Upgrading Brown Coal)褐煤提质技术,其特点是用轻油去除褐煤中的水分。具体工艺是:将褐煤研磨成粉状后,与再生油(通常是石油裂解产生的轻油)和重油混合,形成煤浆,然后在一个蒸发器中加热煤浆,水分被蒸发,再用细颈盛水瓶从

脱水的煤浆中回收油,得到提质粉煤,最后将提质的煤压制成型(图 3)。

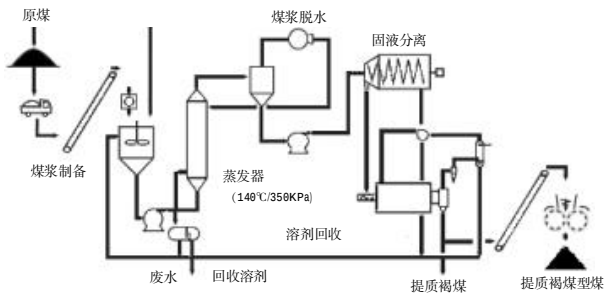


图 3 日本 UBC 工艺流程

3.2 成型提质技术

长期以来,欧洲许多盛产褐煤的国家除将褐煤用于发电和大型锅炉外,其余都是将其加工成型煤后用于工业和民用,澳大利亚亦不例外。褐煤在成型过程中,经过高压或剪切等物理作用,使其凝胶结构及孔隙系统受到了不可逆的破坏,因而从本质上改变了煤样的煤阶,煤化度也随之提高。下面介绍几种国内外典型的工艺技术。

3.2.1 冲压成型工艺^[4]

早在 1858 年,年轻褐煤无粘结剂冲压成型工艺就在德国西奥多矿井实现了工业化应用,后来又推广到澳大利亚、印度等国家。到 1988 年,德国莱茵地区共有 4 个型煤厂,年产型煤 400 万 t,其中 70% 用于民用取暖。原煤在干燥器中干燥使其水分降至 12%~18%。再经冷却、分离,并破碎至 0~6mm,再将其送入带式型煤机,在不添加粘结剂的情况下以 500~2000Bar 的压力挤压,最终生产出不同形状的类型煤。莱茵地区型煤生产一般采用管式干燥器,利用坑口电站的过热蒸汽进行间接干燥,其所采用工艺流程如图 4 所示。

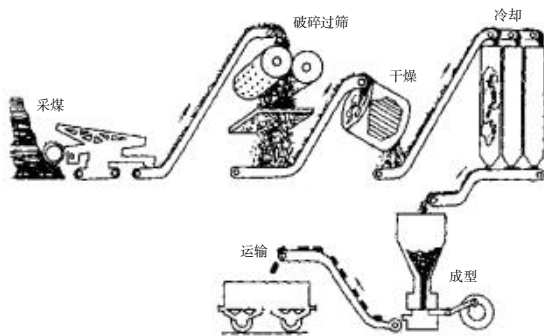


图 4 德国年轻褐煤冲压成型生产流程示意图

3.2.2 辊压成型工艺

近年来,澳大利亚怀特公司开发了用于低阶煤的无粘结剂成型 BCB 技术,其工艺是将次烟煤在气流干燥器中不完全干燥,然后将其输入一个辊压成型机压制成型煤。(图 5)

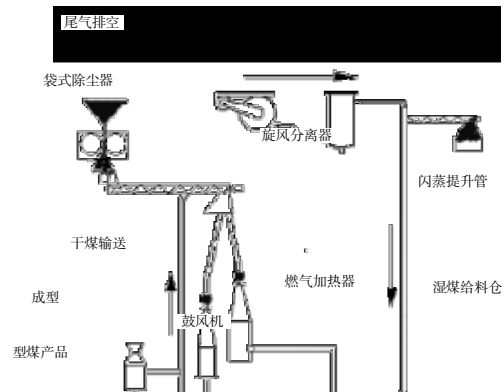


图 5 澳大利亚 BCB 工艺流程

德国泽玛格 (ZEMAG) 公司开发了采用蒸汽管式干燥机进行干燥再辊压成型的类似工艺。

2006 年,神华集团国贸公司与中国矿业大学(北京)联合开发了热压成型 HPU(hot press upgrading)-06 工艺技术。其工艺是将褐煤破碎至 0~3mm,再经过气流干燥,在热反应器中经轻度热解后,再进入成型机中辊压成型,其工艺流程如图 6 所示。

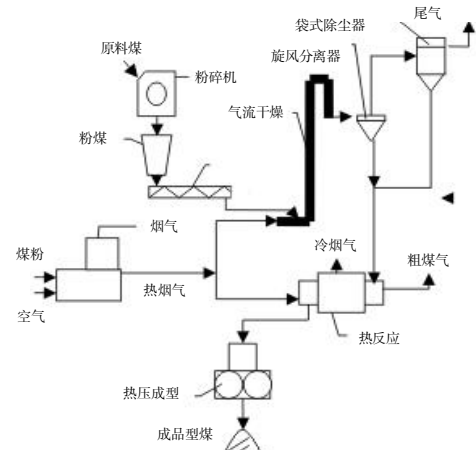


图 6 中国 HPU-06 工艺流程

3.2.3 其他物理提质技术

澳大利亚亚太煤钢公司开发的“冷干(Coldry)”工艺可以将含水量约 60% 的褐煤制成水分为 8%~14% 的类型煤,所得的类型煤发热量达到烟煤水平。冷干工艺是:先将经破碎后的褐煤在专用设备中用“剪

切”原理打破煤的碳结构,使其发生化学变化,实现煤水分离,煤炭提质。煤水分离是在 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 下进行,故称“冷干”。此后煤泥像挤面条一样地被挤出,形成蠕状的煤条。煤条自然断裂成许多棒状型煤,这些煤棒被置于钢丝网带上缓慢传送,用风扇冷却至 10°C 以下,1h 后硬化,再送入大型漏斗状干燥器,经蒸汽干燥 48h 后连续排出,得到型煤产品。

类似的技术还有澳大利亚拉筹布褐煤开发 (LLD) 公司开发的“褐煤稠化技术”,该技术利用电厂余热,采用“剪切”原理打破煤炭结构,实现脱水,并在窑中干燥褐煤。最终产品包括 19% 的煤气,19% 的水,62% 的炼焦用型煤。LLD 目前拥有一条 5t/h 的褐煤试验线。

4 热解提质技术

褐煤热解始于 20 世纪初,其目的是制取石蜡油和固体无烟燃料,二战期间,德国基于战争目的建立了大型褐煤低温干馏厂,开发了褐煤制取汽油、柴油等发动机燃料的工艺。上世纪 50 年代,随着石油、天然气的开发应用,煤的热解加工发展速度减缓甚至停顿。但在一些褐煤资源丰富的国家,并没有间断对褐煤热解技术的研发。特别是上世纪 70 年代石油危机后,人们重新重视廉价的褐煤资源的开发利用,对褐煤热解工艺进行了研究,开发了一些新工艺。国内外典型的褐煤热解工艺包括:德国的 L-R 工艺、澳大利亚的流化床快速热解工艺、中国的多段回转炉工艺、中国固体热载体新法干馏工艺等。

4.1 Lurgi-Spuelgas 低温热解工艺

德国 Lurgi GmbH 公司开发的 Lurgi-Spuelgas 低温热解工艺法是工业上已采用的典型内热式气体热载体工艺。其工艺是:褐煤或由褐煤压制成的型煤(约 $25\sim 60\text{mm}$)由上至下移动,与燃烧气逆流直接接触受热。当炉顶进料水分约 15% 时,在干燥段可脱除至 1.0% 以下,逆流而上约 250°C 的热气体则冷至 $80^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$,干燥后原料在干馏段被 $600^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ 不含氧的燃烧气加热至约 500°C ,发生热分解,热气体冷至约 250°C ,生成的半焦进入冷却段被冷气体冷却,半焦排出后再进一步用水和空气冷却,从干馏段逸出的挥发物经过冷凝、冷却等步骤,得到焦油和热解水(工艺见图 7)。

4.2 Lurgi-Ruhurgas 低温热解工艺

德国 Lurgi GmbH 公司和美国 Ruhurgas AG 公

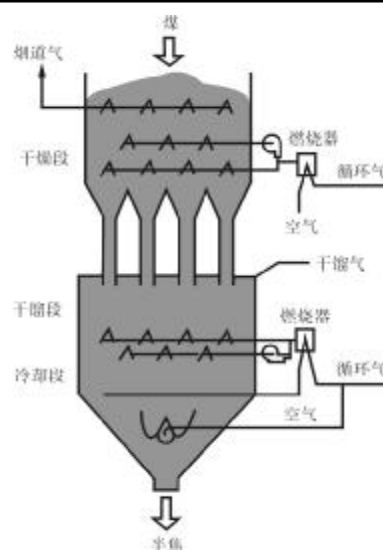


图 7 德国 Lurgi-Spuelgas 低温干馏工艺

司联合开发的 Lurgi-Ruhurgas 低温干馏工艺是固体热载体内热式传热的典型工艺。原料可为褐煤、不粘煤、弱粘煤以及油页岩等。Lurgi-Ruhurgas 工艺流程如图 8 所示。

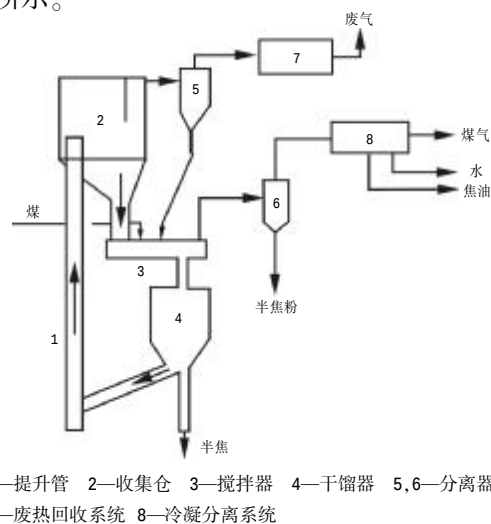


图 8 德国和美国 Lurgi-Ruhurgas 低温干馏工艺流程

首先将初步预热的小块原料煤同来自分离器的热半焦在干馏器内混合,发生热分解反应,然后落入干馏器内,停留一定时间,完成热分解,从干馏器出来的半焦进入提升管底部,由热空气提送,同时在提升管中烧除其中的残碳,使温度升高,然后进入分离器内进行气固分离,半焦再返回干馏器,如此循环。从干馏器逸出的挥发物,经除尘、冷凝、回收焦油后,得到热值较高的煤气。

4.3 Toscoal 低温热解工艺^[4]

Toscoal 煤低温热解技术是美国油页岩公司和

Rocky Flats 研究中心基于油页岩干馏工艺开发的^[4], 于 1970 年至 1976 年间在 25t/d 的中试厂先后对次烟煤、粘结性烟煤进行了试验。图 9 为 Toscoal 工艺流程图。主要流程是粉碎好的干煤在提升管内用来自瓷球加热器的热烟道气预热, 预热煤在热解转炉中和热瓷球接触, 受热并发生分解, 产生半焦和烃蒸气, 半焦在回转筛中与瓷球分离并排出, 瓷球与半焦分离后进入提升管被提升、加热, 加热器燃料为该工艺自产的煤气或燃料油, 热瓷球加热后循环使用。

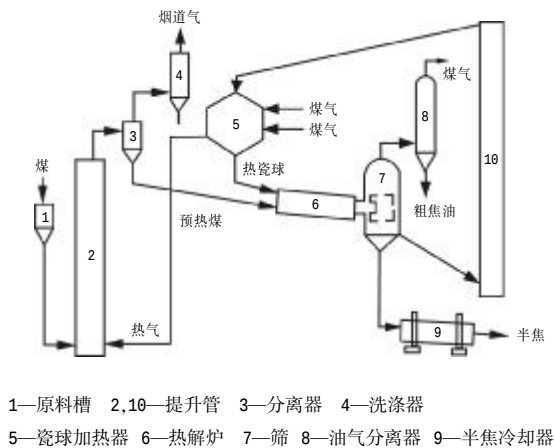


图 9 美国 Toscoal 热解工艺流程

4.4 流化床快速热解工艺^[1]

澳大利亚联邦科学与工业研究院(CSIRO)自上世纪 70 年代开始研究开发了流化床快速热解工艺, 对多种烟煤、褐煤进行了热解研究。其工艺流程见图 10。

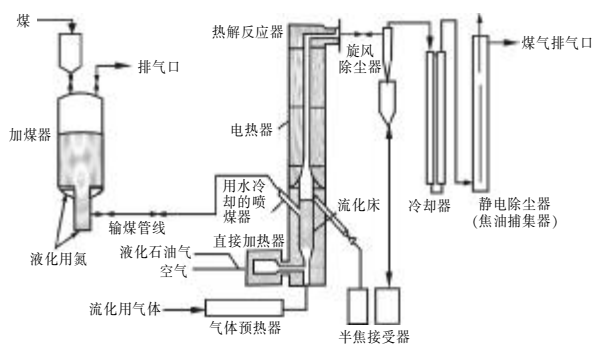


图 10 澳大利亚流化床快速热解装置

煤粉用氮气从加煤器通过管道喷入流化床热反应器, 反应器床层由 0.3~1mm 大小的砂粒组成, 液化石油气和空气燃烧形成的烟气和电加热器预热的氮气通过反应器底部的分布板进入流化床, 煤粉在热解反应器中快速热解 (停留时间小于 0.5s), 离开反

应器的气体通过温度约 350℃ 的高效旋风分离器使大量半焦分离出来, 气体则经过冷却器进入约 80℃ 的电捕焦油器, 分离出焦油并收集。我国中科院过程所研发的喷动-载流床工艺与之类似^[5]。

4.5 多段回转炉工艺^[1]

多段回转炉工艺是中国煤炭科学研究总院北京煤化工分院开发的低变质煤热解工艺, 其流程 (图 11) 是将粒度为 6~30mm 的褐煤在回转干燥器中干燥后进入外热式回转热解炉中低温热解, 所得半焦在冷却回转炉中用水冷却熄焦后得到提质半焦产品, 由热解炉排出的热解气体进一步处理利用。

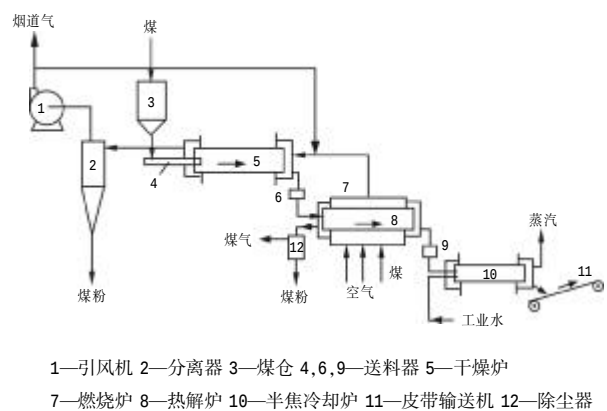


图 11 中国多段回转炉热解工艺流程

4.6 固体热载体新法干馏工艺^[6]

中国大连理工大学开发的褐煤固体热载体法干馏技术是将褐煤通过与热的载体 (热半焦) 快速混合加热使其热解 (干馏) 而得到轻质油品、煤气和半焦的技术。此技术尤其适合于褐煤提质加工。

此技术研究开始于 1981 年, 并于 1992 年在平庄建成了一套处理量 150t/d 的褐煤固体热载体干馏

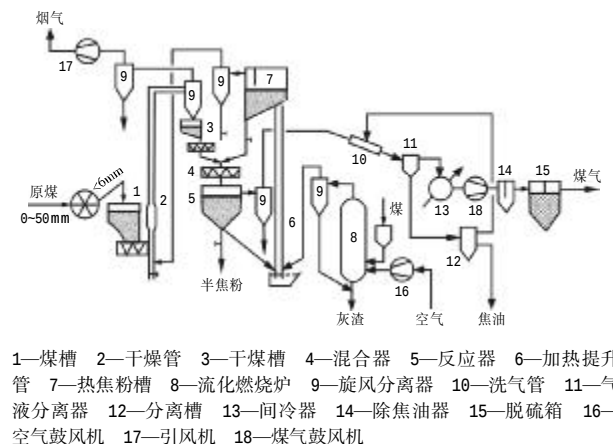


图 12 中国褐煤固体热载体新法干馏流程

工业性试验装置。其工艺流程如图 12 所示。

4.7 其他热解提质工艺

乌克兰开发的褐煤提质工艺技术是在连续的分层半焦化过程中热解褐煤。此工艺可以获得大量化工原料。工艺过程包括煤的运输、预热、管式干燥器中的脱水、分层半焦化连续热解、收集和加工化学产品,以及对褐煤热解固体剩余物的处理。预计在 2000 年至 2010 年间可以建立起年处理能力为 800~1000 万 t 的褐煤工业热解装置。

另外,国内北京柯林斯达能源技术开发公司的网带式褐煤低温干燥改性提质技术、鞍山热能研究院的褐煤低温干馏改质技术、西安热工研究院的褐煤流化床低温干馏改质技术已进入到工业应用阶段。

5 国内褐煤提质加工技术发展趋势

目前,在褐煤非蒸发脱水提质方面国内只有中科院山西煤化所、黑龙江科技学院等少数科研单位进行过基础研究。在褐煤成型提质方面,由于种种原因我国过去一直发展较为缓慢,近年来才在技术和设备方面有所突破,开始工业化应用,技术逐步成熟。

由于国内褐煤提质加工利用还处在起步阶段,

目前我国褐煤提质加工技术发展应该稳步推进,不宜操之过急,技术研发需要国内自主开发和国外引进相结合。在起步阶段可积极稳妥推进工艺简单、技术风险较小的非蒸发脱水和成型提质技术,例如 K—fuel 工艺、BBC 工艺及蒸汽干燥成型等工艺技术。

在此基础上,逐步推进资金和技术密集型的热解提质加工技术,生产半焦、煤焦油和焦炉煤气等用途广泛的多种产品,同时推进与其产品应用相关的煤化工技术发展,以提高资源利用效率。

参考文献

- [1] 戴和武,谢可玉.褐煤利用技术[M].北京:煤炭工业出版社,1999.
- [2] 尹立群.我国褐煤资源及其利用前景[J].煤炭科学技术,2004,32(8):12-14.
- [3] Toru Sugita ,et al. UBC (Upgraded Brown Coal) Process Development[J].Kobe Steel Engineering Reports,2003.
- [4] 贺永德.现代煤化工技术手册[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [5] 崔丽杰,姚建中,林伟刚.喷动—载流床中粒径对内蒙霍林河褐煤快速热解产物的影响[J].过程工程学报,2003,3(2):104-108.
- [6] 郭树才.褐煤新法干馏[J].煤化工,2000,92(3):6-8.

作者简介:邵俊杰(1963-),江苏张家港人,高级经济师,1983 年中国矿业大学毕业,长期从事煤炭企业管理工作。

The Development Status of Lignite Quality Improvement Technology and Development Trend of China's Lignite Quality Improvement Technology

Shao Junjie

(Shenhua International Trade Co., Ltd, Beijing, 100011, China)

Abstract: Lignite is the primary energy in northeast China available in the future, but it has high-moisture content, can be easily weathered and starts spontaneous combustion, produces heat low, and has the low efficiency in direct use, thus it is not convenient for long-distance transportation. It is necessary to improve its quality for large-scale development and utilization. In this paper, brown coal resources in China's east Inner Mongolia are introduced. The development of lignite quality improvement in China and abroad is analyzed, and the overall development process and trends of China's lignite quality improvement are discussed.

Key words: lignite; quality improvement; development trends

(收稿日期:2009-3-23 责任编辑:杨静)

露天采矿机在胜利一号露天矿的应用研究

王启瑞

(神华北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林浩特, 026015)

摘要: 露天采矿机作为一种新型的露天采矿设备,经国外实践证明能有效地开采薄煤层,有选择性地对煤、矸分采,减少矸石混入量,能最大限度地提高回采率。作业过程中能将钻孔、爆破、采装、破碎等环节集于一身,极大地简化了生产环节并获得良好的经济效益。本文针对胜利一号露天矿5#复杂煤层夹矸层数多、煤层薄、发热量低的特点,提出使用露天采矿机有效地进行煤层及其矸石的分采,以提高回采率、降低含矸量,简化作业流程,提高经济效益。

关键词: 露天采矿机 煤层开采 回收率 煤质 经济效益

中图分类号: TD422 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0023-03

1 前言

胜利一号露天矿位于内蒙古自治区锡林浩特市境内,是国家规划的大型煤炭基地内的特大型露天煤矿。井田范围内地质储量 19.76 亿 t,可采储量 18.90 亿 t。主要煤层有 5# 和 6# 煤层,煤层倾角均小于 5°。煤质为中低灰、低硫、低磷、中等热值的褐煤。建设规模 2000 万 t/a,分为 2 期建设,其中一期 1000 万 t/a,露天矿均衡服务年限为 95a。

胜利一号露天矿 5# 煤层采用 15m³ 液压铲—卡车(91t)—半固定破碎站(地面)的半连续工艺。6# 煤层采用单斗—卡车—坑内移动式破碎站—胶带的半连续工艺。

5# 煤层结构复杂,夹矸多、发热量低,在露天矿生产初期产量占露天矿年产量比重大。由于锡林郭勒盟煤炭资源丰富,竞争激烈,煤质的提高对于开拓市场,满足用户需求,提高煤炭产品售价具有重要意义。面对市场状况,就必须从技术上、管理上、工艺上加以突破,大胆实践新工艺,最大程度地克服煤层自身劣势,使煤质得到提高并提高回采率,增强煤炭的市场竞争力。因此,认真结合国内外情况,不断加以研究,提出更加有利的采煤方式是非常重要的。

目前露天采矿机已经在国外成功地应用于露天采矿中,它能选择性地开采薄煤层,能最大限度地提高回采率、减少矸石混入量,并将钻孔、爆破、采装、破碎等环节集于一体,极大地简化了作业环节。针对神华胜利煤田 5# 煤层结构复杂夹矸多等特点,胜利

能源有限公司将利用露天采矿机对 5# 煤层进行选采,该设备的使用将对胜利露天矿提高煤质、增加效益等方面起到一定的作用。

2 露天采矿机介绍

维特根集团的核心业务是做养路机械设备的开发和制造,1980 年发明制造了世界上第一台中置冷铣刨技术的露天采矿机。

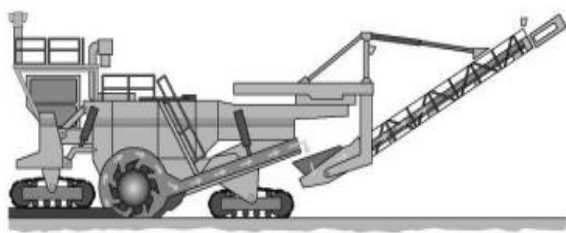
上世纪 80 年代,印度、澳大利亚等国外露天矿由于地区的特殊原因露天矿开采不能爆破,而有些矿山矿层较薄,为了回采这些特殊矿石,将筑路用的铣刨机应用于露天矿。经过长期的使用和改进形成了现在使用的露天采矿机。

目前产品已形成系列化,有 2200SM、2500SM、3700SM、4200SM 及隧道专用 2600 等多种型号,能够适合不同硬度、不同作业条件的岩性。其中维特根 2200SM 露天采矿机在切削 10MPa 物料时能力为 750t/h,切削硬度为 50MPa 物料时能力为 300t/h;最大的 4200SM 露天采矿机切削硬度为 10MPa 时能力为 3400t/h,切削硬度为 70MPa 物料时能力为 475t/h。

维特根采用了铣刨、皮带装卸的联合技术,无需进行钻孔、爆破、破碎、采装等环节,使采矿工艺简单化,实现安全高效生产;水平卧底式工作方式能够实现精确稳定开采,形成的台面和边坡轮廓控制准确,对周围环境和围岩影响最小化;最大限度实现选择性开采,降低含矸率,提高矿山储量的回采率,减少无用工作量,进而提高矿山整体经济效益。

迄今为止, 维特根露天采矿机在全球露天煤矿的应用约 50 台套, 包括波斯尼亚、澳大利亚、美国、俄罗斯和印度等国家, 其中仅印度目前就有 30 套维特根露天采矿机, 年产约 7500 万 t 煤炭。

维特根露天采矿机切削、破碎、装运一次性完成, 采矿切削滚筒水平卧底在整台机器的重心, 并且工作平稳。



露天采矿机工作原理示意图

目前世界范围内使用的露天采矿机根据其切削单元设计不同分为中置(维特根 WSM)、前置(奥钢联 VASM)和前悬臂(威猛平地王系列)。3 种设计各有优势, 其中中置切削单元的维特根 WSM 系列露天采矿机使用最多, 同等切削能力情况下机器自重最低(机器自身重量有效转换为切削转子的切削能力; 发动机通过一级皮带带动切削转子, 传动效率最高)。3 种类型机器中, 切削转子旋转方向的设计也不同, 维特根露天采矿机切削转子的切削方向, 从机器前进的方向来看自下而上, 每把刀的切削物料由薄到厚, 充分发挥机器自身重量, 下刀瞬时冲击较小; 其它两类采矿机的切削转子为自上而下, 考虑到开挖工程中不可完全避免的超硬物料切削而造成的“拱机”现象, 相比而言, 维特根露天采矿机工作时更安全稳定, 不容易出现机器倾覆的危险。

维特根露天采矿机露天开采煤炭的高效性, 能够取代传统工艺中大块破碎、一级二级甚至三级破

碎的主要原因: ①煤炭本身为近水平赋存, 维特根露天采矿机切削转子组合刀具自下向上切割, 切削方向基本上为煤炭结构的薄弱方向; 而传统破碎无论是辊式、锤式或锥式破碎, 都无法保证切削方向正好位于煤炭结构的薄弱面。②维特根露天采矿机水平逐层铣刨, 底部物料总是相对固定, 切削功率充分发挥; 而传统破碎工艺中存在着物料跳动现象, 不可避免损失功率, 产生震动、噪音和粉尘现象。

维特根露天采矿机发展于路面冷铣刨技术, 最适合对近水平赋存的物料进行选择式开采, 切削单元的位置控制最好(四支腿三点支撑, 控制容易并可靠), 进而控制切削精度和深度; 而其它无论前置或前悬臂类型的采矿机控制相对较困难、精确程度较低, 但更适于立面推进方式开采。

在工作中, 维特根露天采矿机可以在一个平整的场地工作并连续地铣削地面材料, 机器在铣削弯道时也是连续的, 通过一层接一层地铣削完成施工。

维特根露天采矿机在褐煤开采中积累了丰富的经验, 并拥有着成功工程实例。如澳大利亚的 Western Collieries Ltd 公司的 Collie 露天煤矿共 12 层 0.2-4.5m 的煤层, 使用维特根 3000SM, 提高了回采率, 灰分由 9% 降低到 6%。

3 运用露天采矿机选采 5# 煤的分析

胜利一号露天矿 5# 煤层为近水平煤层倾角小于 5° , 首采区倾角小于 3° , 煤层抗压强度 2.50~21.20MPa, 平均 10.12MPa, 适合使用露天采矿机进行开采。

经统计分析 5# 煤层首采区平均厚度 15.6m, 由 0~32 个煤分层组成, 夹矸厚度 0~8.43m, 平均 2.6m, 其中厚度 1.0m 以下的夹矸层数占 96%, 1.0m 以上夹矸层数 4%, 0.2m 以下夹矸层数占 48.98%, 均以子夹层为主。选采厚度、选采层数及选采后含矸率变化规律是选采厚度越小, 选采层数越多, 选采后含矸率越低。当选采厚度为 0.2m 时, 含矸率由选采前的 24.51% 降低到选采后的 7.74%; 选采厚度为 0.5m 时, 含矸率由选采前的 24.51% 降低到选采后的 15.87%。根据《胜利一号露天矿初步设计》5# 煤层采用液压铲工艺选采, 确定的选采厚度大于等于 0.5m 厚度的煤层, 总的选采原则为自上而下“层层剥皮”。使用此方案开采 5# 煤 $Q_{\text{net.ar}}$ (收到基低位发热量) 平均为 12.36MJ/kg (2952kcal/kg), 与 6# 煤层混合

Qnet.ar 平均为 13.98MJ/kg(3339kcal/kg)。毛煤发热量可以满足用户要求。为了减少矸石混入率,0.5m 以上选采方案仍然维持原选采方案,把 0.2~0.5m 之间的矸石应用露天采矿机进行选采。

使用露天采矿机可以把原液压铲选采工艺确定的选采厚度 0.5m 进一步降低到 0.2m,可以使含矸率由 15.87%降低到 7.74%,降低了 8.13%,当年产 1000 万 t 时多剥离夹矸 43 万 m³/a,当年产 2000 万 t 时多剥离夹矸 86 万 m³/a。选用一台 2200SM 露天采矿机可以满足生产要求。

按照现场统计资料,含矸率每降低一个百分点其发热量就可以提高 50Kcal/kg,因使用露天采矿机选采工艺可以使采出的 5# 煤含矸率降低 8.13%,发热量可提高约 406Kcal/kg,即从 2952Kcal/kg 提高到 3352Kcal/kg,达到当地最大用户上都电厂的热值要求。根据市场情况,如每提高 100Kcal/kg,吨煤售价提高 1 元,则使用露天采矿机选采工艺可以提高售价 4 元/t。5# 煤年产量在 600~800 万 t,按 600 万 t 计算,因新工艺应用将成品煤的热值提高 400Kcal/kg,每年可以增加 2400 万元收入。如果市场售价进一步增长的话,效益就更加显著了。

胜利露天矿应用露天采矿机还有以下其它优点:

(1)设计 5# 煤选采厚度为 0.5m,顶底板共损失 0.1m,5 下、6 上、6⁻¹ 选采厚度为 1.0m,顶底板共损失 0.4m 煤层,5、6# 煤回采率取 98%,5 下、6⁻¹ 煤回采率取 90%,6 上煤回采率取 80%。煤层选用液压铲选采方案时煤层顶底板共损失煤厚 0.1m,实际上损失厚度很难控制到 0.1m,而选用露天采矿机可以很精确地控制在 0.1m 以下。使用露天采矿机可以使 5 下、6 上、6⁻¹ 顶底板共损失从 0.4m 降低 0.2m,提高回采率。

(2)胜利一号露天矿的主要用户为上都电厂,用火车运输。除了上都电厂外还有锡林热电厂 2×30 万 kW 机组,用汽车运输,要求破碎到 300mm 以下,必须经过破碎站。目前的开采工艺为电铲或液压铲采装由汽车运到破碎站,破碎站破碎后由皮带运送到储煤厂,用装载机装入锡林热电厂的运输汽车,这一工艺流程的运行成本为 10 元/t,其中:采装费用 1.5 元/t、运输费用 3 元/t、破碎费用 1.2 元/t、皮带运输费用 2 元/t、储煤场装煤费用 2.3 元/t。如果使用露天采矿机直接采掘—破碎—装入锡林热电厂运输车辆,此工艺流程成本约 3.88 元/t。露天采矿机选采方案

比现有工艺流程吨煤节约 5.20 元,按锡林电厂每年需要煤炭 100 万 t,则采用露天采矿机工艺年节约 520 万元。

(3)目前露天矿道路修筑由于没有合适的物料作为磨耗层,生产中遇到雨雪天气只能停产,等到晾晒几天后才能恢复生产,不利于生产设备效率的发挥。胜利一号露天矿从拉沟后出露的地层看软弱岩层占大多数,有个别地层比较坚硬,其中 5# 煤层以上有一层 1m 左右的细砂岩平均抗压强度为 41.62MPa,5# 煤层和 6# 煤层之间有两层 1m 左右的细砂岩平均抗压强度 45.98MPa。目前没有专门的爆破设备,采用 WK-10B 电铲直接采装,既不好采装又对设备有极大的损伤。如果引进露天采矿机可以直接将这 3 层细砂岩破碎采装,可以直接铺在露天矿道路上。露天矿年生产能力为 2000 万 t 时,年推进度按 220m 计算,则每年可破碎岩石量 85.8 万 m³,按每年利用率为 50%,则有 42.9 万 m³ 岩石可以用来铺路,按照石料 35 元/m³ 的市场价格计算,考虑露天采矿机生产费用 15 元/m³,可以节约 858 万元的物料费用,而且可以大大改善运输道路的质量,最大限度地发挥设备的效率,提高露天矿抵抗气候影响能力。

(4)简化了破碎环节。5# 煤热值低,将来主要供给电厂使用,电厂用煤要求粒度一般在 100mm 以下,如采用传统工艺流程,首先初破到 300mm,然后二破到 100mm。如果采用露天采矿机工艺,通过控制采装出来的煤粒度大部分可以控制在 100mm 以下,减少破碎设备投资,而且大大简化了工艺流程,减少了运行成本。当一台 2200SM 能力不足时,需增加一台 2200-3800SM 露天采矿机即可满足 5# 煤破碎能力需求。

4 结论

胜利一号露天煤矿 5# 煤层结构复杂,常规的开采设备效果不好。采用一台 2200SM 露天采矿机,把 5# 煤选采厚度由原来的 0.5m 降低到 0.2m,这样可降低成品煤含矸率 8.15%,由此使煤炭热值提高 400Kcal/kg,直接产生较大的经济效益。此外,露天采矿机工艺还能提高煤炭的回采率,减少生产环节,降低生产成本。同时,选采出的煤中矸石还可以用于铺设露天矿道路,减少了破碎岩石的费用。

(下转第 29 页)

复杂地质条件下急斜特厚煤层巷道松动圈监测分析

张子飞¹ 柴 鑫^{2,3}

(1. 神华新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐, 830027; 2. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安, 710054;
3. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 通过对大洪沟煤矿地下巷道松动圈及钻孔窥视的联合监测,同时结合现场工程地质调查研究,综合分析了+555B₁~B₆巷道的失稳主要受局部地质因素和整体岩体结构因素的共同影响。提出顶底帮支护与巷道局部破坏后的重新支护宜强不宜弱的论点与矿压控制措施,为后续安全高效生产提供科学依据。

关键词: 采矿工程 急斜特厚煤层 松动圈监测 稳定性

中图分类号:TD823.21⁺3 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-3880(2009)02-0026-04

1 引言

神新公司大洪沟煤矿属于急倾斜煤层(倾角一般为85°~87°,平均87°,倾角变化是由西向东,由浅而深变缓,底部岩层较顶部岩层倾角陡立),采用支撑掩护支架综采放顶煤采煤方法,随着开采工作的进行,巷道稳定性成为一个急待研究的课题。特别是在+555水平的几个巷道,局部变形及冒顶、底鼓等现象明显,有局部垮塌现象,威胁工人生命安全,影响了矿山的正常生产。为了解巷道围岩的变形特点,研究巷道变形模式,为巷道支护和预报巷道围岩的破坏行为提供可靠依据,为+555及其以下水平的巷道围岩维护提供理论依据。

2 测试地段地质及开采与支护情况

2.1 地质情况

采区属于天山褶皱带前缘与准噶尔盆地之前缘凹陷,古生届至新生界地层因不断槽受地壳运动的影响和断裂破坏,构造线均为东北西南方向。乌鲁木齐矿区位于淮南煤田东南部,未二级构造带中的次级褶皱断裂带,多有短轴向斜,北协及逆冲断层组成,如:八道湾向斜,七道湾背斜,碗 m 沟逆冲断层等。大洪沟井田位于乌鲁木齐矿区东部,八道湾向斜南翼,为一单斜构造。井田煤层可采与局部可采共30层,以稳定和较稳定煤层为主。按夹矸一层以上即为复杂结构的标准,几乎全属复杂结构。夹矸厚度一般随煤层的增厚而增大。如厚达56.25m的B₃₊₆煤层,夹矸厚度达6.31m,厚1.25m的B₃₂煤层夹矸只

有0.5m。主采煤层B₁₊₂煤层位于J2X的底部,煤层最大厚度39.45m,最小厚度31.83m,平均厚度34.84m,含夹矸11层,夹矸单层厚0.1~0.4m。直接顶为泥岩;间接顶为炭质泥岩。B₃₊₆煤层位于B₁₊₂煤层北部,与B₁₊₂煤层相距53~62m,每层最大厚度52.3m,最小厚度39.85m,平均厚度49.13m。内含夹矸11~20层,夹矸总厚1~4.4m。矿体顶板围岩为煤体,质地坚硬,强度高,但节理裂隙发育,且生产过程中不断伴有强烈或轻微岩爆声响。受大的地质构造影响,局部岩体完整性较差,以块状或镶嵌结构为主,属不稳固岩体。局部构造断裂发育带及强烈蠕变带,煤岩破碎,以破裂结构或散体结构为主,属极不稳固岩体,掘进后需立即支护。

2.2 巷道变形与支护情况

巷道变形呈现整体规律,局部异常的变形情况。巷道变形总体呈现一定规律性,破坏主要出现在煤层顶板及底板端,即矿岩接触带附近,该位置大的变形集中出现在拱基线以下,如图1所示。在煤岩接触一端,变形极其明显,锚网时有破坏,而另一帮却基本完好,锚杆几乎看不出有受力变形的倾向。同时,

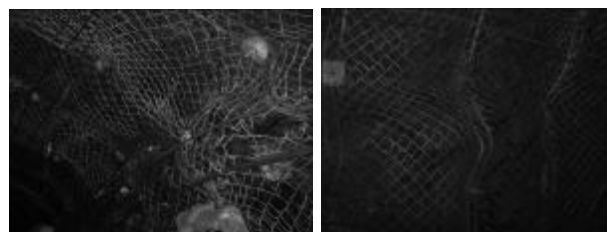


图1 拱基线以下巷道变形情况

变形主要集中在拱基线以下部位，巷道顶拱也基本能够保持完好。巷道多为新近开拓，且已进行了锚固支护，锚杆长 2 m，间排距均为 0.6 m。

3 监测断面布局

在巷道围岩内部变形研究中，松动圈测试和钻孔窥视是最常用的手段。选择了+555 水平的四个准备巷作为测试段。布置了四组共 6 个测孔，其中 B₆ 巷南帮与 B₁ 巷北帮，即煤层顶底板有一个测孔，用来观测煤层顶底板松动圈范围，其余四个测孔为巷道顶板测孔。

4 围岩内部变形监测与分析

4.1 监测仪器与工作原理

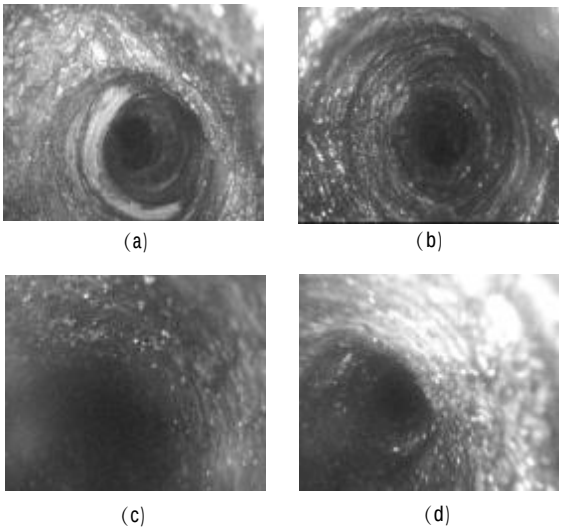
巷道的内部变形监测，就是测量巷道围岩内部裂隙发育程度以及内部岩体膨胀等变形参数。测试仪器采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RSM-SY5 智能松动圈检测仪。针对工作面顶煤和相关回采巷道特点，为配合松动圈测试仪的监测，同时使用 YS(B) 钻孔窥视仪对围岩裂隙发育程度进行直接观测。

松动圈测试仪主要是利用专用一发双收换能器在钻孔中测量岩土孔壁滑行波的波速来判断空周围岩石的破碎程度。由于声波在不同介质中传播速度的差异性，只需检测出钻孔中出现异常波速的位置即可确定岩石的破碎范围。YS(B) 钻孔窥视仪采用高清晰度探头及彩色显示设备，可分辨 1mm 的裂隙及不同岩性，与微机可直接连接，便于图像的实时显示。

4.2 测试结果与分析

简单从巷道外观来看，B₆ 巷顶板外形保持比较好，锚杆等基本很少能看到受力拉拔的状态，从监测数据来看，B₆ 巷顶孔松动圈范围比较小，仅为 1.4m 左右，孔内变形也小，裂隙发育较少。单从顶板支护来看，现有支护完全能够保持巷道的稳固。但综合巷道北帮变形等现象，在支护中建议有针对性地采取一定的不对称支护，在保证安全生产的前提下实现安全、经济、高效的支护模式。B₁ 巷整体变形较大，但变形主要集中在巷道南壁，而顶板的可见变形不大。从钻孔窥视仪中可以看到一个很明显的点，在进入测孔时，煤壁受到挤压明显，该孔打出不到 24 小时，但从图 2(a) 中可以特别清楚地看到，钻孔内挤压变形是多么的严重，这也从一个侧面反映出煤层

内应力非常大。1.5m 之后，孔壁开始变得较为平滑，测孔在 4.2m 范围内均未发现明显裂隙。B₂、B₃ 巷较 B₁、B₆ 两个煤岩接触巷，松动圈范围明显变小，测孔内变形也较小，如图 1 所示。



(a) B₁ 巷顶孔 (b) B₂ 巷顶孔 (c) B₃ 巷顶孔 (d) B₆ 巷顶孔

图 2 巷道壁内变形图

表 1 RSM-SY5 智能松动圈及钻孔窥视监测值

测孔	松动圈范围	钻孔窥视
B ₁ 巷顶孔	1.6m	测孔挤压变形严重，但未发现大的贯通导水裂隙。
B ₁ 巷北帮	1.5m	B ₁ 巷南帮外部变形较大，孔内挤压变形也相当严重，测点所处的南帮为煤层底煤岩接触帮，煤体破坏较大。
B ₂ 巷顶孔	1.4m	孔内并无大的裂隙贯通存在，只有一些细小裂隙，同时应力造成的变形也小。
B ₃ 巷顶孔	0.6m	除一些细小裂隙存在外，孔壁几乎没有说明变化，保持了孔壁的平滑。
B ₆ 巷顶孔	1.4m	孔内变形也小，裂隙发育较少。
B ₆ 巷南帮	1.0m	钻孔受挤压变形较大。

从以上数据可以看出，巷道变形呈现如下规律：帮孔松动范围相对较大，煤岩接触巷较煤层内巷道，帮的变形更为严重，松动圈范围也较大，而顶板的松动圈范围相差不大，这些特点是在多因素共同作用下形成的。

4.2.1 采动影响

采矿活动通过改变围岩应力环境和改变岩体结构性能来影响巷道的稳定性，如果围岩结构好、软弱结构面不发育，影响就小。反之，会加剧巷道的变形破坏程度。B₁ 巷属于开拓巷，采充作业造成的跑水也多于其他巷道，作业用水侵入结构面，粘土矿物遇水膨胀，使岩体中产生膨胀应力，造成围岩流变，松动

圈范围达到了 1.6m。相反, B_3 巷道受采矿活动的影响较小, 松动圈范围也仅在 0.7m 范围内。使用钻孔窥视也未发现大的导水裂隙存在, 其余巷道的松动圈范围也均小于 B_1 巷。

4.2.2 岩体结构因素

根据钻孔窥视数据可以看出, 导致煤壁变形的一个主要因素是顶底板中碳质泥岩层遇水膨胀造成底鼓等巷道变形现象, 并且虽然同属于+555 水平, 四条巷道工程地质条件并非完全一致。根据钻孔窥视数据显示, B_1 巷煤岩接触端煤壁内存在多层厚度不同的碳质泥岩, 而其余巷道煤壁中存在的碳质泥岩厚度与层数都较少, 这直接导致了 B_1 巷煤岩接触帮变形较其他巷道变形严重得多。

同时, 局部区段如 B_3 巷, 工程地质条件较好, 岩体为层状碎裂结构、层状结构, 有一定自稳能力; B_1 巷部分区段煤壁内岩体为层状碎裂结构或碎裂结构, 附近局部为散体结构, 工程地质条件极差, 自稳能力差。岩体结构上的差别导致 B_1 巷的整体围岩蠕变远大于紧邻的 B_2 、 B_3 巷, 以及受同等采矿活动影响下的 B_6 巷, 这也是 B_1 巷顶板的松动圈范围高于 1.6m 范围的原因。岩体结构上的差异是造成巷道变形在同样边帮碳质泥岩层遇水膨胀造成底鼓等巷道变形现象的情况下, 巷道破坏程度不同的另一个原因。

4.2.3 支护因素

受采动影响下锚杆支护理论, 最基本的是三大经典理论: 悬吊理论, 组合理论, 成拱理论(挤压理论)。董方庭教授提出的松动圈理论^[2]认为, 地应力与围岩相互作用会产生大小不同的围岩松动圈。松动圈扩展过程中产生的碎胀力及其所造成的有害变形是巷道支护的主要对象。对于煤巷, 1.5m 以下的中等松动圈, 围岩碎胀变形不大, 认为悬吊理论是确定锚杆支护参数较好的方法。而对于松动圈范围大于 1.5m 的 B_1 巷来说, 围岩的碎胀变形已较明显, 支护所承受的最大载荷是围岩的变形压力, 该值大于 1.5m 厚度松动圈内围岩的重量。单纯使用锚杆和组合锚杆使破裂岩块处于受压状态, 形成平衡拱是很困难的。因此对于+555 水平 4 条不同松动圈范围的巷道, 没有针对其松动圈范围采取相对应的支护手段, 也是造成 B_1 巷等松动圈范围持续扩大、巷道变形严重的重要原因。

4.2.4 巷道与主应力关系因素

但由于工程地质条件的复杂(大洪沟煤矿处于

煤带变形扭曲边缘, 受大的地质构造影响, 煤层错位、松散、破碎。强大的地质挤压变形力导致煤体内形成煤岩频繁穿插的破碎岩组), 小的断层褶皱及破碎带密布, 导致应力复杂多变, 局部异常。巷道开挖于煤岩频繁穿插的破碎岩组, 其各巷道轴线方向与局部主应力方向并非完全一致。根据收集到的资料与现场调查, 局部巷道与主应力方向近正交, 巷道变形严重; 而与最大主应力方向斜交, 巷道则相对稳定。局部区段如 B_3 巷, 松动圈检测未发现明显松动范围, 且测孔内变形极小, 监测期内几乎未发生收敛变形, 而其支护方式也仅是喷锚网; 而 B_1 巷所在的位置, 工程地质条件也无大的变化, 但巷道变形量明显增大, 属欠稳定巷道。同时, 整个巷道呈现岩体向煤体挤压, 即顶底板同时向中心挤压的特征, 是另一个导致煤岩接触壁巷道变形较其他巷道更为严重的原因。

5 矿压控制措施

(1) 对裂隙较为发育、巷道破坏严重的巷道, 在维护时要尽可能控制岩体结构破碎所造成的岩体蠕变, 维护时要使用锚网联合支护, 锚杆要中、短结合, 以改善围岩自稳能力。对破坏的巷道要立即进行维护, 以免应力重新集中, 造成松动圈的扩大。二次支护与破坏后的返修宜强不宜弱。

(2) 巷道侧帮要避免与较大软弱结构面斜交, 尽可能让新巷道的侧帮避开较大软弱结构面。作业时要尽可能防止跑水, 以免作业用水侵入结构面, 造成结构面中粘土矿物遇水膨胀, 使岩体产生膨胀应力, 导致围岩流变。

6 结论

(1) 大洪沟+555 水平 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_6 巷道总体稳定性较好。巷道变形呈现一定规律性, 巷道破坏主要出现在顶板及底板端, 即矿岩接触带附近, 大的变形集中出现在拱基线以下。其主要因素是因为顶底板中碳质泥岩层遇水膨胀造成底鼓等巷道变形现象, 同时整个巷道呈现顶底板同时向中心挤压的特征, 应加强此处岩体维护工作, 如增喷马铃, 增设金属网, 增加锚杆长度等措施, 特别是 B_1 及 B_6 巷矿岩接触带附近。而巷道靠近煤层壁变形较小, 其稳定性较好。

(2) 大洪沟地处整个煤带转折附近, 地质构造复杂, 煤层错位、松散、破碎。岩体结构因素决定了巷道

变形破坏规律。巷道受整体大的地质构造的影响,小的断层褶皱及破碎带密布,破坏与此有明显的相关关系,对小范围局部地带加强支护尤其重要。

(3) 松动圈测试和钻孔窥视仪作为巷道内部变形的监测手段,在大洪沟煤矿主体巷道有效地监测到其内部变形,裂隙发育程度等数据,并且可直观显现其顶底板内部碳质泥岩膨胀等内变因素,从而可据此有效地评价巷道的稳定状态,以为巷道变形支护提供有力的科学指导。

参考文献

[1] 张嘉凡,石平五,张慧梅.急斜煤层放顶煤开采中基本顶的溃屈破坏分析[J].西安科技大学学报,2008,28(2): 392-395).

[2] 石平五,张幼振.急倾斜煤层放顶煤开采“跨层拱”结构分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):79-82.

[3] 高召宁,石平五.急倾斜水平分段放顶煤开采岩移规律[J].西安科技学院学报,2001,21(4): 316-318.

[4] 路世豹,李晓,马建青等.金川二矿区地下巷道变形监测分析及应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):488-492.

[5] 董方庭,宋宏伟,郭志宏等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994,29(1):21-31.

[6] 邵小平,石平五,张嘉凡.亚急斜煤层采空场覆岩变形破坏数值与相似模拟[J].西安科技大学学报,2008,28(2):249-253.

作者简介: 张子飞 (1958-),高级工程师,1991年毕业于北京煤炭管理干部学院采矿工程专业,现任神华新疆能源有限责任公司董事长。

Monitoring and Analysis of Loose Zone in Steep Extra-thick Coal Seam under Complicated Geological Conditions

Zhang Zifei¹ Chai Xin^{2,3}

(1. Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd, Xingjiang, Urumchi, 830027, China; 2. School of Energy of Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Western mining and Disaster Prevention of the Ministry of Education, Shaanxi, Xi'an 710054, China)

Abstract: a comprehensive analysis of the '+555 B1 ~ B6 roadway' s instability is carried out to find that it is the combined effect caused by the local geological factors and the overall rock structure factors, through the joint monitoring to the loose zones and drilling holes in Dahonggou coal mine' s underground roadway, and field engineering geological investigation. It is proposed that the top-bottom support and re-support after the local damage of the roadway should be strong, and rock burst control measures are suggested, which provides a scientific basis for the follow-up safe and efficient production.

Key words: mining engineering, loose zone monitoring, stability

(收稿日期: 2009-3-30 责任编辑: 杨 静)

(上接第 25 页)

本文研究成果,对提高开采低热值、低售价褐煤的露天矿通过采用露天采矿机新工艺提高经济效益具有一定的参考意义。

作者简介: 王启瑞 (1965-),教授级高级工程师,1987年毕业于中国矿业大学,2007年博士研究生毕业于中国矿业大学,现任神华北电胜利能源有限公司总经理。

A Study on the Application of Open Pit Mining Machine in Shengli No.1 Open-pit Mine

Wang Qirui

(Shenhua Beidian Shengli Energy Co., Ltd, Inner Mongolia, Xilinhot 026015, China)

Abstract: The open Pit Mining Machine, as a new type of open pit mining equipment, is proved in practice abroad to be effective in thin-seam mining. It can conduct selective mining for coal and tonstein to reduce the volume of waste mixed and maximize the recovery rate. In the working process it can integrate drilling operations, blasting, mining and loading, and breaking to greatly simplify the production links and obtain good economic profit. In this paper, according to the features of Shengli No.1 open-pit mine of multi-layer tonstein, thin coal seams and low heat, the use of open pit mining machine is suggested to carry out effectively the sub-coal mining to improve the recovery rate, reduce waste volume, simplify processes and increase economic efficiency.

Key words: open pit mining machine; coal mining; recovery rate; coal quality; economic benefits

(收稿日期: 2009-4-03 责任编辑: 杨 静)

大型综采设备绿色维修的实践

王铁军 罗 宇

(中国神华神东煤炭分公司, 陕西 神木, 719315)

摘 要: 根据神东煤炭分公司维修中心多年来在大型综采设备绿色维修方面的实践,讨论了大型综采设备维修企业实施绿色维修的技术体系,指出了综采设备绿色维修的实施方法。

关键词: 绿色维修 综采设备 实践

中图分类号: TD421.8 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0030-04

自 20 世纪 80 年代以来,人们逐渐认识到必须转变对环境有害的生产和消费模式,从而形成了可持续发展的概念。可持续发展是今后世界各国各行各业应普遍遵循的发展战略,在此共识下出现了席卷全球的绿色浪潮。从采煤行业来看,大型煤炭基地的建设也必将从粗放型向集约型转变,从人力密集型向设备密集型转变,采煤设备绿色设计绿色制造已为人们所熟悉,绿色维修便成了重要的发展方向。神东煤炭分公司在 2005 年建成了全国第一个亿吨级煤炭基地,是典型的设备密集型煤炭企业,拥有国内外最为先进的井工矿开采设备,设备种类繁多,装机功率大,技术先进。为了保证生产接续,设备维修是其中重要的一环。随着科技的进步和可持续发展提出的新要求,维修已从单纯恢复原机性能、排除故障的传统维修发展为养修并重、降低能耗、保护环境、可持续发展、质量与安全并重的绿色维修。在以绿色为主题,以可持续发展和建设节约型社会为目标的历史时期,绿色维修已成为新的维修理念。神华集团下属的神东煤炭分公司维修中心自 2002 年以原总机厂为基础重新组建以来,一直致力于神东矿区井下综采设备维修工作,在绿色维修方面做出了显著的成效。

1 综采设备传统维修手段存在的问题

采煤行业设备维修量大、面广,大到巨型设备的修复,小到零部件的修补,涉及的范围相当广泛。在维修行业生产过程中有些环节,如设备的拆卸、零部件的清洗修复以及其它附加过程中,所使用的维修设备、维修场所都可能成为污染源。它通过排放废气、废水、废渣等污染着大气、水体及土壤,同时还可

产生振动、噪声、电磁辐射和光辐射等污染,危害周围的环境。传统的维修过程由于没有考虑到维修过程中所造成的环境污染、人体伤害及资源的合理利用等问题,结果造成大量的资源能源的浪费和环境污染,甚至是人体伤害,如焊接过程中主要产生弧光、电焊烟尘、金属气体、氟化氢、氮氢化合物、臭氧、一氧化碳和噪声等污染,由焊接而引起的电焊尘肺病就是其职业病之一;设备清理过程中产生的煤尘也会引起煤尘肺病。

2 综采设备绿色维修概念的提出

随着煤炭工业的发展,大型煤炭基地的建设也必将从粗放型向集约型转变,从人力密集型行业向设备密集型转变。煤炭工业的这一转变,必将带来大型采煤设备使用量的激增,相应的报废量也会有很大增长。采矿设备维修的专业化、社会化,将是采矿设备维修行业发展的必然趋势,这一趋势将促进采矿设备资源的有效利用和优化配置。为保护环境、提高资源利用率,提出了采煤绿色维修这个概念。

2.1 绿色维修的概念

绿色维修是综合考虑环境影响和资源利用效率的现代维修模式,其目标是除达到保持和恢复产品的规定状态这一物理目标外,还应满足可持续发展的目标要求,即在维修过程及产品维修后直至产品报废处理这一段时期内,最大程度地使产品保持和恢复原来的规定状态,又要使维修废弃物和有害排放物最少,即对环境的负面影响最小,且对人员(维修者和使用者)的劳动保护性好,还要使资源利用率最高。绿色维修是可持续发展战略和清洁生产模式在维修业中的具体体现,是现代维修业的可持续发

展模式。装备绿色维修的内涵是节约资源、保护环境、提高效能、保证安全。

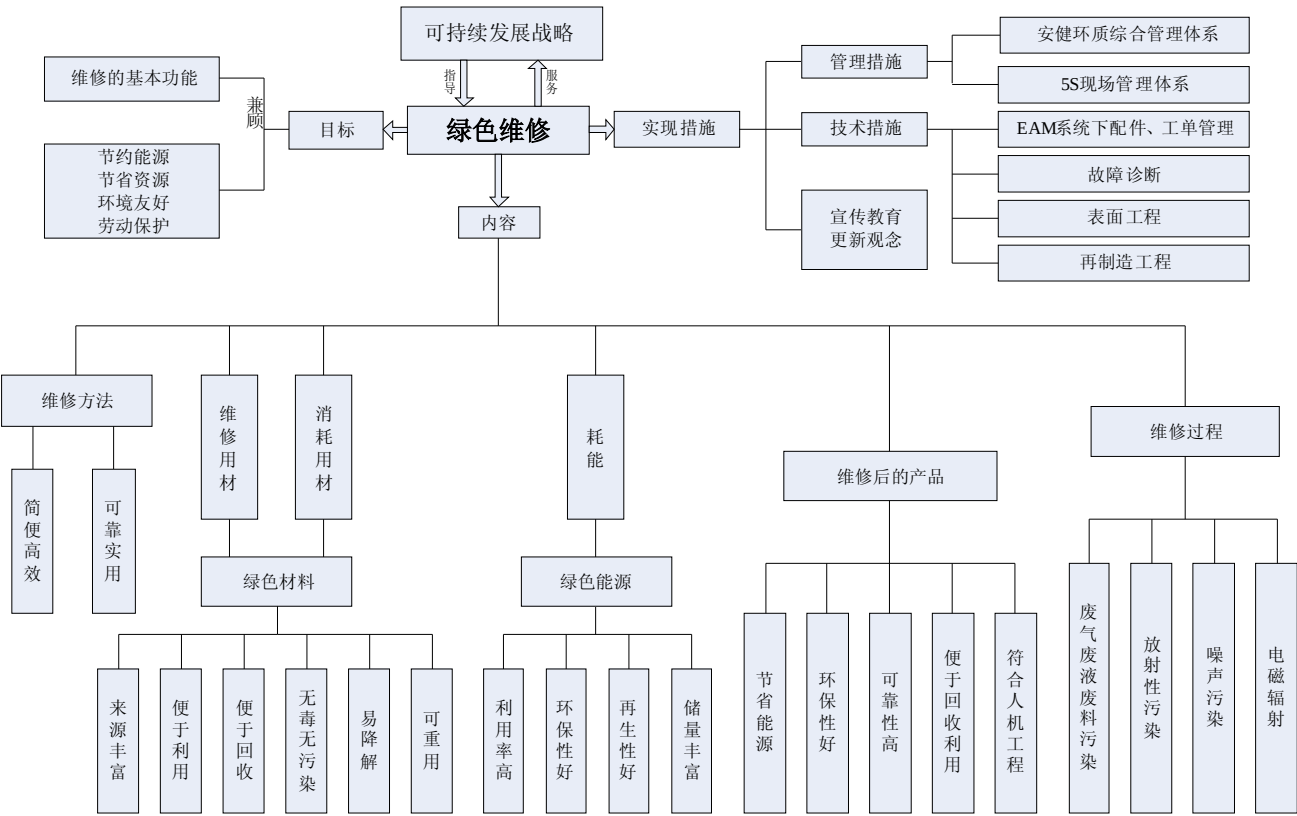
2.2 绿色维修的特点

绿色维修以优质、高效、节能、节材、环保为主要目标，是一种从报废零部件中获取高附加值的维修理念，它以原有成型的零部件为基础，进行局部加工与改进，使其性能达到甚至超过原来的性能。其优点主要表现在：可缩短研制周期，降低研制和全寿命周期的费用；对环境的负面影响小，资源利用率高。绿色维修兼顾经济效益和环境效益，能最大限度地减少原材料和能源的消耗，降低成本，提高效益，对环境的污染最小；能对生产全过程进行科学的改革和严格的管理，使维修过程中排放的污染达到最低；鼓励使用环境无害化的产品，使对环境的危害大大减轻。绿色维修方式可以实现资源的可持续利用，在维修过程

中可以控制大部分污染，减少污染来源，具有很高的环境效益。所以，无论从经济角度还是从环境和社会角度来看，绿色维修均符合可持续发展战略。

3 维修中心绿色维修系统的组成

绿色维修要做到资源能够综合利用，在维修中能够节省资源、保护环境和避免人员伤害。绿色维修实施内容中贯彻可持续发展思想，每一部分每一细节都要考虑到绿色问题，例如维修过程中注重回收使用、绿色维修设备注重物料的节省及工作环境的绿色性等。在资源利用方面主要考虑到绿色材料和绿色能源要求来源丰富、便于利用、便于回收，而且不污染环境即环保性好。对于维修后的零部件整机应有绿色要求，如要求能够节省能源、环保性好、便于拆卸、便于回收及再利用等。维修中心绿色维修系统的组成如图 1 所示。



维修中心绿色维修系统内涵丰富，在实际工作中维修中心做了大量的实践工作。如为了防止焊接烟尘的污染，维修中心在各焊接工位都安装了集尘装置；实施绿色清洗技术，对零件的除锈、除油等尽

量采用物理清洗方法（超声波清洗、喷砂），减少化学清洗剂的使用；在拆解过程中，实施绿色拆解技术，使用各种专用的拆解工具，尽可能地避免破坏性的拆解，提高旧件可修复性。

3.1 绿色维修的技术支持

维修过程中,利用高尖端的技术来代替传统的摸、看是十分重要的。故障诊断技术是随着电子测量、信号处理以及计算机的技术发展逐渐形成的一门综合性技术。故障诊断技术可以在设备运行过程中或基本不拆卸的情况下,监测设备的运行状况,预测设备的可靠性,判断故障的部位和原因。因此,利用故障诊断技术能够防止突发故障和事故的发生,减少事故性停机;较优科学地确定设备修理间隔期和内容,降低维修成本,保证安全生产,节约能源。故障诊断技术已成为实现绿色维修的关键技术。神东点检管理平台正是在这样一个背景下建立的。系统功能主要包括点检基础信息输入与查询、点检查询、点检考核、点检漏检、点检预测、点检趋势分析、点检越限预测等功能模块。神东分公司设备点检管理系统的实行,可有效实现设备管理事前计划、事中控制、事后分析;避免设备管理的信息死角和设备缺陷的沉淀;简化设备运行数据采集过程;可以大幅降低设备管理的工作强度,提高人力资源利用效率。公司实行以离线点检为主,在线点检为辅,精密点检配合日常点检的点检方式。

表面处理技术是绿色维修的另一关键技术。利用镀层、涂敷、氧化等表面处理技术,可以通过改变表面的化学成分、组织结构等制的固体材料表面的特殊功能薄层,使机件达到更高的耐磨性、抗疲劳性以及耐高温等性能,是使维修工程达到优质、高效、低耗、低污染等目标的重要手段。比如在采煤机摇臂行星减速架的修复采用了激光熔敷技术,使修复后的零件在耐磨性方面比原结构更优。

维修中心在维修过程中,注重设备再造。主要包括:①修复,通过测试、拆修、换件、局部加工等,恢复产品规定的状态和能力。②改进,通过局部修改产品设计,特别是引进新技术等使产品的性能得到提高,适应新的使用要求。维修中心所承修的主要是进口采煤设备,维修过程中对设备改进多达数百项。这些改进都被外方认可,并在后续的机型中采用。③回收利用,通过对废旧产品进行测试、分类、拆卸、加工等使产品或其零部件、原材料得到再利用。

3.2 建立专业化、系统化的维修队伍

随着科学技术的发展和企业装备水平的提高,眼看耳听手摸传统的维修方法已适应不了现代设备保养维修工作的需要,需要培养一批会操作现代操

作仪器,能准确判断故障并且能及时排除故障的高素质人才。只有这样,才能保证现代设备完好、高效、充分地发挥其效能。神东煤炭分公司维修中心是神东公司按照 EAM 管理模式组建而成的专业维修基层单位。维修中心的主要任务是负责矿区机电设备的大修项修;负责零配件加工、制作;负责向各单位提供专业化维修服务;负责实施国产化开发研制并应用新技术、新工艺、新材料,开发研制新产品。维修中心有四个专业维修部和一个加工服务部,四个专业维修部分别对不同的设备进行大修、项修和抢修,加工服务部负责大修中一些零件的加工和维修中心国产化项目的制造任务。维修中心专业化的维修模式大大提高了设备维修质量,缩短了维修周期,节约了维修成本,培养了一批设备维修方面的专业人才。

3.3 搞好配件采购和供应工作

为了提高维修效率,应使配件的计划、采购、修旧和改造等与材料供应工作相协调。为了使配件计划尽可能地符合实际,计划编制人员必须掌握两头情况:一是要协同有关职能部门,如施工技术、计划、则务等部门,结合维修中心的实际情况,每个部门都对下一年度的施工任务、计划投资、机械设备使用和检修情况,作出充分的分析和估计;二是要了解机械设备的使用情况,主要是机械设备的技术状况,操作、维修人员的技术水平和管理水平,以及配件库存情况等。然后综合各方面的因素,参照以往配件消耗情况,具体进行计划编制,力求以最小的库存储备来满足机械修理对配件的需要。所有配件采购及供应工作都在 EAM(企业资产管理系统)下进行。

3.4 在维修全过程中贯穿绿色维修

机械的维修过程可分为 3 个阶段:修前阶段、修理阶段、修后阶段。

(1)在修前阶段,以前设备进厂后直接拉到车间,清洗后在原地边处理煤泥边拆卸维修。实施绿色维修后,设备进厂后在车间外面的固定空地先用高压水进行清洗,处理干净后拉进车间进行设备状态监测与故障诊断的研究,进而拆解进行维修。清洗设备用的废水进行处理后再应用。由于清洗的是采煤设备,废水中带有大量的煤泥,通过废水处理系统,对其中的煤泥回收。

(2)在修理阶段,采用新工艺、新技术,提高维修效率。采取环保设施和手段降低维修过程中有害废物的排放并进行适当处理。比如说采煤机或支架等

设备中排出的废油、废液,排到特定的容器再经过过滤处理可以循环使用;带有杂质的油静置一段时间,待煤渣沉淀后,上面的油可以做后续处理继续作其他用途;维修现场打扫与修理同步进行,时刻保持环境清洁;为防止粉尘,还利用吸尘装置或是水灭尘;保证在维修结束后,维修人员健康不受影响,待修设备周围环境保持良好。

(3)修后阶段,搞好维修现场环境。在维修全过程中,维修中心实施了 5S 现场管理体系。5S 就是整理(SEIRI)、整顿(SEITON)、清扫(SEISO)、清洁(SEIKETSU)、素养(SHITSUKE)五个项目,因日语的拼音均以“S”开头,简称 5S。5S 起源于日本,通过规范现场、现物,营造一目了然的工作环境,培养员工良好的工作习惯,其最终目的是提升人的品质。最先重视和进行 5S 方面研究的是从事制造业的质量管理专家,维修中心作为一个设备大修企业,把在制造业中广泛应用的 5S 管理体系创新性地引入到综采设备维修的现场管理,丰富了 5S 管理的适用范围。

采煤设备维修的现场管理与制造车间的现场管理有着很大的不同,现场管理更加复杂。设备升井运到维修现场时,上面带着大量的煤泥,使工作现场清扫难度加大;设备损坏的情况不一样,维修过程也就具有很多不可遇见的因素,对维修场地的要求不是固定不变的;维修过程中会产生很多的废油、废水等,对废弃物的处理也增加了现场管理的难度。针对这些情况,维修中心在开展 5S 过程中采取了一些行之有效的管理办法。如设备在进入大修车间前,在车间外的专用清理场地对设备上附带的煤泥进行清除,然后设备进入车间固定的维修区域;对于设备拆解过程中流出的废油,采用专用的收集容器收集后化验,以确定能否用在其它非重要部件等,确保了现场的整洁。

5S 的推行采用一种自上而下的方法。首先在中心领导层形成推行 5S 现场管理的共识,成立推行组织,由中心主任担任 5S 推行活动委员会主任。随后制定了 5S 推行方针及目标,拟定工作计划及实施方法。5S 推行过程中重要的一环就是教育。维修中心对所有员工进行了 5S 培训,使广大员工明白了 5S 的内容及目的、实施方法和评比方案。在活动前中心进行了宣传造势,通过海报、标语、宣传栏等的宣传,使中心全体员工以积极心态投入到 5S 活动的开展。

5S 实施过程中,各部门根据自己所承修设备的

不同,以中心 5S 管理制度为基础,制定了适合本部门的制度和考核标准。

除此之外,维修中心还制定了一些绿色操作行为规范,对实施清洁生产规范操作、工作成绩突出者颁发绿色维修人员证书或一定的物质奖励。对维修工艺及车间进行整体性的绿色评估,合格者颁发绿色维修工艺或绿色维修车间证书等。

4 综采设备绿色维修的意义

(1)符合社会发展趋势。从宏观上讲,在维修企业中推行绿色维修,对资产的再使用和避免废物产生是至关重要的;一般说来,通过维修恢复一种产品的性能(含使用寿命)所消耗的劳动量和物质资源,仅仅是制造同一产品的几分之一甚至十几分之一。而人力、物力资源消耗的减少,就意味着物料流和能量流的减少,意味着对环境污染的减少并利于社会的持续发展。

(2)利于企业生存竞争。随着采煤机械化程度的提高,综采机械日益向大型化、高技术化方向发展。现代化的设备集机械、电力、液压、电子、计算机、传感技术与一体,使维修的技术含量猛增,同时也显示出了工程机械维修的重要性。污染大、浪费严重的维修企业必然被社会所淘汰。而维修企业要推行绿色维修,必须选择先进的维修工艺、新型的维修材料,同时考虑经济和环境。这样的企业在社会发展中必定会赢得市场,成为适应发展的生存者。

(3)效益显著。绿色维修兼顾经济效益和环境效益,最大限度地减少原材料和能源的消耗,降低成本,提高效益,对环境和人类危害最小,对生产全过程进行科学的改革和严格的绿色管理,使维修过程中排放的污染达到最小,鼓励使用环境无害化的产品,使环境危害大大减轻。

5 结束语

绿色维修作为全新的维修理念,其在维修的诸多环节中始终贯彻的原则是有利于节约能源、提高资源利用率、防止污染、注重生态保护以及人员安全健康。维修绿色化是采煤机械维修发展绿色化的客观要求,也是今后采矿专业设备维修发展的方向和重点。推行绿色维修符合可持续发展的思想,是现代采矿行业的可持续发展模式。

(下转第 72 页)

特大型风力发电机组技术现状与发展趋势

施跃文 高辉 陈钟

(国华能源投资有限公司,北京市 东城区,100007)

摘要: 特大型风力发电机组技术不仅体现了当代电机制造、材料工程、电力电子、自动控制、流体力学和地质气象等领域的科技水平,而且引领着未来风力发电机组设计制造技术的发展方向。本文通过介绍国外6种不同类型特大型风力发电机组的技术特点,分析了设计制造机组关键零部件(如发电机、齿轮箱、叶片和塔筒等)所采用的新技术,总结了风力发电机组技术的发展趋势,比较了不同类型风力发电机组的优缺点,以期为我国风力发电设备及其零部件的研发工作提供参考。

关键词: 风力发电机组 特大型 设计制造 发展趋势

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0034-05

在过去的10年里,全球风电市场高速发展,新增装机容量和总装机容量的年均增长率都在28%左右,如表1所示^[1]。截至2007年底,全球风电总装机容量达到了94GW,年发电量超过200TWh,约占全球总发电量的1.3%,仅2007年新增装机容量就高达20GW以上。

表1 全球风电装机容量(1998~2007年)

年度	新增装机容量/GW	新增装机容量增长率/%	总装机容量/GW	总装机容量增长率/%
1998	2.520	-	10.200	-
1999	3.440	36.51	13.600	33.33
2000	3.760	9.30	17.400	27.94
2001	6.500	72.87	23.900	37.36
2002	7.270	11.85	31.100	30.13
2003	8.133	11.87	39.431	26.79
2004	8.207	0.91	47.620	20.77
2005	11.531	40.50	59.091	24.09
2006	15.318	32.84	74.141	25.47
2007	20.076	31.06	94.123	26.95
平均	-	27.52	-	28.09

在风电装机容量快速增长的同时,风电技术也取得了长足进步,特别是风力发电机组(以下简称风电机组)本身,由20世纪90年代的定桨距、恒速技术,发展到今天被广泛应用的变桨距、变速技术,而且单机容量不断刷新纪录。海上风电技术逐渐成熟,全球海上风电装机容量已经超过1GW,有力地促进了特大型风电机组(单机容量大于或等于3MW)的研发。风电设备制造企业一方面努力扩大产能,批量化生产现有产品,满足陆地风电市场需求;另一方面纷

纷推出特大型风电机组,为未来海上风电市场竞争做准备。降低风电成本、提高可靠性是风电机组设计遵循的原则,为了实现这一目标,特大型风电机组设计中采用了更多的创新技术。

1 Enercon E-126(6~7MW)型风电机组

德国Enercon公司开发的E-126是目前世界上最大的风电机组^[2],2007年底第一台样机在德国投入运行,转轮直径127m,额定功率6MW,可升级到7MW。为了便于运输,采用两段式叶片,靠近叶根的较短部分由金属制成,外延部分由玻璃钢增强纤维制成。轮毂高度135m,采用预制混凝土塔筒,由35节组成,壁厚为45cm,塔筒底部直径为14.5m。各节塔筒预先在工厂浇筑成型,然后运至现场进行装配。底部8节塔筒中每节等分为3段圆环,中部22节塔筒中每节分为两段半圆环,顶部5节塔筒中每节为整体圆环,最顶节塔筒由钢板制成。在现场把各节塔筒吊装起来,采用多重钢缆结合成塔架的环壁,从塔底延伸到塔顶,用浇筑的方法进行永久固定。另外,机舱罩和导流罩由铝合金板制成,优点是可减少火灾风险,便于现场装配和散热。

Enercon公司采用“蛋型”机舱和高效的叶片翼型。2003年,Enercon公司开发了新型叶片翼型,分别安装在E-30(300kW)和E-66(1500kW)风电机组上。经实测,风电机组整体风能利用系数 C_p 最大值为0.53,如果考虑5%左右的电气系统损失,那么叶片的实际气动效率高达56%^[3],仅比贝兹常数(最大

理论气动效率)低 3%~4%。通过改进叶根形状、缩小叶片截面、增加叶径长度,可使叶片与机舱有机地结合在一起,有助于气流均匀地流过机舱;在叶尖还安装了“小翼”,可有效地抑制扰流和旋涡的生成,从而提高发电量和减少噪声。此外,叶片法兰直径大,采用双列螺栓与轮毂相连的方式,以提高强度。

与 Enercon 公司生产的其他型号风电机组一脉相承,E-126 传动系统也采用直驱技术,没有齿轮箱,主轴直接与无刷励磁同步发电机(低速)相连,两个主轴承分别为双列圆锥和单列圆柱滚子轴承,采用全容量变流器。

2 Repower 5M(5MW)型风电机组

5M 风电机组由德国 Repower 与丹麦 LM 公司、希腊可再生能源中心(Centre for Renewable Energy Sources,CRES)以及德国海上风能技术公司(Offshore Wind Technologie GmbH,OWT)共同合作设计生产,主要针对未来海上风电市场。现在已经有两台 5M 风电机组在苏格兰北海域的 Beatrice 风电场投入运行,并向 2km 外的石油钻井平台供电。Beatrice 海域的水深为 45m,这是海上风电机组首次安装在如此深度。为此,风电机组基础采用了四脚桁架结构,每一脚用于固定的钢桩被打入海床 39m 之下。为减少海上吊装的工作量,首先在码头将塔筒直立地组装在支架上,接下来吊装机舱和风轮到位,然后通过特制的吊臂将风电机组整体平移到吊装船,运输到预先完成的四脚架基础旁边,最后,再把风电机组整体提升,安放在四脚架基础上^[4-5]。

5M 风电机组的转轮直径为 126m,额定功率为 5MW,是最大的双馈电机式变桨变速风电机组^[3]。传动系统基于传统布局,采用了 3 级齿轮箱结构(传动比为 97)和 6 极双馈式异步发电机。除此之外,传动系统的设计也处处体现了创新的理念。冗余设计概念在 5M 风电机组中得到了充分体现,如采用更多传感器,有助于运行人员更全面地掌握风电机组运行数据;结合法兰的模块化传动系统在一个模块出现故障时,风电机组在减少出力的情况下可以继续保持运行(最大 3MVA),提高了整体可靠性。另外,主轴采用双轴承设计,活动轴承可比传统的球面滚子轴承更加有效地防止主轴震动和错位,配合另一个滚子轴承防止外载荷对齿轮箱的冲击,延长齿轮箱的使用寿命。其他独特设计包括:机舱内吊车吨位

提高,可以完成 95%以上的运行维护工作,包括齿轮箱的更换等;机舱顶部设有直升飞机平台;机舱内配置全套维护工具;全自动火情报警和消防措施等。5M 的另一特点是具有全自动润滑系统,能够保持叶片、主轴承、齿轮箱、偏航及发电机轴承、偏航及高速轴刹车等设备处于良好工作状态。

5M 叶片体现了 LM 公司的最新制造技术。雷击电流分流器被设计成条形,增加了接收器捕捉雷电的能力,同时减小了对叶片空气动力性能的影响。缩短叶片根部的螺距可以增加其连接的坚固性。同时,更多的夹层结构设计和碳纤维复合材料的使用降低了叶片重量。LM 公司因此产品而荣获丹麦行业协会颁发的“2007 年产品奖”。

截至 2007 年底,Repower 共安装了 10 台 5M 风电机组,现正在开发 6M 风电机组(额定功率 6MW),计划在 2008 年底之前推出^[2]。

3 Multibrid M5000(5MW)型风电机组

2005 年初,德国 Multibrid 公司安装了第一台 M5000 风电机组,转轮直径 116m,额定功率 5MW^[3]。2007 年,法国最大供电企业 Areva 出资收购了 Multibrid 公司。

M5000 由德国工程咨询公司 Aerodyn 设计,采用半直驱技术。该设计综合了传统 3 级齿轮箱结构和直驱式技术的优点,即取消主轴,采用 1 级齿轮箱连接低转速永磁同步发电机,并通过集成化设计大大降低了机舱重量和尺寸,其主要技术特性为:

(1)采用 1 级齿轮箱(传动比为 1:9.92)和水冷式永磁同步发电机(最大转速为 147rad/m,出口电压 3kV)。与 5M 风电机组相比,大大简化了传动系统结构,尺寸仅为 5M 的 1/10;

(2)备用的数据采集设备减少了因其故障而导致的系统停机;传感器系统可提供维护预警;

(3)良好的机舱密闭设计和空气过滤器使风电机组能够承受恶劣气候条件(如盐雾和潮湿空气侵蚀)的影响,适应于海上环境条件;

(4)紧凑型设计使 M5000 风电机组相比于同级别特大型风电机组具有较轻的机舱和轮毂重量,便于运输和安装。M5000 的机舱总重量(包括轮毂和叶片)约为 310t,而 Repower 5M 的重量为 420t, Enercon E-126 的重量则达到 530t。当然,紧凑型设计同时也带来了部件维修的困难;

(5)采用碳纤维结构的叶片,降低重量;

(6)四象限的全容量变流器改善了电能质量,功率因数调节范围为 0.9(感性)~0.9(容性)。

2007 年,Aerodyn 又推出了超级紧凑型设计(super compact design,SCD)概念,其结构与 M5000 相似,但所采用的两级行星齿轮箱和中速发电机相互独立。齿轮箱和发电机的外径完全相同,并且由同心法兰连接,这样减小了轴线不重合的风险。主轴由法兰盘直接连接在齿轮箱的输入轴端。

4 Gamesa G128(4.5MW)型风电机组

西班牙 Gamesa 公司计划 2008 年安装 G128-4.5MW 样机,即转轮直径为 128m,比当今世界最大风电机组还长 1m,其主要特点如下^[2]:

(1)“紧凑”传动系统,对主轴、2 个主轴承和两级行星齿轮箱进行集成化设计,减少了所用部件;

(2)多变量控制系统,减少叶片振动和载荷;

(3)两段式叶片,与现有 2MW 风电机组采用相同的运输工具,对道路要求也相同;

(4)混合式塔筒(混凝土+金属结构),减少投资;

(5)内置吊车,便于安装和拆卸部件;

(6)全容量变流器,由 6 个并联的 770kW 变流器—绝缘栅场效应晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)组成。如果一个变流器故障,仅损失 1/6 的发电量,从而提高可靠性;

(7)小风时,仅开启少量变流器,并可以在接近单个变流器额定功率的范围内运行;其他变流器关闭,从而提高了效率。

通过分析上述技术特点发现,G128-4.5MW 的技术路线很可能不同于 Gamesa 现有产品,而采用中速同步发电机,即属于基于 Gamesa 传统机舱布局的“半直驱式”风电机组。

5 Vestas V90(3.0MW)型风电机组

丹麦 Vestas 风能集团公司是世界上最大的风电设备制造公司,截至 2007 年底,在全球 63 个国家共安装 35000 台风电机组,总容量 28GW。产品的主要技术特点是变桨距(OptiTip[®])和采用双馈异步电机实现变速运行(OptiSpeed[®])。

V90-3.0MW 采用双馈电机式变桨变速技术,但为了降低重量,Vestas 开发了多项创新技术^[3]。与 Vestas 传统机舱布局相比,取消了主轴,轮毂通过大

轴承装配至齿轮箱(传动比 1:104.5),对大轴承与齿轮箱进行集成化设计,减少机座尺寸,采用水冷式发电机(四极绕线式异步发电机,带滑环)。通过上述措施,V90-3.0MW 风电机组的机舱重量和尺寸与 V80-2.0MW 相当,但发电性能却提高了 50%。为了减轻重量,方便运输,使用高强度钢板(型号为 S355J2G3/NL)来制造塔筒。内饰件不是通过焊接方式,而是采用磁铁固定在塔筒上,从而增加塔筒的疲劳强度。总之,重量轻是 Vestas 风电机组的显著特点,例如,V90-3.0MW 机舱重量为 70t,叶轮(含叶片和轮毂)重量为 41t,80m 塔筒重量为 160t,比同级别其他机型轻得多。

导流罩和机舱罩采用流线型设计,以减少塔架和基础所承受的载荷。在叶片承载结构中使用碳纤维材料,提高强度,减轻重量。叶片还采用新翼型来提高气动效率。在控制策略方面,当塔筒或传动系统出现大幅度振动时,可以通过调节叶轮或发电机转速来增加阻力,消除振动。另外,把干式变压器安装在机舱内,可节省塔筒内电缆的重量和成本。截至 2007 年底,近 600 台 V90-3.0MW 风电机组投入运行,其中 96 台安装在海上。

6 Clipper Liberty 系列 2.5MW 风电机组

美国 Clipper Liberty 系列风电机组的最大特点就是采用了分布式多发电机传动装置以及双螺旋分布式设计的齿轮箱(两级变速),与常用的三级行星齿轮箱设计相比,减轻了驱动轴的运转压力^[6]。通过分散载荷强度的多路式设计,将主轴的扭矩通过 4 个高速输出轴承传递给 4 台永磁同步发电机(每台发电机额定功率为 656kW),4 个 IGBT 变流器(总容量为 2525kW)安装在塔筒底部。这种发电机系统摒除了大型直驱式风电机组体积大而重,不宜制造、运输和安装的缺点,并且一台发电机故障时其他 3 台仍能正常运行,提高了可靠性和发电量。此外,该风电机组还安装了 2 个主轴承来吸收轴向载荷,解决了轴向运动和联结部件的薄弱问题,以保护风电机组免受损坏,从而延长寿命。减小组件尺寸和减轻部件重量的思想贯穿于 Clipper 风电机组设计的整个过程,例如,Liberty 系列风电机组在发电机制造工艺中,减少了铜材料在线圈中的应用,整体重量明显低于其他同级别机型。据介绍,此种风电机组的吊装可使用与 1.5MW 风电机组同级别的设备,而且维护便

利,不需移动齿轮箱就可以更换高速输出轴承,单台发电机的更换也无需大型吊装设备。

7 特大型风电机组技术发展方向

7.1 单机容量不断增大

1980 年,商业化风电机组的单机容量仅为 30kW,叶轮直径为 15m,而目前世界上最大风电机组的单机容量达到了 6MW,叶轮直径为 127m。在过去的 20 多年里,随着风电机组技术的快速发展,单机容量增加了 200 倍,叶轮直径也增加了近 10 倍。据报道,国外已经开始设计开发 8~10MW 的风电机组。从目前的发展来看,风电机组设备的大型化还没有出现技术限制,即单机容量将继续增大。在 1990-2004 年间,风电机组叶轮直径平均每年增加 5m,如果继续保持这种速度,到 2020 年叶轮直径将达到 200m,相应的单机容量将达到 15MW。

7.2 传动系统设计不断创新

传动系统结构的发展演变是风电机组技术进步的集中体现。传统风电机组的传动设计为叶片连接的主轴通过 3 级变速的齿轮箱与异步发电机相连,丹麦风电机组制造企业最先采用该设计,因此被冠以“丹麦型”,并从 20 世纪 80 年代到 90 年代中后期一直在风电机组制造中占据绝对主导地位。随着风电机组单机容量的增大,齿轮箱的高速传动部件故障问题日益突出,于是没有齿轮箱而将主轴与低速多极同步发电机直接相接的直驱式布局应运而生。但是,多极发电机因绕组布置空间的要求导致重量和体积大幅增加。为此,采用折中理念的半直驱布局在大型风电机组设计中得到了应用。半直驱式风电机组大规模推广应用的主要障碍是价格昂贵,但通过集成化设计及规模化生产,其竞争力将越来越强^[7]。目前,在特大型风电机组的设计制造上依然以传统的丹麦型传动技术为主,但更多地应用创新技术。例如,沿袭“丹麦型”传动系统设计的 5M 风电机组采用了空心传动轴,目的就是减少整个传动系统的重量。从中长期来看,直驱式和半直驱式传动系统将逐步在特大型风电机组中占有更大比例。另外,在传动系统中采用集成化设计和紧凑型结构是未来特大型风电机组的发展趋势。

7.3 叶片技术不断改进

对于 2MW 以下风电机组,通常通过增加塔筒高度和叶片长度来提高发电量,但对于特大型风电

组,这两项措施可能会大大增加运输和吊装难度以及成本。为此,开发高效叶片越来越受到风电机组制造企业和叶片生产企业的重视。新型高效叶片的气动特性在设计中不断得到优化,使得扰流受到抑制,发电量得到提高,并且改善了其降噪特性。另外,特大型风电机组叶片长,运输困难,分段式叶片是一个很好的解决方案,但难点是如何解决两段叶片接合处的刚性断裂问题,遗憾的是 Enercon 和 Gamesa 都没有介绍具体的接合技术。

碳纤维复合材料(carbon fibre reinforced composites, CFRP)因具有密度小、强度高、刚性稳定、耐温耐蚀等特性,越来越多地被应用于大型叶片的制造中。目前 CFRP 制造成本是玻璃纤维复合材料的 10 倍以上,但是随着生产工艺的改进和规模化生产的发展,该成本有进一步下降的趋势。越来越多的夹层结构(sandwich structure)被应用到叶片设计中^[8],这种设计的应用使得叶片的坚固性、疲劳特性以及防腐性等均得到提高。

由于海上风电场不受噪声和视觉影响的限制,在海上风电机组设计中“两叶片”风电机组越来越受到关注,其优点显而易见,如减少了叶片数量和轮毂设计的复杂性,并且安装方便,有利于减少台风等破坏性风速对风电机组的影响^[9]。但从可靠性角度出发,采用传统“跷跷板”结构的“两叶片”风电机组的运行记录并不令人满意,因此,只有解决可靠性问题才会大规模应用“两叶片”设计。

7.4 永磁同步发电机的更多应用

永磁同步发电机不从电网吸收无功,无需励磁绕组和直流电源,也不需要滑环碳刷,结构简单且技术可靠性高,对电网运行影响小。在大功率变流装置技术和高性能永磁材料日益发展完善的背景下,大型风电机组越来越多地采用永磁同步发电机。目前,正在研制直驱式风电机组专用的新型永磁同步发电机^[9],其主要特点是直径小、重量轻(为现有产品重量的 20%~30%),采用非金属定子。

通常,同步发电机与全容量变流器结合可以显著改善电能质量,减轻对低压电网的冲击,保障风电并网后的电网可靠性和安全性。与双馈式风电机组(通常变流器容量为 1/3 的风电机组额定功率)相比,全容量变流器可以更容易实现低电压维持运行(low voltage fault ride through)等功能^[10],满足电网对风电并网日益严格的要求。

7.5 混合型塔筒不断完善

虽然特大型风电机组多为海上环境设计,但是也不排除安装在具有良好风力资源而土地稀缺的陆地上。如果塔筒底部直径超过 4m,则造价高、运输困难,因此 80m 以上高度被认为是钢制塔筒的极限高度。为此,特大型风电机组在陆地安装时多采用混合型塔筒。除了前面介绍的 E-126 所采用的混合型塔筒,还有其他形式的独具匠心的设计,例如荷兰 Mecal 公司专利技术的混合塔筒采用长 10~15m,宽 3~4m,厚度为 25~35cm 的预制混凝土板拼接而成,并通过钢缆上下贯通加固,同时对钢缆加以防腐保护。这种方法的优点是安装速度快,通常可以在一周内完成,而不像先前美国通用电气公司 (General Electric, GE) 在西班牙安装的混合型塔筒,仅混凝土施工就花费了 6 个星期^[4]。总的来看,混合型塔筒的造价仍然较高,仅在钢制塔筒极限高度以上才具有经济性。

8 结论

目前,特大型风电机组设计中仍以“丹麦型”为主导,但制造材料更加多样化,工艺水平在不断提高,设计思想也不断推陈出新,直驱型和半直驱型风电机组正在日益发展壮大。随着风电机组技术的进步,更多边缘科学技术的融合,市场上将会出现更大单机容量的风电机组,并且其可靠性和经济性都会有大幅度提高。

参考文献

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind 2007 report[R]. Belgium: Global Wind Energy Council, 2008.
- [2] Eize de Vries. Wind innovation slows-growth remains robust[J]. Renewable Energy World, 2007, 10(4): 96~107.
- [3] Eize de Vries. Global wind technology: overview of developments 2003-2004[J]. Renewable Energy World, 2004, 7(4): 102~115.
- [4] Seidel M, G??wein J. Advances in offshore wind technology [R]. Rendsburg, Germany: Repower Systems AG, 2005.
- [5] Seidel M, Gosch D. Technical challenges and their solution for the Beatrice Windfarm demonstrator project in 45M water depth[C]. Proceedings of German Wind Energy Conference, Wilhelmshaven, Germany, 2006.
- [6] Thresher R, Laxson A. Advanced wind technology: new challenges for a new century [C]. European Wind Energy Conference, Athens, Greece, 2006: 6~7.
- [7] European Wind Energy Association. Wind energy: the facts[R]. Belgium: European Wind Energy Association, 2004.
- [8] Thomsen O T. Sandwich materials for wind turbine blades[C]. 27th International Conference on Materials Science: Polymer Composite Materials for Wind Power Turbines, Roskilde, Denmark, 2006.
- [9] Spooner E, Gordon P, Bumby J R. Light weight ironless -stator PM generators for direct-drive wind turbines[J]. IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 2005, 152(1): 17~26.
- [10] Erlich I, Wilch M, Feltes C. Reactive power generation by DFIG based wind farms with AC grid connection [C]. European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007.
- [11] Brughuis F J. Advanced tower solutions for large wind turbines and extreme tower heights[EB/OL]. <http://www.mecal.nl>, 2008-06-19.

作者简介: 施跃文 (1957-), 高级工程师, 现任国华能源投资有限公司总工程师, 长期从事电力(含风电)技术管理工作, 曾获国家科学技术进步二等奖。

Technological Development Trends of Super-large Wind Generating Set

Shi Yuewen, Gao Hui, Chen Zhong

(Guohua Energy Investment Co., Ltd, Beijing, Dongcheng District 100007, China)

Abstract: The super-large wind generating set technology not only reflects the contemporary science and technology level in motor manufacturing, materials engineering, power electronics, automatic control, hydrodynamics, geology and weather, etc, but also leads the technology development of future design and manufacture of wind generating set. In this paper, the technological features of 6 different kinds of super-large wind generating set made in other countries are introduced. An analysis of the new technology in the design and manufacture of key parts (such as generators, gear boxes, blades and tower tube, etc.) is presented. It sums up the technology development trends of wind generating set, and compares different types of advantages and disadvantages of wind generating set. May it provide a reference to the R & D work of China's wind power generation equipment and its components.

Keywords: wind generating set; super-large; design and manufacture; development trend

(收稿日期: 2009-3-31 责任编辑: 郝广杰)

国产 600MW 机组循环效率试验及性能优化分析

杜劲松¹ 李 强¹ 包劲松²

(1. 浙江国华浙能发电有限公司, 浙江 宁波, 315612; 2. 杭州意能电力技术有限公司, 浙江 杭州, 310014)

摘 要: 介绍了国华宁海发电厂 #4 汽轮发电机组循环效率及性能优化试验的情况, 包括试验工况安排、试验结果分析等, 并简要阐述了数据处理及计算方法, 结合同样进行的锅炉效率试验, 计算出机组供电煤耗和循环热效率, 提出了单阀状态下的机组经济运行方式, 可为机组调峰运行及经济性分析提供参考依据。

关键词: 600MW 机组 循环效率 性能优化 试验分析

中图分类号: TM621.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0039-07

1 概述

国华宁海发电厂一期工程由四台 600MW 燃煤机组组成, 汽轮机是由上海汽轮机有限公司与美国西屋公司合作并按照西屋公司的技术制造的 600MW 亚临界、单轴、四缸、四排汽、中间再热凝汽式汽轮机, 机组型号为 N600-16.7/538/538。锅炉是上海锅炉厂有限公司制造的亚临界压力、一次再热、单炉膛平衡通风、控制循环、单汽包锅炉, 型号 SG-2028/17.5-M904。发电机是上海发电机有限公司引进美国西屋公司技术自行设计制造的 QFSN-600-2 型水氢氢冷却汽轮发电机。

#4 机组于 2006 年 10 月 18 日首次并网发电, 2006 年 11 月 20 日完成 168h 满负荷试运的考核, 同年 12 月 8 日完成了性能考核试验, 2006 年 12 月至 2007 年 1 月完成机组循环效率及性能优化试验全部项目。

1.1 机组主要技术规范

国华宁海发电厂 #4 机组汽轮机主要技术规范如下:

机组型号: N600-16.7/538/538

汽轮机型式: 亚临界、单轴、四缸、四排汽、中间再热凝汽式

额定功率: 600MW

最大连续功率: 647.922MW

额定主蒸汽压力/温度: 16.7MPa(a)/538℃

额定再热蒸汽温度: 538℃

回热抽汽级数: 8 级(3 高 4 低 1 除氧)

额定蒸汽流量: 1758297 kg/h

额定排汽平均背压: 4.9kPa(a)

设计冷却水温: 20℃

额定给水温度: 272.4℃

额定工况净热耗: 7745.5kJ/kWh
(1850.0 kcal/kWh)

低压末级叶片高度: 905mm

发电机额定功率因数: 0.9

小汽机额定背压: 6.27kPa

1.2 试验目的和标准

通过试验测得汽轮发电机组在不同负荷下常规单阀运行方式和优化单阀运行方式的发电热耗率和厂用电率, 结合同样进行的锅炉效率试验的结果, 获得单元机组循环热效率和发、供电煤耗, 并确定单阀运行状态下的机组经济运行方式, 作为电厂今后经济运行和经济负荷调度的依据。同时, 试验结果作为机组热力性能的原始资料, 可作为电厂今后节能降耗和技改工作的基础。对进一步开展同型机组的热经济性工作也可提供有益的支持。

试验按照国家标准《电站汽轮机热力性能试验验收规程》(GB8117-87), 并参考美国机械工程师协会《汽轮机性能验收试验规程》(ASME PTC6-1996) 进行。水和水蒸汽性质参数采用“国际公式化委员会工业用方程 IFC-1997”计算得到。

2 试验工况安排

机组循环效率及性能优化试验在 100%、90%、

80%、70%、60%、50%额定负荷等 6 个负荷点进行,在每个负荷点按定压、滑压和四阀全开工况,分别安排 3~5 个工况,详见表 1。本试验共进行了 26 个工况,其中 600MW、540MW 负荷常规定压运行和 480MW 以下负荷常规滑压运行工况试验时,主汽压参考机组原设定的滑压曲线。表 1 中试验工况主汽压和修正后功率(扣除励磁)为试验时间段内平均值,主汽压为修正后的绝对压力。

表 1 #4 机组循环效率及性能优化试验工况

负荷点 (MW)	汽机 运行方式	试验主汽压 (MPa)	修正后功率 (扣除励磁)(MW)	高压调门 开度(%)	LOAD REFER- ENCE (MW)
600	常规定压	16.53	604.3	32.2	618.4
	变主汽压	15.96	603.8	40.2	632.5
	四阀全开	15.70	609.8	90.8	-
540	常规定压	16.29	541.4	25.1	586.9
	变主汽压 1	15.67	534.8	26.6	594.2
	变主汽压 2	14.64	534.0	31.5	615.9
	四阀全开	13.71	537.8	97.8	-
480	常规滑压	16.03	480.0	22.3	554.4
	变主汽压 1	14.77	479.0	24.4	583.6
	变主汽压 2	13.37	479.1	30.5	612.4
	四阀全开	12.45	483.3	97.8	640.5
420	变主汽压 1	16.38	414.4	18.8	482.6
	常规滑压	14.93	411.4	20.4	518.5
	变主汽压 2	13.61	417.6	22.6	558.3
	变主汽压 3	11.91	416.5	28.1	601.3
360	四阀全开	10.75	416.6	97.8	-
	变主汽压 1	15.59	360.2	17.9	461.0
	常规滑压	13.60	357.6	19.9	507.7
	变主汽压 2	11.81	357.1	22.6	558.3
300	变主汽压 3	10.40	357.8	27.4	597.8
	四阀全开	9.19	354.1	97.7	-
	变主汽压 1	12.93	304.3	18.2	468.4
	常规滑压	11.89	309.1	19.8	-
300	变主汽压 2	10.29	305.7	22.3	-
	变主汽压 3	8.95	309.8	27.9	-
	四阀全开	7.89	304.2	97.7	-

3 机组运行方式及系统隔离

3.1 机组的运行方式

试验时,机组按原则性热力系统的方式运行,辅机按设计要求投运。试验前根据试验工况要求调整机组运行方式和负荷。为保持工况稳定性,撤出“协调控制”,实行 DEH 阀位控制。各工况主汽温和再热汽温尽量保持额定值,变压优化运行工况维持主汽压和

对应的高压调门开度满足试验要求。在试验进行过程中,保持参数稳定,煤量和高压调门开度不变。

3.2 热力系统的隔离

在进行每次试验前,对机组的热力系统进行了如下隔离操作:

(1)隔绝本机向辅汽系统供汽,隔绝本机与其它机组的汽水联系,辅汽由邻机供;

(2)隔绝各加热器的危急疏水阀及汽水系统的疏水阀、旁路阀,对于存在明显内漏且影响试验结果准确性的疏水阀,在确定不影响机组安全运行的前提下,将疏水阀前或后隔离阀关闭;

(3)高负荷工况主机及小汽机轴封由本机供,关闭辅汽至轴封隔离阀。420MW 及以下低负荷工况轴封由辅汽补供;

(4)隔离凝结水至闭式水箱、定冷水箱补水,改由凝结水输送泵补水;

(5)停止锅炉的连排、定排及吹灰。

(6)关闭连排至除氧器隔离阀和除氧器向空排气阀;

(7)试验前将凝汽器水位适当提高后关闭热井补水阀,汽、水的化学取样照常进行。

4 数据处理及计算方法

4.1 原始数据处理

数据整理时,对所有人工和计算机自动采集的试验数据进行整理和辅助计算,多重测点数据求取其算术平均值,压力数据进行测点和变送器位差、大气压修正,温度数据进行仪表校验偏差修正。根据凝汽器、除氧器和汽包水位变化值、介质密度和容器尺寸计算出水位变化当量流量,扣除试验前测得的系统明泄漏量,即为系统不明泄漏量。由实测的流量元件前后差压经标准公式计算出流量。

4.2 试验热耗率的计算

以试验测得的除氧器进口凝结水流量为基准,通过各加热器的热平衡计算,确定除氧器和高加的抽汽流量,而后分别求得最终给水流量、主蒸汽流量、高压缸排汽流量和热再流量等主要流量。通过机组热平衡计算得出机组做功的总热耗量,从而求得热耗率。

$$HR = \frac{G_{MS} \times H_{MS} + G_{HRH} \times H_{HRH} - G_{FW} \times H_{FW} - G_{CRH} \times H_{CRH} - G_{SH} \times H_{SH} - G_{RH} \times H_{RH}}{P_G - P_E}$$

式中:HR—发电机输出端功率计算的试验热耗

率, kJ/kWh ;

P_G —发电机输出端功率, 由高精度数字电功率表实测得到, kW ;

P_E —励磁变功率, kW ;

G_{MS} 、 H_{MS} —主蒸汽流量、焓值;

G_{HRH} 、 H_{HRH} —热再蒸汽流量、焓值;

G_{FW} 、 H_{FW} —最终给水流量、焓值;

G_{CRH} 、 H_{CRH} —冷再蒸汽流量、焓值;

G_{SH} 、 H_{SH} —过热器减温水流量、焓值;

G_{RH} 、 H_{RH} —再热器减温水流量、焓值;

以上流量单位为 kg/h , 焓值单位为 kJ/kg 。

4.3 热耗率和电功率的修正

为了便于与设计状况和相同负荷下各种运行方式间进行比较, 对试验热耗率和电功率进行了主蒸汽温度、再热蒸汽温度、过热器减温水流量、再热器减温水流量、低压缸排汽压力、发电机功率因数等 6 项修正。修正曲线以制造厂提供的修正曲线为依据。

4.4 发、供电煤耗和循环热效率的计算

根据机组发电热耗率、锅炉效率、管道效率设计值(97%)和厂用电率, 计算出各工况试验状况下以及参数修正后的机组发、供电煤耗和循环热效率。计

算时同一负荷不同运行方式各工况锅炉效率取相同值(以锅炉性能试验报告中推荐数据为依据)。

5 试验结果及分析

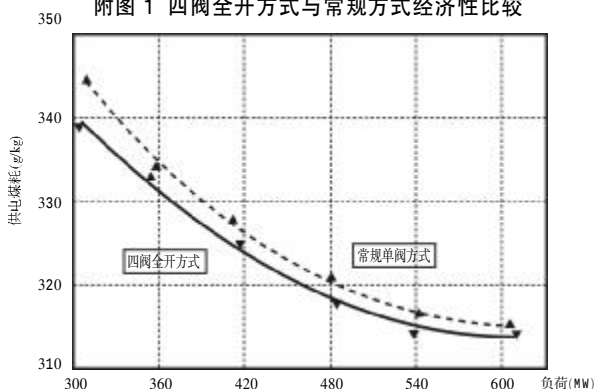
5.1 试验结果

各工况试验测量数据和计算结果表明, 在 300MW ~ 600MW 的机组日常调峰负荷范围内, 试验状态下机组的发电热耗为 $7991\sim 8626\text{kJ/kWh}$, 修正后发电热耗为 $7999\sim 8519\text{g/kWh}$; 试验发电煤耗为 $299.9\sim 324.0\text{g/kWh}$, 修正后发电煤耗为 $299.0\sim 320.4\text{g/kWh}$; 试验供电煤耗在 $315.2\sim 349.7\text{g/kWh}$ 之间, 修正后供电煤耗在 $314.3\sim 345.6\text{g/kWh}$ 范围内; 机组循环热效率试验值为 $35.1\%\sim 39.0\%$, 修正后循环热效率为 $35.5\%\sim 39.1\%$ 。

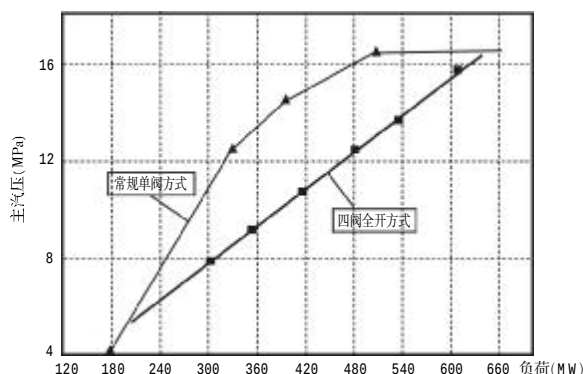
由于试验时机组状况与正常运行时较接近, 因此试验状态下机组的发电热耗率、供电煤耗和循环热效率基本反应了机组的日常运行经济性状况。此外, 因试验结果计算时管道效率取 97% 的设计值, 如实际管道效率高于设计值, 机组循环热效率应更高些。

根据试验计算结果绘制成一系列特性曲线见附图 1~16。

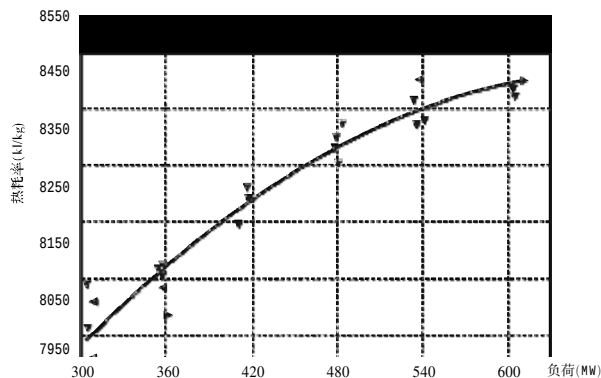
附图 1 四阀全开方式与常规方式经济性比较



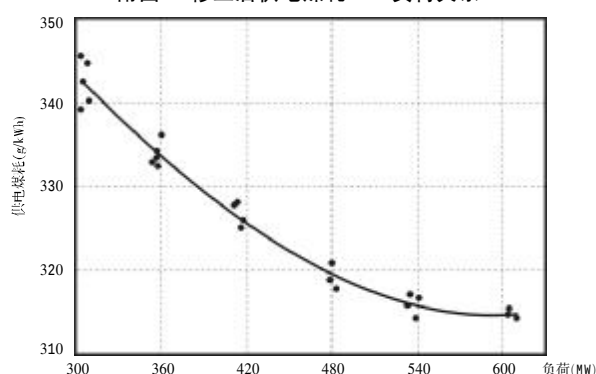
附图 2 四阀全开方式与常规方式主汽压比较



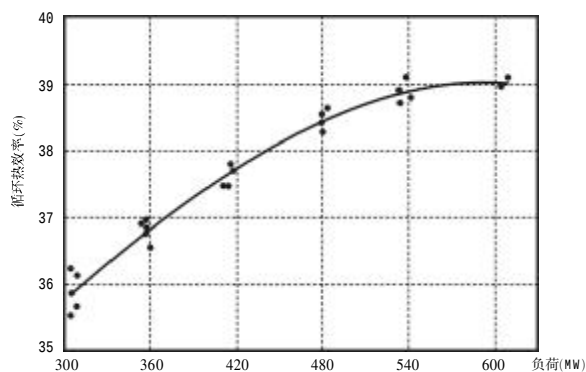
附图 3 修正后发电热耗率——负荷关系



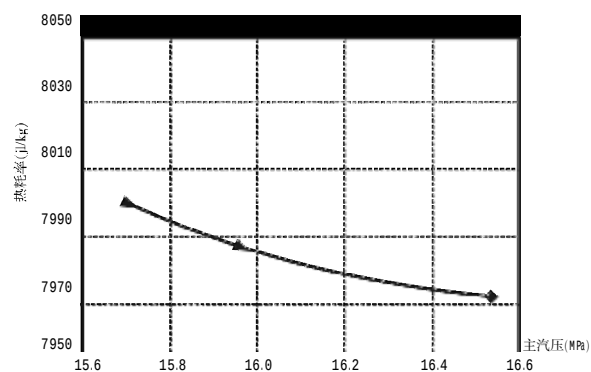
附图 4 修正后供电煤耗——负荷关系



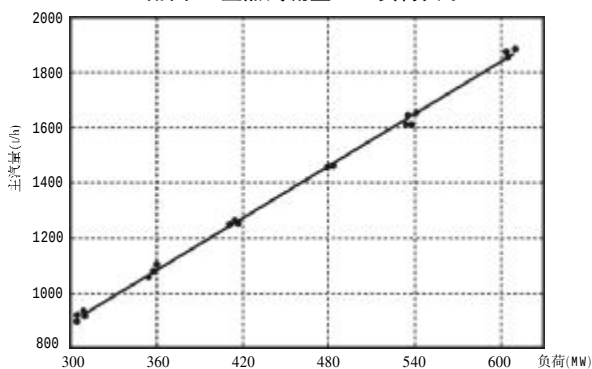
附图 5 修正后循环热效率——负荷关系



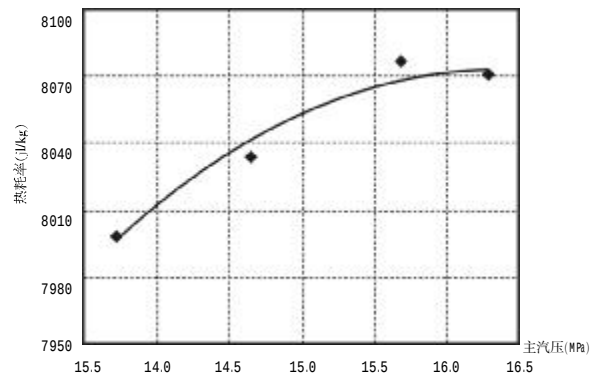
附图 9 600MW 变汽压方式经济性比较



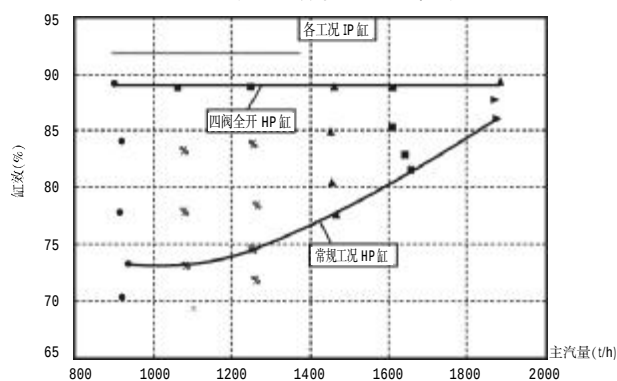
附图 6 主蒸汽流量——负荷关系



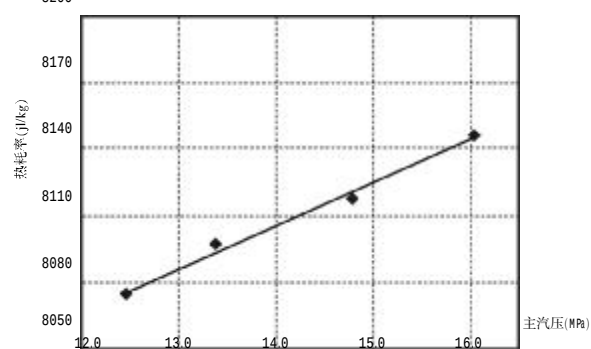
附图 10 540MW 变汽压方式经济性比较



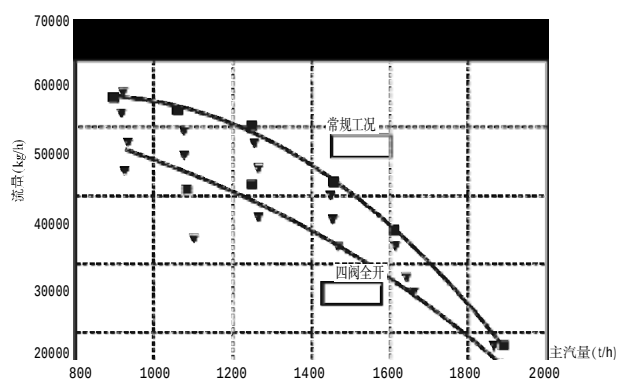
附图 7 HP、IP 缸效率——主汽量关系



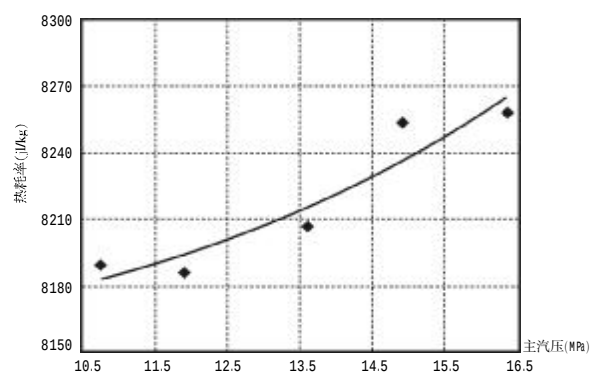
附图 11 480MW 变汽压方式经济性比较



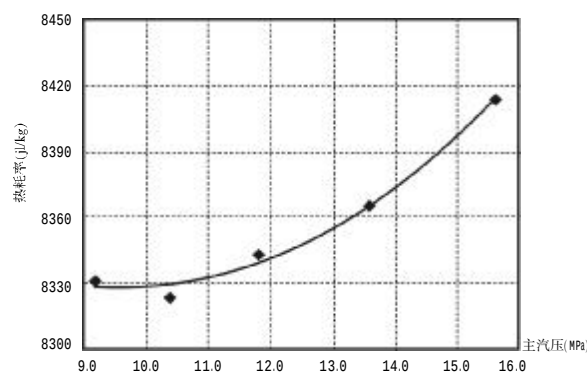
附图 8 小汽机流量——主汽量关系



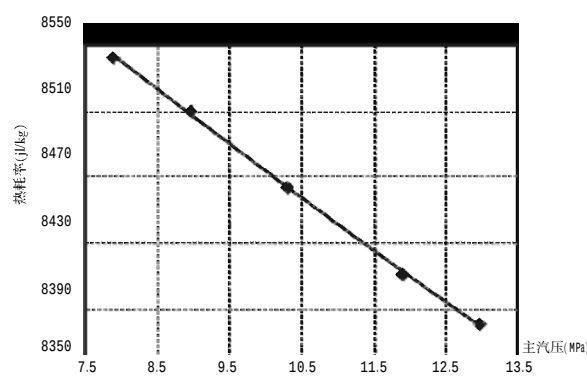
附图 12 420MW 变汽压方式经济性比较



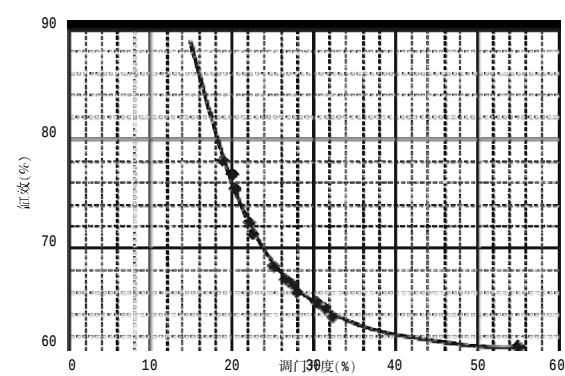
附图 13 360MW 变汽压方式经济性比较



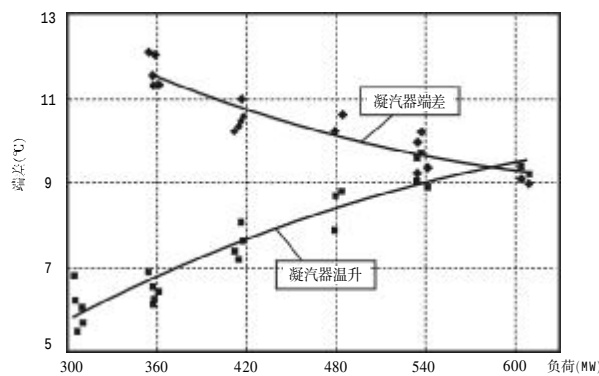
附图 14 300MW 变汽压方式经济性比较



附图 15 高压缸效率——高压调门开度关系



附图 16 凝汽器温升、端差——负荷关系



5.2 单阀调节状态下的最佳经济运行方式

为确定机组在单阀调节状态下最佳经济运行方式，对每个负荷点不同主汽压运行工况进行了经济性比较。附图 9~附图 14 反映了在日常调峰负荷范围内各负荷点采用不同主汽压运行时机组发电热耗率的变化情况。该组图表明，当汽轮机高压调门处于单阀运行状态时，在各种负荷工况下，主汽压最低或接近最低时，机组发电热耗率最低。即对应四只高压调门全开或开度较大时，机组发电热耗率最低。此时，机组供电煤耗最低，循环热效率最高，经济性最佳。

实际运行时，尤其在 AGC 方式下，理想的四阀全开状态难以正常实现，而调门开度在 55%左右时流量已接近四阀全开的流量，调门压损接近最小，因而可将 50%~55%开度当作高压调门实际最大开度。由此可认为，在 300MW~600MW 日常调峰负荷段，单阀调节状态下机组实际最佳经济运行方式是高压调门最大开度方式。

究其原因，在单阀调节状态下、四阀全开滑压运行时虽然主汽压较低，这一因素使循环热效率降低，

但由于调门节流损失减小，由主汽门前参数和高压缸排汽参数计算的高压缸效率提高，从而又使循环热效率增加。就本机组实际特性而言，在单阀调节状态下，高压调门节流损失减少、高压缸排汽温度上升和小汽机耗汽量减少对循环热效率的正面影响大于主汽压降低对循环热效率的负面影响，因此在各负荷工况下采用高压调门最大开度方式滑压运行时机组经济性最佳。

5.3 常规单阀运行方式与四阀全开方式经济性比较

表 2 各负荷工况常规单阀运行方式与四阀全开方式供电煤耗对比 (单位:g/kWh)

	600MW	540 MW	480 MW	420 MW	360 MW	300 MW	均值
常规单阀	315.3	316.7	320.9	327.8	334.2	344.6	
四阀全开	314.3	314.3	317.8	325.0	332.8	339.1	
供电煤耗差	1.0	2.4	3.1	2.8	1.4	5.5	2.7

表 2 是各负荷工况主汽压采用原设定滑压曲线的常规单阀运行方式和四阀全开滑压运行方式之间经济性的比较。由表 2 数据可见，各负荷工况下运行时，与四阀全开方式相比，常规单阀方式机组供电煤耗偏高 1.0~5.5g/kWh，供电煤耗差的平均值约为

2.7g/kWh。根据试验结果,将两种运行方式下供电煤耗拟合成附图 1 所示趋势线,图中曲线反映出在整个调峰负荷范围内四阀全开方式供电煤耗明显低于常规运行方式。

5.4 采用经济运行方式对机组运行的影响

通过附图 2 中各负荷工况四阀全开方式和常规滑压方式主汽压的对比,在日常调峰负荷范围内,四阀全开滑压运行方式机组运行主汽压比常规方式明显偏低。300MW~600MW 负荷段采取理想的四阀全开方式运行时,主汽压将比常规方式降低 1.1~4.3MPa。其中 520MW 以下负荷运行时,四阀全开方式主汽压比原定值低 3MPa 以上。

主汽压降低时,在锅炉燃烧状况不变情况下,主蒸汽温度更容易提升。就本机组实际情况而言,在原本主汽温已能达到设计值的情况下,这一特性会使过热器减温水量增加,对机组运行经济性会产生负面影响。另一方面,主汽压降低而主汽温不变情况下,主汽焓上升使得高压缸排汽温度相应上升,再热蒸汽需要的吸热量减少,有利于提升再热汽温。正好解决了 #4 炉再热汽温偏低低于设计值的问题,从而提高循环热效率。根据制造厂提供的修正曲线将这两不同方向的影响情况计算后列于表 3。由该表可见,降低主汽压运行后,因过热器减温水量增加引起的热耗率上升和因再热汽温升高而降低的热耗率,两者程度基本相当。因此,总体而言,降低主汽压运行在过热汽温和再热汽温这两环节上不会造成对机组运行经济性的明显影响。

表 3 各负荷工况四阀全开方式与常规单阀方式主汽压变化对经济性影响对比

		600MW	540 MW	480 MW	420 MW	360 MW
再热 汽温	常规单阀	520.6℃	529.7℃	528.8℃	537.1℃	530.5℃
	四阀全开	525.1℃	538.7℃	534.1℃	535.3℃	537.5℃
	发电热耗差	-0.11%	-0.22%	-0.13%	0.04%	-0.18%
过热器 减温水	常规单阀	15.1t/h	47.3 t/h	40.3 t/h	111.9 t/h	85.1 t/h
	四阀全开	63.8 t/h	115.5 t/h	93.7 t/h	129.5 t/h	124.0 t/h
	发电热耗差	0.11%	0.18%	0.15%	0.06%	0.15%
两项影响总和		0.00%	-0.04%	0.02%	0.10%	-0.03%

此外,降低主汽压运行时,因高压缸排汽温度相对提高,使得高压缸通流部件沿蒸汽流动方向热应力有所减少。与常规滑压运行方式相比,四阀全开方式高压缸排汽温度明显提高,除 600MW 工况因主汽压降低相对较少,高排温度仅上升 4℃外,540MW 及以下负荷均提高 10℃以上。因此,采取降低主汽压的

经济运行方式,对机组调峰运行安全性将产生有利影响。

5.5 单阀调节状态下机组经济运行方式的实现

由于机组在日常协调控制方式下无法直接调节高压调门开度,因此可以通过设定主汽压来间接控制高压调门,从而实现经济运行。附图 2 给出了四阀全开滑压运行方式主汽压与负荷的关系,参考该曲线进行主汽压设定即可达到高压调门最大开度的经济运行状态。

实际应用时,因经济运行状态下汽机无法通过增加高压调门开度参与加负荷,升负荷只能通过锅炉增加燃料量来实现,升负荷速度将受到较大限制。因此,为满足机组正常调峰时升负荷速率的要求,需适当提高主汽压设定值,减小高压调门开度。同时,为避免单阀经济运行状态下高压调门在最大开度运行时,因工况不稳定或参数波动较大造成高压调门在 55%以上开度大幅晃动,影响机组安全运行,也需要适当关小高压调门。因此,实施机组经济运行时,滑压曲线应在附图 2 四阀全开曲线基础上向左平移一些。建议参考正常运行时负荷波动幅度和升负荷速率来确定曲线左移量。

5.6 加热器运行状况

加热器的运行状况通常以加热器上、下端差和进出水温升来评价。上端差偏大意味着加热器出水温度偏低,将使高一级加热器抽汽量增加,而下端差偏大将增加本级加热器抽汽量,这两种情况均会减少汽机做功,对经济性造成不利影响。表 4 是机组满负荷工况高、低加实际运行与设计状况对比情况,其中实际值是满负荷 3 个工况的平均值。表 4 数据显示,满负荷工况下所有高、低加上端差和 #2 高加、#8 低加下端差均低于或接近设计值,仅 #1、#3 高加和 #5、#6 低加下端差超过设计值 0.8℃~4.7℃,因超差

表 4 满负荷工况高、低加实际运行与设计状况对比 (单位:℃)

		#1 高加	#2 高加	#3 高加	#5 低加	#6 低加	#7 低加	#8 低加
上端差	设计值	-1.67	0	0	2.78	2.78	2.78	2.78
	实际值	-2.48	-0.85	-2.14	1.44	2.76	1.03	-
	偏差	-0.81	-0.85	-2.14	-1.34	-0.02	-1.65	-
下端差	设计值	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56
	实际值	6.33	4.91	7.99	10.26	7.17	-	5.30
	偏差	0.77	-0.65	2.43	4.70	1.61	-	-0.26
进出水 温 升	设计值	31.4	42.9	30.9	26.4	16.9		51.7
	实际值	35.9	41.6	32.7	31.4	20.9		47.5
	偏差	4.5	-1.3	1.8	5.0	4.0		-4.2

较小,对机组运行经济性不会产生明显影响。因此,机组满负荷工况下高、低加总体运行情况良好。对于下端差相对偏大的#5低加,建议适当提高加热器运行水位,以进一步减小端差,提高机组运行经济性。

加热器进出水温升是另一个值得关注的性能参数,温升偏小同样会增加高一级加热器抽汽量,影响汽机做功。对于末级高加而言,出水温度偏低将使进入锅炉省煤器的给水温度偏低。参考ASME试验规程,给水温度降低1℃,机组发电热耗将上升0.043%,对于本机组影响煤耗约0.135g/kWh。从机组实际运行情况来看,满负荷工况3台高加和4台低加总温升均比设计值高5℃左右,且高、低加出水温度分别比设计值高7℃和5℃左右。因此,总体而言本机组高、低加进出水温升大于设计值,运行情况良好。

5.7 机组冷端运行情况

附图16是各负荷试验工况流经凝汽器的循环水温升和凝汽器端差与负荷关系。在300MW以上整个调峰范围内凝汽器端差均远超过设计值,端差最小的600MW工况仍比2.9℃的设计值大6℃以上。凝汽器端差是凝汽器运行的重要性能指标,通常用以判断凝汽器的换热性能和工作状况。作为新投产机组,凝汽器换热性能下降导致端差大幅上升的可能性较小。结合机组运行实际情况,试验在冬季进行,因凝汽器循环水进口温度远低于设计值,使得凝汽器真空明显高于设计值,为避免真空过高引起低压缸变形而导致机组轴系振动超标,影响机组安全运行,运行通过关小真空泵进口阀等手段对凝汽器真空进行了限制。由此可见,偏大的端差并不能直接反映凝汽器本身真实的换热性能。附表1数据和附图16中虚线显示,满负荷工况下流经凝汽器的循环水温升约9.3℃,低于9.6℃的设计值,表明满负荷工况循环水流量完全满足机组正常运行要求。而在低负

荷工况下低压缸排汽量下降,但循环水流量一般不作频繁调整,因此循环水温升更小。

宁海电厂机组循环水系统设计为扩大单元制系统,即两机之间设有循环水联络管道和阀门。2006年12月中、下旬分别进行了#1、#2机组和#3、#4机组3台循环泵供2台机组运行试验,试验成功后随即正式投入3泵供两机方式运行。本次试验各工况中,600MW负荷3个工况和300MW负荷主汽压居中的3个工况是在3泵两机试验前进行的,其余工况均在与#3机共用3台循环泵的状况下进行。从3泵两机试验情况来看,循环泵运行电流下降11A左右,两机组凝汽器循环水出口温度上升1℃左右,不至于对真空造成明显影响。因#4机满负荷工况凝汽器端差高达9℃以上,凝汽器循环水出口温度上升1℃后,端差仍比设计值大5℃。因此,在目前凝汽器换热情况良好前提下,存在进一步减少循环水量,降低厂用电率的潜力。根据试验期间实测数据,满负荷工况2台循环泵并列运行时,单台循环泵功耗在2670kW左右。而三泵两机时,循环泵功耗下降约260kW。以此计算,三泵两机运行两台机组可节省厂用电2930kW左右,折算成供电煤耗每台机组约可下降0.7g/kWh。由此可见,三泵两机方式运行对机组运行经济性带来了可观的有利影响。

参考文献

- [1] 《电站汽轮机热力性能试验验收规程》(GB8117-87)[S].
- [2] 美国机械工程师协会《汽轮机性能验收试验规程》(ASME PTC6-1996)[S].
- [3] 浙江国华宁海发电厂汽机、锅炉技术协议[S].

作者简介:杜劲松(1968-),高级技师,工程师,长期从事电厂运行技术管理,现任职于国华宁海电厂生技部,从事运行、可靠性、节能管理工作。

Circulating Efficiency Test of Domestic 600MW Units and Their Performance Optimization Analysis

Du Jinsong¹, Li Qiang¹, Bao Jinsong²

(1. Zhejiang Guohua Zheneng Power Generation Co., Ltd, Ningbo, Zhejiang, 315612, China;

2. Hangzhou Yineng Electric Power Technology Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang, 310014, China)

Abstract: In this paper, Ninghai Power Plant's #4 Turbo generator circulating efficiency and performance optimization tests are introduced, including the status and arrangements of the tests and testing results analysis. The data processing and calculation methods are briefly introduced. Combining the boiler efficiency test, the recycling thermal efficiency of coal consumption and power supply of the units is calculated. The units' economical operation mode under the state of single valve is proposed, which can provide reference for the units' shifting operation and their economical performance analysis.

Key words: 600MW unit; recycling efficiency; test analysis; performance optimization

(收稿日期: 2009-3-18 责任编辑: 郝广杰)

国华盘电俄制 500MW 超临界锅炉低 NO_x 燃烧调整

刘应文 高武军

(天津国华盘山发电有限责任公司, 天津 蓟县, 301900)

摘要: 国华盘山发电有限责任公司的锅炉是超临界、直流、一次中间再热、平衡通风的固态排渣煤粉炉, 配有 32 台涡壳式旋流燃烧器。针对这种锅炉如何通过燃烧调整控制环保指标(氮氧化物 NO_x)的关键点, 进行燃烧调整试验, 针对锅炉氧量、分级送风调整对炉内工况进行测量分析, 并根据试验提出了燃烧调整方案。

主题词: 超临界锅炉 燃烧调整 旋流燃烧器 氮氧化物

中图分类号: TM621.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0046-03

国华盘山发电有限责任公司锅炉为超临界、直流、一次中间再热、平衡通风的固态排渣煤粉炉。锅炉出口主蒸汽设计参数为 25.0MPa、545℃, 再热蒸汽设计参数为 3.92MPa、545℃, 锅炉最大连续蒸发量为 1650 t/h。由于锅炉为俄制机组, 技术落后, 设计上没有考虑 NO_x 排放指标要求, 因此在机组正常运行时 NO_x 排放超过天津市 450mg/m³ 标准, 如何通过燃烧调整来降低排放是摆在我们面前的主要问题。

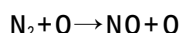
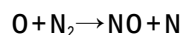
1 氮氧化物 NO_x 的生成机理

NO_x 主要指 NO 和 NO₂, 其次是 N₂O₃, N₂O, N₂O₄ 和 N₂O₅。在发电厂锅炉的煤粉燃烧过程中, NO_x 的形成途径主要有两条: 一是有机地结合在煤中的氮化物在高温火焰中发生热分解, 并进一步氧化而生成 NO_x; 二是供燃烧用的空气中的氮在高温状态与燃烧空气中的氧发生化合反应而生成 NO_x。在煤粉锅炉生成的 NO_x 中, 主要是 NO, 约占 95%, 而 NO₂ 仅占 5% 左右, N₂O₃、N₂O、N₂O₄ 和 N₂O₅ 的量很少。NO_x 的生成量与锅炉的容量、结构、燃烧设备、煤种、炉内温度水平和氧量、运行方式等有关。

煤燃烧过程中所生成的 NO_x 有 3 种类型, 即热力型 NO_x、燃料型 NO_x 和快速型 NO_x。

1.1 热力型 NO_x 的生成

热力型 NO_x 是燃烧空气中的氮在高温下氧化而成的。其生成机理是由前苏联科学家捷里道维其(Zeldovich)提出的, 按这一机理, 热力型 NO_x 的生成主要由以下链锁反应来描述:



热力型 NO_x 的生成速率满足 Arrhenius 定律, 可采用以下表达式:

$$\frac{d\{c(\text{NO})\}_{\text{mol/cm}^3}}{d\{t\}_s} = \frac{6 \times 10^{16} \{c(\text{O}_2)\}_{\text{mol/cm}^3}^{0.5} \{c(\text{N}_2)\}_{\text{mol/cm}^3}}{\{T\}_K^{0.5} e^{69090/\{T\}_K}}$$

式中: t —反应时间;

T —反应温度;

$c(\text{NO})$ —NO 的浓度;

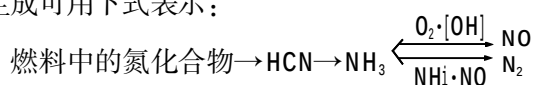
$c(\text{O}_2)$ —O₂ 的浓度;

$c(\text{N}_2)$ —N₂ 的浓度。

由上式可以看出, 影响热力型 NO_x 生成量的主要因素有燃烧反应的温度、氧气浓度和反应时间, 而且温度对热力型 NO_x 的生成影响最大。实际上在 1350℃ 以下, 热力型 NO_x 生成量很少, 但随着温度的上升, 热力型 NO_x 生成量迅速增加, 温度达 1600℃ 以上时, 热力型 NO_x 占 NO_x 生成总量的 25%~30%。

1.2 燃料型 NO_x 的生成

燃料型 NO_x 占煤粉锅炉 NO_x 生成总量的 70%~80%。一般认为, 燃料型 NO_x 是燃料中的氮化合物在燃烧过程中发生热分解, 并进一步氧化而生成的, 同时还存在 NO 的还原反应。燃料型 NO_x 的生成和还原机理相当复杂, 至今仍无法解析清楚。燃料型 NO_x 的生成可用下式表示:



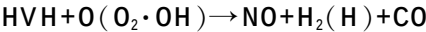
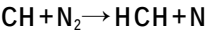
其中 NH_i 为未知氮氢化合物

燃料型 NO_x 的生成和还原不仅与煤种的特性、煤中氮化合物存在的状态、煤中的氮热分解时在挥

发分和焦炭中分配的比例和各自的成分有关,还与氧的浓度、燃烧温度相关,其中氧的浓度是可以通过调整控制的。

1.3 快速型 NO_x 的生成

快速型 NO_x 的生成是通过燃料产生的 CH 原子团撞击 N₂ 分子,生成 HCN 类化合物,再进一步氧化而生成的,这个反应很快,所以称为快速型 NO_x。快速型 NO_x 的生成可由以下式子表示:



温度对快速型 NO_x 的生成影响很小,与热力型和燃料型 NO_x 的生成量相比,快速型 NO_x 的生成量要少得多。

1.4 NO_x 生成量与火焰温度的关系

一般来说,热力型 NO_x、燃料型 NO_x 和快速型 NO_x 的生成量随火焰温度变化的规律,可以由图 1 定性描述。

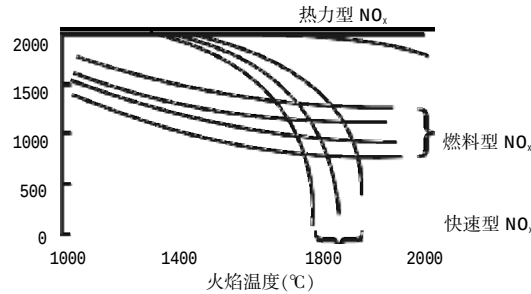


图 1 NO_x 生成量与火焰温度的关系

2 盘电锅炉现状

锅炉满负荷 500MW 运行时 6 套制粉系统投入,风烟系统自动运行,具体数据见表 1。

表 1 锅炉满负荷 500MW 运行时风烟系统自动运行数据

序号	项目	单位	数据
1	锅炉氧量	%	4.5
2	运行磨煤机二次风挡板开度	%	100
3	备用磨煤机二次风挡板开度	%	30
4	防焦风挡板 NG334 开度	%	100
5	一二次风比例调节挡板 NG310、NG410	%	40~50
6	锅炉效率	%	93.825
7	氮氧化物排放(NO _x)	mg/m ³	550~600
8	空预器入口烟温	℃	383
9	空预器出口烟温	℃	154
10	一次风压	Kpa	10.1
11	二次风压	Kpa	0.8
12	锅炉出口烟气温	℃	1200
13	一次风空预器(两分仓式)	台	2
14	二次风空预器(两分仓式)	台	2

3 调整应注意的关键点

- (1)二次风量表计显示不准确,不能反应现场实际工况。
- (2)锅炉在进行调整过程中对飞灰含碳量、大渣含碳量影响。
- (3) 如何控制氮氧化物排放与锅炉经济性的合理分配。
- (4)调整后对锅炉安全运行影响评估。
- (5)对锅炉转向室温度影响。

4 主要调整内容

针对上述 NO_x 的生成机理,我们主要针对影响较大热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 进行调整。

(1)锅炉防焦风 NG334(由锅炉一次风空预器出口引出的 320℃热风,从锅炉本体两侧 44.7m 吹入炉膛)调整,当机组负荷 450MW 及以上时保持 100%全开,当机组负荷降低后逐渐关小 NG334,在保持锅炉出口主再热汽温度情况下,维持最大开度,以提高炉膛出口还原风量,控制 NO_x 生成。

(2)二次风量调整,根据不同磨煤机对应的喷燃器进行二次风调整,运行磨煤机对应二次风挡板开度原方式保持 100%全开,没有起到风量调节作用,因此受到系统布置影响,造成管道阻力不均,从而影响喷燃器配风均匀性,使得锅炉燃烧工况不均匀。另外二次风全开造成主燃烧区氧量过剩,产生大量 NO_x。该公司通过关小二次风挡板提高二次风压,由 100%开度关小到 60%开度,备用制粉系统由 30%关小到 20%维持喷燃器冷却,使二次风挡板截流起到调节作用,将二次风均匀送到喷燃器,同时降低燃烧器二次风供给,以减少主燃烧区氧量,抑制 NO_x 生成。

(3)一二次风比例调节挡板 NG310、NG410 调整,由于锅炉防焦风取自一次风空预器出口,保持最大开度,因此会造成一次风空预器通风量增加,一次风空预器排烟温度降低,与二次风空预器排烟温度产生较大偏差,通过关小一、二次风比例调节挡板 NG310、NG410,来调节一、二次风空预器通风量平衡。

(4) 锅炉送风量调整,根据锅炉燃烧工况,降低锅炉送风量,由原来满负荷 500MW 氧量 4.5%,下调至 4.0%;450MW 氧量由 5.0%下调到 4.5%;在满

足燃烧条件下尽量减少送风量,控制燃料型 NO_x 的生成。

(5)由于锅炉燃烧工况调整,势必对锅炉各项参数造成影响,其中受炉膛出口烟气温度升高影响锅炉汽水参数变化明显,主要体现在主、再热汽温度,通过对锅炉煤水比、减温水、再热器汽汽换热器旁通调整能够满足机组运行要求。

(6)通过就地二次风旋流挡板调整使喷燃器扩散角度、着火点、在最佳范围,保持各燃烧器火焰有较好刚性,避免火焰回流、飞边、冲刷水冷壁。

(7)以上调整内容主要是通过锅炉配风降低锅炉主燃烧区温度,尽量拉长锅炉着火区域,使主燃烧区低氧燃烧,均衡锅炉燃烧室温度抑制热力型 NO_x、燃料型 NO_x 生成。

5 调整后效果

(1)调整后 500MW 工况下通过电科院对锅炉各项损失监测,均没有出现明显增大现象,锅炉飞灰含碳量较调整前有所增加,在线监测由 0.8% 升高到 1.8%,大渣含碳量没有明显增加,锅炉效率由 93.825% 下降到 93.629%,排烟 CO 含量明显增加达 538PPm,NO_x 排放下降到 400 mg/m³ 左右,达到天津市排放标准。

(2)由于二次风挡板的调整,使各喷燃器二次风量均匀配风,燃烧工况明显好转,锅炉转向室温度偏差明显减小,但目前受到二次风量显示不准限制,还不能做到精确调整,致使锅炉转向室温度还是存在偏差。

(3)机组 400MW、450MW 负荷调整后 NO_x 排放量在 430 mg/m³ 左右,能够达到标准。

(4)锅炉风量调整后引、送风机功率明显降低,对风机单耗影响明显。

(5)保持锅炉二次风挡板 60% 开度运行 10d,通过就地观察发现 2~4 层乙侧喷燃器水冷壁、后墙水冷壁出现颗粒状结焦,同时有黑烟,对锅炉炉膛出口进行测温发现炉膛出口温度有升高趋势,最高点达到 1280℃,说明主燃烧区煤粉缺氧燃烧,造成锅炉火焰中心上移。当恢复 100% 二次风挡板开度及原有氧量标准后,炉膛出口温度下降到 1200℃ 左右,喷燃器附近黑烟明显减小,结焦消失。因此,应通过对锅炉

配风的精细调整控制锅炉的结焦现象,与控制 NO_x 排放寻求一个均衡状态。

(6)机组带 500MW 试验数据见表 2。

表 2 机组带 500MW 试验数据

序号	项目	单位	数据	
			燃烧调整前	燃烧调整后
1	排烟含氧量	%	5.18	5.04
2	排烟 CO 含量	PPm	94	538
3	排烟温度	℃	151.7	155.6
4	送风机入口温度	℃	44	46.7
5	空气相对湿度	%	56.7	70.3
6	排烟热损失	%	5.546	5.552
7	可燃气未完全燃烧热损失	%	0.000	0.002
8	固体未完全燃烧热损失	%	0.202	0.388
9	锅炉散热损失	%	0.359	0.359
10	灰渣物理热损失	%	0.067	0.070
11	NO _x 排放	mg/m ³	550~600	400
12	锅炉效率	%	93.825	93.629

6 结论

(1)通过燃烧调整基本能够满足机组各项参数指标要求,但对锅炉结焦存在一定影响,炉膛出口温度偏高,长期维持此方式运行对锅炉安全、经济性影响有待进一步评估。

(2)结合控制锅炉低 NO_x 三级燃烧调整理论,该厂锅炉通过开大防焦风 NG334、关小二次风调节挡板、平衡空预器通风量、喷燃器内二次风调节、适当降低锅炉送风量就能够满足目前 NO_x 排放标准。

(3)通过对锅炉的燃烧调整发现,锅炉降低氧量运行是控制 NO_x 排放的主要手段,但要综合考虑降低氧量对经济性的影响,锅炉的 NO_x 污染物排放量最低时,锅炉效率不一定最高,所以在通过燃烧调整优化减少 NO_x 排放时要综合考虑,避免只追求低 NO_x 排放而降低锅炉的效率和安全性。

参考文献

- [1] 《国华盘山发电有限责任公司集控运行规程》[S].
- [2] 《华北电力科学研究院试验报告》[R].
- [3] 《网络技术论文》[C].

作者简介:刘应文(1976-),1997年毕业于北京电力高等专科学校,现任盘电公司发电部锅炉专业主管。

(下转第 82 页)

超超临界机组凝结水泵变频调节方案经济性分析

刘颖华 石 英

(神华国华(北京)电力研究院有限责任公司, 北京, 100025)

摘 要: 对超超临界 660MW 机组凝结水泵采用变频调节方式与节流调节方式进行技术经济比较分析。结果表明,对于配置 2 台 100%容量凝结水泵的方案,经常运行的一台采用变频器调节,另一台采用工频节流调节,可以大幅度降低厂用电率,减少发电成本。虽然初期投资较高,但由于其节能效果显著,可快速回收项目投资。

关键词: 凝结水泵 变频调节 经济分析

中图分类号: TM621.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-3880(2008)02-0049-04

1 前言

变频调速技术在电力系统的应用日益广泛,其卓越的调速性能、完善的保护功能、显著的节能效果和简单易行的自动调节特性成为企业节能降耗行之有效的有效的手段。

火电厂中给水泵、循环水泵和凝结水泵等耗电约占厂用电的 40%。而凝结水泵流量裕度大,变工况频繁,具有很大的节能潜力。但同传统的节流方式相比,有初投资高的问题,其总体的经济效益如何,本文将针对某工程 2×660MW 超超临界机组探讨凝结水泵的变频调节方案和相关技术经济分析。

2 变频器节能原理

根据电动机理论,异步感应电动机的转速 n 与电源频率 f 、转差率 s 、电机极对数 p 3 个参数有如下线性关系:

$$n = \frac{60f(1-s)}{p}$$

改变其中任何一个参数都可以实现转速的改变。变频器是通过改变电源频率 f 的方式来改变电动机转速的。在异步感应电动机的设计制造完成后,转速与频率的线性关系既确定,如图 1 所示。

由于转速 n 与频率 f 之间为线性关系,从理论上分析调速范围在 0%~100%内时,其线性度都很好,将高压变频器用于节能改造,可省去阀门节流等带来的功

率损失,从而达到节能的目的。

对于水泵,由流体动力学理论可以知道,流量与转速的一次方成正比,扬程与转速二次方成正比,而泵的功率则与转速的 3 次方成正比。用 n 、 H 、 N 分别表示转速、扬程和功率,下角标“0”均表示额定工况参数。当流量由额定值 Q_0 降至 Q 时,与额定功率 N_0 比较,采用转速调节的电机的功耗为:

$$N = \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 N_0$$

当流量由 100%降到 70%,则转速相应降到 70%,而电机的功耗降到 34.3% N_0 ,也就是节约电能 65.7%。扣除阀门调节时的功耗与额定功耗的差、转速下降引起电机的效率下降等因素,节电效果也是非常显著的。

3 凝结水泵调节方案比较

凝结水泵是汽轮机热力系统中的主要辅机设备之一,它的作用是把凝汽器中的凝结水输入低压加热器加热后送入除氧器内。该工程每台机组配 2 台 100%容量的凝结水泵,一台运行,一台备用。其参数如下:

(1) 电机参数

电机额定功率 2000kW,额定电压 6kV,额定转速 1490r/min,效率 94%,功率因数 0.913。

(2) 水泵参数

水泵扬程约 357.2m,流量 1657m³/h,转速 1490r/min。

3.1 节流方式

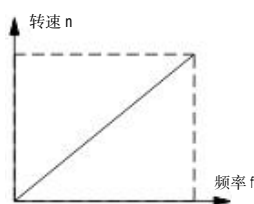


图1 转速与频率的线性关系

当前,凝结水泵常用的调节方式为节流方式,属非变速调节,通过关小泵出口管路上阀门或挡板的开度,使管路局部阻力损失增加,造成管路性能曲线变陡,进而改变工况调节流量。这种调节方式投资小,简单可靠,灵活方便。但凝结水泵能量损失大,经常处于非设计工况运行,凝结水水位较难控制,经济性差。

设计方案一为采用节流方式调节凝汽器内水位。调节方案示意图如图 2 所示。

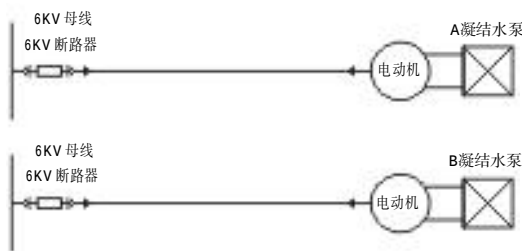


图 2 凝结水泵两台工频调节方案示意图

3.2 变频调节

采用异步电动机的变频调速,可以较好地控制系统性能,提高运行效率,减少了设备内部应力,延长电机寿命。泵的流量正比于转速,功率正比于转速的 3 次方。因此,在启动时,可通过控制频率来缓慢增加速度,实现无级调速,形成软启动,大大减少凝结水泵的工作电流,降低了启动功率,具有非常明显的节能效果,且可防止电流冲击和“水锤”现象,减少维护量,延长系统寿命。运行在非设计工况时,随转速的降低,其必须汽蚀余量与转速的平方成正比,这时将会大大降低必须汽蚀余量,减少泵内发生汽蚀的可能性,延长水泵寿命。

基于以上变频调速的优势,考虑设计方案二为对凝结水处理系统的 2 台 100%容量的凝结水泵,其中经常运行的一台采用变频器调节,另一台采用工频(节流)调节,以备变频器故障时投运。调节方案示意图如图 3 所示。

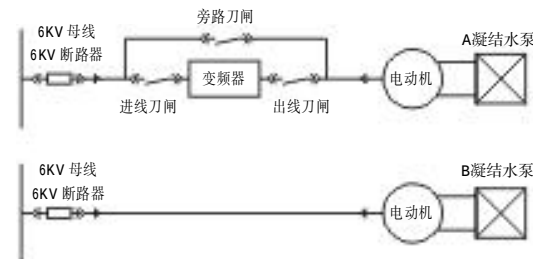


图 3 凝结水泵一台变频,一台工频调节方案示意图

4 两种调节方案的技术经济性分析

4.1 耗电量比较

凝结水泵节流调节时,随流量的变化,泵性能曲线不变,改变的是管路性能曲线,故泵在各个流量下的轴功率可由泵性能曲线查出。运用相似定律,由运行工况点的相似曲线及泵的性能曲线可求出流量、扬程和效率。耗电量比较时要以电网输出功率为基准计算,所用到的电机效率 η_d 按下式计算:

$$\eta_d = 1 - (1 - \eta_{dn}) \frac{1 + P_d / P_{dn}}{2 P_d / P_{dn}} \quad (1)$$

式中: η_d —异步电动机的额定效率;

P_d —电机的输出功率;

P_{dn} —异步电动机的额定功率。

凝结水泵在各流量对应工况下所消耗的电网输出功率(电耗)为:

$$P_B = P_d / \eta_d \quad (2)$$

利用式(1)和式(2)可计算出不同流量下凝结水泵所消耗的电网输出功率,见下表 1。

表 1 节流调节方式(方案一)不同工况时的电耗

机组负荷 (%)	泵流量 $Q_r(m^3 \cdot h^{-1})$	轴功率 $P_d(kW)$	电机效率 $\eta_d(\%)$	泵电耗 $P_B(kW)$
100	1657	1925	93.73	2053.83
75	1242.75	1726	93.35	1848.96
50	828.5	1430	92.59	1544.37

本文借鉴上海凯士比泵有限公司型号为 NLT500—570X5S 的凝结水泵的性能曲线进行计算。该型泵设计扬程 367m, 流量 1638m³/h, 转速 1490r/min。

凝结水泵进行变频调速时,同节流调节情况相反,泵管路性能曲线不变,泵的特性曲线发生变化。变频调速的优点在于能够适应各运行工况点除氧器所需凝结水压力,因此可使用热平衡图获取各运行工况点除氧器凝结水入口压力,加入沿程管路压降及各低压加热器固定压力损失,作为各运行工况点泵的要求扬程,再利用性能曲线得到各运行工况点的效率后,可用下式计算各点的轴功率:

$$P_d = \frac{\rho g Q_v H}{36000 \eta} \quad (3)$$

式中: ρ —水密度=995kg/m³;

g —重力加速度=9.8m/s²;

$Q_v H$ 和 η —凝结水泵各工况点的流量、扬程和效率。

$$P_B = \frac{P_d}{0.98\eta_V\eta_d} \quad (4)$$

式中: η_V —变频器的效率;可查变频器效率表,因为未确定变频器产品,这里简略估算为 96%;

η_d —电机效率;此处的电机效率取值节流调节方式算出的电机效率。

考虑到变频器输出非完全正弦波形及电机的降转速运行等因素,都会使电机效率有所降低,因此引入系数 0.98。计算结果见表 2。

表 2 变频调节方式(方案二)不同工况时的电耗

机组负荷 (%)	泵流量 $Q_r(m^3 \cdot h^{-1})$	扬程 $H(m)$	轴功率 $P_d(kW)$	电机效率 $\eta_d(\%)$	变频器效率 $\eta_V(\%)$	泵电耗 $P_B(kW)$
100	1657	237.06	1237.17	93.73	96	1402.99
75	1242.75	194.40	817.97	93.35	96	931.38
50	828.5	156.24	523.29	92.59	96	600.73

对比表 1 和表 2 可见,不论是在哪种工况下运行,凝结水泵的电耗都大大降低。

以上只是单位时间内的耗电量计算,并未涉及各种工况的运行时间,只有机组各种调节方式所有运行时间下耗电量的比较,才可以看出其真正节电情况。因此,将其全年运行时间加以考虑,各对应时间段乘以泵所消耗的相应电功率 P_B 即为该时间段的耗电量,结果见表 3。

表 3 不同工况时的耗电量比较

机组负荷 (%)	泵流量 $Q_r(m^3 \cdot h^{-1})$	年运行小时数(h)	利用小时数(h)	节流调节方式耗电量(万 kWh)	变频调节方式耗电量(万 kWh)
100	1657	2700	2700	554.53	378.80
75	1242.75	2000	1500	369.79	186.28
50	828.5	1200	600	185.32	72.09
总计		5900	4800	637.17	1109.64

由表 3 可见,采用变频调节方式耗电量较节流调节方式年耗电量减少 472.47 万 kWh,以电价取值 0.25 元/kWh 计,每年可节约约 118 万元。

4.2 经济性分析

以上是对两种调节方式的技术性分析,并没有考虑投资等情况,因而是不全面的。需增加对于初投资和运行费用等的考虑,才可以全面衡量其技术经济性。

(1) 年计算费用法

年计算费用法是一种静态分析法,它不考虑资金的时间价值,但资金的时间价值是客观存在的,它

表现为资金随时间的增值能力,即利率。由于不考虑时间价值,所以静态分析法的分析结果较为粗略,但仍然足以作为参考之一。

设各方案在基准投资回收期 P_c 内的总费用以 G_s 表示, I 为总投资, c 为年运行费用,则:

$$G_s = I + P_{cc} \quad (5)$$

将上式除以 P_c , 得到规定的抵偿年限内, 各方案每年的平均计算费用, 以 G 表示, 则得:

$$G = \frac{G_s}{P_c} = \frac{I}{P_c} + c \quad \text{万元/a} \quad (6)$$

在静态分析法中, 静态的年计算费用法可用于多个方案的比较, G 最小的为最经济方案。

在本文中, 总投资 I 对节流方式调节方案取值为 0, 变频调速设备安装的初投资, 取值为 250 万元, 投资回收期 P_c 定为 20a, 计算结果如表 4。

表 4 两种调节方案的耗电量年计算费用法比较

费 用	节流调节	变频调节
总投资 I (万元)	0	250
年耗电量(万 kWh)	1109.64	637.17
年运行费用(耗电电费) C (万元)	277.41	159.29
年计算费用 G (万元)	277.41	171.79

可见方案二经济性更好。

(2) 最小年费用法

最小年费用法是一种动态分析方法, 它在进行方案的技术经济分析时, 对在方案实施全过程中有关的所有的资金款项都考虑时间价值, 比静态分析法更符合实际情况, 更加合理。把技术方案从开始施工到结束年的所有投资, 用规定的年利率折算到基准年, 然后平均分摊到项目经济运行期的每一年, 再和年运行费用相加, 从而得到方案的年费用, 最后得到年费用最小的方案, 即所谓的最小年费用法。对于当年施工、当年投产的项目, 每年的运行费用相等时, 年费用的计算公式如下:

$$NF = K \frac{i(I+i)^n}{(I+i)^n - I} + C \quad (7)$$

式中: i —年利率, 取值为 0.05;

n —设备的经济运行年限, 取值为 20;

K —变频调速设备安装的初投资, 取值为 250 万元, 节流调节方式的初投资近似为零;

C —项目的年运行维护费用, 绝大部分是年使用电费, 其他维护费用相对很小, 电价取值为

0.25 元/kWh。

计算结果见表 5。

表 5 两种调节方案的耗电量年费用比较

费 用	节流调节方式	变频调节方式
初投资 K(万元)	0	250
年耗电量(万 kWh)	1109.64	637.17
年运行维修费用(耗电电费)(万元)	277.41	159.29
年费用 NF(万元)	277.41	179.35

由以上的计算可看出,尽管变频调速装置的初投资很大,但由于其节电能力大,变频调速所需耗电的费用大大低于节流调节时的费用。

4.3 实测数据比较

国内有部分 300MW、600MW 电厂实现了凝结水泵的变频改造,在实际运行后,公开发表了变频节能测试记录,可供参考。表 6 为某电厂 300MW 机组额定工况下水泵电机每小时耗电量。

表 6 凝结水泵电机工频、变频运行耗电量实测比较

负荷(MW)	工频运行(kWh)	变频运行(kWh)	绝对变化量(差值)
300	836.613	768.46	68.153
270	836.613	613.85	222.763
255	836.613	545.939	290.674
210	836.613	421.704	414.909
170	836.613	304.897	531.716

以年平均负荷定为 255MW,年平均运行小时数为 6000h 计,变频运行年节约厂用电为 1744044kWh,年节电率为 34.74%,按电价 0.25 元/kWh 计,可节约费用 43.6 万元。

其它实测也表明,采用凝结水泵变频调节方式可获得较大的经济效益。

5 结论

凝结水泵采用变频调节方式,可以大幅度降低厂用电率,减少发电成本,并且可以减少电机启动时的大电流冲击问题,延长设备寿命。通过技术经济比较,建议 660MW 超超临界机组凝结水泵配置采用上文分析的方案二,即配置 2 台 100%容量的凝结水泵,其中经常运行的 1 台采用变频器调节,另 1 台采用工频(节流)调节,以备变频器故障时投运。

参考文献

- [1] 惠毅,王邦群.火电厂凝结水泵各种调节方式耗电特性的计算方法[J].宁夏电力 1999 年 第 04 期
- [2] 曹乐敏,王玉彬.莱城电厂凝结水泵一拖二变频调速改造 山东电力技术[J].2004 年 第 01 期
- [3] 阎桂焕,顾昌.变频调速技术在电厂循环水系统优化运行中的应用[J].节能 2003 12-14.

作者简介:刘颖华(1969-),女,高级工程师,热能动力工程专业。现在国华电力工程技术中心从事设计技术管理和技术咨询工作。

The Economical Evaluation of Frequency Conversion of Condensate Pump of Ultra-supercritical Generating Units

Liu Yinhua, Shi Ying

(Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd, Beijing, 100025, China)

Abstract: An economical comparative analysis between the frequency conversion and flow regulation is carried out on the condensate pumps of ultra-supercritical 660MW units. The results show that for the allocation program of 2 100%-capacity condensate pump, adopting frequency conversion to one of the regularly running pump and flow regulation to the other one can greatly decrease the power consumption rate to reduce the cost of power generation. Although the initial investment is high, the energy saving effect is obvious and the project investment can be recovered in a short period.

Key words: condensation pump, frequency regulating, economical evaluation

(收稿日期: 2009-4-4 责任编辑: 郝广杰)

大秦铁路重载运输发展对朔黄铁路的启示

李晓建

(朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁, 062350)

摘要: 大秦铁路作为我国第一条重载铁路,在既有铁路重载扩能改造升级过程中,积累了丰富的经验,添补我国重载运输技术发展的空白。朔黄铁路作为西煤东运第二大通道重要组成部分,在未来几年在运量不断增加的情况下,要完成 3.5 亿 t 扩能改造,逐步掌握重载铁路运输技术,大秦铁路的经验值得借鉴。

关键词: 大秦铁路 重载运输技术 扩能改造 万吨列车

中图分类号: F532.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0053-04

大秦铁路作为运营铁路,既要完成增量任务又要兼顾重载试验,并实现同步重载扩能改造升级,这在世界铁路行业也不多见。大秦铁路重载运输发展过程中积累经验,对朔黄铁路公司未来 3.5 亿 t 重载运输扩能改造,具有良好的借鉴作用,现将笔者对大秦铁路发展的调研和思考作一探讨。

1 发展情况

1.1 基本概况

“九五”期间开工修建的大秦铁路,西起山西大同,东至河北秦皇岛,途经晋、冀、京、津四省市,全长 653km,是我国第一条双线自动闭塞电气化铁路运煤专线,是我国“三西”(山西、陕西、蒙西)煤炭外运的北通道。大秦线与京承、京秦、京山、迁曹等多条铁路干线接轨,地形复杂、山区多、桥隧多、站间距离长,重车线最大上坡为 4‰、最大下坡为 12‰(化稍营至涿鹿、延庆至茶坞两段),最小曲线半径为 400m,原设计 32 个车站、年运量 1 亿 t。2004 年、2005 年、2006 年,大秦线相继进行了 2 亿 t 扩能改造,改造后大秦线减少为 24 个车站,其中湖东、阳原、化稍营、涿鹿、延庆、茶坞、蓟县、遵化、迁安、后营、柳村 11 个站到发线有效长为 2800m,可接发 2 万 t 列车,其它车站到发线有效长 1700m,具备接发万吨列车的能力。与之配套的万吨列车装车站点 64 个,其中 2 万 t 装车站点 12 个。

1.2 发展过程

大秦线自 1988 年 12 月 28 日开通运营以来,运量从 1989 年的 2007 万 t 上升到 2007 年的 30380

万 t,计划 2010 年运量达到 4 亿 t。其重载运输发展过程可分为三个阶段:

第一阶段(1989-2002 年),缓慢发展期。这一阶段,主要开行 5000t 级货物列车。1989 年大秦线完成运量 2007 万 t,之后平均每年以 13.4%的速度递增,到 2001 年完成运量 9272 万 t,2002 年完成运量 10339 万 t,开通运营 14a 达到设计能力。这期间,煤炭市场疲软,煤炭需求不足也是影响其发展的重要原因。

第二阶段(2003-2007 年),快速发展期。这一阶段,主要开行万吨、2 万 t 列车。大秦线单元万吨列车从 1993 年试验到 2003 年大量开行,组合万吨列车从 2004 年 4 月试验至 6 月正式开行,2 万 t 组合列车从 2004 年 11 月试验至 2006 年 3 月开行,到目前,大秦线图定计划已没有低于 1 万 t 级的列车编组。大秦线 2003 年完成运量为 12369 万 t,2004 年为 15289 万 t,2005 年为 20300 万 t,2006 年为 25300 万 t,2007 年达到 30380 万 t,年平均递增 25.1%。这期间,国民经济发展迅速,煤炭需求剧增,铁路运能紧张,大环境有利于大秦铁路的发展。

第三阶段(2008-2010 年),向年运量 4 亿 t 目标冲刺。这一阶段,以开行 2 万 t、万吨列车为主,相应增加行车密度。大秦铁路 2008 年实际完成 34000 万 t,2010 年计划完成 4 亿 t。2008 年 4 亿 t 扩能改造已经启动,其中大秦线 4 亿 t 配套站场改造工程及北同蒲大新至韩家岭 2 万 t 重载扩能改造工程已开工建设。4 亿 t 扩能改造完成后,大秦线将有 6 座车站到发线有效长度可以满足 2 万 t 组合列车的会让要

求,其中两个车站(北辛堡、玉田北)重车线有效长度为 5600m。到 2009 年 2 万 t 列车将达到日开行 52 对,万吨列车 38 对;2010 年 2 万 t 列车将增加到日开行 56 对,日均通过 2 万、万吨重载列车将达 96 对,年运输能力可达 4 亿 t。

1.3 技术应用与创新

(1)强化运输组织,提高运输效率。一是加大装车组织力度,与大秦线配套建成万吨、2 万 t 装车站点 76 个,其中 2 万 t 12 个,解决了装车的瓶颈问题;二是加大列车开行密度,到 2008 年,大秦铁路日均通过重载列车 105 对,其中 2 万 t 列车日开行最高达 32 列,日完成运量 104.5 万 t;三是提高空车运行速度,大秦线空车(仅限 C70、C80 型车辆固定编组的列车)最高运行速度由 80km/h 提高到 90km/h,极大地压缩 C70、C80 型车辆的运行时间,可由原图定 15h 左右,压缩至 7h,车辆大秦线全周转时间,由平均 1.9 压缩至 1.3 左右,机车运用效率有了明显的提高;四是增加万吨列车开行对数,加强装、运、卸的点点对点运输组织,充分发挥大功率交流传动电力机车在 2 万 t 列车牵引中的优势,到 2009 年 2 万 t、万吨列车日开行数量将增加到 90 对、年运量 3.5 亿 t,2010 年 2 万 t、万吨列车日开行数量将达到 96 对、年运量 4 亿 t。

大秦铁路以较高的运行速度、较大的行车密度、严密有效的行车组织,实现了铁路重载运输新突破。

(2)利用 400K+800M 无线电台传输指令同步控制机车。在铁路综合数字移动通信系统 GSM-R 建成前,试用 400K+800M 无线电台传输指令同步控制机车,并成功用于大秦线 4×5000 吨重载组合列车,使通信传输距离由 450MHz 的 650m 提高到 800MHz 的 790m,进一步拓展了机车同步控制技术应用领域。

(3)利用铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)传输指令同步控制机车。在 GSM-R 建成后,实现了机车同步控制技术与铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)的结合,并成功应用于 2×10000 吨重载组合列车。把机车同步控制技术由过去的点到点通信传输,发展为系统网络通信传输,解决了机车间通信距离受限的关键问题,可使列车编组模式多样化。

(4)成功应用可控列尾技术,有效解决了 2 万 t “1+1”重载组合列车制动时,因排风时间长造成的前堵后拥制动不同步的难题。

(5)使用国内首创的 120-1 制动阀和中间牵引

杆等重载车辆及重载配套技术,使列车纵向冲击力减少了 35%。

(6)重车线换铺 75kg/m U75V 无缝线路,采用大号道岔,换铺 III 型砟枕,延长了钢轨大修期,提高了线路通过能力。

(7)大量推广使用新技术新设备。行车调度指挥,采用了分散自律控制调度集中系统(CTC),其模式分为中心控制、分散控制和车站控制三种控制方式,将列车运行和调车作业都通过调度中心集中控制;电务专业,采用了 ZPW-2000A 型无绝缘移频自动闭塞、GSM-R 移动通信及通信监视、监测系统;供电专业,采用了适应重载列车运行要求的接触网架设技术、供电远动系统及综合自动保护装置;车辆专业,使用了新型“5T”信息管理系统、铁路货车信息管理系统(HMIS)和车号自动识别系统(AEI)。大量新技术新设备的开发利用,提高了大秦铁路的技术装备水平。

2 有待解决的问题

2.1 长大列车动力特性和不同工况运行的内力变化规律需要进一步探索

从目前大秦线开行重载列车的实际情况看,单元万吨列车和组合万吨列车牵引车辆数最多为 120 辆,2 万 t 列车牵引车辆数最多为 210 辆。运行中暴露出多起列车分离、挂钩、脱线等安全事故,桥梁摆动幅度也明显加大。不难看出,长大列车动力特性和不同运行工况内力变化规律,还没有被完全认识,需要进一步研究和探索。这将有助于重载铁路新线设计、既有线加固和养护、机车车辆制造与维修等技术标准的制定和水平的提高。

2.2 同步操控系统指令的安全传达和延时需要解决

开行组合万吨列车的关键技术之一是实现机车同步操控。机车同步控制的关键是指令传输的可靠性和及时性,它关系着组合重载列车的运行安全。从大秦线重载运输的实际情况看,无论是 400K+800M 无线电台点到点通讯传输,还是铁路综合数字移动通信系统网络传输(GSM-R),其实际运行中的通讯中断、同步控制指令延时长等问题时有发生,尤其是长大下坡道制动时,由于空气传输速度的问题,两个因素叠加时会产生“前堵后拥”的情况,导致了多起行车事故,加大了安全隐患。

2.3 线路技术条件需要提高

世界重载铁路技术发展很快,轴重普遍在 27t 以上,最大轴重已达 45t,单列牵引总重最高达到 7 万 t。世界上发达国家,以货运为主的重载铁路均把大轴重、低自重、低动力和低成本作为发展方向,其行车速度和行车密度并不高。我国重载铁路的特点是重载、高速、高密度,这对线路技术条件的要求会大大提高。目前大秦线线路暴露出以下问题:

(1)钢轨磨损快,更新周期短。目前,大秦线重车线均为 75kg 无缝钢轨,在曲线半径 800m 以上地段钢轨更新期为 3a,曲线半径 600m 以下地段钢轨更新期为 1a,随着运量的增加钢轨的更新期还会缩短。2009 年,计划更新部分 U77MnCr 钢轨,以提高钢轨的抗磨损强度。

(2)钢轨断裂,锚固螺栓剪断,橡胶垫板压溃、挤出等隐患不能消除。目前,重车线钢轨伤损多,小半径曲线地段更为严重,为确保行车安全,工务车间(工队)均配备了探伤班组,探伤周期由过去的 30d 缩短为一周。探伤任务重、安全隐患多。

(3)桥梁激振加大,出现横隔板断裂、梁体裂纹超限、墩台裂损、梁端顶死、支座倾斜急需加固处理。

(4)桥涵加载图式已改变,结构强度和健康状况需要检测和评估。

2.4 重载运输标准体系需要建立和完善

目前,大秦线图定计划已没有低于 1 万 t 的列车编组。相关的行车作业标准及办法,仍沿用铁道部《行规》执行。目前尚无万吨、2 万 t 重载运输的作业标准和办法。急需研究制定重载运输标准体系。

2.5 综合维修天窗少,天窗时间短,导致固定设备欠修

2008 年大秦线日均通过重载列车 104 对,列车间隔时间 14min,每周下达 90min 维修天窗 1 次,固定设备实行故障修。由于综合维修天窗少、时间短,导致固定设备维修欠账,设备折旧非常严重,存在较大安全隐患。

3 经验和教训及对朔黄铁路的启示

3.1 扩能改造是基础

朔黄铁路 3.5 亿 t 扩能改造,是神华集团进一步开发煤炭资源,完善“煤、电、路、港、油五位一体”发展模式的重要一环,对加快“三西”煤炭基地开发,促进西部经济发展,强化国民经济基础设施,完善“西煤东运”第二大通道,提高通道整体运输效率

和效益有着重要意义和作用。大秦铁路重载运输发展的经验和教训,对朔黄铁路重载运输的发展和即将开始的 3.5 亿 t 扩能改造,有很好的借鉴作用,能使公司少走弯路,节省投入,提高效率,发挥投资最大效益。

朔黄线与神朔线一起构成我国西煤东运的第二大通道,根据朔黄线现有技术条件,车站到发线有效长 1050m,牵引质量 5676t,追踪间隔 8min 考虑,区间极限输送能力为 1.8 亿 t/a,而目前朔黄线货运量已达 1.34 亿 t/a,能力利用率已达 74%。按照近年朔黄线运量增长速度,运输能力基本已处于饱和状态,仅通过缩短追踪时间,提高运输能力的空间已经很有限,开行万吨列车、2 万 t 重载列车,将成为大幅提高运输能力的必然选择。从美国、加拿大、澳大利亚、南非等重载运输发达国家的经验看,大轴重、大牵引质量是提高铁路货物运输能力的有效途径。

3.2 重载技术是关键

重载铁路运输是一项综合性的系统工程,牵涉到铁路设计、施工、运营与养护维修的全过程。我国重载铁路技术体系尚不完备,还没有形成系统的重载运输成套技术,在万吨列车同步操作、无线网络通信、列车动力学、轮轨关系、牵引供电、重载铁路养护维修、路基和桥梁检测与强化、运输行车组织等多学科、多专业有很多新课题需要解决。为此,《铁路科技发展“十一五”规划》把重载铁路技术列为了开展自主创新的四个主要领域之一。虽然发达国家重载运输技术比较成熟,但并不完全适合我国的国情与路情。朔黄铁路必须结合自己的实际情况,引进消化吸收再创新,解决公司在重载铁路运输发展过程中遇到的技术难题和具有前瞻性的关键技术,为朔黄线开行万 t 列车做技术储备。

2008 年,朔黄铁路公司与中南大学、铁三院共同完成了国家高技术研究发展计划(863 计划)现代交通领域重大交通基础设施核心技术“重载铁路桥梁和路基检测与强化技术”专题课题项目申报,通过专家网评、专家会议评审和答辩,最终承担了这一课题的研究工作,将为公司发展大轴重重载技术提高有力支撑和研究平台。

针对重载铁路桥梁和路基病害突出,缺乏有效的检测与强化技术的问题,通过“重载铁路桥梁和路基检测与强化技术”课题研究,提出我国重载运输条件下铁路桥梁和路基的静动力性能检测技术、桥梁

结构实时监测技术、道床与路基状态连续检测技术,并建立桥梁和路基状态的评估指标体系,最终形成重载运输条件下桥梁和路基运行中快速加固以及维修技术,制定并开发我国重载铁路桥梁和路基检测评价指标及强化技术,以大幅度提高既有重载铁路桥梁和路基承载能力,保证重载铁路运营安全。

这几年,从大秦线、朔黄线等既有重载铁路的运行情况看,已经出现了桥梁横隔板断裂、梁体裂纹、墩台裂损、梁端顶死、支座倾斜、涵洞裂损、涵洞变形以及桥涵过渡段路基下沉、区间路堤和路堑地段下沉、路肩宽度不足、基床翻浆冒泥及道床板结、排水不良等多种类型病害。朔黄铁路 3.5 亿 t 扩能改造后重载运输将向大轴重、大牵引质量发展,既有铁路桥梁和路基的使用条件将更加恶化,桥梁和路基病害产生的几率将进一步加大。通过“重载铁路桥梁和路基检测与强化技术”课题的研究实施,将解决既有重载铁路结构强度安全储备下降、各种病害出现的几率加大、危害性加剧等运输生产中出现的重大技术难题,提高公司工务及相关专业的技术水平,还要以此为契机,在朔黄线 3.5 亿 t 扩能改造的同时,加大技术创新和科技成果转化力度,走产学研相结合的技术路线,系统研究开发适合朔黄铁路的万 t 列车同步操作技术、无线网络通信技术、重载铁路牵引供电技术,以及适合大轴重、大牵引质量列车运行的重载铁路养护维修技术,并结合朔黄铁路的运营管理模式,充分吸收国铁调度指挥信息化的经验,建设具有朔黄铁路特点的行车调度指挥系统,最大限

度地提高行车运输组织效率,使机务专业、通信专业、电务专业、供电专业、车务专业的技术水平有本质的提升。

3.3 持续创新是保障

在未来几年,扎实推进“重载铁路桥梁和路基检测与强化技术研究”、“朔黄铁路轮轨材质及匹配性研究”、“重载列车动态监控系统(ZLDS)研制”、“预防弓网故障机车受电弓无线视频检测系统”、“朔黄铁路通信网综合维护管理系统”、“重载铁路综合运输信息系统建设”等国家和铁道部及神华集团科研项目,将“朔黄铁路桥梁振动控制技术”、“牵引变电所电器设备在线监测技术”、“列车风管贯通检测安全保护装置”、“朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统”等科技成果及时转化为现实生产力,用技术进步提升朔黄铁路的技术水平,用科技创新推动朔黄铁路重载运输的发展。

参考文献

- [1] 《2007 年全国铁路统计年鉴》[R].
- [2] 王家驹.大秦铁路扩能关键技术及对策分析[J].中国科技信息.2002,(19)
- [3] 胡志.大秦线 2 万吨重载列车运输组织模式分析[C].西南交大交通运输工程.2005
- [4] 丁志庭.关于大秦铁路开行 2 万吨重载列车的探讨[C].中国铁道学会 2004 年优秀论文集.2005

作者简介:李晓建(1955-),工程硕士,高级工程师,朔黄铁路发展有限责任公司副总工程师。

The Enlightenment of Daqin Railway's Heavy-haul Transportation Development on Shuohuang Railway

Li Xiaojian

(Shuohuang Railway Development Co., Ltd Suning County, Hebei Province 062350, China)

Abstract: In the process of capacity expansion and upgrading of Daqin Railway, China's first heavy-haul railway, a wealth of experience is accumulated to fill the blank in the technology development of China's heavy-haul transportation. As an important component of the second channel for the coal transportation from west China to east China, Shuohuang Railway will complete the transportation capacity expansion of 350 million tons under the conditions of increasing traffic in the next few years. To gradually master the heavy-haul railway transportation technology, the experience of Datong-Qinhuangdao Railway's reform is worth learning from.

Key words: Datong-Qinhuangdao railway, heavy-haul transportation technology, transportation capacity expansion, 10,000-ton train

(收稿日期:2009-3-17 责任编辑:贺烨真)

神华集团铁路运输信息化建设研究

李 巍 杨 侃

(神华包神铁路有限责任公司, 内蒙古 包头市, 014014)

摘 要: 拥有神朔、朔黄、包神、大准、黄万等五条总运营里程为 1367km、运能为 415 百万 t 的自有铁路线,拥有 2.43 万辆载重车辆的神华集团铁路运输系统,面对蓬勃发展的信息化浪潮,该如何应对呢?本文就是针对神华集团铁路运输系统的信息化建设现状及其面临的形势与问题,对其信息化建设现状进行了深入地分析、研究。提出了神华集团铁路运输系统的信息化建设的方向和道路。指出了神华集团铁路运输系统的信息化建设必将从自动化、网络化逐步走向集成化,进而发展为现代物流业下的电子商务,这一必由之路。并以此为思路,探讨了神华集团铁路运输系统信息化建设的对策和步骤。

关键词: 神华集团 铁路运输 信息化建设 电子商务

中图分类号: F532.6 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0057-05

1 国内外铁路运输信息化发展

国外铁路自 20 世纪 60 年代始就已经将计算机运用于铁路运输生产和管理中,经过多年的努力,形成了比较完善的运输管理信息系统,如美国南太平洋铁路公司的综合运营管理信息系统(TOPS)。加拿大国营铁路公司的铁路运输报告及管理系统(TRACTS),日本国铁研制的新干线综合调度指挥系统(COSMOS)等等。近几年来,随着计算机与通信技术的进步,特别是因特网技术的出现以及经营管理理念的发展,国际上又提出了铁路智能运输系统的概念。内容涉及综合运营管理、列车运行自动控制、多式联运以及紧急救助、安全监控等方面。

我国铁路的信息化建设起步较晚,经过 30 多年的发展,铁路信息化覆盖运输安全、运输组织、技术装备、客货营销、经营管理等各个方面。目前,全路信息技术从业人员总数已达 5500 多人,拥有大、中、小型计算机 1600 余台,微型计算机近 10 万台,建立了覆盖铁道部、铁路局和主要站段的计算机网络及传输网、交换网、数据通信网三大通信基础网,先后在不同的领域开发了一大批应用信息系统,实现了从传统管理向现代化管理的跨越。从 1998 年至 2004 年铁道部科技研究开发计划中与铁路信息化有关的 146 项目中来看(参见表 1、图 1、图 2),可以得出二个结论:(1)国内外铁路运输的信息化建设,已经从运输组织、经营管理、运输营销等三大基础信息领域

表 1 1998~2004 年铁道部科技研究开发计划信息技术立项总体情况

类别	通信网络	信息系统	信息共享	信息安全	信息政策
年度					
1998	1	4	0	1	0
1999	6	4	0	1	0
2000	9	15	1	1	0
2001	12	12	5	2	0
2002	8	20	3	0	1
2003	8	19	2	2	1
2004	0	0	0	0	8
合计	44	74	11	7	10

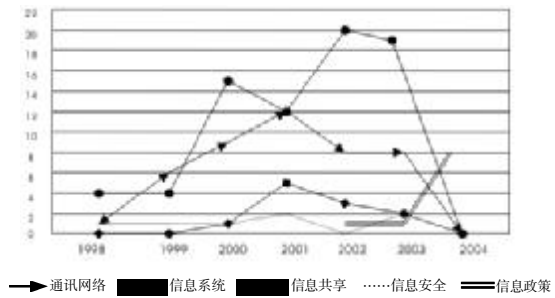


图 1 1998~2004 年铁道部科技研究开发计划信息技术立项折线图

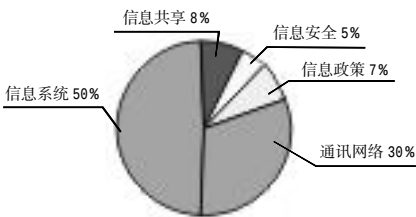


图 2 1998~2004 年铁道部科技研究开发计划信息技术立项结构化饼图
(以上资料来源:李学伟,汪晓霞,《中国铁路信息资源理论基础》,2004 年, p212)

逐步走向集成化,智能化。(2)经过了大规模的信息基础建设和集成,信息系统的建设从注重解决实际应用领域,逐步转化到研究和制定信息化战略、政策和标准的轨道上来。

为此,如何制定出一套科学、合理的信息化建设发展规划和统一的标准规范,对各种铁路运输组织的信息化建设至关重要。

2 神华集团铁路运输系统信息化现状及存在的主要问题

2.1 神华集团铁路运输系统信息化现状

神华总部 2003 年实施了以煤、电、路、港、销售各环节为中心的综合调度管理信息系统(该系统包括生产动态监测子系统和调度报表子系统),能及时掌握煤炭生产、铁路运输、电厂发电、港口吞吐、接卸运行及安全生产情况,实现了对主要生产矿井、铁路运输、车皮、港口接卸、船期、堆场存煤等信息的实时监控。在日常办公管理方面,都不同程度地建成了相应的办公自动化系统(OA)和视频会议系统等。在经营管理领域:建成和投入使用的有财务系统、资产管理系统等。在各铁路子、分公司在运输组织、经营管理、运输营销等领域都先后建立起了各自的应用信息系统(详见表 2)。

2.2 信息网络现状:

神华集团数字传输网络(见图 3)是以自建的 SDH155M、SDH622M、SDH2.5G 光纤传输系统为主,以租用公网数字电路为辅,形成了以神华集团总部(神华大厦)——神东煤炭分公司(大柳塔)——包神铁路公司(包头)——神朔铁路分公司(神木北)——朔黄铁路公司(肃宁北)——黄骅港务公司(黄骅港)为核心的传输骨干网络,各生产单位都建立起了良好的内部网络,形成了覆盖全集团公司的信息传输网络。

2.3 存在的主要问题

(1)与不断发展壮大的神华铁路运输体系建设相比,信息化管理手段、管理技术相对滞后。主要表现在:一是现有的管理信息系统与铁路行业相比,还有较大的差距;二是已建成的信息系统,各自为政、互不相通,无法享有信息系统的集成和信息共享。

(2)信息化建设没有一个科学、统一的发展规划和总体设计作指导,缺乏统一的技术标准。内部各子、分公司的信息化建设标准不一,缺乏协调统

表 2 神华集团铁路运输系统信息化建设现状统计表

单位	神华总部	包神铁路	神朔铁路	朔黄铁路	大准铁路	货车公司
现在车系统		√	√	□	□	
货运管理系统		□	√	□	□	
确报管理系统		√	√	□	□	
18点统计系统		√	√	□	□	√(主要是货车追踪管理)
货票系统	□	√	√	□	○	
车号自动识别系统	□	√	√	□	□	
查询统计系统	□	√	√	□	□	
列车追踪管理系统	□					
机务、车辆管理系统		○				
综合调度系统	√	√	√	□	□	
行车安全辅助系统		○	○	○	○	○
工务、施工管理信息系统		○		□		
其他辅助安全管理系统(现场视频监控等系统)	□	○				
财务管理系统	√	√	√	√	√	
办公自动化系统(OA)	√	√	√			
计划分析、预测决策系统	○					○
人事、劳资管理系统		○				
其他日常办公管理系统		○				
客户管理系统						
结算系统	○					
营销系统						

注:①√:已完成 □:设计实施中 ○:含有相关功能模块 空白:没有或不详或不涉及相关内容;②行车安全辅助系统主要包括:车辆安全防范和预警系统(5T)及列车运行状态查询系统、计算机联锁控制系统、计算机化的自动闭塞系统等。

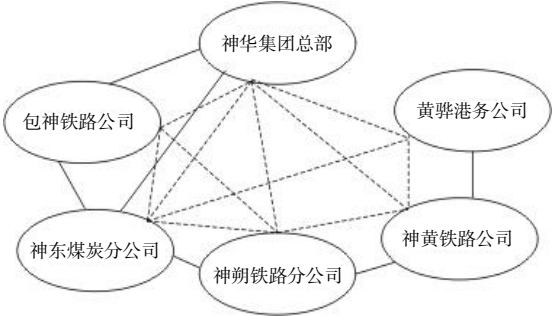


图 3 神华集团传输骨干网示意图

一。信息化建设没有“方向感”。

(3)信息系统的建设过度关注铁路体系内部,缺乏生产供应、市场营销层面的内容,造成只注重于运输链条内部指挥、管理,忽视生产因素和市场因素。

3 现代物流业是神华集团铁路运输系统发展的必然趋势

以煤、电、路、港、油五位一体的神华集团,铁路组成了神华的“生命线”,也成为神华集团的核心竞争的重要组成部分。其神朔和朔黄铁路是我国最大的西煤东送主干线之一。截至 2007 年 6 月 30 日,神朔和朔黄的年运力分别达到 14000 万 t 和 15000 万 t,包神和大准的年运力分别达到 2000 万 t 和 4500 万 t,黄万年运力达 3750 万 t。同时,拥有约 2.43 万辆载重车辆。相对其他企业的运输系统来讲,进驻现代物流业的门槛较低,具有“先天”的优势。

从“软件”上来看,一是有国家政策的大力支持。国家和地方政府高度重视现代物流业的发展,相继出台了许多相关的物流发展政策。二是物流市场需求旺盛。2004 年,我国社会物流总额达 38.4 万亿元。2005 年,达到 48 万亿元,同比增长 25.4%。预计到 2010 年,仅第三方物流占物流市场的比重将达到 23%。三是具有较好的信息化网络优势。四是具有一定的信息化基础。五是神华铁路运输网服务覆盖面不断扩大。正从东部沿海向西部逐渐延伸、扩张。六是弥补自身“缺陷”的需要。神华煤运输占神华铁路运输的比例非常高。特别是神朔、朔黄、黄万三条铁路线的比例都达到了 97% 以上。一旦煤炭产业链上的任何“风吹草动”,都会极大的影响神华集团铁路运输系统的效益。七是国内外已经都有很多大型企业或物料运输部门转换为专业物流公司的成功前鉴。如马士基集团(MAERSK)、美国总统轮船(APL)、RYDER 系统公司、中外运、中外代、中铁、中远、中海等都是由航运、铁路或企业的运输服务系统(部门)转型为专业物流公司的。2006 年我国物流服务行业的前 20 名,大都是由专业运输企业或大型企业的运输系统而转型。仅中铁名下的就占 3 家。“中铁”品牌就是我国铁路系统依靠自身运输优势,而打造的专业物流公司。

当然,神华集团铁路运输系统向物流业的转变,将会是一个比较缓慢的过程。原因在于,目前我国还是处于经济增长阶段,目前国家用能结构,耗能比例不会在短期内调整到位。煤炭需求的绝对数量,仍可能持续增长。我国仍将保持一段大工业化生产的“惯性”。使得神华集团铁路运输系统在目前情况下仍没有满足神华煤炭企业本身的运量需求。随着神华集

团铁路运输系统的规模扩大、运能不断增加,国家能源消费合理调整的进度不断深化,也许用不了几年,神华集团铁路运输系统的运力就有出现“运力过剩”的现象。到那时再向现代物流业调整转变,是否已晚呢?现在的金融危机,能否看出端倪呢?

4 神华集团铁路运输信息化建设的对策与步骤

与目前整个神华集团的紧抓产、销“两头”,“再造一个神华”的发展思路看,神华集团铁路运输系统走向现代物流业,必须经历以下几个过程。相应的信息化建设,也需要经历如下的过程,来适应其发展的需要。(参见图 4)

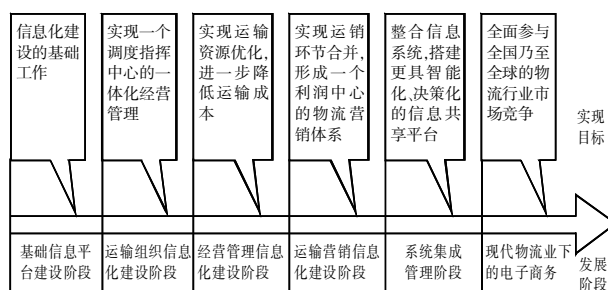


图 4 神华集团铁路运输系统信息化建设进程图

一是实现调度指挥的集中统一。基于神华产运销体系供应链环节,从运输组织入手,以采取总部集权式调度指挥,实行业务垂直管理。实际就是按照一体化经营管理模式(只有一个调度中心,其他都是操作点)的原则规划、设计信息系统。这也符合现代物流一个统一的指挥中心、多个操作中心的运作模式。突出有效的控制这一特点。为此,需要加大基础信息平台建设力度及生产组织方面的信息化建设力度。就是要积极建立完善网络基础平台、信息共享平台、公用基础信息平台、信息安全保障平台和运输服务门户五类平台。在此基础上,积极建立和完善运输组织方面的信息化建设。主要包括生产管理信息系统、综合调度系统、运输安全保障系统等三大类信息化建设。

二是在实现第一阶段任务的基础上,进一步降低运行成本。就是充分利用好计算机信息系统这一有效工具,在系统内部的经营管理方面大做文章,在日常办公管理、财务计划管理、人力资源管理、材料成本管理方面利用信息手段,挖潜提效,实现内部管理、运行成本最低化。具体就是要建立和完善财务管理系统(包括成本、固资、材料等内容的管理信息

系统)、办公自动化(OA)、计划、分析、决策系统、人事劳资管理系统及其他日常办公系统等。

三是与神华集团铁路运输长远发展相结合,实现系统内部一个利润中心的目的。以发展的观点来看待神华集团,将现有的运输、营销体系合二为一。即将产运销体系中的运销 2 环节合并,建立起以铁路、港口为基本运输形式,实现与生产、产品相对立的物流营销体系。在分别实现第一阶段一个指挥中、第二个阶段降低经营成本的基础上,实现一个利润中心。这样的好处就是将生产的下游环节合并起来,创建一个直接面向市场的层面,将除生产以外的各种环节和各种决策紧密联系起来,对外(集团以外)形成一个作业系统,避免了各环节、部门各自为政,都强调自己是利润中心的弊病,实现了降低成本与最大利润的有效结合的目的。所以从事运输物流、承担全程服务时,只能有一个利润中心,其他各(分)子公司、机构、部门都是成本中心。一切以整体利益为导向,一切为利润中心服务,一切以利润中心的最大利益为自己的利益。同时对外大大增强了核心竞争力。此阶段信息化建设的重点就是客户管理系统、结算系统、营销系统(主要是货运营销系统及部分客运营销系统。长久来看,还有集装箱营销系统、行包营销系统等)、市场分析、决策系统等。

四是系统集成。整合现有的信息系统,将可利用的资源有效地组织起来。消除信息交换和共享困难,搭建更广泛、更高效的信息共享平台,通过深度的数据挖掘,发挥好现有信息系统的协同效益,实现信息系统的整体效益最大化。

五是逐步走向现代物流的电子商务—这一必由之路。就是在解决好前几步信息化建设的基础上,建立和完善用户导航系统、商务门户网站、运输服务产品电子商务和物资网上采购平台等,逐步实现为煤炭销售的提供第一方物流服务,逐渐转变为为煤炭、矿物、粮食、其他货物运输、集装箱运输、行包运输提供第三方物流服务的企业。

5 现代物流下的电子商务展望

现代物流企业开展电子商务,并且取得成功,应具备以下几个条件(见表 3)。

由表 3 可以看出,神华集团铁路运输系统完全具备这些条件。而其电子商务将是以神华铁路运输系统作为电子商务的主体参与电子商务活动,参与

表 3 电子商务条件表

成功电子商务的条件		是否满足	备 注
政府的推动与支持		√	
企业 信息化	企业内部的局域网要有一定水平	√	
	实现 InterNet 和 IntraNet 的改造升级	√	
银行电子化、 金融电子化 (满足网上支 付与结算)	商业电子化和金融电子化所需的基础设施完备	√	通过近几年的努力,我国银行电子化、金融电子化正不断完善
	现电子货币流通,如 IC 卡等	√	
完备的网络 设施	广域网的建设,国内要有大面积的广域网	√	
标准规范和政策法规		√	我国在研究国际先进经验的同时,结合中国国情,在立法方面进行了积极有益的探索,初步制定了一套有中国特色的电子商务法规。并且正逐步完善。

注: √ 为满足条件

市场(国际、国内)竞争,应用电子商务的方式来实现经营目标,也就是神华铁路运输系统以应用电子商务的方式来提高整个“运输链条”信息化水平的过程。应用电子商务,最直接的目的是实现网上销售和网上服务,把企业的信息流、商流、资金流和服务的相关资源与功能整合到网上,构筑企业电子商务应用平台,形成一个电子商务系统。为此,首先要建立一个统一规范的神华集团铁路运输系统信息共享平台,实现已有信息系统间、已有信息系统与新建系统间、已有信息系统与外部信息系统(公路、水运、航空)间的信息共享,并且要建立统一的神华集团铁路运输系统基础空间数据库,利用空间数据来整合个运输环节信息资源,加强不同业务信息系统的资源共享和互联互通,为电子商务提供有效、实时和准确的数据。其次,开展电子商务,还要加快建设电子商务交易平台建设。需要建立电子商务门户网站及相关的电子商务应用系统,建立门户网站与神华集团铁路运输系统内部信息系统的接口,为客户提供多样化的接入手段,实现 Internet、电话、移动通信和数字电视等多种接入,提供方便、快捷和实用的商务服务,拓展延伸服务与增值服务,实现客货营销的社会化。例如客户可以通过手机短信实现货物发送和资金支付、本企业物资的网上采购等。第三,还要实现安全认证与网络资金支付。最后,开展电子商务活动中急需解决的

是人才和知识问题。

6 结论

神华集团铁路运输系统的信息化建设必将是一条紧密围绕物流市场,更加灵活高效、更加智能化的电子商务之路。必将在提高运输能力,优化运力资源配置、提高运输安全保障、提升科学决策水平等方面带来更大的竞争优势。也需要考虑信息化建设要与优化的运输组织指挥方式、运输管理体制、运营模式相协调的问题、电子商务与业务流程重组的关系、信息系统的安全问题、人才队伍建设、信息体系的维护和信息化管理制度建设等问题。

当然,任何企业的信息化建设都不会一蹴而就、一步到位的。都需要一个全面、系统、科学的调查研究过程,也需要有一套科学合理的规划、设计。信息化建设会随着社会、经济、技术、市场等的不断发展变化、企业自身的各个发展阶段而有不同的侧重和特点,还需要在今后的实践中不断研究、摸索和完善。

参考文献

- [1] 严建援.信息时代的管理信息系统(第四版)[M].机械工业出版社,2004年
- [2] 姜旭平.信息系统开发方法[M].清华大学出版社,1997年

- [3] 毕庶伟.管理信息系统分析与设计[M].机械工业出版社,1992年
- [4] 岳剑波.信息管理基础[M].清华大学出版社,1999年
- [5] 蒋翠清.铁路电子商务应用现状及战略规划研究[J].经济物流,2005/4
- [6] 马纵江.广州宝供储运公司物流方案介绍[J].计算机世界,1998(43)
- [7] 许红.我国铁路信息化建设现状及发展规划[J].综合运输,2006/8-9
- [8] 符向东.传统物流企业向第三方物流转化的途径[J].中国物资流通,2001(17)
- [9] 马钧培.中国铁路信息化建设与展望[J].交通运输系统工程与信息,2005/10
- [10] 耿雪霏.铁路运输向现代物流发展的分析与对策[J].物流科技,2005/28
- [11] 汪晓霞.实现铁路跨越式发展的信息化重点任务研究[J].中国铁路,2003.12
- [12] 孙远远.TMIS 总体架构设计研究[J].铁路计算机应用,2005/7
- [13] 李学伟.中国铁路信息化进程研究[J].中国铁路,2005/1
- [14] 李振福.交通运输融入现代物流的E推模式[J].现代物流,2004/8
- [15] 叶怀珍.交通运输与现代物流[J].交通运输系统工程与信息,2001/1
- [16] 姚仁革.企业现代物流信息系统应用的分析与探讨[J].物流科技,2005/10
- [17] 中国神华网站 <http://www.shenhua.com>
- [18] 石炳坤.运筹“网络”之中调度千里之外——铁道部运输调度指挥管理信息系统建设展望[J].互联网周刊 <http://www.netweek.com.cn>

作者简介:李巍(1971-),工商管理学硕士,高级工程师,神华包神铁路公司科技信息部副经理。

A Study on the Informationalized Construction of Railway Transportation of Shenhua Group

Li Wei, Yang Kun

(Baotou-Shenmu Railway Company of Shenhua Group, Baotou City, Inner Mongolia, 014014, China)

Abstract: Owning five railways of Shen-Shuo, Shuo-Huang, Bao-Shen, Da-Zhun and Huang-Wan with a total operating mileage of 1367 kilometers and transporting capacity of 415 million tons as well as 24,300 heavy-duty vehicles, how should Shenhua Group respond to the vigorous tide of informatization? In this paper, in-depth analysis and research are carried out towards the current informatization state of Shenhua Group's railway transportation system to point out that Shenhua Group's informatization of the railway transportation system is bound to develop from automation, network-based to integration, and finally to e-commerce of modern logistics industry.

Key words: Shenhua Group; railway transportation; informatization construction; e-commerce

(收稿日期: 2009-3-31 责任编辑: 贺焯真)

朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统的研究与探讨

陈海滨 张智善 王建华

(朔黄铁路发展有限责任公司, 河北省 肃宁县, 062350)

摘要: 朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统针对SS4B型电力机车、铁路运输组织、车站作业特点分别建立机车牵引、行车组织、车站接发车作业过程的数学模型与仿真模型,按照分布式计算机仿真系统的结构与原理,结合机车控制原理、列车动力学、列车运输组织与管理、列车运行安全规则等专业知识,借助计算机网络、数据采集与控制、数据库、多媒体等计算机软硬件技术,构筑了与朔黄铁路运输业务高度一致的现代化职业技能培训系统。

关键词: 朔黄铁路运输 综合仿真 培训系统

中图分类号: F532.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0062-06

朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统是朔黄铁路发展有限责任公司与西南交通大学共同研制的多层次铁路运输职业人员综合培训系统。它以高性能的全功能列车驾驶模拟器为依托,与车站作业仿真培训系统和列车调度运行指挥仿真系统协调运行,能实现朔黄铁路主体运输作业过程的仿真,这在国内不仅是开创性地提出列车、行调、车站三位一体联合培训的先进理念,也成功实践了三位一体的整体联合培训。系统地成功研制为朔黄铁路职业培训提供了更加丰富的培训内容和更为先进的培训手段。

1 系统研制的背景

朔黄铁路是国家“九五”、“十五”重点建设工程,是我国西煤东运第二大通道的重要组成部分。自2000年5月18日临管运营以来,运量逐年跨越式增长,连续保持年运量增加千万吨的速度,年运量已经突破1亿t大关,效益连创新高。朔黄铁路运能日益扩张的需求要求朔黄铁路不断提高运营效率和运输管理水平,因此,如何采取有效方法训练从业人员不断改进作业技能、挖掘运输生产潜能,如何对朔黄铁路运营从业人员进行系统的培训成为了朔黄铁路公司提高运输生产能力的当务之急。

进入20世纪90年以来,随着高速铁路和城市轨道交通的迅速发展,列车驾驶模拟器技术获得较快发展。目前,国际上普遍采用分布式交互仿真技术、计算机图像生成(Computer Generate Image,简称CGI)技术、数字音频技术、多自由度运动仿真等技术

构建具有高度真实感的虚拟列车驾驶环境。系统技术先进、安全性好、功能完备、逼真度高,在轨道交通发达国家成为列车司机及维护、维修人员技能培训的必备手段。同时也出现了应用于调度指挥作业培训用的列车运行调度指挥模拟系统,应用于车站作业培训用的车站作业仿真培训系统,并在干线铁路、城市轻轨和城市地铁等轨道交通运输中得到应用。澳大利亚、美国、法国、德国、英国、日本和中国香港地区的轨道运输部门还利用轨道交通综合培训系统对司机、调度人员、车站值班员进行业务技能考核,从业人员只有通过模拟培训系统的考核才能获得上岗资格,对已上岗人员每年定期进行技能巩固培训。

鉴于朔黄铁路公司承担的运输业务具有全面负责朔黄铁路涉及的列车运行调度、车站作业和列车运行全过程的特点,可以将从业人员的职业技能培训与实际工作的特点紧密结合起来,将调度作业、车站作业、机车作业三方业务结合起来进行综合培训,更好地体现“源于国铁,优于国铁”指导思想。为此,朔黄铁路公司提出了研制“朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统”的设想,希望将列车运行调度、车站作业、列车运行三方面从业人员的职业技能培训工作有机地联系起来,构筑与朔黄铁路运输业务相一致的高科技职业技能培训系统,全面提高朔黄铁路公司从业人员的业务素质,确保朔黄铁路具有长期的竞争优势。

2 系统的基本组成

朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统用于培训朔黄铁路的机车司机、运行调度指挥人员及车站作业人员,按照系统的功能可以在结构上分为 3 个部分:机车业务部分、列车调度运行指挥部分、车站作业部分,这 3 个部分彼此都能独立运行,也可以根据需要进行联合同时进行综合训练。按照此思路,整个系统由全功能列车驾驶模拟器、车站作业仿真培训系统和列车调度运行指挥仿真系统组成,从形式上构成了铁路运输过程的三角关系,见图 1 朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统总方案。该系统借鉴分布式交互仿真技术的先进思想,采用构成方式灵活,具有高度可靠性、可扩展性的分布式体系结构来实现。

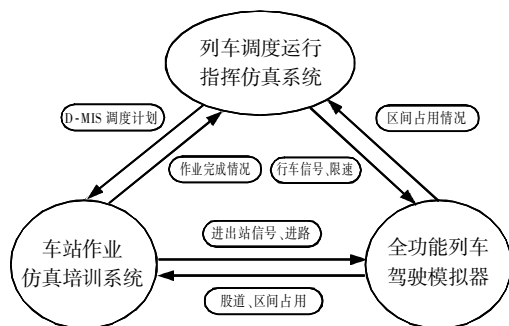


图 1 朔黄铁路运输综合(仿真)培训系统总方案

全功能列车驾驶模拟器为学员司机提供与实际机车高度一致的驾驶环境,包括建立完全封闭的司机驾驶舱、完全一致的司机操纵台、提供与真实一致的沿线路的图象视景,仿真实际运行中的各类声音音效、机车车体运动效果,仿真 SS4B 机车控制逻辑、SS4B 牵引/制动特性、空气制动特性,在模型及软件中使用完全一致的线路断面、线路信号道岔等设施。

车站作业仿真培训系统和列车调度运行指挥仿真系统通过对全线的站场线路设备、信号设备、线路上行驶或停放的列车进行仿真,对每一个设备建立了一个设备对象,并以每个设备间的相互关系组织起来,每一个设备对象都按其他设备、连线方式对本设备的影响和自身的特性运作,实时向系统发布自身的运行状态。

这 3 个大系统之间通过 100Mbps 快速以太网网络互相连接,采用的通讯协议为 TCP/IP 网络协议。系统中采用 IP 组播与单播通讯相结合的方式,最大限度地降低了网络通信的强度,以确保满足通信的实时性要求。各个系统功能相对独立,既可以离线工作,亦可以在需要的时候实现通讯,系统彼此之间可

以利用此网络方便地实现数据的交换与实时通信。同时在体系结构上也很方便进行扩展。在系统能够满足扩展要求的同时,不会引起系统性能的下降,具有良好的可扩展性。

3 全功能列车驾驶模拟器的研究

全功能列车驾驶模拟器是计算机仿真、虚拟现实、信息技术、列车动力学、列车控制理论等相关领域理论、技术相结合的产物,是一种人在回路的大型仿真系统。朔黄铁路全功能列车驾驶模拟器采用计算机图像生成方式的多通道视景生成系统、数字光学处理技术的视景显示系统、多自由度电动运动系统、多声道数字立体声技术、计算机网络技术、分布式交互仿真技术,通过对朔黄铁路 SS4B 列车的性能、运行环境以及信号系统的实时数字仿真,全面、真实地模拟列车在各种运行环境与工况下的运行状况、操纵特性、牵引/制动特性以及其它特性,并能够从视觉、听觉、体感、触觉等方面为受训司机逼真地再现列车在不同情况下的运行状况,在具有高度沉浸感的列车虚拟驾驶环境中实现列车乘务员的驾驶培训与考核等功能。

3.1 全功能列车驾驶模拟器的系统组成

全功能列车驾驶模拟器由若干硬件设备及若干个软件子系统组合而成,硬件设备应该包括:SS4B 操纵台、司机驾驶舱、多通道投影系统。多声道音响系统,六自由度运动平台,教员控制台,观摩区投影计算机。司机舱安放在运动平台上方,机车运行时整个驾驶舱随运动平台一起运动,司机能体会到运动的效果。司机舱内前方安装多通道板块拼接形成的宽水平幅度的投影屏幕,在舱内适当位置安放 3 个投影仪把视景图像投射到投影屏幕,这样司机前方逼真的沿线图像就显示出来了。在司机位置周围驾驶舱前后左右布置多个喇叭播放机车运行的各类声音效果,营造逼真的三维环绕音效。其软件系统应该包括:主控制软件,运动控制软件,声音仿真软件,视景控制软件,视景线路模型、输入输出采样软件,观摩系统软件,机车电路故障软件等。主控制软件是模拟器系统中最核心的软件,教员可以通过它来设置不同课程,修改运行参数,控制训练过程,查看训练后数据,监视司机操纵,观看列车运行各类仪表参数,观看列车力的动态变化等。运动控制软件控制运动平台的动作效果,可以集成在主控软件中。声音仿

真软件利用数字声音技术来控制多声道声音的播放。视景控制软件控制多通道视景的显示,调度视景线路模型,表现天气变化,突发事件时视景特效,以及控制多通道视景的同步等。输入输出采样软件采集机车各类手柄开关等输入设备的数据,输出数据控制各类仪表,指示灯等输出设备的变化。观摩系统软件为观摩学员提供实时的机车运行状态画面,机车电路故障软件全面模拟机车实际电路流程并可以在其上任意设置故障点考验司机排故障能力。所有软件都放在各自的计算机中,这些计算机都通过以太网连接在一起,互相之间通过 TCP/IP 协议进行网络数据传递,彼此通讯。全功能模拟器是由以上的硬件设备和软件系统集成在一起形成的一套复杂系统,整套系统必须要协调一致,确保实时性、协调性、逼真度,让司机具有很强的沉浸感。同时全功能模拟器也可以与车站作业仿真培训系统和列车调度运行指挥仿真系统连接在一起进行训练,模拟器根据车站给出的进出站信号、排出的进路行车,同时把股道区间占用信息传递给车站作业仿真培训系统。区间占用情况同样传递给调度运行指挥仿真系统,接收从调度运行指挥仿真系统传递过来的行车信号、限速等信息。可将朔黄铁路全功能列车驾驶模拟器分为模拟驾驶系统、教学观摩系统、教员监控系统以及设备系统 4 个部分,如下图 2 所示。

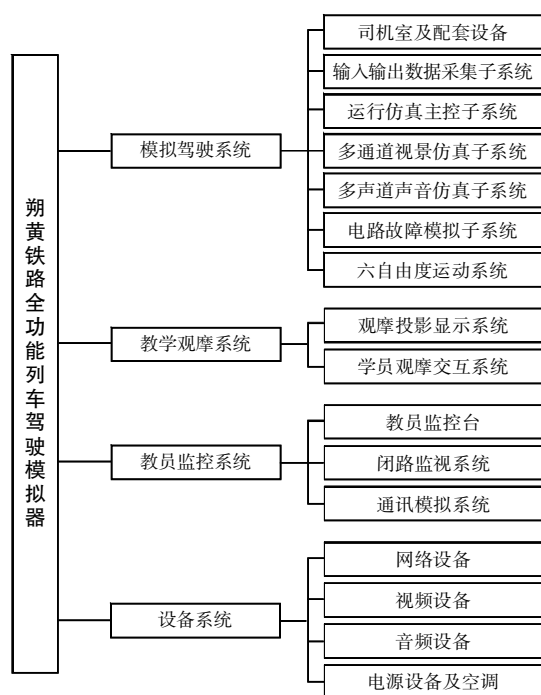


图 2 全功能列车驾驶模拟器的结构示意图

3.2 全功能列车驾驶模拟器的软件系统

全功能列车驾驶模拟器软件体系采用分布式结构实现,通过快速以太网把各个软件子系统连接在一起,各子系统之间的信息交换均通过网络传输实现,采用 TCP/IP 网络协议进行彼此之间的通讯,整个系统结构简单、可拓展性极强。

3.2.1 主控子系统

它是全功能模拟器软件体系中最核心的软件,负责核心业务计算并管理整个模拟器软件系统。一个主控子系统涵盖了一台 SS4B 机车本身的功能仿真,在主控子系统中包含有列车牵引计算模拟、列车动力学计算、列车控制逻辑特性模拟、列车牵引/电制特性模拟、列车空气制动模拟、列车编组模拟等功能。

3.2.2 输入输出数据采样子系统

对司机的所有操纵动作进行实时采集和设备管理,管理对象涉及各类按钮、旋钮、琴键开关、司控器、指示灯、信号机等各类开关量和电表、压力传感器、取样电阻等模拟量设备,完成车载运行记录器的控制,模拟实现车载微机屏的显示、监控功能。

3.2.3 多通道视景仿真子系统

由左通道、中通道、右通道 3 个通道的视景图形拼接成宽视角的前方铁路线场景,包含钢轨、轨枕、道碴、道岔、信号机、接触网、电杆及沿线的房子、树木、人物等丰富视觉信息,以司机室司机位作为视点,构建出逼真的朔黄铁路三维场景,多通道视景仿真子系统根据主控子系统传递过来的速度、位置信息同步驱动三通道视景沿线路的运动。

3.2.4 多声道声音仿真子系统

采用数字化声音仿真技术,模拟 SS4B 机车在朔黄线路上运行时司机的听觉,包括鸣笛、劈相机、压缩机、电弧声机轨道声、道岔声、过桥梁、过隧道等各类声音。通过构建在司机周围的 5.1 声道扬声器系统把声音播放出来,实现对列车运行环境声音的模拟,营造真实的听觉环境。

3.2.5 运动仿真子系统

根据主控子系统设计出来的列车的动力学数据,模拟列车运行动感效果,模拟纵向、横向、垂向位移及侧滚、点头、摇摆 6 个自由度的冲动、振动、持续加速度及其给人体的感觉。

3.2.6 电路故障排除模拟子系统

建立电路逻辑控制数学模型,全面模拟 SS4B 电

力机车的所有电路,包括主电路、控制电路、辅助电路,不但可以模拟电路系统在正常工作状态下的状态,也可以模拟故障发生后的电路状态。

3.2.7 学员观摩子系统

由于全功能模拟器一次只能由一人进行操纵训练,为了提高培训效率,其他的学员可以以观摩的形式进行学习,学员可以通过观摩软件观看机车运行状态,观看和聆听列车在线路上的运行条件、参数、工况、操作开关、手柄位置及仪表状态、机械动作声音等信息,并可相互交流学习。

3.2.8 教员监控子系统

实现对各个子系统的实时在线监视、对各个子系统运行程序的退出、重启、系统重启及关闭等控制功能;观摩投影画面的切换控制,CCTV 监视参数的改变控制。

3.2.9 CCTV 子系统

通过安装在模拟器司机室内的低照度摄像头的图像采集信号,使教员能够观察模拟器司机室内的情况以及受训司机在操作及故障处理过程中的表现。

4 车站作业仿真培训系统的研究

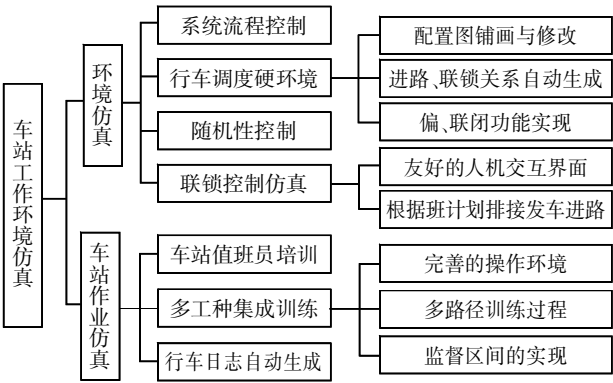
车站作业仿真系统是将通信技术、数据库技术、多媒体技术、软件工程技术、网络技术和计算机处理等先进的技术手段,结合当前仿真技术的最新发展,建立起的在铁路运输车站作业范围内的全方位、多层次和多工种协同工作的虚拟仿真和实验环境。

4.1 车站作业仿真培训系统的功能

车站作业仿真系统主要功能是营造一个与现实铁路车站系统在本质上具有一致性的虚拟培训和实验环境。仿真系统通过友好的图形化人一机交互界面,为操作人员在系统运行中实时地制定有关计划,调整列车运行状态提供有力的支撑;通过相关车站区间配置图为车站值班员监督列车运行提供界面,实现同质、相似条件下的仿真运行。如图 3 为车站作业仿真功能示意图,它包括车站作业环境的仿真和作业内容的仿真两方面的内容。

4.2 车站作业仿真培训系统的系统组成

本次开发的车站作业仿真培训系统,要求适用于朔黄铁路各种类型(大、中、小)的车站作业培训。其基本配置包括:车站值班员模拟控制子系统、信号员模拟操作子系统、助理值班员(外勤)虚拟作业子系统及教员监控系统。



4.2.1 信号联锁模拟控制系统

车站作业仿真培训系统提供与朔黄铁路(典型车站)的信号控制系统一致的信号员操作界面,具体实现形式分为两种——实物信号控制台与软件模拟的信号控制台。采用实物信号控制台或仿制的信号控制台,使受训学员对实际操作环境有深刻的感性认识。同时,为了使信号联锁模拟控制系统具有通用性,还提供计算机软件仿真的、通过鼠标操作的信号控制台,在其上能够进行朔黄铁路全线所有车站的信号控制模拟演练。

4.2.2 值班员模拟控制系统

车站作业仿真培训系统应提供与朔黄铁路车站值班员控制系统一致的操作设备及界面,能够进行当前车站值班员与相邻车站值班员的呼叫通讯模拟。可以模拟 TDCS 提供的列车运行计划信息的显示、通告与更新,要求配置模拟的无线电台、对讲设备、电话、TDCS、车站电气集中复示显示器等设备。

4.2.3 助理值班员虚拟作业系统

营造一个可使受训学员完成接、发列车作业过程的虚拟站场,使学员可以观察到站场内各类设备、车列的状态,为受训学员提供判断与决策的站场信息,实现助理值班员作业过程规范化培训。该系统能够提供图形化手段进行人工引导列车进出站作业的模拟培训。

4.2.4 教员监控系统

让教员在符合一定培训规则的前提下,按照自己的培训思想或培训大纲设计的培训课程进行培训。教员可以通过教员监控系统干预培训过程,为受训人员设置突发事件、非正常现象、设备故障等通常状态下不能模拟或难以模拟的现象,训练受训人员处理异常情况的能力。

4.2.5 稳压电源及停电保护

配备稳压电源及在线式不间断电源 (UPS); 在外部电力供应中断的情况下可提供至少 10min 以上 (满负荷情况下) 的不间断备用电力供应, 以保护系统安全关闭。

5 列车调度运行指挥仿真培训系统

列车调度仿真系统是将通信技术、数据库技术、多媒体技术、软件工程技术、网络技术和计算机处理等先进的技术手段, 结合当前仿真技术的最新发展, 综合运用于整个铁路运输行车调度体系中, 建立起的在铁路运输调度范围内的全方位、多层次、多部门和多工种协同工作的虚拟仿真调度培训和实验环境。

列车调度仿真系统的整个流程是输入、输出及中间执行过程的一个多要素组合。如图 4 列车调度运行指挥仿真培训系统的基本原理示意图。

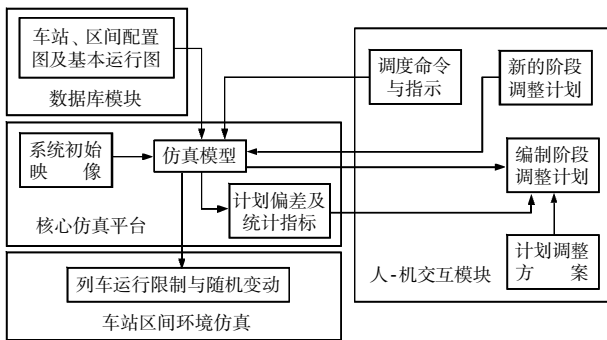


图 4 列车调度运行指挥仿真培训系统基本原理示意图

其中仿真模型是整个系统的关键, 在仿真实验过程中要实现对调度员工作环境的仿真, 必须创造在相似性原理基础上的虚拟软硬件支撑平台, 实现各种方式下的调度监督和调度集中。系统围绕计划的编制、修改、调整、下达和实现来组织各子系统的内部结构和功能, 建立一个在可视化条件下的实时仿真体系, 从最初的车站、区间配置图的绘制到图形化计划操作界面的实现都能以多媒体方式来表现。系统的输入是系统运行的基础数据, 系统通过收集各种原始信息和实时仿真信息辅助调度员制定实时的列车调度调整计划; 系统中间处理过程是针对列车调度计划和列车实际运行情况之间的偏差以及各相关状态进行合理的随机性调整过程; 在仿真运行的最后, 实现系统仿真的目的, 同时输出仿真所得的各种指标和图表。

5.1 列车调度运行指挥仿真培训系统的主要功能

铁路列车调度仿真系统主要功能是营造一个与现实铁路调度系统在本质上具有一致性的虚拟培训和实验环境, 将机、车、工、电、辆等与行车有关的各部门、各工种间的联系、协调配合关系融合到以调度为核心的仿真系统中, 最终实现完成一个铁路调度全方位、全过程的现代化铁路调度仿真系统。如图 5 为列车调度运行指挥仿真培训系统的仿真功能示意图, 它也是包括了环境仿真和作业内容仿真两方面的内容。

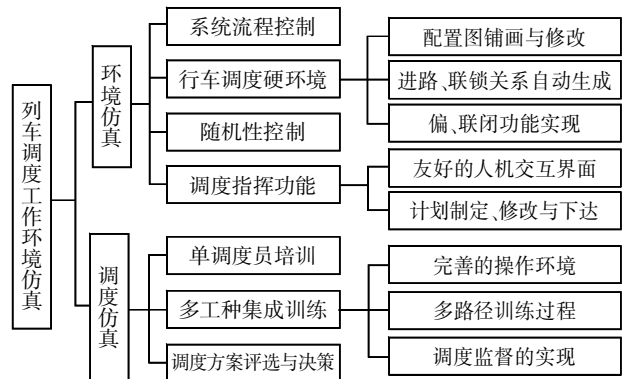


图 5 列车调度运行指挥仿真培训系统仿真功能示意图

5.2 列车调度运行指挥仿真培训系统的系统组成

调度实现功能主要包括调度监督、行车指挥自动化、车站终端功能 3 个方面。3 个方面结合在一起, 就能实现行车调度作业仿真的主要内容。

5.2.1 虚拟车站系统

模拟软件系统对全线的站场线路设备进行仿真、对信号设备进行仿真、对线路上行驶或停放的列车进行仿真, 对每一个设备建立了一个设备对象, 并以每个设备间的相互关系组织起来, 按设备相互间的影响和自身的特性运作, 实时向系统发布自身的运行状态。列车自动控制系统收到设备消息后以与实际系统完全一致的方式通过界面, 显示给相关操作人员。

5.2.2 虚拟列车系统

虚拟列车按运行图要求、受系统控制、按信号自动行车, 通过虚拟列车与系统间的通讯, 系统可实时得到全线各个列车运行的各项参数。

5.2.3 列车监控系统

系统得到的列车运行参数又用于显示和提供给系统使用, 并通过系统影响列车的自动运行。系统通过运行图得到列车的目的地, 并根据列车位置计算出所需的进路, 并通过联锁系统验证后发布。联锁系

统通过联锁运算,控制虚拟站场上的道岔信号设备,建立进路。通过对一些运行参数的修改,可以自动或人工调整列车运行。

5.2.4 教员监控系统

教员可实时设定或预先在课程中设定设备故障、线路故障、列车故障、供电故障、系统故障等一系列故障,同时设备或列车工作在故障状态,教员可实时或预先在课程中恢复发生故障的设备或列车。

5.2.5 数据中心

系统软件通过对数据中心的访问操作,提供与实际系统完全一致的数据服务及报表管理、报警及日志管理、运行图分类管理、运行图编辑、计划修改、统计处理等一系列工作。

6 系统的使用情况

利用全功能列车驾驶模拟器培训司机,不仅让司机熟悉及精通正常情况下的驾驶操纵技能,同时也模拟列车故障和行车突发事件,使受训司机迅速熟悉列车故障和行车突发事件处理程序,大大缩短司机培训时间,进而降低运营成本。采用车站值班员培训系统和调度员培训系统,不仅能让车站值班员和调度员对日常业务进行熟悉演练,同时也可以训练在各种情况下的应变能力,特别是在非正常情况下的培训,提高调度员和车站值班员的培训力度与培训效率,缩短培训时间。朔黄铁路列车驾驶模拟器、车站作业仿真培训系统、列车调度运行指挥仿真培训系统 3 个子系统中,列车驾驶模拟器于 2007 年 7 月投入使用,使用的时间最长,也最具有代表性。

列车驾驶模拟器主要用于机车乘务员的培训。培训的内容包括正常作业培训和非正常作业培训,正常培训的内容有机车高、低压试验、制动机试验、牵引操纵等,非正常培训的内容有天气状况变化、线

路状况变化及机车设备故障等 3 个方面。

根据乘务员层次的不同,我们分别制定了不同的培训重点。比如对于国铁返聘的老司机,主要培训乘务操纵,熟悉 SS4B 机车性能和朔黄线路状况、运行特点;对于新学员,主要培训机车机械构造、机车电路,从感性、理性上加强对机车的了解;对于副司机,主要培训一次乘务作业标准、机车机能试验,深入了解机车控制原理;对于司机重点培训非正常操纵。通过培训,有力地提高了乘务员的作业水准。截至 2008 年 12 月,在不到一年半的时间里共计培训各类人员 400 余人次,仅参加 2008 年全国铁路司机理论考试的乘务员中,有 44 人顺利通过考试。通过培训,体现了仿真培训具有高效、安全、方便、节能,针对性强,不受时间、场地和环境的影响,能够反复试验且不会造成线路中断或设备损坏等优点。

7 小结

本系统的研制成功是国内第一套集行车调度指挥仿真、车站作业仿真与全功能机车驾驶模拟器于一体的铁路运输综合(仿真)培训系统,系统引进了 6DOF 电动运动平台、高端投影仪、图形工作站、视频显示与控制设备等先进设备,采用了分布式仿真、CGI、动感仿真、数字化声音、多任务(线程)、面向对象的软件开发等技术,实现了朔黄铁路运输作业主要内容的覆盖,并具有逼真、准确、易用、易维护、稳定、可靠、可拓展性强、实用性高等突出特点,取得了明显的培训效果,但在如何实现自动评分、如何提高观摩学习效率、如何展开针对性的联合培训和应急故障培训方面还需要进一步研究和探讨。

作者简介:陈海滨(1960-),高级工程师,工程硕士,朔黄铁路发展有限责任公司总经理助理。

Research and Discussion on Shuohuang Railway Transport Complex (Simulation) Training System

Chen Haibin, Zhang Zhishan, Wang Jianhua

(Shuohuang Railway Development Co., Ltd Suning County, Hebei Province 062350, China)

Abstract: Shuohuang Railway Transport Complex (simulation) training system is designed for SS4B electric locomotive, railway transport organization, station operation features, to set up the mathematical model and simulation model of locomotive traction, traffic organization, and station operating process. In accordance with the distributed computer simulation system structure and principles, locomotive control theory, train dynamics, organization and management of train transportation, train operation safety rules are combined. With the help of the use of computer networks, data acquisition and control, database, multimedia and other computer hardware and software technology, the modernized vocational skill training system in high accordance with Shuohuang Railway transport operations is formed.

Keywords: Shuohuang; comprehensive simulation, training system

(收稿日期:2009-2-12 责任编辑:贺烨真)

煤化工过程中的 CO₂ 排放及 CCS 技术的研究现状分析

任相坤 崔永君 步学朋 张翠清

(中国神华煤制油化工有限公司, 北京 研究院, 100011)

摘 要: 温室气体排放导致的全球气候变暖问题是目前最被关注的问题之一, 尤其对以煤为主要一次能源的中国而言, 面临着越来越大的减排压力。本文对几种典型煤化工过程中的高浓度 CO₂ 排放情况进行了分析, 之后对 CO₂ 捕集和封存技术(CCS)的关键环节及国内外研究现状进行了分析和总结, 最后简单介绍了神华集团正在执行的几个 CCS 项目的进展情况。

关键词: 温室气体 煤化工 CO₂ CCS 技术

中图分类号: X784 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0068-04

1 前言

20世纪80年代以来, 全球气候变化及其对环境造成的影响逐渐成为人们研究和关注的热点。最新科学研究成果表明: 全球地表平均温度近百年来(1906~2005年)升高了0.74℃, 如果按照现在的发展趋势, 预计到21世纪末仍将上升1.1~6.4℃^[1]。温度的升高, 主要是由化石燃料燃烧和土地利用变化等人类活动排放的温室气体(主要包括CO₂、CH₄和N₂O等)导致大气中温室气体浓度增加所引起的。例如IPCC组织(政府间气候变化专门委员会)统计出2000年全球化石燃料排放的CO₂为235亿t^[2], IEA(国际能源署)曾预测中国在2007年已成最大的CO₂排放国^[3]。在2008年中国刚颁布的《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书中介绍到: 2004年中国能源消费排放的CO₂排放量约为50.7亿t, 虽然中国现在每年的CO₂排放量大, 但是历史排放量很低。1904-2004年中国由于化石燃料燃烧排放的CO₂累计量约占世界同期的8%, 人均累计排放量居世界第92位^[4]。

2005年2月正式生效的《京都议定书》作为人类社会应对全球变暖挑战所采取的全球统一行动, 表明了人类减排温室气体的决心。虽然在2005-2012年期间, 作为发展中国家的中国不承担减排义务, 但是专家们指出, 《京都议定书》的生效虽然在短期内对中国有利, 但长远来看可能使中国承受越来越大的国际压力。无论是从防止全球气候变暖, 还是从我国能源可持续发展的角度, 中国

政府也一直在提高能源利用效率、优化能源结构、发展低碳能源技术等方面努力着, 实现温室气体减排任重而道远。

除了节约能源、提高能源效率、优化能源结构、发展替代能源等措施外, 如何对已排放出的CO₂进行处置成为目前被关注的问题之一。总体而言, CO₂的处置主要有以下四种方式: ①陆地林业碳汇; ②CO₂的矿化和资源化利用; ③CO₂的深海埋存; ④海洋绿藻吸收CO₂; ⑤CO₂的地层封存。目前, 最被广泛认可的固碳技术是陆地林业碳汇, 但是也有观点认为, 这种固碳作用是临时的, 只是一种过渡性的政策选择。由于将CO₂矿化和资源化利用的数量有限, 因此不可能成为主要的处置方式。深海也是科学家认为可以封存CO₂的场所之一, 由于存在着诸多技术难点以及不可预测的后果等因素, 此方案的可行性也受到了限制, 目前仍处于实验阶段。也有科学家正在研究利用海藻吸收CO₂, 然后再将海藻转化为生物燃料, 认为这是最理想的CO₂减排路线, 但是此方法将受到处理规模和地域的限制, 并且利用生物燃料会重新排放CO₂。

最近, 科学家们逐渐将目光投向了陆地地层, 认为地层是理想的固碳场所之一, 并提出3个目标地层: ①废弃或产量衰竭的油、气井; ②深部盐土层; ③深部或不可开采煤层。同时认为在未来的50年到60年之内, 将CO₂“埋”入地下的方式可能被作为一种减少温室效应的重要方式而被采用。

2 煤转化过程中的高浓度 CO₂ 排放情况

作为经济增长最快的发展中国家之一，中国正面临经济发展和温室气体减排的双重压力。正因为中国是以煤为主要一次能源的国家，发展煤的低碳能源技术，将对实现我国温室气体减排计划具有重要的现实意义。煤的低碳能源转化技术包括煤的大规模制氢、煤制液体燃料、煤制烯烃、煤制甲醇和煤制天然气等技术，在煤转化为低碳的终端能源以及其它煤转化过程中，也会排放出大量的 CO₂，只有对排放出的 CO₂ 进行了处置，才能真正实现将煤由高碳能源转为低碳终端能源，否则只是改变了 CO₂ 的排放方式或排放途径，没有真正实现煤的低碳化。

对于传统的燃料燃烧过程，由于烟道气中 CO₂ 的体积含量一般仅为 3%~15%，如果对这种烟道气实施 CO₂ 的捕获，那么成本将很高且不现实，因此目前关注的焦点是煤转化过程中高浓度 CO₂ 的处置问题。

现代煤化工技术是以气化为龙头的多元转化技术，例如煤的间接液化、煤制烯烃、煤制甲醇、煤制氢和煤制天然气等，其基本工艺路线如下（见图 1）：煤先经过气化反应转化为 CO 和 H₂，然后通过变换反应将部分 CO 和 H₂O 转换为 H₂ 和 CO₂，将 CO 和 H₂ 的比例调至生产目标产品所需的比例，然后通过酸性气体脱出技术将 CO₂ 从变换气中分离出来，再经过合成反应得到目标产品。煤直接液化过程中，需要大量的 H₂ 参与反应，因此煤制氢是煤直接液化工艺的重要组成部分。煤制氢时，在变换反应中需要将全部 CO 转为 CO₂，然后通过酸性气体脱出工艺将 CO₂ 分离出来，再经过 PSA 等分离工艺得到产品 H₂。

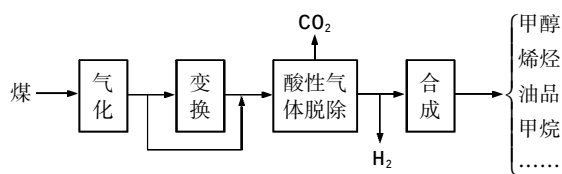


图 1 几种典型的煤转化工艺流程简图

由此可见，在酸性气体脱出工艺中将排放大量的 CO₂，这部分 CO₂ 气体具有数量大、浓度高的特点，浓度一般能达到 95% 以上，显然这些高浓度 CO₂ 即是人们关注的焦点，也是实施 CO₂ 地质封存等处置方案的对象。当然，在各种煤转换工艺过程中，还有其它 CO₂ 排放点，例如合成反应器、提供热

量和蒸汽的燃烧炉、提供电力的发电厂等。和酸性气体脱出工艺得到的 CO₂ 相比，这些 CO₂ 气体浓度低，与一般的烟道气浓度接近，虽然它们也是被关注的焦点，但不是目前需要考虑如何处置的对象。

在煤转化工艺过程中，到底产生的高浓度 CO₂ 量有多少，到目前为止尚未有一个一致的、公认的、完整的、准确的数据。例如有些是根据碳平衡计算出来的，有些数据仅仅是排放出的高浓度 CO₂ 量，还有些数据不包括电力消耗所带来的间接排放量，但是大家对煤转换过程中将排放出大量 CO₂ 这一事实是认可的。

一般来说，各煤转化过程中排放的 CO₂ 总量顺序依次为：煤制化学品或烯烃>煤间接液化>煤制甲醇>煤直接液化。以百万吨的项目为例，各转化路线排放的 CO₂ 量都高达数百万吨甚至超过千万吨。其中煤制化学品或烯烃排放出的高浓度 CO₂ 量最大，这因为工艺复杂、产品链长、产品组成多等因素造成的。针对直接液化和间接液化两种工艺，间接液化排放的 CO₂ 总量是直接液化的 2 倍。虽然具体排放量仍存在争议，但是煤转化过程中排放出大量的 CO₂ 已是不争的事实，尤其对于排放出的高浓度 CO₂ 如何进行处置，已成为制约煤转化技术发展的瓶颈。正如前所述，目前仍处于开发阶段和验证阶段的 CO₂ 地质封存技术，是解决这一问题的潜在方案之一。

3 CCS 技术的研究现状

前面已提到地质封存是未来大规模处置 CO₂ 的潜在方案，科学家们将 CO₂ 经过分离、输送和地质封存等过程，以达到长期处置的综合技术成为 CCS 技术（Carbon Capture and Storage）。CCS 技术主要包括捕获、运输和封存 3 个方面，总体而言，捕获和运输技术相对成熟一些，有些技术已在工业上得到了广泛应用。封存技术是一个较新的领域，仍处于开发和验证阶段，目前世界上只有 3 个正在运行的商业化示范项目。

3.1 CO₂ 分离的工业方法

捕获是指 CO₂ 的分离和提纯过程，已实现工业化的方法包括溶剂吸收法、吸附法、膜法和低温分离法等。

（1）溶剂吸收法包括化学吸收法、物理吸收法和物理化学吸收法，已经被证实是目前所有 CO₂ 吸

收方法当中技术最成熟、应用最广泛,而且具有适合进行大规模 CO_2 捕捉潜力的技术方案。但是溶剂吸收法也存在着一些不可忽视的问题,例如有些溶剂具有毒性、溶剂需要再生、捕获工艺复杂等。

(2) 膜分离技术是借助混合气体中各组分在膜中渗透速率的不同而获得分离的方法,目前用于分离 CO_2 的膜材料主要有醋酸纤维素、聚砜、聚碳酸酯等聚合物。膜方法虽然已经有很多比较经济的应用实例,但是对于大规模的 CO_2 捕捉系统,膜方法在成本与可靠性要求上还有较大的差距。

(3) 变压吸附法 (PSA) 基本原理是:吸附剂对不同气体的吸附量随压力的变化而不同,该技术具有工艺过程简单、能耗低、适应能力强、操作方便、技术先进、经济合理等优点,可用于各种气体的分离,能够从合成氨变换气以及窑炉气中脱除和回收 CO_2 。

(4) 低温分馏分离过程是在低温下将气体中各组分按照工艺和要求冷凝下来,然后用蒸馏法将其中各类物质按照蒸发温度的不同逐一加以分离。该方法适用于天然气中 CO_2 、 H_2S 含量较高,以及在用 CO_2 进行 3 次采油时,采出气中 CO_2 含量和流量出现较大波动等情形,工艺设备投资费用较大,能耗较高。

3.2 电厂的 CO_2 捕获技术

由于目前大的 CO_2 排放点源主要是以煤为原料的电厂,因此有针对性地提出了 3 个 CO_2 捕获系统:燃烧前捕获系统、燃烧中捕获系统和燃烧后捕获系统。

(1) 燃烧前捕获系统特点是:先将煤气化,得到 CO 和 H_2 ,再经过水蒸气变换, CO 转为 CO_2 ,然后通过分离或 CO_2 捕获技术,分别得到高浓度的 H_2 和 CO_2 , H_2 可以燃烧发电或作为无碳能源输出。

(2) 燃烧中捕获系统是一种富氧燃烧技术,先经利用空分系统,得到高纯度的 O_2 ,然后将高浓度 O_2 引入燃烧系统。因为烟道气中的 N_2 含量大大降低,有利于 CO_2 的进一步捕获和处理。

(3) 燃烧后系统主要针对传统的燃煤方式,目的是将烟气中的 N_2 和 CO_2 分离,采用的方法主要是能实现大规模化的工业分离方法,例如溶剂吸收法等。

目前,多数捕获技术仍处于开发和发展阶段,迄今为止, CO_2 捕获尚未在大型电厂中采用 (例如

500MW)。另外,由于 CCS 的运行费用主要集中在捕获和压缩阶段,因此捕获的高成本也是造成燃煤电厂不愿进行 CO_2 的捕获的主要原因。在 IPCC 的特别报告中称,现有的 CO_2 捕获技术能够捕获一个电厂 85%~95% 的 CO_2 ,但是和未实施捕捉技术的电厂相比,需要多消耗 10%~40% 的能源(不同类型的电厂,需要多消耗的能源有所不同)。当然,随着捕获技术的发展和 CO_2 排放政策的要求,在不远的将来,会有越来越多的电厂将建立 CO_2 捕获系统。

3.3 CO_2 的运输方式

二氧化碳的运输方式主要有:①公路、铁路运输;②管道运输;③船舶运输。在公路与铁路运输方面,目前有非绝热高压钢瓶装运、低温绝热容器装运、干冰散装或块装三种分装运输方法。管道运输是一种成熟的市场技术,目前主要应用于 EOR 项目中,典型的做法是将气态 CO_2 加压至 8MPa 以上,提高 CO_2 的密度以提高单位体积的 CO_2 运输质量,以降低成本。利用船舶运输 CO_2 与运输液化石油气相似,在特定条件下是经济可行的,但是由于需求有限,目前还只是小规模进行。

对于进行 EOR 项目 (提高石油采收率) 之类的大规模的 CO_2 运输而言,管道运输是最经济可行的运输方式。在美国,超过 2500km 的管道每年将天然源和人为源产生的数百万 t 的 CO_2 运输到位于德克萨斯州的许多地方用于 CO_2 -EOR。在大多数管道中, CO_2 流体由位于上游的多台压缩机驱动,有些管道还配有若干中间增压站。正如用管道运输天然气需要标准一样,随着 CO_2 管道设施的进一步发展,也应建立相应的 CO_2 气源标准。目前主要在 CO_2 -EOR 应用背景下制定的标准并不一定完全符合 CCS 的要求,但是可以借鉴已有的认识。表 1 是美国 Canyon Reef EOR 项目的 CO_2 管道运输标准。

表 1 管道运输对 CO_2 质量的要求 (CO_2 -EOR)

二氧化碳	产品至少含 95% 的 CO_2
水	产品中不能含有自由水,气相中浓度不应超过 0.48g/m ³
硫化氢	产品中硫化氢含量不应超过 1500ppm(质量浓度)
硫	产品中总的硫含量不应超过 1450ppm(质量浓度)
温度	产品温度不应超过 48.9℃
氮气	氮气摩尔含量不应超过 4%
碳氢化合物	摩尔含量不应超过 5%,而且产品露点温度不应超过 -28.9℃
氧气	产品中氧气含量不应超过 10ppm(质量浓度)
乙二醇	产品中乙二醇含量不应超过 0.00004L/m ³ ,而且在整个管道运输过程中不能出现液态的乙二醇。

3.4 CO₂ 的地质封存技术

CO₂ 封存的目标地层包括石油和天然气储层、深部含盐水层和深部不可采煤层。据 IPCC 的预测结果，全球深部盐水层的封存量最大，而 CO₂ 封存在石油、天然气和煤储层中可能带来额外的石油、天然气和煤层气产量而倍受关注。IPCC 的特别报告中称，全球这三类地层可封存的 CO₂ 量达 20000 亿 t（见表 2）。

表 2 预测各储层可封存的 CO₂ 量^[4]

储层类型	封存能力下限(亿 t)	封存能力上限(亿 t)
油气田	6750	9000
不可采煤层	30~150	2000
深部盐水层	10000	不确定,可达 100000

一般认为应将 CO₂ 封存在 800m 以下深度的地层中，此处的 CO₂ 可能处于液体或超临界状态（和储层条件有关），CO₂ 的密度是水密度的 50%~80%，接近某些原油的密度，CO₂ 将产生向上的浮力。因此，选择的封存地层上部必须具有良好封闭性能的盖层。同时，毛细管压力也将起到物理俘获的作用，将 CO₂ 留在储层构造的孔隙中。当 CO₂ 被注入地层后，通过部分置换已经存在的流体，例如油、气或煤层气，CO₂ 被封存在储层中，而石油、天然气或煤层气被置换出，这就是注 CO₂ 提高石油采收率技术（CO₂-EOR）、提高天然气采收率技术（CO₂-EGR）和提高煤层气采收率技术（CO₂-ECBM）的基本原理。随着 CO₂ 与储层或围岩发生化学反应，就会出现所谓的地质化学俘获机理。首先，CO₂ 在现场水中溶解，导致充满 CO₂ 的水就变得越来越稠密（在几百年乃至几千年内），并沉落在储层构造中。其次，溶解的 CO₂ 与岩石中的矿物质发生化学反应形成离子类物质，经过数百万年，部分注入的 CO₂ 将转化为坚固的碳酸盐矿物质，达到了永久封存的效果，CO₂ 在深部盐水层中的封存就利用此化学作用。

目前，国外已在 CCS 各领域展开了研究，包括捕获技术、封存机理、地层评价技术、输送技术、注入技术和监测技术等，并且在 CO₂-EOR 方面进行的研究较深入，例如开发预测石油产量变化的模型和软件、CO₂ 在油储层中的运移理论等。国内在 CO₂ 工业分离方面已有多年的运行经验，对 CO₂ 的封存研究则刚刚起步，但是探讨 CCS 宏观问

题的较多，有些研究也涉及到了 CO₂ 封存量的预测、对封存地层的评价和 CO₂ 注入技术等，但是研究的深度和广度还远远不够。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中，已将“主要行业二氧化碳、甲烷等温室气体的排放控制与处置利用技术”列为重点领域的优先主题，在《中国温室气体白皮书》中，已将“研究二氧化碳捕获与封存技术”列为中国减缓气候变化的政策与行动之一。国家科技部的 973 和 863 计划、自然科学基金委等都对 CCS 项目给予了支持，并已开展了多个国际合作项目，除高等院校和科研院所外，一些企业也已在 CCS 技术领域展开了相关工作，例如中石油、神华集团、华能集团等。

总体而言，CCS 技术是一个较新的研究领域，基本仍处于发展和验证阶段。目前世界上只有 3 个达到商业化运行的封存示范项目（年封存量达到 100 万 t），分别是加拿大的 Weyburn 项目、挪威的 Sleipner 项目和阿尔及利亚的 In Salah 项目。另外，世界上还有 13 个百万吨级的 CCS 项目正在建设和论证中，主要位于北美、欧洲和澳大利亚等地区。

4 神华集团 CCS 项目进展情况

作为一个负有社会责任感的大型国有企业，神华集团也肩负着国家节能减排的重任，已经在 CO₂ 减排思路和减排措施等方面展开积极探索，例如大力实施节能措施、积极提高能源利用效率、稳步推进可再生能源的开发利用（主要是风能、太阳能、生物质能等），同时展开了 CCS 领域的研究工作，并取得了重要进展。

神华集团数个 CCS 项目的主要研究内容包括：神华集团各板块 CO₂ 排放现状的调研和分析、国内外 CO₂ 捕集技术现状调研和分析、CO₂ 封存和利用技术的调研和分析、神华集团 CO₂ 减排战略和 CDM 机制等。以煤直接液化厂为研究对象，以鄂尔多斯盆地为目标区，对鄂尔多斯盆地可封存 CO₂ 的潜在地层进行了初步分析并提出有利区块，为下步示范工程的建立奠定基础。

5 结束语

温室气体导致的全球气候变暖已引起国际社会的高度关注，而煤转化过程中排放的 CO₂ 更是首当其冲，尤其对以煤为主要一次能源的中国而言更是

如此。各种煤转化工艺排放出的高浓度 CO_2 量和总排放量是不同的, 如何对排放出的 CO_2 进行处置已成为制约煤转化技术发展的瓶颈。 CCS 技术被认为是能够实现煤低碳化的潜在解决方案之一, 虽然 CCS 技术仍处于发展阶段, 但是已有的商业化示范项目证明此技术具有可行性。神华作为一个负有社会责任感的大型国有企业, 已在 CO_2 减排和处置方面展开了前瞻性的工作, 数个 CCS 前期研究项目进展顺利。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 中国应对气候变化的政策与行动 [R]. 2008
- [2] IPCC. Special Report-Carbon Dioxide Capture and Storage [R]. 2005
- [3] IEA.. World Energy Outlook 2007 [R]. 2008

作者简介: 任相坤 (1963-), 1983 年毕业于山东化工学院, 从事相关技术的研究开发及科技管理工作, 现任中国神华煤制油化工有限公司北京研究院副院长, 神华煤制油研究中心有限公司董事长。

CO_2 Emissions in the Process of Coal Chemical Industry and Analysis of the Research Status of CCS Technology

Ren Xiangkun, Cui Yongjun, Bu Xuepeng, Zhang Cuiqing

(Shenhua Coal-oil Chemical Industry Co., Ltd, Beijing 100011, China)

Abstract: Global warming caused by greenhouse gas emissions is one of the most concerned problems in the world. China is faced with growing pressure from emission reduction as a country relying on coal as its main energy resource. In this paper, several typical kinds of CO_2 emissions of high concentrations in the process of coal chemical industry are analyzed, and then the key links in CO_2 capture and storage technology (CCS) and the current research status at home and abroad are analyzed and summarized. Finally, a brief introduction to a number of CCS projects in progress of Shenhua Group is made.

Keywords: greenhouse gas, coal chemical industry, CO_2 , CCS, Shenhua Group

(收稿日期: 2009-4-1 责任编辑: 贺烨真)

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] 何庆. 绿色设备管理与维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.7.
- [2] 徐滨士. 绿色再制造工程—21 世纪的重要产业 [J]. 航空制造术, 2002,(6).
- [3] 吴言忠, 李英德. 煤炭企业设备管理中存在的问题及对策研究[J]. 中国矿业, 2005(10).

- [4] 翟桂武, 杨成龙. 高产高效矿区设备管理的研究与探讨[J]. 煤炭科学技术, 2002(1).
- [5] 田瑞兰. 设备点检制在安全生产中的成功应用[J]. 煤炭工程, 2005(6).

作者简介: 王铁军 (1962-), 吉林永吉人, 神东煤炭分公司维修中心主任(副总师), 高级工程师, 毕业于辽宁工程技术大学机制专业, 现从事井下采矿设备维修工作。

The Practice of Green Maintenance of Large-scale Fully Mechanized Mining Equipments

Wang Tiejun, Luo Yu

(China Shenhua Shendong Coal Subsidiary, Shenmu, Shaanxi, 719315, China)

Abstract: According to Shendong Coal Branch Service Center' s experience for many years in the green maintenance of large-scale mechanized mining equipments, the paper discusses the technology system for the repair enterprises' practicing of green maintenance of large-scale fully mechanized mining equipments, and points out the implementation methods of green maintenance of fully mechanized mining equipments.

Keywords: green maintenance; fully mechanized mining equipment; practice

(收稿日期: 2009-3-27 责任编辑: 杨静)

煤直接液化反应动力学模型研究*

郭治¹ 王勇² 艾军²

(1. 中国神华煤制油化工有限公司, 北京, 100011; 2. 煤炭科学研究总院北京化工研究分院, 北京, 100013)

摘要: 针对神华上湾煤, 采用高压釜进行了不同温度下液化反应动力学实验研究。通过液化反应机理分析, 提出并建立了多组分并联转化动力学模型。利用高压釜液化实验数据, 获得了该模型的动力学参数, 并合理解释了煤液化转化反应的规律。

关键词: 煤液化 动力学 数学模型

中图分类号: TQ529.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-3880(2009)02-0073-04

煤直接液化技术是缓解我国石油紧缺的重要技术之一。神华集团建设的世界首座年产百万吨油品的直接液化示范生产线已试车成功, 标志着我国成为唯一拥有煤直接液化工业化技术的国家。

煤液化反应动力学是液化技术的关键科学问题之一, 虽然国内外众多学者对此做了大量的研究工作, 但由于煤结构的复杂性, 至今尚有较多问题未形成统一的结论。因此, 973 计划项目“大规模煤炭直接液化的基础研究”将液化反应动力学列为其中的重要研究课题。

煤液化反应动力学模型是液化反应动力学的重要内容, 也是煤液化工艺包的重要组成部分。许多研究者对煤液化反应动力学模型进行了研究, 如 Robert 等^[1]提出煤生成前沥青烯与沥青烯, 进而再生成油和气的简单串联反应路径, 并建立了相应的动力学模型; Pradhan 等^[2]提出煤可同时生成气态产物、油、沥青烯, 而沥青烯又可转化为油的串并联反应途径, 由此建立了动力学模型; 日本 Akira KIDOGUCHI 等^[3]采用 55cm³ 高压釜进行了煤加氢液化反应初期的动力学研究, 认为可将煤按液化性质划分为快速转化组分、慢速转化组分、不转化组分, 其中快速转化组分可转化为前沥青烯和沥青烯、油、气态产物, 慢速转化组分仅转化为前沥青烯和沥青烯, 按此机理建立了动力学模型并求出各反应速率常数; 王志忠等^[4]对内蒙古胜利褐煤进行了液化动力学研究, 提出煤可按快速转化和慢速转化两个部分划分, 并认为快速转化部分只生成油与气, 慢速转化部分只生成前沥青烯, 前沥青烯与沥青烯之间、沥青烯与油气

之间可相互转化; Onozaki 等在 150t/d 的 NEDOL 中试装置上进行了液化动力学研究, 提出了更为复杂的反应网络和动力学模型。上述研究者得到的研究结果不尽相同, 可能是因实验煤种、溶剂、催化剂、实验装置等差别所导致的。

从煤的化学结构特点分析: 在液化开始时, 随温度升高煤中键能较弱的桥键、侧链、含氧官能团会瞬间断裂形成各种分子量的自由基, 这些自由基被供氢溶剂提供的氢自由基饱和而稳定成为各种分子量的产物; 在恒定温度后, 煤及较大分子中间产物中键能较强的脂碳键、芳碳键等在氢自由基的攻击下逐步减弱并断裂, 进而转化为分子量小的产物。因此, 煤中存在瞬间转化的组分(简称热解加氢组分), 其转化速度受升温速度控制, 其数量与煤中较弱化学键的多少及键能分布密切相关; 而煤中其它组分(简称攻击加氢组分)的反应速度, 与反应温度、煤的浓度、氢自由基浓度、催化剂种类及分散浓度等因素有关, 但由于化学键能分布不同, 其转化反应速度随反应时间而变化。这些均为实验所证实。

本文重点研究煤液化反应后期攻击加氢组分的转化反应动力学行为, 提出并建立多组分并联转化动力学模型, 通过实验数据获得其动力学参数。

1 实验

1.1 实验煤样

以神华上湾煤为实验煤样, 其分析数据见表 1。

表 1 神华上湾煤分析数据

工业分析			元素分析(daf)				
M _{ad}	A _d	V _{ad}	C	H	N	O	S
9.34	5.52	38.24	80.13	4.88	1.06	13.51	0.42

*: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2004CB217603)

1.2 实验过程

在 500mL 水平震荡高压釜中,将实验煤样与循环溶剂按 4.5:5.5(质量比)混合,同时加入煤样量 1% 的纳米铁系催化剂(由 863 计划资助开发的催化剂)。其中,循环溶剂是神华上湾煤在 BSU 液化实验中所获得的循环溶剂。

实验开始时,先对高压釜充氢气至 8.4MPa,然后切断氢气并将釜温升至规定的反应温度,此时反应压力将达到约 20MPa。由于高压釜热容量较大,升温需一定时间,为避免升温时间不同造成的影响,各实验点的升温时间控制约 40min。在不同的反应时刻强制冷却使反应终止。取出反应产物进行索氏抽提,同时取气样进行色谱分析;据索氏抽提与气体组成分析结果,计算出转化率、各产物产率、氢耗。

由于实验装入的煤样量仅 10g 左右,其反应过程中的氢耗对高压釜的氢分压影响不大,同时,其反应放热对温度的影响亦可忽略不计,故反应过程可认为基本处于恒温恒压状态。

在索氏抽提中,规定正己烷不溶、四氢呋喃可溶物为沥青烯类物质,其是前沥青烯与沥青烯的混合物,以 PAA 表示。气体产率与氢耗率由气体组成确定。油产率经物料衡算获得。

2 实验结果

2.1 动力学实验结果与分析

根据液化示范装置的反应温度,分别进行了 440℃、455℃ 下的动力学实验,结果见图 1、图 2。

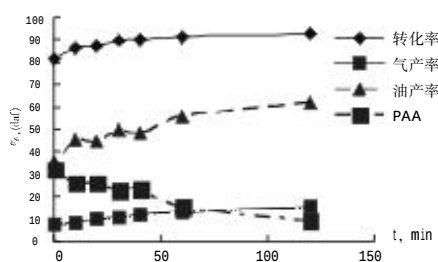


图 1 440℃液化反应动力学实验结果

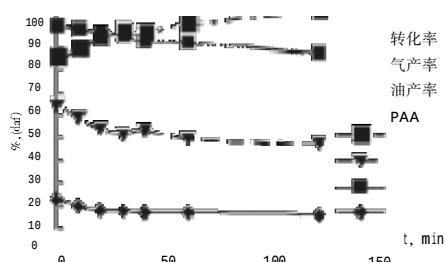


图 2 455℃液化反应动力学实验结果

由图可见,两个温度下转化率与各产物产率变化趋势基本一致,即随反应时间的延长,转化率、油产率、气产率增加,PAA 减少。反应前期,转化率增速较快,后期增速变缓。由于高压釜升温时间较长,除热解加氢组分发生瞬间转化外,部分攻击加氢组分已在升温阶段发生转化,使得恒温开始时转化率已达 80% 以上。

图 3、图 4 为 PAA 随反应时间的变化关系。

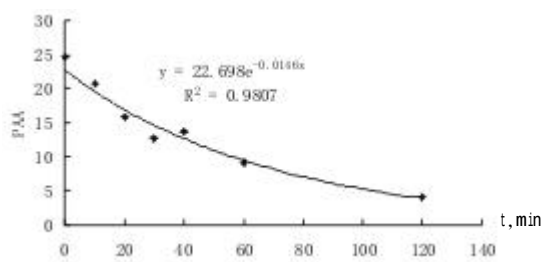


图 3 455℃时 PAA 随反应时间的变化关系

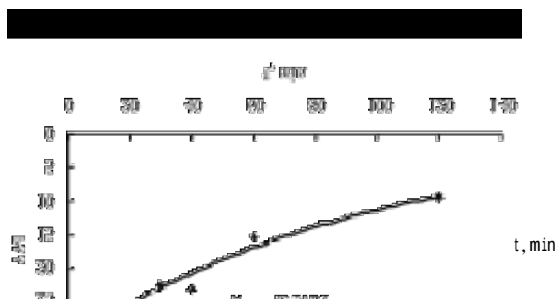


图 4 440℃时 PAA 随反应时间的变化关系

图 3、图 4 示出 PAA 随反应时间几乎呈指数下降,说明液化反应转化率较高时(剩余较多难反应煤组分),剩余煤几乎不生成 PAA,即较难反应的煤,其转化为 PAA 的速度很小,甚至可忽略,这一结论与前述某些研究者观点不同。从煤化学结构分析,难反应煤往往具有较大的芳核和较少的桥键及侧链,其加氢过程中难以裂解成分子量较大的 PAA 分子,而是在氢自由基攻击作用下开环成较小分子物质,同时消耗较多氢。实验中发现,随煤转化率升高,气产率变化率有明显的突变增加,且随反应温度升高,该突变点向高转化率方向移动。这表明,难反应煤组分转化后多会形成气体产物。

2.2 热解加氢组分的实验测定

为了确定热解加氢组分,采用热容量很小的 55mL 微型高压釜,在与 500mL 高压釜相同的实验条件下对神华上湾煤进行了急速升温液化实验,图 5 所示为不同温度下反应零时刻(即刚升至反应温

度的时刻)的转化率,其代表了热解加氢组分的多少。

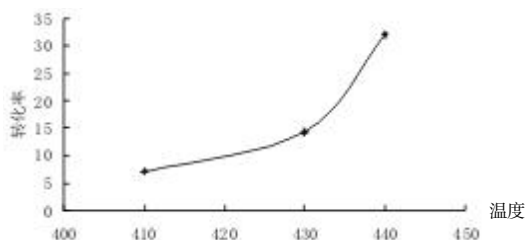


图5 微型高压釜反应开始时转化率与温度的关系

由图5可见,随反应温度的升高热解加氢组分增加,430℃以下增幅较缓,超过430℃增幅变大。

3 多组分并联转化动力学模型

3.1 液化反应机理

由于煤中各化学键能不同,在液化反应中表现出不同的动力学性能。据此可将煤划分为三类组分,即热解加氢组分、攻击加氢组分、不易转化组分。对于高压釜液化反应,由于升温阶段已使热解加氢组分和部分攻击加氢组分转化,只剩下部分攻击加氢组分和不易转化组分。其中,攻击加氢组分仍然是不同反应性能组分的混合物。其反应机理如图6所示。

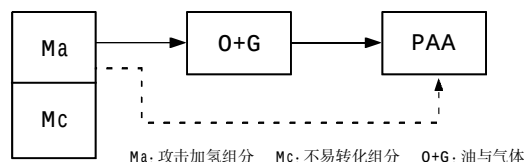


图6 煤液化反应机理

如前所述,由于高压釜显示的是高转化率下的液化反应,Ma已基本不向PAA转化,故图6中以虚线表示。

3.2 煤液化转化动力学模型的建立

由于Ma是由若干反应性能不同的组分组成,对于每个组分而言,均满足一级反应动力学规律,即

$$Ma = \sum_i M_{i0} \exp(-k_i t) \quad (1)$$

一般,对于煤转化常采用一级动力学形式表述

$$-\frac{dMa}{dt} = k \cdot Ma \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,可得到

$$k = \frac{\sum_i k_i M_{i0} \exp(-k_i t)}{\sum_i M_{i0} \exp(-k_i t)} \quad (3)$$

由(3)式可见,当 k_i 不同时反应速度常数并非常数,而与反应时间有关,表明煤液化转化并不一定符合一级反应动力学规律。为了能够通过实验数据获取动力学参数并减少求取参数数量,对(3)式中分子、分母分别进行二阶台劳展开以求取近似解,得到

$$k(t) = \frac{k_1 - (k_1^2 + \sigma^2) \cdot t + 0.5 \cdot c \cdot t^2}{1 - k_1 \cdot t + 0.5 \cdot (k_1^2 + \sigma^2) \cdot t^2} \quad (4)$$

因此,高压釜不同反应时间的未转化煤可用下式表达

$$M = (M_0 - Mc) \cdot \exp\left[-\int_0^t k(t) dt\right] + Mc \quad (5)$$

由于(5)式的解析解较为繁琐,在这里省略。

3.3 实验条件下的动力学参数

通过各温度下的动力学实验数据对(5)式进行回归求解,获得以下参数,见表2。

表2 不同温度下的煤液化转化动力学参数

温度, °C	k_1, min^{-1}	σ, min^{-2}	c, min^{-3}	$Mc, \%$	$M_0, \%$
440	0.04693	0.01243	8.88×10^{-5}	6.89	18.30
455	0.04136	3.35×10^{-3}	3.56×10^{-5}	3.77	12.93

其中, k_1 代表反应开始时对应煤浓度下的平均反应速度常数,其与未转化煤的初始浓度 M_0 、反应温度及不易转化组分浓度 Mc 有关。 M_0 越高,较大反应速度常数的组分含量越多,使得 k_1 加大;反应温度增加时,虽然各组分反应速度常数增加,但一部分不易转化煤组分成为 Ma ,其反应速度常数往往较小,故平均反应速度常数与两者的贡献有关。由(5)式及表2数据,可计算出440℃下未转化煤浓度达到12.93%时须反应14.45min,对应条件下的平均反应速度常数为 0.039min^{-1} ,小于455℃对应未转化煤浓度下的平均反应速度常数。说明对于上湾煤液化平均反应速度常数,温度的贡献大于 Mc 降低使反应速度常数减小的作用。

σ 是不同反应性能组分反应速度常数的方差,当其值越小且 c 与 k_1^3 越接近时,则表明各组分的反应速度常数基本一致,可视为一个组分按一级动力学处理。由表2数据可知,455℃时反应更接近一级反应。

Mc 与反应温度有关。温度较低时 Mc 较大,随温度增加,部分不易转化煤组分具有了一定的反应速度,成为 Ma 组分,使得 Mc 降低。

图7~图8示出动力学模型计算值对实验值的拟合结果,由图可见,计算值与实验值具有很高的相

关系系数,表明模型能较准确模拟实验结果。

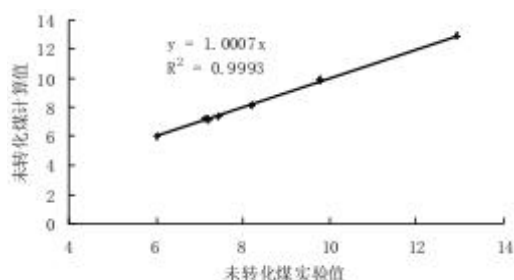


图 7 455℃时未转化煤拟合结果

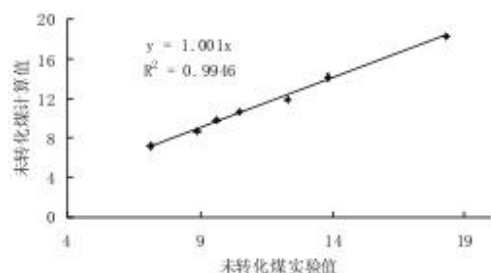


图 8 440℃时未转化煤拟合结果

4 结论

(1)通过对神华上湾煤不同温度下的高压釜液化动力学实验,表明反应后期难反应的煤不易形成

沥青烯类物质,其转化产物多为气态产物。因此,较长的反应时间会使氢耗量增加较多。

(2)通过微型高压釜急速升温液化实验,明确了煤中存在瞬间转化的热解加氢组分,其数量随温度的升高而增加,超过 430℃后随温度的增幅加大。

(3)建立了液化过程多组分并联转化动力学模型,该模型更合理地解释了攻击加氢组分的转化过程。通过动力学实验数据,获得了该模型各动力学参数,计算结果表明,模型能够较好地模拟动力学实验结果。

参考文献

- [1] Robert A. Keogh. Liquefaction pathways of U.S bituminous coals [J]. Energy and Fuels, 1991, 5(5): 625~632.
- [2] Pradhan, V. R. et al. Kinetics Modeling of Direct Liquefaction of Wyodak Coal Catalyzed by Sulfated Iron Oxides [J]. Ind. Eng. Chem. Res. 1992, 31: 2051~2056
- [3] 木戸口晃,金田荣一,平出政隆,等.石炭液化における初期反応のシミュレーション [J]. 三井造船技報,1999,166(2):39~43
- [4] 王志忠,凌大琦.内蒙胜利煤直接液化反应速度的研究[J].燃料化学学报,1983,11(4):19~25.

作者简介: 郭 治 (1955-),院长助理,教授,中国神华煤制油有限公司北京研究院。

Direct Coal Liquefaction Reaction Kinetics Model Research*

Guo Zhi¹, Wang Yong², Ai Jun²

(1. China Shenhua Coal-oil Chemical Industry Co., Ltd, Beijing 100011, China;

2. Beijing Coal Chemical Industry Research Branch of Coal Science Research Institute, Beijing, 100013, China)

Abstract: This paper conducts experimental study of liquefaction reaction kinetics at different temperatures to Shangwan Shenhua coal in autoclave had. Through liquefaction reaction mechanism analysis, multi-component dynamic model of parallel transformation kinetics models are proposed and established. The use of liquefaction autoclave experimental data is used to obtain the kinetic parameters of the model, and present a reasonable explanation for the rule of coal liquefaction conversion reaction.

Key words: Direct coal liquefaction; Kinetics; Mathematics model

(收稿日期: 2009-2-18 责任编辑: 贺烨真)

沉淀铁基催化剂助剂对费托反应性能影响的研究

吕毅军¹ 石玉林¹ 宁文生² 吕德义²

(1. 中国神华煤制油化工有限公司北京研究院, 北京 100011; 2. 神华浙工大创新工程中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对连续共沉淀制备的系列费托合成铁基催化剂, 考察了其在积分固定床反应器中的反应性能, 并与其化学组分和含量直接关联; 主要分析研究了 Cu、K、Zn 助剂对催化剂还原、费托合成反应活性及选择性的影响。同时着重比较分析了 SiO₂ 添加量对催化剂费托反应性能的影响, 以期对催化剂有效助剂 K、Cu 等在 SiO₂ 存在时的协同作用机理进行探索。

关键词: 费托反应 沉淀铁催化剂 二氧化硅 粘结剂 助剂

中图分类号: TQ529.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0077-05

在我国富煤、少油的能源结构背景下, 发展煤间接液化以制取液体燃料的技术具有重要的现实意义。费托合成反应是将合成气(CO+H₂)转化为有机烃的催化反应, 目前世界上通用的费托合成催化剂也主要为铁基(Fe)、钴基(Co)两大体系, 其中以 Sasol 工业化催化剂沉淀铁、熔铁, Shell、BP 等公司的担载钴催化剂为代表^[1-3]。

铁基催化剂廉价易得且费托反应活性高, 并且由于其具有高 WGS 反应活性, 尤其适用于低 H₂/CO 比的煤基合成气的费托合成。研究表明, 无论从催化剂对反应条件和合成气成分的适应性、还是反应产物选择性的控制上来说, 铁催化剂是一种能够满足不同要求的催化剂。通过调整铁催化剂中的助剂成分或反应温度, 能在一定范围内改善铁基催化剂的活性, 灵活地调变费托合成产物选择性, 譬如可高选择性地合成轻质烯烃、汽油馏分、重质烃和含氧有机物等^[4]。

本论文旨在考察沉淀铁催化剂上 K、Cu、Zn 等助剂的作用, 特别是考察了不同助剂添加量在 SiO₂ 引入方式和含量不同情况下的催化剂性能。试验首先采用连续共沉淀方法制备了系列 Fe/K/Cu/Zn/SiO₂ 催化剂, 通过积分固定床在工况条件 (503-533 K, 1.6 MPa, H₂/CO=1.5) 下对上述系列催化剂进行了费托反应性能测试, 结合 N₂ 低温吸附、SEM、XRD 等系列表征测试手段对催化剂的织构、形貌表面物相等有了解, 以期探索助剂对催化剂费托反应性能的作用机理。

1 实验部分

1.1 催化剂制备

本论文所用费托合成反应性能测试用系列含助剂沉淀铁催化剂按照以下方法制备得到。将一定比例的 Fe(NO₃)₃、Cu(NO₃)₂、Zn(NO₃)₂ 混合溶液并流加入到沉淀剂 Na₂CO₃ 或 (NH₄)₂CO₃ 溶液中, 或者先将一定计量的硅酸钾溶液与 Fe(NO₃)₃ 或 (NH₄)₂CO₃ 溶液混合均匀, 之后在一定温度和 pH 值下连续共沉淀。沉淀完成后, 沉淀物(浆液)用去离子水多次洗涤、过滤, 严格控制滤液电导率至 100 η S 以下, 滤饼重新加入去离子水后搅拌打浆, 并加入计量的含钾硅溶胶溶液, 通风干燥后, 在 623K 下焙烧 6h, 得到系列 Fe/xK/yCu/zZn/mSiO₂ 催化剂。所得催化剂经压片、破碎、筛分后, 获得 80~150 目的催化剂粒度。

同时, 也可按照上述步骤在滤饼重新打浆后经过实验室喷雾干燥装置干燥成型, 获得微球沉淀铁催化剂, 由于实验室微型喷雾设备获得微球粒度较小 (<80 μ m), 不能满足固定床评价粒度需要 (>100 μ m)。本论文中将喷雾微球小粒重新压片、破碎、筛分, 获得 80~150 目的催化剂颗粒用于催化剂评价。典型的实验室喷雾干燥成型的催化剂外观以及实际用于催化反应性能评价的催化剂外观 SEM 照片可见图 1。

参与评价费托反应性能试验的催化剂样品按照上述不同制备路线, 并且针对不同助剂的含量分别制备了多组不同 K、Cu、Zn 含量以及 SiO₂ 添加方式和添加量的样品, 典型表征数据见后。

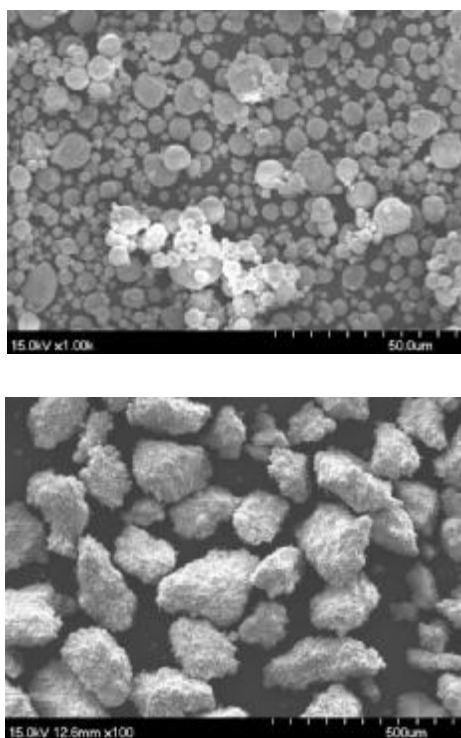


图 1 实验室微型喷雾干燥后和压片成型后破碎筛分样品的 SEM 对比

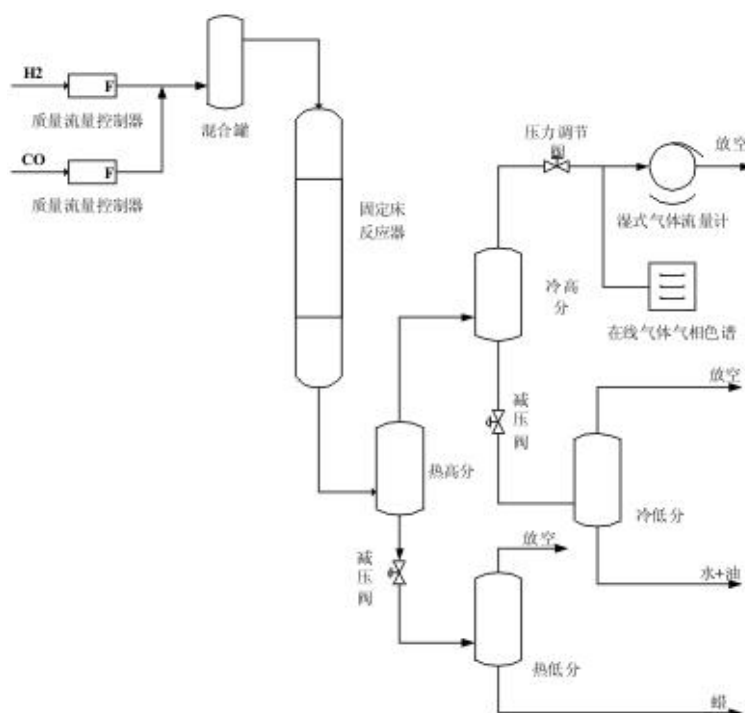


图 2 实验室积分固定床费托反应装置示意图

1.2 反应性能评价

图 2 是实验室采用评价费托催化剂的固定床反应装置流程示意, 装置主要由一个外部电加热等温反应器(内径 12mm), H_2 、 CO 单独质量流量计和控制一体仪表, 热高分、热低分和冷高分、冷低分等容器组成, 尾气经过湿式气表计量后排空。

固定床催化剂评价装置采用 DCS 控制操作, 气体连续流动。主反应器为三段式电加热控温以保持反应器内催化剂床层处于恒温状态。主要工艺参数控制精度为: 流量控制精度: $\pm 1\% \text{F.S.}$, 反应温度控制精度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 制冷温度控制精度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 压力控制精度: $\pm 0.015 \text{MPa}$ 。

催化剂的粒度为 80~150 目, 装填量为 1.5g, 催化剂经一定比例石英沙稀释均匀后装填在反应器的恒温段。原料气分别为纯度在 99.999% 的 H_2 和 99.9% 的 CO 气体钢瓶组供给, 全部经过脱硫达到 0.05ppm 以下、脱氧、脱水处理后, 进入评价装置。催化剂装入反应器后用 CO 气体进行还原处理, 催化剂还原工艺条件为: 空速(GHSV)=2000 h^{-1} 、压力为 0.5 MPa, 程序升温至 280 $^\circ\text{C}$, 还原 8 h。还原后降温至 160 $^\circ\text{C}$, 提压至正常反应系统压力后, 程序升温至

235 $^\circ\text{C}$ 进行反应, 反应条件为: $H_2/CO=1.5$, $P=1.6 \text{MPa}$ 和 $GHSV=3000 \text{h}^{-1}$ 。

1.3 产物在线分析

费托产物的复杂特点对其分析方法和精度都有专门的要求, 其中作为主要理想产物的油相、蜡相和副产物水相都采用离线的色谱检测分析, 而气相组成能迅速表现费托反应的特性, 从而更直接有效指导评价试验, 尤其是尾气成分中的 H_2 、 CO 、 CH_4 和 CO_2 等, 可快速提供催化剂工况条件下的原料气转化率、副产物选择性等, 因而都采用在线的色谱分析方式。本试验气体组成分析采用 Agilent 6890N 型气相色谱仪分析, 为毛细管柱色谱系统, 自动在线定时取样、进样, 自动采样系统由催化评价装置的 DCS 系统控制, 一次采样全分析时间在 15min 左右。

1.4 费托反应性能计算

CO 转化率% (mol/mol)——转化的 CO 摩尔量与原料气中 CO 的总摩尔量之比;

CO_2 选择性% (mol/mol)——产物中净生成的 CO_2 摩尔量与转化的 CO 摩尔量之比;

CH_4 选择性% (mol/mol)—— CO 转化成 CH_4 的摩尔量与转化的总 CO 摩尔量之比。

1.5 催化剂表征

低温 N_2 吸附由 Micromeritics ASAP 2000 物理吸附仪测定。测试前,氧化态样品在 150°C 、压力为 10^{-2} torr 的条件下处理 6h。测试时,样品在液氮中冷却至 -196°C ,进行低温 N_2 吸/脱附实验,数据采集由计算机完成。由 Brunauer-Emmet-Teller (BET) 方法计算样品比表面积。

X 射线衍射 (XRD) 采用 D/max-2500 型 X 射线衍射仪, Cu 靶 $K\alpha$ ($\lambda=0.154\text{nm}$), 管电流 100mA , 管电压 40 kV , 扫描范围为 $15\sim 75^\circ$, 扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$, 扫描步长为 0.02° , 数据由计算机采集。

扫描电子显微镜 (SEM) 采用 ESEM XL30 扫描电子显微镜观测催化剂的形貌。样品涂于铜板上, 压紧后测量; 测定催化剂截面元素分布前, 将催化剂固定在高分子聚合物中, 固化后经切片、抛光, 采用 Oxford INCA 300 能谱仪 (EDXS) 扫描截面, 测得表面元素分布。

2 助剂影响试验结果与讨论

2.1 K、Cu、Zn 助剂含量变化对催化剂反应性能的影响

制备了不同助剂含量的系列催化剂共计 96 个样品并进行费托合成反应性能评价, 采用统计学方法对数据进行了整理, 结果见图 3、图 4 和图 5。

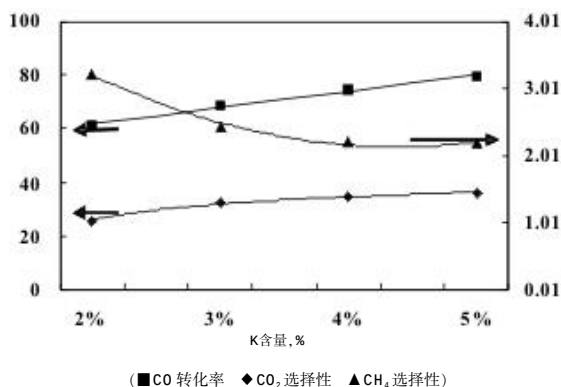


图3 不同K助剂含量对沉淀铁催化剂反应性能的影响

从图3的趋势可以发现, 助剂K在催化剂中的含量对催化剂的反应活性有显著的作用, CO转化率几乎随K含量增加而线性增长, 同时也能相当程度上抑制副产物甲烷的生成, 但是由于对 CO_2 的选择性也有促进作用 (WGS 变换反应活性也得到增加), 选择最佳的K含量是必须的。

Cu、K 助剂作为费托合成铁基催化剂最常使用的两种助剂, 其含量对催化剂的费托反应性能影响

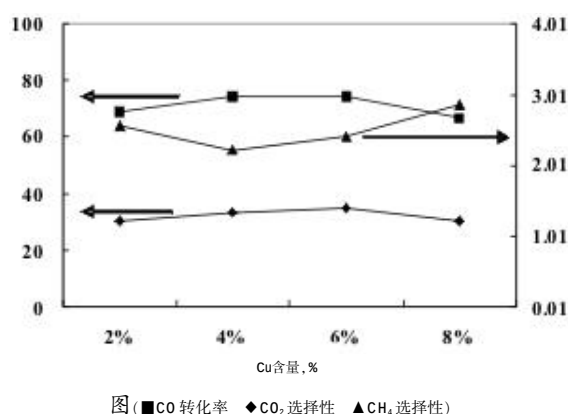


图4 不同含量Cu组份对沉淀铁催化剂反应性能的影响

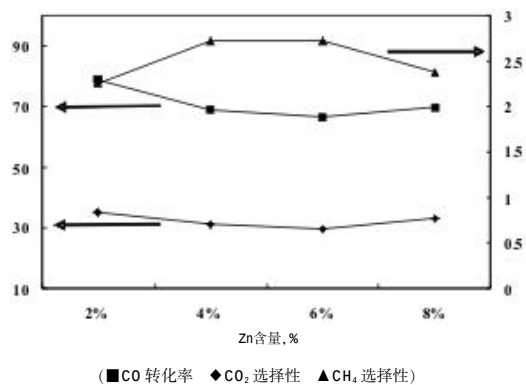


图5 不同含量Zn组份对沉淀铁催化剂反应性能的影响

已经被许多学者进行过研究报道。Bukur^[5]发现, K 助剂作为公认的电子助剂, 能够有效地提高长链烃和烯烃的选择性, 这是因为 K 助剂能促进催化剂对 CO 的吸附, 抑制对 H_2 的吸附。Yang^[6]在 Fe/Mn 催化剂性能的 K 助剂影响研究当中, 发现 K 的添加有利于催化剂形成大晶粒的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 并且能抑制催化剂的还原, 但可促进催化剂的碳化。当 K 含量低于 $0.7\text{wt}\%$ 时, 随着 K 含量的增加, 催化剂的活性不断增加, 当含量超过 $0.7\text{wt}\%$ 时, 活性迅速下降。

Cu 助剂对反应性能的影响也从图 4 中可以反映出来, 尽管不是非常有规律的线性变化趋势, 仍可以发现 Cu 的存在对 CO_2 选择性、CO 转化率不如对甲烷选择性那样影响显著。为使得催化剂的转化率和副产物选择性都很满意, Cu 含量存在一个最佳含量范围的趋势更是明显。Bukur^[7]在固定床反应器上比较了不含 SiO_2 的 $100\text{Fe}/x\text{Cu}/y\text{K}$ 系列催化剂的费托反应性能, 发现含 Cu 催化剂的活性比不含 Cu 的催化剂高得多。由此推测 Cu 助剂促进催化剂活性的原因在于其能提高 $\alpha\text{-Fe}$ 或铁碳化物晶相在还原后

催化剂中的含量,还指出 Cu 助剂的加入能提高长链烃的选择性,尤其是不含 K 助剂的催化剂。但是在本研究当中针对选择性的贡献,Cu 含量却是有一个最适宜的范围,这一结果值得深入考察。同样,在 Wielerstz^[6]以 SiO₂ 为载体的 Fe/Cu 双金属催化剂的研究中,发现 Cu 助剂能加速 Fe₂O₃ 的还原,当 Cu 原子占(Fe+Cu)原子总量的 10~20%时,催化剂具有最高的费托反应活性。Cu 含量较低时,对催化剂的选择性影响不大,当 Cu 原子含量超过 Fe 原子和 Cu 原子总量的 60%时,Cu 助剂能明显提高 CH₄、CO₂ 和烷烃的选择性。

关于 Zn 的加入量对催化剂性能影响的报道较少,有研究^[4]发现,发现 Zn 助剂含量较低时,催化剂的比表面积随着 Zn 助剂含量的增加而增加,Zn 助剂能够丰富催化剂的孔道。Zn 助剂会抑制催化剂的费托反应活性,促进产物中低碳烃的选择性。加入少量 Zn 助剂后,WGS 反应受到一定抑制,但继续增加 Zn 的含量后,WGS 反应反而会受到促进。这一结论完全与本研究结果(图 5)的范围相一致,表明 Zn 的存在对催化剂活性及选择性的积极作用是有限的。

2.2 SiO₂ 添加对催化剂反应性能的影响

图 6 显示的是 SiO₂ 加入到硝酸盐溶液中制备的系列催化剂的反应结果。由图可见,随着 SiO₂ 含量增加,CO 转化率显著下降,CO₂ 选择性也有下降,而 CH₄ 选择性则逐渐增加。SiO₂ 含量在 5~20%范围时催化剂性能变化较为显著,而 SiO₂ 相对含量>25%后,活性处于很低的水平。其中 SiO₂ 含量为 5%时的催化剂存在活性诱导期,即 CO 转化率先是在短时间内达到一个最高值,然后快速下降达到一个较为稳定的值,而当 SiO₂ 含量高于 10%以后,此诱导期消失。

图 7 是 SiO₂ 采用加入碳酸铵溶液中制得的催化剂的反应性能评价结果。可以发现,随着 SiO₂ 相对含量增加,其对催化剂活性、选择性的影响的总体效应与图 6 系列催化剂相似:CO 转化率下降,CO₂ 选择性下降,CH₄ 选择性略有增加。但是仔细比较图 6 和图 7 可以发现,在同等 SiO₂ 含量时图 7 系列催化剂(SiO₂ 加入碳酸铵)比图 6 系列催化剂(SiO₂ 加入硝酸盐中)的 CO 转化率最高值要略大,但失活速率快很多;SiO₂ 添加含量对于催化剂活性和选择性地影响也更为敏感,在 0~10%添加量时催化剂性能变化

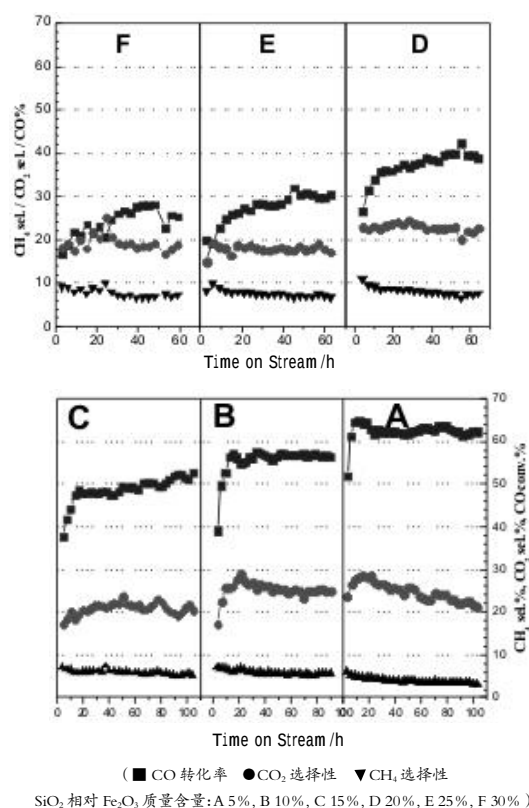


图 6 不同含量 SiO₂ 以加入硝酸盐溶液时对费托反应性能的影响

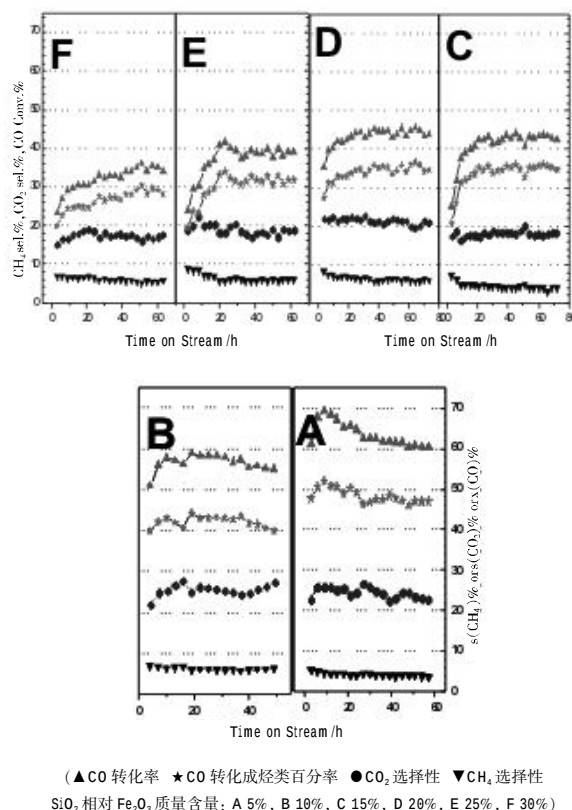


图 7 不同含量 SiO₂ 加入碳酸铵溶液中的费托反应性能变化

就极为显著,当 SiO_2 相对含量>15%后,活性已处于很低的水平。

SiO_2 作为铁基催化剂最常使用的载体或粘合剂,被国内外众多催化剂专利商和学者深入研究过,Bukur^[9]研究了 SiO_2 载体对 Fe/Cu/K 催化剂的影响后发现,随着 SiO_2 的增加,费托反应和 WGS 的活性都呈下降趋势, SiO_2 载体能增加催化剂的稳定性,促进催化剂的一次反应,降低产物烯烷比。 SiO_2 还会降低气态烃的产率。

Damlani^[10]采用 MES、BET、XRD 和 SEM 等表征手段研究了 SiO_2 对 Fe/Cu/K 催化剂物理化学性质的影响。结果表明, SiO_2 的添加有利于催化剂中形成直径小于 3nm 的铁相晶粒,这些小晶粒具有很大的比表面积,难于还原和碳化。 SiO_2 加入还会导致有效 K 含量的降低。上述两方面的结果导致,催化剂的活性与 Si 的含量成反比关系。

本文对不同 SiO_2 含量系列催化剂组进行了 XRD 表征分析,结果见图 8。由图 8 可见,所有催化剂主要处于非晶状态,但在低 SiO_2 含量催化剂上还能发现残留有微晶结构;改变 Zn、K、Cu 助剂含量,对催化剂的结晶程度影响较小;随着助剂(粘结剂) SiO_2 加入从 10wt%、15wt%增加到 20wt%时,催化剂表面残留的微晶结构趋于消失,更接近无定型结构,活性金属的分散度得到提高。

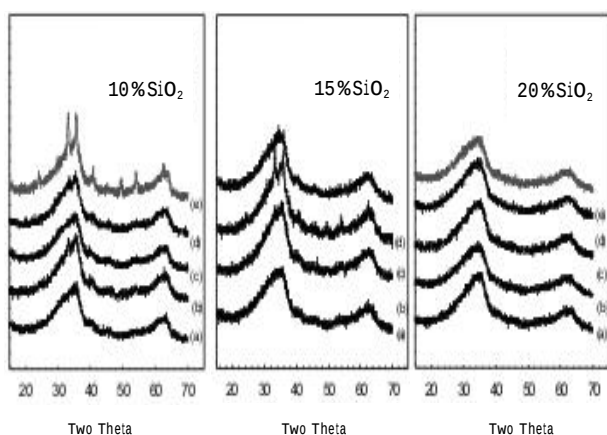


图 8 不同 SiO_2 含量的沉淀铁催化剂 XRD 图谱
(每组变化是因含助剂 K、Cu、Zn 量不同)

表 1 给出了不同 SiO_2 含量催化剂样品的孔结构数据,可见当 SiO_2 相对含量达到 15%时,比较 5% 含量的催化剂,比表面提高了 65%以上,孔容也有较大提高。

表 1 含有不同百分含量 SiO_2 的催化剂孔结构参数

SiO_2 含量, wt%	ZnKCu组合	SBET, m^2/g	$V_p, \text{cm}^3/\text{g}$	D_m, nm
5	a	101.2	0.25	10.1
	b	103.9	0.26	10.2
	c	97.2	0.28	11.6
15	a	175.7	0.35	9.7
	b	170.7	0.47	11.1
	c	165.5	0.48	11.7

图 8 结果和表 1 数据表明, SiO_2 含量增加有利于催化剂表面活性金属形成分散相,提高催化剂的比表面积。从常规催化理论来说这些催化剂表面性质的变化都倾向于提高催化剂的活性,而图 6、图 7 所示费托合成反应性能评价却得到相反的结果,其原因是否为单位催化剂质量中由于 SiO_2 含量增加后作为主活性组分的 Fe 原子数量大幅减少而致,抑或是由于上述两类添加 SiO_2 的方法导致了催化剂表面形成了 Fe-Si 相互作用体,或者多种原因综合而成,还需要深入研究。

试验工作还包括针对不同阶段添加 SiO_2 及助剂组分的制备路线影响研究,尤其是不同制备技术对所得催化剂样品的物化性能、费托反应初期、长期稳定性等进行了详细考察,限于篇幅,未在本报道中描述。

3 结论

通过在 DCS 控制连续流动微反评价试验装置上全面的费托沉淀型铁基催化剂配方和制备技术对反应活性、选择性影响的考察,发现 Fe-Cu-K-Zn- SiO_2 作为费托催化剂基础配方,在专有制备技术和组分搭配合理的情况下,有较高的活性和选择性。对于工业催化剂技术, SiO_2 既是粘结剂,提高强度、抗磨等性能;又起到了载体的作用,调变催化剂的孔容、孔径和分布、初始粒子分散度等;还可能通过金属活性组分与载体的相互作用影响催化剂性能。费托合成沉淀铁催化剂加入 SiO_2 后,随着 Si 含量的增加,稳定性增加、CO 转化率下降、 CO_2 选择性下降、 CH_4 选择性略有增加。关于主要助剂 K、Cu、Zn 的影响:发现 K 含量提高有利于提高 CO 转化率,降低 CH_4 选择性,但同时也有提高 CO_2 选择性的趋势,也表明 K 含量有一最佳范围;Zn 的增加对于活性、选择性等没有起到显著的有利作用,其加入量应当再

进行优化;Cu 助剂的含量对于催化剂的活性和选择性也有一个最佳范围。

参考文献

- [1] Schulz H. H, Short history and present trends of Fischer-Tropsch synthesis[J]. Appl. Catal. A, 1999, 186(1-2): 3
- [2] Dry M E. E, The Fischer-Tropsch process: 1950-2000[J]. Catal. Today, 2002, 71(3-4): 227
- [3] 郝庆兰, 王洪, 刘福霞等, 焙烧温度对浆态床 F-T 合成铁基催化剂性能的影响[J]. 催化学报, 2005, 26(4): 340
- [4] 王洪, 浆态床 FT 合成铁基催化剂物相转移及 Cu, Zn 助剂作用研究[D]. 中国科学院山西煤炭化学研究所, 太原, 2005
- [5] Bukur D B, Okabe K, Rosynek M P. et al. Activation Studies with a Precipitated Iron Catalyst for Fischer-Tropsch Synthesis .1. Characterization Studies[J]. J. Catal., 1995, 155(2): 353
- [6] Y Yang, H. Xiang, Y. Xu, L. Bai, Y. Li, Effect of potassium promoter on precipitated iron-manganese catalyst for Fischer-Tropsch synthesis[J]. Appl. Catal. A: General, 2004, 266, 181-194
- [7] Bukur D. B., Mukesh D., Patel S. A., Promoter Effects on Precipitated Iron Catalyst for Fischer-Tropsch Synthesis[J]. Ind. Eng. Chem. Res. 1990, 29, 194-204
- [8] Wielers A.F.H., Hop C.E.C.A., Beunum J. van, et al., On the properties of silica-supported bimetallic Fe-Cu catalysts. Part 1. Preparation and characterization[J]. J. Catal. 1990, 121, 375-385
- [9] Bukur D. B., X. Lang, Mukesh D., Zimmerman W. H., et al, Binder / Support Effects on the activity and selectivity of iron catalysts in the Fischer-Tropsch Synthesis[J]. Ind. Eng. Chem. Res. 1990, 29, 1588-1599
- [10] Dlamini H., Motjope T., Joost G., et al., Changes in physico-chemical properties of iron-based Fischer-Tropsch catalyst induced by SiO₂ addition[J]. Catal. Lett. 2002, 78, 201-207

作者简介: 吕毅军 (1972-), 博士、高级工程师, 长期从事费托合成铁系催化剂的研究。现任中国神华煤制油化工有限公司北京研究院间接液化和合成研究所课题组长、神华浙工大创新工程中心副主任。

A Study on the Influence of Precipitated Iron-based Catalyst for Fischer-Tropsch Reaction Performance

Lu Yijun¹ Shi Yulin¹ Ning Wensheng² Lu Deyi²

(1. Beijing Institute of China Shenhua Coal-oil Chemical Industry Co., Ltd, Beijing 100011, China;

2. Shenhua Engineering Innovation Center of Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang, 310012, China)

Abstract: The paper studies the reaction performance of series of synthesized Fischer-Tropsch iron-based catalyst in integral fixed-bed reactor and the direct relevance of its chemical composition and content, and mainly analyses the influence of Cu, K, Zn auxiliaries on catalytic reduction and the activity and selectivity of Fischer-Tropsch synthesis reaction. At the same time the influence of the addition amount of SiO₂ on the Fischer-Tropsch catalyst reaction performance is analyzed to explore the mechanism of coordinated effect of the effective catalyst agents such as K and Cu with the existence of SiO₂.

Key words: Fischer-Tropsch reaction, precipitated iron catalyst, silica, binder, additives

(收稿日期: 2009-4-05 责任编辑: 贺烨真)

(上接第 48 页)

Low NO_x Combustion Adjustment of Guohua Panshan's Russian-made 500 M W Supercritical Boiler

Liu Yingwen, Gao Wujun

(Tianjin Guohua Panshan Power Generation Co., Ltd., Jixian County, Tianjin, 301900)

Abstract: Guohua Panshan Power Generation Company's boiler is a supercritical, DC, intermediate re-heating, balanced-ventilation coal breeze boiler of solid slagging, which is equipped with 32 vortex burners. In view of the key point of how to control the environmental indicators (nitrogen oxides NO_x) through the adjustment of the boiler combustion test, combustion adjustment test is carried out, and a measurement and an analysis towards the boiler's oxygen amount and graded air supply are made. An adjustment programs is made in accordance with combustion test.

Key words: supercritical boilers, combustion adjustment, swirl burner, nitrogen oxides

(收稿日期: 2009-3-11 责任编辑: 郝广杰)

600MW 火电机组湿法烟气脱硫系统 GGH 堵灰治理

刘毅 张千

(神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100069)

摘要: 某电厂 600MW 火电机组湿法烟气脱硫系统运行过程中,由于烟气换热器 GGH 严重堵塞,系统阻力增大,增压风机超负荷运行,为防止增压风机出现喘振、失速,不得不长期开启烟气旁路运行。经过深入现场调研,对运行数据归纳、整理,利用垢样成分分析、烟气流场分析等技术手段,逐步分析出造成 GGH 堵塞的原因。在组织对 GGH 换热元件进行有效清洗的基础上,采取了有针对性的技术措施,保证系统安全稳定运行,提高了设备可用率,极大地减少了 SO₂ 的排放量,产生良好的环保效益。

关键词: 火电机组 脱硫 GGH 堵塞 治理

中图分类号: TM621.7⁺3

文献标识码: B

文章编号: 1672-3880(2009)02-0083-08

1 概述

湿法烟气脱硫工程中,回转式烟气换热器(通常称为 GGH)以其不需要提供单独热源、降低脱硫系统水耗量、提高净烟气温度,降低对烟囱和净烟道的腐蚀等优点而被广泛应用。从设置有 GGH 的烟气脱硫装置运行情况来看,均出现了不同程度的 GGH 蓄热元件结垢,造成 GGH 堵塞,系统阻力增加,导致增压风机喘振,影响到脱硫系统的安全运行,以致于部分电厂不得不长期开旁路运行,甚至还出现将 GGH 蓄热元件拆除运行的状况,带来了严重的安全隐患。

因此,解决 GGH 堵塞,不仅关系到脱硫系统安全稳定运行,而且对保障整个火电厂安全运行有重大意义。

本文结合某电厂脱硫系统的运行情况,以试验数据和相关测试结果为依据,分析 GGH 结垢的原因,并提出相应的解决方案。GGH 蓄热元件结垢情况如图 1。



图 1 GGH 蓄热元件结垢照片。

2 系统描述

2.1 概况

该电厂燃煤火力发电机组装机容量为 2×600MW,

锅炉为亚临界、中间再热四角切圆汽包炉,设计煤种为神府东胜煤。工程同步建设烟气脱硫装置,采用了石灰石—石膏湿法工艺,一炉一塔配置,吸收塔为鼓泡塔,设有 GGH。两套脱硫系统分别于 2004 年 11 月和 2005 年 3 月投入运行。

2.2 布置方式

脱硫岛布置烟囱后部,两座吸收塔沿烟囱中心线对称布置。原烟气由主烟道上部接出,经增压风机升压后由 GGH 下部接入,冷却后的原烟气再经烟气冷却泵输送的浆液冷却到饱和温度后喷射进入浆池。脱硫后的净烟气由 GGH 净烟气侧上端接入,加热后通过烟囱排放。

GGH、烟气冷却泵分别布置在吸收塔两侧。除雾器布置在吸收塔出口净烟道的水平段,共两级。

2.3 主要设计参数

脱硫系统主要设计参数见表 1。

表 1 脱硫系统主要设计参数表

序号	名称	单位	100%负荷设计工况
1	脱硫装置烟气量	Nm ³ /h	2130613
2	原烟气 SO ₂ 浓度	mg/m ³	1580
3	净烟气 SO ₂ 浓度	mg/m ³	<79
4	净烟气粉尘浓度	mg/m ³	<12
5	除雾器雾滴含量	mg/Nm ³	<50
6	净烟气温度	℃	>80
7	脱硫效率	%	≥95
8	压力损失整个脱硫装置	Pa	≤4000
9	整个脱硫装置电耗	kW	≤12600

3 原因分析

3.1 垢成分分析

该厂曾分别燃用神华煤和神华煤混烧印尼煤，为分析煤质变化引起粉煤灰成分变化对 GGH 结垢的影响，对不同煤质条件下，GGH 蓄热元件上的结垢物成分、粉煤灰成分进行分析，结果如下：

3.1.1 燃用神华煤

(1)GGH 结垢物物相分析见表 2。

表 2 燃用神华煤，GGH 结垢物成分

成 分	分析结果(%)	
	冷端	热端
Al ₂ O ₃	6.493	7.419
SiO ₂	13.3499	20.98
SO ₃	6.8387	7.0334
CaO	28.1875	22.2401
Fe ₂ O ₃	36.667	33.992
CaSO ₄	25.68	
CaCO ₃	4.53	

从上表看出，结垢物主要成分为：CaO、SiO₂、Al₂O₃ 及 Fe₂O₃ 四种，与水泥的成分比较接近。

(2)燃用神华煤灰成分分析结果见表 3。

表 3 燃用神华煤灰成分

成分	分析结果(%)
Na ₂ O	1.15
MgO	1.31
Al ₂ O ₃	15.87
SiO ₂	28.62
P ₂ O ₅	0.48
SO ₃	4.37
K ₂ O	1.05
CaO	25.34
TiO ₂	1.45
Cr ₂ O ₃	0.18
Fe ₂ O ₃	20.11
CuO	0.03

3.1.2 混烧印尼煤

2007 年 2 月后，该电厂开始混烧印尼煤，检查发现蓄热元件的热端、中部、冷端的结垢情况有所不同，成分分析结果如下：

(1)垢样元素分析和物相分析结果见表 4、表 5。

从元素分析上看，GGH 蓄热元件结垢物的成分中，主要元素是 Fe、Si、F、Al、S、Ca、O 等 7 种元素；从

表 4 混烧印尼煤 GGH 蓄热元件结垢物元素

元素	热端	中部	冷端
O	47.64	49.79	49.09
Ca	7.49	6.50	10.11
S	5.53	4.31	8.71
F	7.49	5.03	6.09
Si	13.90	15.51	11.72
Al	8.42	8.30	5.95
Fe	5.69	6.40	4.83
Mg	0.82	0.61	0.81
Na	0.62	0.57	0.45
K	0.54	0.57	0.49
Sr	0.25	0.25	0.45
Ti	0.70	0.84	0.54
Ba	0.36	0.44	/
P	0.45	0.65	0.39
Mn	0.10	0.11	/
Ba	/	/	0.37
Se	/	0.12	/

表 5 GGH 蓄热元件结垢物物相分析

物相	冷端	中部	热端
CaSO ₄ ·2H ₂ O	60.19	82.52	42.11
CaSO ₄	15.07	/	42.35
CaSiF ₆ ·2H ₂ O	11.14	7.45	10.60
KAl(SO ₄) ₂ (OH) ₆	/	/	4.94
CaAl ₂ O ₄	13.60	10.03	/
非晶 SiO ₂	少量	少量	少量

物相分析结果看，主要成分是石膏，属酸不溶物，垢量越高的部位石膏量越高，另外还含有一些结构复杂的化合物。

(2)飞灰成分分析见表 6、表 7。

表 6 飞灰成分表（石炭煤：印尼煤：神混煤=1：1：3）

分析项目	分析结果(%)
NaO ₂	0.06
MgO	0.65
Al ₂ O ₃	14.4
SiO ₂	38.3
P ₂ O ₅	0.112
SO ₃	1.711
K ₂ O	1.551
CaO	23.425
TiO ₂	2.413
Fe ₂ O ₃	17.348
CuO	0.037

表 7 飞灰成分表 (石炭煤:印尼煤:神混煤=1:2:2)

分析项目	分析结果(%)
NaO ₂	0.63
MgO	1.033
Al ₂ O ₃	26.1
SiO ₂	44.32
P ₂ O ₅	0.538
SO ₃	2.533
K ₂ O	1.122
CaO	13.356
TiO ₂	1.377
Fe ₂ O ₃	8.956
CuO	0.018

3.1.3 综合分析

综合上述化验结果,从结垢成分及其部位分布情况分析,可得出如下结论:

(1)通过垢成分分析,可以看出 GGH 结垢主要由 SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃,其成分和水泥很接近,导致 GGH 蓄热元件上积垢清洗困难;

(2)混烧印尼煤前粉煤灰中 CaO 含量达到 25.34%,而混烧印尼煤后 CaO 含量有所下降,结合对运行数据的分析,发现 GGH 蓄热元件积垢的速度也相应减缓,说明粉煤灰中 CaO 的含量增加,会加速 GGH 堵塞;

(3)从混烧印尼煤后粉煤灰成分分析可以看出,CaO 含量明显减少,且随神混煤占的比例减少,粉煤灰中 CaO 的含量也相应减少。结合运行记录可以看出,随着 CaO 的减少,高压冲洗水效果就越明显。由此可以推断 CaO 含量减少,GGH 蓄热元件上积垢相对松散,易于清除;

(4)利用元素分析,对比蓄热元件热端结垢和冷端结垢可以看出,冷端 Ca、S 的含量较高,Si、Al、Fe 成分含量较低;热端 Ca、S 的含量次之,Si、Al、Fe 均高于冷端;中部 Ca、S 的含量最低,Si 的含量明显高于冷端和热端。而 Si 主要来源于飞灰,由此可以看出结垢主要集中在冷端和热端两侧,中部多为积灰;

(5)通过物相分析可以看出,垢样的主要成分是 CaSO₄·2H₂O 和 CaSO₄ 和部分 Si 的化合物,说明换热元件上积垢主要是由净烟气中的石膏和原烟气中的粉尘构成;

(6)从 GGH 冷端蓄热元件上的结垢成分可以看出,冷端 CaSO₄·2H₂O 含量为 60.19%,中间部位为

高达 82.52%,热端为 42.11%。由于石膏只能是由净烟气携带而来,应首先聚集在冷端,在冷端应占据大量的份额,由此可以判断,GGH 吹灰器的吹扫能力不足;

(7)GGH 热端、冷端蓄热元件结垢中 CaSO₄ 含量分别为 42.35%、15.07%,原烟气侧含量明显高于净烟气侧。分析其原因:GGH 热端蓄热元件温度介于 80℃~120℃之间,冷端蓄热元件温度介于 50℃~90℃之间,原烟气中 H₂SO₄ 蒸汽露点温度一般在为 120℃~130℃。原烟气中的 H₂SO₄ 蒸汽,在酸露点温度高于蓄热元件温度,如果有水与原烟气中 SO₃ 形成的 H₂SO₄,原烟气中的 CaO 与凝结的稀硫酸发生反应生成 CaSO₄,附着于蓄热元件表面形成结垢的一部分。其中水的来源主要有三个方面,一是原烟气中的水蒸气凝结;二是吹灰空气中含水;三是高压水冲洗后,压缩空气不能及时干燥而残留的水;

(8)随净烟气而来的浆液液滴中有少量 CaCO₃,也会与凝结的稀硫酸发生反应生成 CaSO₄;

(9)烟气飞灰成分主要有 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 等氧化物,而顺原烟气流向垢样中 Si、Al、Fe、Mg 元素的成分逐渐减少趋势,说明这部分结垢与原烟气中飞灰有关;

(10)浸泡试验中发现各段都有 SiO₂ 存在,经查实,其间出现过除尘器异常,所以烟气含尘量高也是加剧结垢的原因之一;

(11)蓄热元件表面一旦形成烧结性积垢,在运行中很难清除,造成 GGH 差压不可恢复,并加剧了结垢的速度。

3.2 除雾效果原因分析

理论上分析,位于 GGH 上游的设备除雾器如果效率较低,不能有效去除液滴,将导致烟气中的液滴对 GGH 及后部烟道处的玷污和腐蚀,加剧蓄热元件结垢。

影响除雾器效果的主要因素有液滴的数量和尺寸、流场分布(烟气流速)、除雾器结构,由于除雾器的结构形式已经确定,因此,主要针对液滴分布和流场进行分析:

3.2.1 流场分析

烟气流速是影响除雾器效果的主要因素之一,对除雾器前烟气流场进行数值模拟,结果表明,按原有导流板布置方式(如图 2)在除雾器入口截面上流场分布非常不均匀,最大速度为 12.2m/s,最小速度

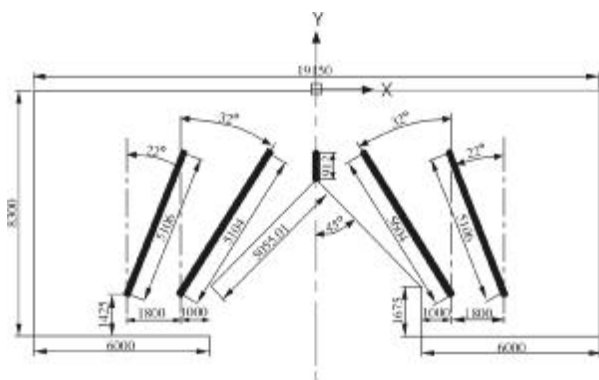


图 2 原有导流板长度和布置位置

为 -0.198m/s , 即两侧烟道混合后有中心回流区存在。除雾器入口前 $4\sim 6.5\text{m/s}$ 的速度范围面积百分比为 26.97% , $2\sim 7.2\text{m/s}$ 速度范围面积百分比为 47.16% 。流场分布情况如图 3、图 4、图 5 所示。

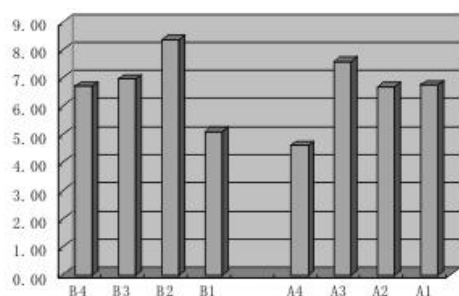
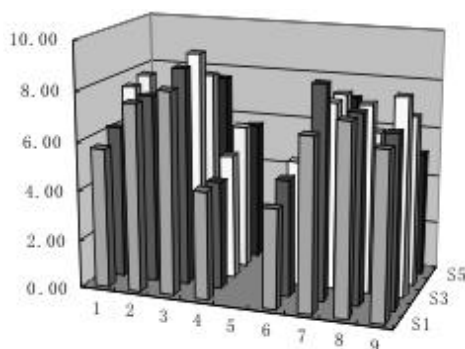
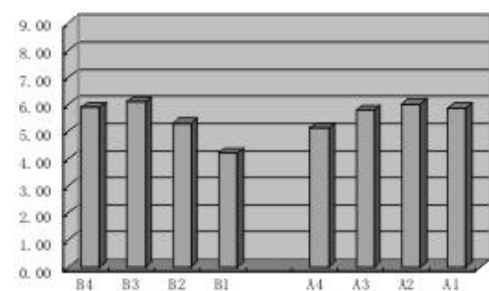


图 3 除雾器入口截面速度分布图

图 4 除雾器入口前烟道中心截面 ($x=3000\text{mm}$) 速度分布图 (m/s)图 5 除雾器入口前烟道水平截面 ($z=14250\text{mm}$) 速度分布图 (m/s)

通过流场分析可以看出, 该电厂除雾器主要存在如下问题:

(1) 除雾器烟气流场不均匀, 有较大比例烟气流速分布在除雾器高效区之外;

(2) 实际运行中关闭旁路挡板门时烟气平均流速达到 8.33m/s (有效通流面积按 75% 计), 高于除雾器的极限流速 7.2m/s 的情况, 从而导致除雾效果恶化。

3.2.2 液滴情况分析

从理论上分析, 鼓泡塔的技术特点决定了烟气携带一定的小液滴, 由于粒径偏小, 较难被除雾器捕捉。小液滴形成机理如下:

(1) 液流被机械破碎。对于机械破碎形成的小液滴, 主要可以分为三种情况: ①由于空气流速非常大, 气水混合物有很大的动能, 所以当气水混合物碰到固体壁上, 分界面上将会引起大量水滴飞溅; ②液面发生强烈波动时, 可能击溅起许多小水滴; ③大水滴落在液面上被打碎, 形成二次水滴。前两种情况与鼓泡床内气流的分布情况有关, 当气流流速分布不均匀时, 机械破碎形成的小液滴含量明显增多。

(2) 气泡在液面上逸出、破裂时形成。气泡从液面逸出、破裂时形成小液滴具体过程如下: 当气泡上浮到液面时, 气泡的上半部突出气空间, 水膜减薄以至于破裂, 破裂的水膜形成一些细小的水滴。由于气液两相的压力差及液膜的表面张力的作用, 气泡周围的水急剧向中心集聚以填补空虚部位, 形成一个波峰。以一定速度向上升起的波峰断成几个大水滴, 抛向气空间。气泡从液面逸出、破裂时形成小液滴的粒径与气泡的粒径成正比。

后续试验也证明了小液滴的存在, 同时适当增加 JBR 液位可以有效减少小液滴的产生。

3.3 GGH 清扫原因分析

为及时清理换热元件上的粘接物, 设计有三种清扫方式, 即高压水冲洗、低压水冲洗、压缩空气吹扫。如果清扫装置的投入能够达到一个良好的清扫效果, 必然会延长其使用周期。

造成清扫效果差的原因涉及到设备本体和运行方式以及系统配置的诸多因素, 包括以下几个方面:

3.3.1 板型的影响

GGH 的板型对结垢的产生和清扫效果有很大的影响。目前国内常用的板型为 DU 型和 DNF3 型。DU 型换热元件的优点是传热效率高, 可以减少传热面

积,降低传热元件高度;缺点是烟气通道是开放式的,吹扫压缩空气压力衰减快,不容易吹扫干净,且蓄热元件间距小。**DNF3** 传热效率低,所以换热面积大,换热元件高度偏高,也在一定程度上削弱了除灰效果。

由于技术流派的不同,因此,板型的影响是不可避免的。

3.3.2 冲洗水投入的影响

对运行数据的分析可以知道,在 2006 年 6 月 20 日前经过离线高压水冲洗后,**GGH** 折算差压为 660Pa,已经达到了在线高压水投入运行的条件,说明在此之前,**GGH** 结垢已经比较严重,即使用离线高压冲洗水清洗已经不能达到清洁的要求。在 2006 年 6 月 20 日至 2006 年 8 月 30 日这段时间内,折算差压一直呈上升趋势,折算差压由 660Pa 上升到 1500Pa,共历时 70d。

在利用离线高压水冲洗后,在 2006 年 9 月 22 日投运时折算差压下降至约 600Pa,在此后的 23d 内,上升幅度达到约 800Pa,在 2006 年 10 月 13 日至 10 月 23 日的时段内,运行人员进行连续在线高压水冲洗试验,在经历了短暂的差压下降的过程后,差压折算值不降反升,且增幅较快,因此可以证明,极度频繁的在线水冲洗不但不能帮助降低差压,反而使差压增加的速度更快。在 2006 年 10 月 25 日至 2006 年 11 月 28 日这一时间段内,折算差压由约 1100Pa 急剧上升至约 9800Pa。在随后的 16d 内,虽然初期系统停用后经高压水冲洗后折算差压下降到约 2400Pa,但最终还是上升到约 4570Pa,增加的速度依然很大。本阶段的情况除了证明在线高压水冲洗的投入频度不能太高外,也说明了一旦蓄热元件粘污状态严重,其差压增加的速度变快。由于在本阶段吹灰器按照正常程序投入运行,可以认为除灰器已经不能起到清洁作用。

2006 年 12 月 19 日至 2006 年年末的时段内,再次组织了离线高压水冲洗,2007 年 1 月 1 日投入运行后,折算差压下降到 850Pa 左右,到 2007 年 2 月 2 日差压折算值达到 2050Pa;但是在随后的 13d 内,差压折算值急剧上升,最后达到约 7000Pa。上述情况同样证明了在折算差压值达到或超过一定值以后,其增长速度会突然加快。

因此不能及时把握高压水冲洗投入的时机也是造成对清洗效果恶化的主要原因之一。

3.3.3 吹灰介质的影响

经过对 **GGH** 吹灰器的检查,发现存在如下问题:

(1)吹扫压缩空气湿度过大。在 **GGH** 的吹灰器吹灰试验过程中发现吹扫时压缩空气所带水分较多,尤其在开始吹扫时,对压缩空气的湿度进行了测量,发现压缩空气罐入口管道处压缩空气湿度为 17.7%HR,然后测量吹灰器就地压缩空气母管压缩空气湿度为 38.9%HR,说明在吹灰器就地压缩空气母管处有存水现象,或者说压缩空气所带的水汽在此处有凝结现象,影响吹扫效果。

(2)压缩空气吹扫能力不足。该电厂脱硫 **GGH** 蓄热元件吹灰用压缩空气空压机出口表压是 7.2~7.5bar,吹灰器进口处吹扫时压缩空气压力为 6.5~7.3bar,通过对 **GGH** 吹灰器压缩空气吹扫时压力衰减试验发现,在正常压缩空气吹扫时,压缩空气到蓄热元件底部时流速衰减已达到 50%,造成吹灰器无法吹透蓄热元件。

3.4 运行方式原因分析

通过结垢成分分析得知,**GGH** 换热元件结垢主要原因在于净烟气携带石膏浆液液滴较多,而净烟气携带的中石膏量,不仅与除雾器的除雾效率有关,还与采用的脱硫工艺和运行参数的选择及运行调整有关,主要表现在:

(1)石膏浆液密度偏高,净烟气中携带的浆液浓度也会相应高些,携带石膏量增大;

(2)吸收塔浆液 PH 值偏大,浆液中的 CaCO_3 浓度较高,净烟气中携带的 CaCO_3 浓度相应增加,加剧结垢;

(3)由于脱硫开旁路运行,在机组负荷调整时,会导致部分净烟气经旁路倒流,一部分净烟气与原烟气混合,降低了 **GGH** 热端的入口烟温,原烟气中的 H_2SO_4 蒸汽凝结加快,凝结量更多;由于原烟气温度的降低,烟气中的 SO_3 也直接吸收水分而生成 H_2SO_4 。此两方面的因素引起的换热元件表面稀硫酸增多,加剧了 CaSO_4 等结垢;

(4)由于旁路的分流,进入吸收塔的原烟气流量减少,流经除雾器的烟气流速低于临界流速,除雾器除雾效果恶化,大量的石膏浆液液滴逃逸除雾器到了 **GGH** 冷端,导致冷端结垢严重。

4 处理方案

4.1 脱硫系统恢复

根据对运行数据的分析,维持脱硫系统的长周

期稳定运行,必须首先使 GGH 蓄热元件保持在洁净状态。考虑到 GGH 结垢成分复杂,清洗困难,清洗介质选用不当容易损伤 GGH 蓄热元件表面的搪瓷(主要成分 SiO_2)的特点,经过小型清洗,中型清洗实验后,确定了清洗方案。GGH 蓄热元件清洗前后的对比见图 6。

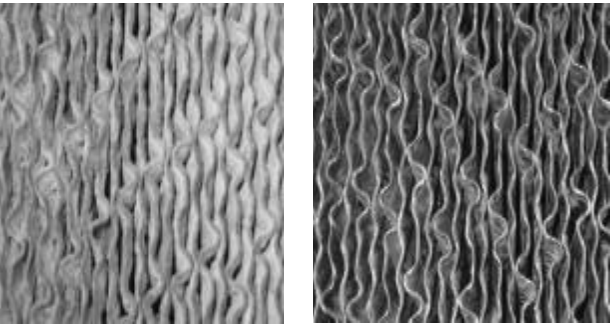


图 6 GGH 蓄热元件清洗前后的照片对比

通过 GGH 蓄热元件清洗前后的照片对比可以看出,GGH 蓄热元件化学清洗,能有效清除其积垢,使脱硫系统从新投运时,GGH 保持在相对洁净状态。

4.2 流场优化

为使除雾器前的烟气流场分布更合理,保证较高的除雾效率,对设计工况下进行了 7 个工况的数值模拟,采用烟气流速 4~6.5m/s 和 2~7.2m/s 速度范围内,净烟气在除雾器入口截面的分布比例来评估除雾器前烟气流速分布均匀程度。确定了如下流场优化方案:

将原来吸收塔出口的两个烟道汇合点移后,使得汇合点直接放在了除雾器入口处,使得两个烟道的烟气汇合后直接进入除雾器,并将原来除雾器入口烟道的四块导流板割除。另外增加八块导流板,沿除雾器入口 V 型烟道中心线对称布置,规格分别为:长度为 1960mm,与烟道中心夹角为 28°;长度为 1832mm,与烟道中心夹角为 25°、长度为 1832mm,与烟道中心夹角为 18°、长度为 1000mm,与烟道中心夹角为 15°。

4.3 吹灰器完善

针对目前吹灰器的设置情况,相应主要完善措施为:

(1)在 GGH 底部再增加一台吹灰器,确保换热元件的上下都能够吹透,正常情况下每 8h 进行一次压缩空气吹扫,当 GGH 换热元件压差超过初始值的

1.3 倍时投入高压水进行冲洗;

(2)提高原脱硫空压机的出口压力至 1.3MPa,确保吹灰器就地压缩空气的压力约为 0.9MP;

(3)在压缩空气储气罐出口增加空气净化装置,提高 GGH 换热元件表面的干燥度;

(4)对原有的高压冲洗水泵出口管和入口管进行改造,增大高压冲洗水流量,以提高冲洗效果。

4.4 运行参数调整优化

针对鼓泡塔脱硫技术,拟定了脱硫系统运行调整方案如下:

(1)FGD 装置启动后,按规定操作关闭烟气旁路挡板,投入增压风机动叶控制自动,使得旁路挡板前后差压<300Pa;

(2)在锅炉 BMCR 工况下,关闭烟气旁路挡板,观察 GGH 原烟气侧、净烟气侧的差压,并做好记录。在原烟气侧差压达到 560Pa 时,启动高压水冲洗;

(3)在锅炉 BMCR 工况下,关闭烟气旁路挡板,除雾器的冲洗方式不变,如果超过 200Pa,则加强冲洗。冲洗效果不佳,应停下脱硫装置检查除雾器;

(4)在 BMCR 工况下,在其它运行参数一定的情况下,吸收塔浆液 PH 值稳定控制在 5.0 左右;

(5)BMCR 工况下,在其它运行参数一定的情况下,吸收塔浆液含固量调整 15%左右;

(6)在 BMCR 工况下,在其它运行参数一定的情况下,调整 JBR 液位,保持浸没深度为 135mm,并注意跟踪分析石膏浆液成分,保证氧化效果。

5 处理后的效果分析

5.1 改造前后的运行数据分析

通过对 GGH 进行改造,GGH 差压运行稳定性显著提高,在 FGD 装置大修启动后保证脱硫系统各项运行参数正常,保持 GGH 运行差压稳定,坚持定期和不定期高压在线水清洗,精心控制吸收塔 PH 值、浆液密度、液位,各项参数均运行在合格范围内,改造前后 GGH 差压情况对比见表 8 和图 7、图 8。

表 8 GGH 差压数据统计表

日期	机组负荷 MW	脱硫烟气量 km ³ /h	GGH 原差压 kPa	GGH 净差压 kPa
2007 年 6 月 1 日 (实施前)	601	1978	1.25	1.15
2007 年 12 月 24 日 (实施后)	598	1950	0.86	0.84
2008 年 5 月 22 日	599	2071	0.72	0.60
2008 年 6 月 4 日	599	2080	0.73	0.65
2008 年 7 月 3 日	601	2077	0.71	0.80

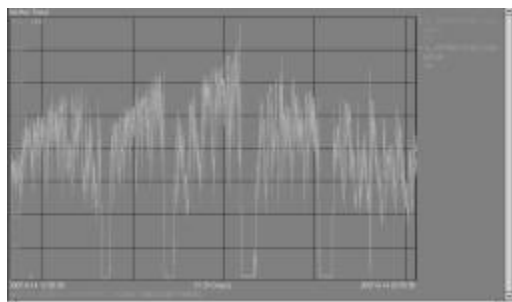


图 7 GGH 改造前差压变化趋势(2007 年 5 月 14 日至 6 月 14 日)

说明:图中 GGH 差压急剧下降时段为开启旁路挡板,关闭增压风机动叶,用高压水清洗 GGH 时段

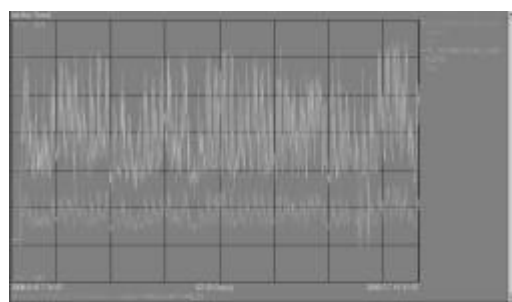


图 8 GGH 改造后差压变化趋势(2008 年 5 月 16 日至 7 月 7 日)

改造前,GGH 差压上升速度迅速,平均每天上升 100pa 左右,通常连续运行不到半个月时间,GGH 单侧达 1500pa 左右,折算差压达 3000pa 左右,使脱硫系统阻力增大,不得不开启旁路挡板、增压风机限动叶运行。改造后 GGH 单侧差压在近两个月的时间里上涨了 100pa 左右,无明显上升趋势,旁路挡板一直处于关闭状态。在机组满负荷的工况下,单侧差压最大为 830pa,且通过正常的清洗手段能有效地遏制 GGH 差压增长。

5.2 经济效益分析

验证脱硫装置的主要技术经济指标主要为:脱硫效率,系统可用率、电耗等指标。按照设计,该系统脱硫效率均不小于 95%,系统投运率不低于 95%。由于 GGH 堵塞原因,脱硫系统尽管投运率均超过 90%,但旁路烟气挡板开启,只能部分烟气脱硫。治理后,脱硫系统投运率达到 98%以上,且一直保持旁路烟气挡板关闭。

由于系统可用率的提高,其经济效益主要体现在如下 3 个方面:

(1)系统长期高效运行,减少了 SO₂ 的排放,降低了排污费;

(2)GGH 阻力下降,增压风机电耗下降,降低了

厂用电率;

(3)避免了脱硫电价罚款。根据“燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法”的有关规定,安装脱硫设施后,上网电价在原执行上网电价的基础上每千瓦时加价 1.5 分钱。但具有下列情形的燃煤机组,从上网电价中扣减脱硫电价,即:

(a)脱硫设施投运率在 90%以上,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款;

(b)投运率在 80%~90%的,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款并处 1 倍罚款;

(c)投运率低于 80%的,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款并处 5 倍罚款。

5.2.1 排污费

根据环保局的统计计算,每台机组满负荷工况开启旁路小时 SO₂ 排放量 0.625t/h,每台机组满负荷工况关闭旁路小时 SO₂ 排放量 0.0625t/h,每台机组治理前后小时降低 SO₂ 排污量:

单台机组降低 SO₂ 排污量=(开启旁路前每小时排污量-关闭旁路后每小时排污量)=0.625-0.0625=0.5625 t/h。

单台年度降低 SO₂ 排污量=(0.625-0.0625)×6000=3375t/a·台

两台机组每年可减少 SO₂ 排放量 6750 t/a。按照排污费 630 元/t 计算,年减少排污费 425.25 万元/a。

5.2.2 电耗

分别按 GGH 堵塞时满负荷脱硫增压风机的电耗工况与处理方案实施后 3 个月内增压风机的满负荷时平均电耗工况进行对比;时间按年度利用小时数作为计算(6000h);年度增压风机电耗节约量计算公式为:

年度节电量 kWh=(改造前增压风机功率-改造后增压风机功率)×年机组利用小时数。

1 号机组年度节电量=(改造前增压风机功率-改造后增压风机功率)×年机组利用小时数=(6054-4970)×6000=650.4 万 kWh。

2 号机组年度节电量=(改造前增压风机功率-改造后增压风机功率)×年机组利用小时数=(6234-4518)×6000=1029.6 万 kWh。

因此,年度 1、2 号机组脱硫系统共节电约 1680 万 kWh。

5.2.3 脱硫电价罚款

根据“燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法”的规定,脱硫设施投运率在 90% 以上,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款。治理前,旁路烟气挡板门开启,部分烟气脱硫,但脱硫装置的投运率均超过 90%。每台机组脱硫投运率每降低 1% 需扣除脱硫电价:

脱硫投运率每降低 1% 扣除脱硫电价=脱硫电价×年机组利用小时数×机组负荷=0.015×6000×600000×0.01=54 万元。

治理前后脱硫系统投运率由 92% 提高到 98% 以上,两台机组每年减少脱硫电价损失=脱硫投运率每降低 1% 扣除脱硫电价×治理前后投运率差×2=54×(98-92)×2=648 万元。

由此可以看出,通过对 GGH 堵塞问题的治理,可取得良好的环境效益和社会效益。

6 结论

综上所述,通过深入的原因分析,通过采取清洗、流场优化、吹灰器优化、运行参数优化等措施,提高脱硫系统投运率,降低脱硫系统电耗,大幅减少火电机组 SO₂ 的排放量,不仅可以产生较大的经济效益,而且有助于树立火电厂环保、节能的良好社会形象,具有重大的社会效益。

作者简介:刘毅(1970-),高级工程师,长期从事烟气脱硫设计及技术研究工作。

GGH Clogging Prevention of 600 M W Thermal Power Unit Wet-process Flue-gas Desulphurization System

Liu Yi, Zhang Qian

(Shenhua Guohua (Beijing) Electricity Research Institute Beijing, 100069, China)

Abstract: During a power plant's 600MW thermal power unit wet-process flue gas desulfurization system's operating, as flue gas heat exchanger GGH has serious blockage, the system resistance increases, and booster fan has overload operation. To prevent the emergence of pressurized air surge, the flue gas bypass has to be started for long-term operation.

After extensive field research, and through operation data sorting and analysis of the element analysis, flue gas flow field analysis, gradually the causes of congestion of GGH are found. Based on the effective cleaning of the GGH heat-transfer components, targeted technical measures have been taken to ensure the safe and stable operation of the system. Usability of the equipment is improved and the SO₂ emissions are greatly reduced to produce good environmental benefits.

Key words: desulphurization, GGH, clogging, improvement

(收稿日期: 2009-2-27 责任编辑: 郝广杰)

科技动态

《煤矿安全生产风险预控体系及控制技术》项目通过中国煤炭工业协会组织的专家鉴定

2008年12月20日,中国煤炭工业协会组织专家对《煤矿安全生产风险预控体系及控制技术》项目进行了鉴定。鉴定委员会认为,项目系统研究了煤矿事故致因理论、危险源辨识方法、风险评估及预警技术等,提出了煤矿内-外因事故致因理论;建立了煤矿安全生产风险预控管理体系;开发了煤矿安全生产风险预控管理系统平台;在神华集团安全生产风险预控体系建设实践中,开发了相关重大危险源控制技术。项目成果在神华集团所属煤矿以及全国试点煤矿得到推广应用,取得了显著的经济和社会效益。项目研究成果为我国煤矿提供了一套系统、全面的安全风险预控体系组成要素、指标体系、建设方法,以及有关危险源控制技术,填补了国内空白,综合研究成果达到国际领先水平。

神朔铁路污水的资源化利用技术研究

郝小平 郭尽朝 彭友 李红利

(中国神华能源股份有限公司神朔铁路分公司, 陕西 神木, 719316)

摘要: 污水的资源化利用是解决神朔铁路分公司所在地区水资源短缺问题的一条有效途径。在分析污水资源分布和特点的基础上, 论证了生活污水处理中采用固定化微生物污水处理技术和反渗透膜深度处理技术的可行性, 并应用 MBR 工艺技术进行了生活污水的初步和深度处理, 分别达到中水标准和《生活饮用水卫生标准》的有关规定, 开辟了水资源利用的新途径。通过技术经济比较, 进一步提出了提高污水资源化利用的技术实施方案。

关键词: 污水 资源化 利用 集成技术

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-3880(2009)02-0091-05

1 问题的提出

神华集团神朔铁路分公司地处神木北地区, 是我国“八五”计划重点建设项目之一, 也是中国神华能源股份公司煤、电、路、港、油系统工程的重要组成部分。它是我国继大秦铁路之后的第二条西煤东运的大通道, 主要承担神府、东胜煤田的煤炭外运任务。

由于神木北地区特殊的地理环境, 水资源短缺的矛盾尤为突出, 且日渐严重。据调查, 1993 年采水井只需 10m 就可以采到足够的表层地下水, 1995 年因表层地下水源不能满足用水需求, 神朔铁路公司开采积岩层水源, 新建了深达 250m 的永久水源。刚开始, 永久水源日供水量为 1200m³/d, 但随着地下煤层不断开发等原因, 地下水水位不断下降, 出水量不断降低。现供水量降为 300m³/d, 枯水季节只有 100m³/d 左右, 致使枯水季节无法保证正常供水, 严重影响了神朔铁路公司的正常生产。如 2006 年 10 月 23 日、24 日、25 日, 神朔铁路分公司机务段由于缺水导致无法正常供热, 给供热安全带来了严重隐患。

针对神木北地区严重缺水的情况, 神朔铁路分公司进行过大规模的水源勘察工作, 但收效甚微。

2 解决问题的思路

要解决神朔铁路分公司所在地区水资源短缺的矛盾, 一方面固然要加大水源勘察工作, 但另一方面必须要从节约用水, 实现污水的资源化利用上大做文章。

据 2008 年 5 月 15 日至 17 日实测, 神北铁路区的平均用水量约为 2185.7m³/d, 排水量是 1500m³/d, 其中绝大部分是生活用水。生活用水中, 饮用水比例很小, 大部分是冲厕、洗浴用水及其他用水。考虑到部分污水未汇集到污水厂内等原因, 也按排水量是用水量的 80% 的常理推算, 所以神北铁路区的平均排水量约为 1500~1800m³/d, 目前这部分水处理后直接排放, 造成了水资源的巨大浪费。如能将这部分水回用, 可节约大量的水资源。

神北铁路区所排的污水中, 生产污水中含有大量的有机污染物及其他化学类有毒有害污染物, 处理回用的成本很大。而生活污水中的污染物成分比较单一, 主要含有人们的生活过程中排放的易降解和难降解的有机污染物, 经过一定方法处理后, 可根据不同的用途处理到相应的程度。具体是生活污水经过 MBR 工艺处理后, 首先达到中水标准, 回用于冲厕、洗洒道路、草坪等用途; 再进一步深度处理后, 达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006) 中表 4 “农村小型集中式供水和分散式供水部分水质指标限值”水质标准, 可回用于洗衣、洗浴等用途, 以大大提高污水资源化利用程度。

在神木北地区开展以生活污水为对象的再生水回用研究, 不仅对于解决神朔铁路分公司的生产与生活用水, 保证企业的正常运行有着重要的意义, 而且对于解决整个神木北地区及类似地区水资源短缺问题提供了技术支持, 同时也是建立资源节约型、环境友好型社会的根本需要。为此神华集团于

2007年初立项, 决定开展“神朔铁路污水回收再利用技术研究项目”, 兰州交通大学联合甘肃省膜科学技术研究院于 2007 年 12 月通过竞标成为本项目的承接单位。

项目承接单位在大量前期实验研究的基础上, 经过实验室小试、中试, 最后经过制作 $1\text{m}^3/\text{h}$ 的实验样机, 进行现场试验, 达到了预期的实验效果。下面就该项目的主要内容作一简介分析。

3 关键技术及其特点

本研究采用如图 1 所示的技术流程。关键技术是微生物固定化污水处理技术、新型微生物固定化吸附型载体、高效微生物、膜处理设备及整体设备的全自动控制。

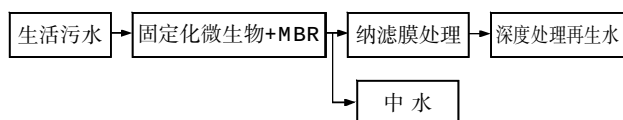


图 1 项目技术流程

3.1 固定化微生物处理技术

污水生物处理是利用微生物的新陈代谢作用降解水中的污染物, 达到净化水质的目的。生物处理是目前污水处理中最有效、最经济、应用最广泛的污水处理方法, 但常规的生物处理技术对污水中难降解有机物的处理效果差, 固定化微生物技术能很好地弥补这一缺点。

固定化微生物技术是一项新型污水处理技术, 是通过化学或物理的手段将微生物限定在一定的空间区域内, 其保持活性并可反复利用的方法。从某种意义上讲它是针对传统方法的弊端出现的, 所以其优势是常规生物处理方法不能比拟的。该方法特点鲜明, 针对性强, 直接解决传统污水处理方法中存在的问题。

固定化微生物方法种类很多。在该项目中, 采用操作简单、固定化条件较温和、对微生物活性影响小、成本低等优点突出的载体结合微生物固定化方法。

3.1.1 新型微生物固定化载体

载体结合微生物固定化法的核心是载体。载体的表面特征及结构直接影响着固定化效果的好坏。载体在为微生物提供附着固定表面并将其限定在某

一特定区域的同时, 还必须为生化反应的底物及反应产物的传递创造良好的条件。近年来, 随着水处理技术的不断发展, 对固定化载体材料也提出了更高的要求, 从而促进了载体材料的发展, 出现了更为理想的新型载体, 本项目采用的多孔功能型吸附载体^[1]是这类新型载体的典型代表。该类新型载体在保持原有载体巨大比表面积的同时, 着重强调微生物和载体之间的结合力、载体为微生物所提供的生长微环境以及所固定微生物最终能达到的多功能处理性能。

3.1.2 新型高效微生物

微生物是生物处理的主体。传统的污水生物处理主要有活性污泥法和生物膜法, 其所用的微生物是通过自然培养驯化得到的, 即根据具体的进水水质和运行工艺这两个具体条件, 采用自然淘汰的方式, 将不符合该条件的微生物淘汰, 最终只保留在该条件下能整体存活并发展壮大的菌种。这种方法成本低廉, 但存在着对污染物的降解能力差、微生物自然培养驯化需要的时间很长和抗冲击性能差等缺点。

专项微生物是利用生物工程手段, 针对不同的污染物, 培训出专门的降解微生物, 再将其制配成干粉状, 在污水生化工艺启动时直接投加使用^[2]。它由 20 多种微生物菌群、复合酶制剂、微生物营养素、生物活性诱导剂等多种成分配制而成, 与传统的活性污泥和生物膜等相比, 其特点主要表现在: ①专一性强, 根据不同的进水水质可选择专门的微生物。尤其是对传统方法无法处理或处理效果很差的高浓度有机污水和高氨氮污水有独特的处理效果。②微生物活性高, 抗冲击能力强, 处理效率高、效果稳定。③繁殖能力强、速度快、培养时间短, 能快速启动和恢复系统运行。

固定化微生物技术将高效菌固定在特定载体上, 不仅大大提高了反应器内的生物浓度, 提高了处理效果, 而且很好地解决了污泥流失的问题, 同时可以使污泥停留时间无限延长, 保证了设备的稳定运行和氨氮去除效果。本项目采用菌种为专门适用于生活污水处理的美国进口高效菌。

3.2 固定化微生物+MBR(MIBR)技术

膜生物反应器(Membrane Bioreactor, 简称 MBR)是近年来发展起来的一种污水处理新技术, 该工艺融合了传统生物处理技术的生物降解功能和膜分离

技术的高效分离功能。与传统废水生物处理工艺相比,具有污染物去除效率高、出水水质稳定、设备占地面积小、便于自动控制、出水可以直接回用等优点而受到广泛关注^[3,4],并成为我国中水回用的首选方案^[5-7]。国外早已将该技术成功地应用于污水回用^[8]、粪便污水^[9]及垃圾渗滤液^[10]的处理中。经过多年的努力,我国也将该技术成功地应用于生活污水处理回用工程中,并开始了氨氮污水^[11]、造纸废液^[12]、印染废水^[13]、农药废水^[14]、造纸黑液^[15]等工业废水的处理研究。就国内目前的发展趋势来看,污水回用和难降解有机废水的处理成为 MBR 在推广应用的重要方向。

尽管 MBR 技术有着其它中水回用技术与工艺无法比拟的优点,但在使用过程中,暴露出的对难降解有机废水处理效果差和由于膜污染而使膜组件使用寿命大大降低、运行费用增加等问题,已成为其进一步发展的瓶颈^[16],微生物固定化技术是近年来发展起来的污水处理新技术,具有对难降解有机废水处理效果好、反应器悬浮污泥浓度低等特点。将微生物固定化技术应用于 MBR,可有效解决 MBR 面临的主要问题。

本项目将生物固定化技术与膜生物反应器相结合,设计出集 A/O 工艺、微生物固定化技术、膜分离技术为一体的新型复合式膜生物反应器(简称 MIBR),兼具固定化微生物技术、活性污泥法和膜分离的特点,使 MBR 生化反应器生物浓度高,出水水质好、实现水力停留时间同固体停留时间的分离,使固体停留时间无限延长,保证了稳定的氨氮去除效果;同时,固定化微生物技术将微生物固定在载体上,克服了污泥呈悬浮状态的缺点,对 MBR 膜过滤系统起到了保护作用,因此大大减轻了膜的污染,增长膜组件的运行周期,延长膜组件的使用寿命大幅度降低了 MBR 的运行费用。

3.3 膜分离深度处理技术

膜分离处理技术具有不影响分离物质的生物活性、节能、无公害等特点,在食品工业、制药工业、乳品工业等行业得到越来越广泛的运用。

超滤/反渗透是膜分离技术中过滤效果最好、去除污染物最有效的一种方法,在给水处理以及深度水回用处理中应用最广泛,处理效果最好。它具有显著的离子选择性,对二价离子的去除率高达 95%以上,对 COD 去除率达到 90%,细菌去除率在 99%以上;出水水质优质稳定、安全性高,且流程短、易自动

控制,因此被认为是当今获得优质安全饮用水的重要技术之一,在给水处理方面具有不可比拟的优越性。

本项目首次将超滤膜分离技术应用于污水的深度处理工程之中,在国内少见。

3.4 全自动控制系统

为实现该系统的自动控制,系统配有触摸屏的方式控制的电控柜。MIBR 进出水流量、温度、pH,纳滤系统进出水 pH、电导率、系统操作压力、淡水、浓水流量都实现远程显示。

为了保护系统,防止系统各个水泵欠压,在原水箱、中间水箱都装有液位开关,可实现自动报警及停止运行各个对应的水泵。为实现纳滤膜的反冲洗自动控制,安装电动控制阀及电磁阀,既可实现自动反冲洗,也可以手动操作。

4 试验结果及实用化成本分析

4.1 微生物固定化处理试验

试验污水采用生活污水,所用菌种为专门适用于生活污水处理的美国进口高效菌,试验同时运行两个形状大小相同,有效容积 10L 的反应器。一个反应器中加入取自实际污水处理厂、后又在实验室培养驯化好的活性污泥;另一反应器中投加 0.5g 如前所述的进口高效菌,同时池中还投有专门开发的微生物固定化吸附型载体材料,填充比 1:4。两反应器运行方式相同。试验结果:

(1)固定化微生物反应器的 COD 去除率比常规反应器要高的多,处理效果好,生化处理时间比常规反应器缩短 2h;

(2)固定化微生物反应器的抗进水 COD 负荷冲击能力是常规反应器的 2 倍以上;

(3)以周期处理时间为 6h,即比普通 SBR 反应器周期处理时间缩短 2h 的条件下,固定化微生物反应器能达到很好的处理效果,而常规反应器达不到;

(4)可缩小 25%的生化反应池容积,对降低工程造价有重要的实际意义。

4.2 现场试验结果

现场试验装置流程简图见图 2。设备主要运行参数为:MIBR 进水流量为 1.0~1.2m³/h, HRT=10h;纳滤回收率为 50%,淡水出水流量为 0.5~0.6m³/h。试验污水为神朔铁路分公司内污水,主要为生活污水,具体水质见表 1。试验结果表明:

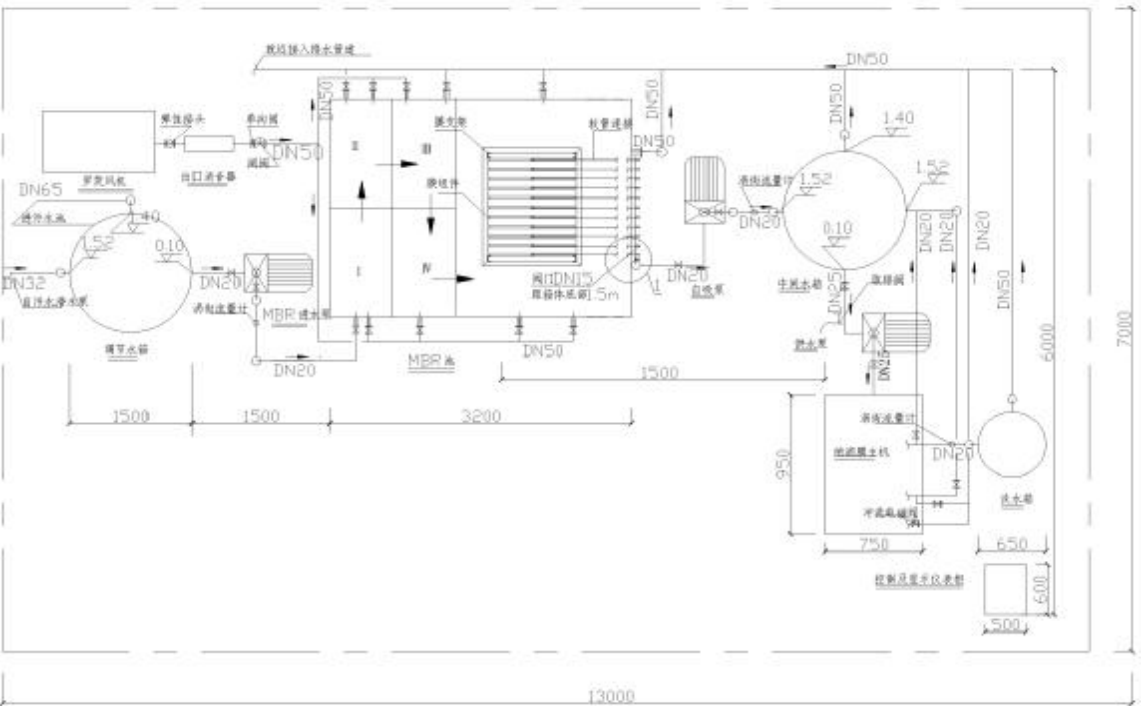


图 2 现场试验装置流程简图

表 1 现场试验水质

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	氨氮	SS	浊度
最高值	222.4	68.3	108.14	178	20.3
最低值	87.4	24.5	6.68	24	7.8
平均值	125.8	39.8	40.85	73	11.1

(1)前置生化处理段出水,即膜前固定化微生物处理出水 COD 值基本在 50mg/L 左右,通过 MIBR 膜的截留作用、部分去除,MIBR 出水 COD 稳定在 20~40mg/L 左右,去除率维持在 80%左右,其他指标经当地环保局监测,均达到中水水质标准《城市污水再生利用城市杂用水水质标准》(GB/T18920-2002);

(2)经过榆林环保局测定,设备总出水完全达到达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中表 4 “农村小型集中式供水和分散式供水部分水质指标限值”水质标准,达到合同要求标准;

(3)设备运行一段时间后,操作压力增大,经过特殊的方法清洗后,可保证设备的长期稳定运行。

运行成本分析:采用固定化 SBR 工艺后,由于生物量的增加,曝气量需要增加约 10%,其它运行费用没有增加。但好氧生化处理时间缩短 2h,鼓风机运行时间缩短 30%,结果节约了约 20%的的鼓风机电耗。

上述比较可知,采用固定化工艺后,工程投资有所增加,但运行费用大大减少。

5 技术应用试验

为使本项目的研究成果尽快发挥实际效益,2008 年经神华集团批准,确定在神朔铁路分公司机务段修建项目示范工程,以解决机务段范围内的污水资源化利用问题。该示范工程成功后,将考虑进一步的推广。示范工程规模及相关设计参数如下:

(1)污水处理站日处理污水量 340m³/d; 前段 MIBR 出水 340m³/d,其中 40m³/d 直接作为中水回用(冲刷、绿化用水),剩余 300m³/d 进入后续膜处理系统;膜处理系统出水中,净化水(纳滤淡水)为 170m³/d,用于洗衣、洗浴用水(进一步处理后可作为锅炉进水);纳滤浓水 130m³/d 作为中水回用。

(2)运行成本

MIBR 设备共用电 339.75kWh,产水量 340m³/d,电费为 0.5 元/m³,消毒剂投加量为 10g/m³,单价为 0.3 元/m³,MIBR 膜的更换费用 0.76 元/m³;MIBR 出水制水成本,也就是中水成本为 1.56 元/m³(不包括设备折旧)。

深度水处理系统各台设备共用电 131kWh,产

水量为 $170\text{m}^3/\text{d}$, 电费 $0.38\text{元}/\text{m}^3$, 清洗药剂费用 $0.1\text{元}/\text{m}^3$, 反渗透膜更换费用 $1.43\text{元}/\text{m}^3$; 膜分离深度水处理系统出水制水成本, 也就是洗衣、洗浴用水成本为 $3.47\text{元}/\text{m}^3$ (不包括设备折旧)。

6 结论与建议

(1) 以生活污水为对象, 采用 MIBR-膜分离组合工艺进行再生水处理, 出水完全可以达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006) 中表 4“农村小型集中式供水和分散式供水部分水质指标及限制”水质标准。对于严重缺水地区的污水资源化利用, 解决洗衣、洗澡甚至锅炉用水等提供了新思路;

(2) MIBR-膜分离组合工艺可根据不同的用途生产出中水和深度处理的再生水, 制水成本分别达到 $1.56\text{元}/\text{m}^3$ 和 $3.47\text{元}/\text{m}^3$ (不包括设备折旧);

(3) MIBR-膜分离组合工艺自动控制程度高, 操作简单, 结构紧凑, 占地面积少, 并可根据实际需要设计大小适宜的设备;

(4) 试验证明, 该技术先进、可行, 可实现工程化应用。

总之, 神朔铁路分公司所在地区水资源短缺的矛盾日益突出。实施污水的资源化利用, 是解决水资源短缺的一条有效途径, 也是构建节约、和谐和可持续发展企业的重要保障。本项目的实施, 可带来巨大的经济与社会效益。

参考文献

- [1] 刘蕾, 李杰, 王亚娥等. 固定化高效菌处理校园生活污水的研究[J]. 兰州交通大学学报, 2005, Vol.1.24 No.1:66~69.
- [2] 李杰, 王亚娥, 王志盈等. 高效微生物在污水生化处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2006, Vol.1.7No.1:66~69.

- [3] 顾国维, 何义亮. 膜生物反应器——在污水处理中的研究和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.30~58.
- [4] 张再利, 朱宛华, 江荣. 膜分离技术及生物反应器的发展和展望[J]. 安徽化工, 2001, 2(110):24~27.
- [5] 1.Chang I S, Kim S N. Wastewater treatment using membrane filtration-effect of biosolids concentration on cake resistance [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(3~4):1307~1014.
- [6] 2.Jiang Tao, Kennedy Maria D, van der Meer Walter G J, et al. The role of blocking and cake filtration in MBR fouling [J]. Desalination, 2003, 157(1~3):335~343.
- [7] 莫慧, 刘建华, 钟新华等. 居住区中水处理系统方案及经济比较[J]. 中国给水排水, 2002, Vol.18, No.2:60~62.
- [8] 柳清香, 张勇. 膜生物反应器在污水中的应用前景[J]. 工业安全与环保, 2003, Vol.29, No.3:5~8.
- [9] Keith Brindle. Membrane bioreactor-today's effluent treatment process for tomorrow[J]. UTA International, 1997, (2):108~111.
- [10] L van Dijk. Membrane bioreactor for wastewater treatment: the state of art and new developments[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 35
- [11] 张西旺, 金奇庭. 一体式 MBR 处理高氨氮小区生活污水中试研究[J]. 环境工程, 2003, 21(2):35~41.
- [12] 韩怀芬, 金漫彤, 黄玉柱, 等. 膜生物反应器处理难降解有机废水研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(3):40~43.
- [13] 刘超翔, 黄霞, 文湘华, 等. 一体式膜-生物反应器处理毛染废水的中试研究[J]. 给水排水, 2002, 28(2):56~59.
- [14] 沈树宝, 陈英文, 夏明芳, 等. 仿生膜生物反应器处理高浓度有机农药废水的研究[J]. 工业水处理, 2003, 23(3):40~43.
- [15] 管运涛, 蒋展鹏, 祝万鹏, 等. 两相厌氧膜-生物系统处理造纸废水[J]. 环境科学, 2000, 21(4):52~56.
- [16] 孟凡生, 王业耀. 膜生物反应器在我国的研究发展展望[R]. 水资源保护, 2005, 21(4):1~3, 33.

作者简介: 郝小平 (1961-), 高级工程师, 现任中国神华神朔铁路分公司总工程师。

Shenshuo Railway Waste Water Utilization

Hao Xiaoping, Guo Jinchao, Peng You, Li Hongli

(Shenshuo Railway Subsidiary of China Shenhua Energy Co., Ltd, Shaanxi, 719316, China)

Abstract: The utilization of waste water resources is an effective way to solve the water shortage in the region where the Shenshuo railway company is located. In this paper, on the basis of the distribution and characteristics of waste water resources, the feasibility of the application of microorganism immobilization technology and the reverse osmosis film technology in sewage treatment is demonstrated. And the MBR technology is used for the preliminary and in-depth processing of domestic wastewater to respectively reach the intermediate water standards and the relevant provisions in "Drinking Water Health Standards". A new way for the utilization of water resources is found. Through the technical and economic comparison, the technical implementation plan is proposed further to improve the utilization of wastewater resources.

Key words: wastewater, resources, utilization, integrated technology

(收稿日期: 2009-3-22 责任编辑: 郝广杰)

投 稿 须 知

投稿要求

稿件应具有真实性、科学性和实用性,要求选题具有代表性,论点鲜明,论据充分,数据可靠,结论准确,层次分明,文字简练,尤其必须准确使用国家法定计量单位。论文字数含文中图表应不超过 6000 字。作者文责自负,请自留底稿,采用或未被采用的稿件均一律不退。收稿 6 个月未刊登者,可另投它处。

本刊处理稿件对来稿有删修权,不同意删修的稿件必须来函声明。作者须对文稿的真实性和保密性负责,并声明未一稿多投。作者姓名、单位、详细地址、邮政编码及联系电话务必写清楚,多作者稿署名时须征得其他作者同意,排好先后次序,一般不应超过 5 人。

文稿书写格式及要求

凡属国家级、省部级或其它基金项目资助的论文,请在文稿首页地脚标明基金名称及基金项目编号。

来稿须交电子版,稿中外文字母、符号须分清大、小写,正、斜体;上、下角的字母,数码和符号,其位置高低应区别明显;易混淆的外文字母、符号,在第一次出现时应用重点注明。

文题:应简明、确切反映本文的特定内容,一般不用副标题。切忌口号式或广告词式的标题,尽可能不用代号。文题以不超过 24 字为宜。

摘要、关键词:稿件必须有摘要,应采用结构式文摘,字数以 200 字左右为宜。摘要应以第三人称撰写,以介绍论文内容概要为目的。不应有评价性词语;摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论等,英文摘要应与中文摘要相符,其书写要符合科技英语的语法规则,采用间行打印。关键词 3~5 个,采用科学技术标准主题词,若规定标准词表中无该词的可使用自由词。

图表:文中图表要精心设计,插图切勿过大,应符合大 16K 分栏排版要求,图中文字、符号应与正文一致,照片要黑白清晰,层次分明,凡文字能说明的

内容尽量不用图和表,正文、表、图三者中的数据不应重复。表或图应各有表题、图题,同时必须有相应的表序号和图序号。采用三线表或王字表,表中数据务必核实,纵横之和一致。图的坐标要设计准确,刻度均匀,坐标轴上有数值,不使用箭头,纵横坐标应同时有量及单位。

名词使用:文中使用的名词应注意全稿前后统一,必须使用全国自然科学、社会科学名词委员会公布的各科名词,所用专用名词不要随意缩写,如所用名词过长,而文中又需多次使用,则应在第一次引用时在全名后加圆括号注明缩写。

作者简介:对论文的第一作者可按下列顺序书写其简介:姓名,性别(出生年-),职称,何年毕业于何学校(或何学位),现工作单位及任职。

参考文献与脚注

作者引用的参考文献必须是公开发表的并且是正文实际引用的文献,学位论文可以作为参考文献引用,参考文献著录格式是顺序编码制,引用文献应按在正文出现的先后次序排列,其格式如下:

图书格式:著者.书名[M](文献类型标识).版本(第一版可省略).出版地:出版者,出版年.页次。如:张惠枕.计算机在矿井通风中的应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992。

期刊格式:著者.题名[J](文献类型标识).刊名,出版年,卷号(期号):页次。如:刘武奇,赵怀勋.基于 Internet 的应用系统设计方法和技术分析[J].计算机系统应用.1999,(9):15~17。

专利格式:专利申请者.专利题名[P](文献类型标识).专利国别(或地区).专利号.年份。

学位论文:主要责任者.文献题名[D](文献类型标识).出版地:单位,出版年。

国际、国家标准:标准编号,标准名称[S]。

(当著者不多于 3 人时,全部著录,否则只著录前 3 人,后加“等”。引用他人未发表的资料或协作成果应征得有关方面的同意,并加以说明。)