

# 低阶煤水煤浆制备技术与工艺研究现状及前景

魏亚玲<sup>1</sup> 孟献梁<sup>2</sup> 陶二玉<sup>1</sup> 赵中熙<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 银川学院化学工程系, 宁夏 银川 750011; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对中国储量丰富的低阶煤难以制备高浓度水煤浆的问题, 介绍了国内先进的低阶煤制浆技术。制备高品质低阶煤水煤浆, 应结合煤质特性, 选择适宜的磨矿技术、提质改性工艺、配煤技术或添加剂, 制备符合工业化应用的高性能低阶煤水煤浆。同时指出, 低阶煤制备水煤浆技术是适合中国国情的洁净煤技术, 是目前国内对低阶煤合理利用的一条新途径, 低阶煤水煤浆的研究和发展为解决中国环境污染问题和能源合理利用问题提供了广阔的前景。针对目前中国低阶煤水煤浆的发展状况, 对中国低阶煤制备水煤浆技术发展前景进行了展望。

**关键词:** 低阶煤; 水煤浆; 制浆工艺; 分散剂

中图分类号: TQ534.4; TD849 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2014)06-0060-04

## Production techniques and process of low rank coal water slurry

WEI Yaling<sup>1</sup>, MENG Xianliang<sup>2</sup>, TAO Eryu<sup>1</sup>, ZHAO Zhongxi<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Yinchuan College, China University of Mining and Technology, Yinchuan 750011, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** China is abundant in low rank coal which is very difficult to made into coal water slurry (CWS). This paper first introduced the advanced CWS preparation technologies. In order to obtain high quality low rank CWS for industrial application, the following factors should be taken into consideration, the coal properties, grinding, modification and coal blending techniques, additives. The CWS preparation technologies could utilize low rank coal efficiently, they were also suitable for the Chinese national condition. The research and development of low rank CWS had a wide range of application in environmental protection and energy utilization. At last, the authors looked forward to the prospects of low rank CWS preparation.

**Key words:** low rank coal; coal water slurry; coal water slurry preparation process; dispersant

## 0 引 言

水煤浆技术是 20 世纪 80 年代兴起的高效率、低污染的煤基液态燃料, 是由 65% ~ 70% 的煤粉, 29% ~ 34% 的水和小于 1% 的化学添加剂, 经过一定的加工工艺制成的液体燃料。水煤浆既保持了煤炭原有的性质, 又具有燃油一样的流动性与稳定性。中国水煤浆技术已达到世界领先水平, 用普通精煤制备的水煤浆已经商业化, 其作为代煤代油燃料在工业锅炉、电站锅炉以及工业窑炉上已经得到成功的应用。水煤浆的燃烧效率和锅炉热效率都较高,

其锅炉燃烧负荷调节范围宽, 且燃烧充分、残炭量低、灰渣量少。另外, 由于排烟温度低, 能有效降低 NO<sub>x</sub> 的排放, 也易于脱硫, 环保节能, 存储安全, 是一种理想的代油代煤燃料。随着国内气化技术的发展, 作为气化原料的水煤浆的需求量也急剧上升。目前, 全国水煤浆生产和使用量已超过 3000 万 t/a (燃料用), 气化水煤浆使用量突破 5000 万 t/a<sup>[1]</sup>, 且随着煤化工工业的发展其需求量将会不断增长。随着能源的不断消耗, 优质煤炭资源逐渐减少, 因此世界各国更加重视对储量丰富的低阶煤资源的开发利用。中国低阶煤(指煤化程度较低的煤, 包括褐

收稿日期: 2014-09-18; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.014

基金项目: 宁夏回族自治区大学生创新创业训练计划资助项目(20140805)

作者简介: 魏亚玲(1985—), 女, 甘肃兰州人, 助教, 硕士研究生, 从事化学工艺方面的科研工作。E-mail: wylsmqh@163.com

引用格式: 魏亚玲, 孟献梁, 陶二玉, 等. 低阶煤水煤浆制备技术与工艺研究现状及前景[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 60-63. doi:10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.014

WEI Yaling, MENG Xianliang, TAO Eryu, et al. Production techniques and process of low rank coal water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 60-63. doi:10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.014

煤、长焰煤、不黏煤、1/2中黏煤和气煤)资源丰富,储量占煤炭资源量的55%以上,主要分布在内蒙古东部、云南东部、新疆和黑龙江东部地区,此外,陕西北部、内蒙古部分地区存在大量的年轻亚烟煤。要大力发展水煤浆产业,必须结合中国煤炭资源分布及储量情况,采用储量丰富、价格低廉的低阶煤制备水煤浆是今后发展的趋势。低阶煤具有全水分和内在水分高、挥发分高、含氧官能团多、孔隙率高等特点,属于难制浆煤。其中,褐煤原煤一般最大成浆浓度仅为30%~40%<sup>[2]</sup>,稳定性差,容易沉积,其水分过高不利于稳定燃烧,气化效率低,煤耗、氧耗高,所以必须通过适当方法来改善成浆性。在推广应用中,如何用低阶煤制出浓度高、黏度低、流变性好的水煤浆是目前的研究热点<sup>[3]</sup>。许多学者经过大量实验研究,提出了一些新的制浆技术来提高低阶煤的成浆性能。笔者主要介绍了中国低阶煤水煤浆制备的现状以及适用低阶煤水煤浆分散剂的研究现状,并对中国低阶煤水煤浆的发展趋势进行了分析。

## 1 低阶煤水煤浆技术的研究现状

目前,低阶煤水煤浆技术仍存在很多问题,研发新的制浆技术,提高水煤浆质量,降低制浆成本,乃当务之急。水煤浆制浆工艺的选择需考虑煤炭成浆性的难易程度、水煤浆的质量要求以及水煤浆产品的储运方式等因素。目前中国低阶煤制浆的技术主要有3种。

### 1.1 低阶煤水煤浆分级研磨级配制浆工艺

中国科研工作者对煤炭的成浆性进行了大量的实验研究,掌握了制备水煤浆的级配技术和适用于不同煤种的制浆工艺。

水煤浆制浆方法有干法和湿法2种,干法制浆的浆体浓度较易控制,浓度范围较宽,但对入料浓度要求严格,且环境污染严重,劳动强度大。湿法制浆工艺简单,操作方便,对环境污染小,但难以制得较高浓度的水煤浆。另外,该法对入料中的大颗粒及杂物较难控制<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.1 低阶煤微细干粉级配技术

榆林西部煤炭技术研究中心采用微细干粉级配技术,结合低阶煤的特点,在分析现有水煤浆制备技术的基础上,改造了雷蒙磨机,开发了微细干粉级配制备低阶煤高浓度水煤浆技术,实现粉煤微细化,并按照水煤浆最佳级配要求生产出不同细度和产率的水煤浆干粉,使低阶煤的水煤浆制备技术取得了突

破性进展<sup>[5]</sup>。

采用该技术,分别对河湾矿、上榆树矿、二道矿、榆家梁矿、活鸡兔矿、宝日希勒矿6种煤进行了水煤浆性质研究。研究发现,对于分析基水分8.96%~10.53%的神木煤,最高制浆浓度高达70%;对于分析基水分高达28.66%的内蒙古宝日希勒褐煤,可以制备出浓度高于63%的合格水煤浆。

榆林西部煤炭技术研究中心于2009年建成的20万t/a水煤浆干粉半工业装置,经改造后,该装置生产能力已达75万t/a,并已连续生产出20000t浓度为69%、黏度为800mPa·s(剪切速率为100s<sup>-1</sup>)的低阶煤高浓度的水煤浆产品。

#### 1.1.2 低阶煤高浓度制浆技术

国家水煤浆工程技术研究中心于2006年成功开发了低阶煤制备高浓度水煤浆的专利工艺技术,该技术不仅可以提高低阶煤水煤浆的浓度,还可以改善其流动性和稳定性。图1为分级研磨高浓度制浆工艺流程<sup>[6]</sup>。该技术通过提高煤浆的堆积效率和使用自主研发的高效水煤浆添加剂,使制浆浓度提高3%~5%。

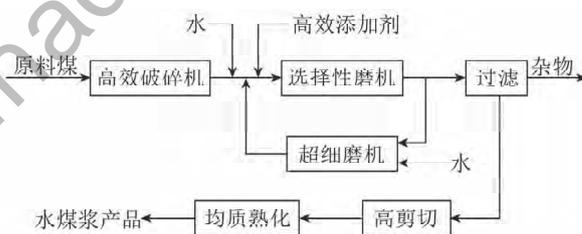


图1 分级研磨高浓度制浆工艺流程

神华煤采用该工艺制得的水煤浆浓度可以达到65%,黏度小于1200mPa·s,稳定性大于60d。与传统制浆工艺相比,制浆浓度提高了5%,吨浆制浆成本降低了15%。

该技术已成功推广至广东、福建、浙江和江苏等地,形成总计1000万t/a的以神华煤为主要原料的燃料浆生产规模<sup>[7]</sup>。另外,该专利技术也成功应用于大唐呼伦贝尔公司18万t/a合成氨、30万t/a尿素工程(内蒙古褐煤为制浆原料)。由于该技术增加了超细浆制备系统,磨矿效率高,能有效改善粒度分布,提高堆积效率,从而提高制浆浓度。目前该技术已成为低阶煤水煤浆的主流制备技术。

### 1.2 低阶煤热力提质制浆技术

低阶煤热力提质方法主要有脱水干燥、低温干燥等方法。脱水干燥有蒸发干燥(微波干燥、热空气或蒸汽干燥,太阳能等)和非蒸发干燥(水热改性

HTD、机械热压改性 MTE) 2 种技术<sup>[8]</sup>。黑龙江科技大学引进国外的水热干燥技术,开发了适合中国褐煤特点的水煤浆制浆技术<sup>[4]</sup>。水热处理不仅可以有效降低低阶煤内在水分和氧含量,抑制其易自燃特性,扩大了产品应用范围<sup>[9]</sup>,而且可以提高低阶煤的热值,褐煤提质后不经烘干即可直接制浆,且水煤浆浓度可达 60% 以上。

国内也有学者对提质后的低阶煤进行了水煤浆制备研究。虞育杰<sup>[10]</sup>采用水热脱水方法对几种代表性的褐煤进行提质加工,并将提质后的煤样制备水煤浆,其定黏浓度较原煤提高了 9% ~ 14%,同时改善了流变性和稳定性。进一步研究发现,若将提质液体产物和和提质后煤样混合制浆,其浆体定黏浓度再度提高 1%,同时回收了液体中可燃物质的能量。

赵卫东等<sup>[2]</sup>采用非蒸发的水热方法对低阶煤进行脱水改性,水热处理过程中有一定浓度的  $H_2S$  生成,说明该法具有一定的脱硫效果。成浆性实验表明,改性后低阶煤水煤浆仍具备假塑性流体特征。从最大成浆浓度、浆体流动性和稳定性等因素综合考虑,最佳的反应终温为 300 ~ 320 °C。通过该水热法改性后,小龙潭褐煤的最大成浆浓度可以由原煤的 44.60% 提高到 64.55%;印度尼西亚 MIP 亚烟煤的最大成浆浓度则由原煤的 39.71% 提高到 64.61%。

顾小愚<sup>[11]</sup>对神华煤低灰低硫高挥发分的低阶煤进行了热力改性,并考察了成浆浓度与改性温度的关系。结果表明,成浆浓度随着改性温度(200 ~ 350 °C)的升高而提高。综合考虑,2 种煤样最佳改性温度均为 300 °C,经过热力改性后,1 号煤(不黏煤)和 2 号煤(长焰煤)成浆浓度分别由 61.2%、57.8% 提高到了 65.5% 和 62.6%。

颜艳东<sup>[12]</sup>以云南小龙潭褐煤为研究对象,利用自行设计的低温干馏反应器对小龙潭褐煤进行低温干馏,并探讨了干馏半焦的成浆性能。实验结果表明:550 °C 干馏半焦制得的水煤浆浓度最高(达 66.51%),但浆体稳定性较差;将小龙潭褐煤原煤与半焦混合制浆,发现水煤浆浓度虽有所降低(61.47%),但能有效改善半焦水煤浆的稳定性,其水煤浆质量达到国家水煤浆质量 3 级标准。

目前,国内对于热力提质后的低阶煤进行水煤浆制备基本处于实验室研究阶段,由于该技术需要大量的热量及专用的设备,能耗高,还没有进行广泛

的工业化推广。

### 1.3 低阶煤配煤制浆技术

煤质程度影响煤成浆性能,一般低阶煤为难成浆煤,制出的水煤浆浓度较低;而较高阶煤为易成浆煤,可制出浓度较高的水煤浆<sup>[13]</sup>。因此,要提高褐煤的成浆性,除现在的制浆工艺、原煤粒度级配和热力改性等,还可采用配入一定比例的易成浆煤种。

国内已有单位借助配煤技术,提高了原煤制浆的浓度,高志芳<sup>[14]</sup>利用内蒙古宝日希勒褐煤原煤和提质煤样分别与潞安常村煤按照一定比例进行配煤制浆,其定黏浓度分别比原煤提高了 10.15% 和 14.67%,磨矿耗电量下降 12.5%。通过结合运用 MATLAB 数学软件与 SQL Server 数据库,对堆积效率、配煤比例、粒度分布、煤灰分和水分等影响配煤水煤浆浓度与黏度的因素进行分析,建立了 1 套配煤水煤浆浓度的预测模型,并对水煤浆浓度进行预测。研究表明,预测模型对水煤浆浓度的预测结果比加权得到的结果更为准确,相对误差小于 5%。

配煤技术对水煤浆性能的影响不具有加和性,而且配煤制浆技术既可提高浆体浓度,还可降低煤的灰熔融性<sup>[15]</sup>。此技术应用在加压气化制合成气的装置中可提高生产效率,减少运行中的各种消耗,延长装置寿命,提高经济效益。

## 2 低阶煤水煤浆分散剂研究现状

水煤浆属粗分散体系,很容易产生煤水分离<sup>[16-17]</sup>,因此,要改善水煤浆的稳定性与流变性,必须在浆体中加入少量的化学添加剂,来改变煤粒的表面性质,使煤颗粒能够在水中分散<sup>[18]</sup>。低阶煤由于其表面亲水基团含量大,浆体稳定性差,需要根据煤种特点加入分散剂来降低煤粒表面的亲水性,增强静电斥力,防止煤粒聚结,从而制备浓度高、稳定性好的优质水煤浆。目前常用分散剂有阴离子型和非离子型。阴离子型主要有各类取代基萘磺酸盐、木质素磺酸盐、腐植酸盐及磺化腐植酸盐、聚烯烃等系列,非离子型有聚氧乙烯、聚氧乙烷系列。

由于不同变质程度的煤种和不同产地的煤质表面物理化学性质有很大差异,煤种对于水煤浆分散剂具有高度选择性,因此分散剂的普遍适应性较差。许多学者对适用于低阶煤的分散剂进行了研究,考察了不同分散剂对煤种的匹配性。武成利等<sup>[19]</sup>通过实验考察了 4 种市售分散剂对华亭煤(低阶煤)的制浆性能的影响,发现萘磺酸改性木质素磺酸钠

对华亭煤的制浆效果最好(当分散剂添加量为0.4%时,制浆浓度高达65%)。李婷婷等<sup>[20]</sup>研究了木质素系分散剂(LS)对煤泥成浆性能的影响,考察了煤泥对LS的吸附性能,通过对LS初始浓度、吸附温度及吸附速率的研究,指出LS主要通过氢键、静电等作用自发地吸附在煤泥表面,使颗粒间形成稳定的空间网状结构,提高了煤泥的成浆性和稳定性。

国家水煤浆工程技术中心在常用低阶煤水煤浆添加剂的基础上,通过调整分子主链结构、官能团和分子量,同时与多种添加剂复配,成功地研制了复合型添加剂(SHPE-III)。使用该复合型添加剂制得的水煤浆的最高成浆浓度达63.5%以上,且很大程度上改善了浆体的流动性和稳定性。与市售添加剂相比,该复合型添加剂具有较高的性价比,是神华煤制气化用水煤浆的理想添加剂<sup>[21]</sup>。

苗真勇等<sup>[22]</sup>以神华不黏煤、赤峰褐煤和宁夏红柳弱黏煤为原料,比较了萘磺酸钠甲醛缩合物阴离子型分散剂(NSF)分别与季铵盐型 Gemini 表面活性剂和十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)复配后对分散降黏性能的影响,并考察了协同作用机理。季铵盐类助剂与 NSF 复配使用时,助剂在煤表面吸附后能为 NSF 提供更多的吸附位点,进而提高 NSF 的吸附量,增加浆体的分散稳定性。Gemini 型助剂因其双头基双尾基的结构特征,其分散增协性能优于 DTAB, Gemini 型助剂可使低阶煤水煤浆成浆浓度提高 2.08%~2.30%。此外,水煤浆中固硫剂的添加也越来越受关注。目前,国内使用的固硫剂大多是钙基固硫剂,由于  $\text{CaCO}_3$  廉价易得,性价比高,适合大量工业应用。据文献报道,NaOH 也具有固硫效果,但其固硫产物分解温度低,不易单独作为固硫剂使用,但作为助剂时,可提高  $\text{CaCO}_3$  的固硫效果。

### 3 低阶煤水煤浆发展前景

基于中国煤炭资源状况,低阶煤制备水煤浆技术是适合中国国情的洁净煤技术,是目前国内对低阶煤合理利用的一条新途径,低阶煤水煤浆的研究和发展为解决中国能源合理利用问题和环境污染问题提供了广阔的前景。

1) 加快科研成果向工业应用的转化,以分级研磨级配技术及干粉级配技术为基础,结合热力提质及配煤技术,对多煤种进行同步研究,实现扩大制浆煤种范围,多种工艺结合,保证产品质量稳定。

2) 进一步开发适合多煤种的高效添加剂,在保

证水煤浆稳定性和流变性的前提下,应该考虑通过添加固硫剂和助剂,降低对环境的污染和控制灰熔融性。

3) 将国内各煤种制浆数据建立数据库,分析影响水煤浆稳定性和流变性的影响因素,利用计算机建立预测模型来指导配煤,严格控制产品质量。

4) 制浆分布区域化,以煤矿为中心,结合水煤浆终端用户的需求量与输送距离,将分选及煤浆制备一体化,实现工艺流程模块化,加强在线控制检测与自动控制水平,建立大型的水煤浆配送中心,提高集中生产化程度,提高市场竞争力。

5) 采用罐装输送与长距离管道输送相结合,设置水煤浆中转稳定中心,降低运输成本。水煤浆浓度高,管道输送阻力大,在离心泵叶轮剪切力作用、管路开关及转折处能否造成浆体粒度分布紊乱等问题都有待解决。

6) 加快工业锅炉、电站锅炉及工业窑炉的技术改造,尤其是对环境污染较大的中小型锅炉。在原有设备基础上,加强设备耐磨性,解决由于燃烧水煤浆使原有锅炉负荷变化所引起的问题及锅炉排灰和环境污染问题。

## 4 结 语

低阶煤水煤浆较烟煤水煤浆有制浆成本低、燃烧性能优良、磨损腐蚀性小及环境污染小的优点,是目前国内对低阶煤合理利用的一条新途径<sup>[23]</sup>。基于中国煤炭资源状况及低阶煤难成浆特点,介绍了国内低阶煤水煤浆制浆技术及匹配分散剂的研究近况,探讨了低阶煤水煤浆的发展意义与发展前景,并对低阶煤水煤浆的发展趋势进行了展望。

### 参考文献:

- [1] 段清兵. 我国水煤浆技术发展现状与趋势[J]. 新材料产业, 2012(11): 14-18.
- [2] 赵卫东, 刘建忠, 周俊虎, 等. 低阶煤高温高压水热处理改性及其成浆特性[J]. 化工学报, 2009, 60(6): 1560-1567.
- [3] 朱书全. 煤的性质对其成浆性影响的研究综述[J]. 煤炭加工与综合利用, 1996(2): 5-8.
- [4] 苗云霞. 水煤浆制备工艺技术研究[J]. 河北化工, 2009, 32(7): 27-29.
- [5] 贺峰, 李保庆. 微细干粉级配制取低阶煤和褐煤高浓度水煤浆技术[J]. 化工进展, 2010, 29(S1): 374-377.
- [6] 梁兴, 闫黎黎, 徐尧. 水煤浆技术现状分析及发展方向[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(6): 62-66.

(下转第67页)

### 3 结 论

1) 多孔板作用下的粒度-分选密度曲线的斜率更大,由-0.518增至-0.448,强化了颗粒基于密度差异分离的趋势,提出了普通床及多孔板干扰床的粒度-分选密度的模型。

2) 高密度颗粒( $1.70$ 、 $1.90$   $\text{g}/\text{cm}^3$ )主要集中在床层底部,体积分数分别为29.79%、32.86%,低密度颗粒( $1.40$ 、 $1.50$   $\text{g}/\text{cm}^3$ )主要集中在床层上部,体积分数分别为48.90%、20.81%,中间密度( $1.60$   $\text{g}/\text{cm}^3$ )颗粒分布比较均匀,沿床高方向其体积分数在17.58%左右波动。

3) 多孔板干扰床中形成了多孔板分级-板间流化区-多孔板与边壁间流化区的多级分选模式,在一定程度上能抑制低密度粗颗粒及高密度细颗粒的错配,从而提高干扰床的分选性能。

#### 参考文献:

- [1] Drummond R, Nicol S, Swanson A. Teetered bed separators: the Australian experience[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 2002, 102(7): 385-392.
- [2] Maharaj L, Pocock J, Loveday B K. The effect of distributor configuration on the hydrodynamics of the teetered bed separator[J]. Minerals Engineering 2007, 20(11): 1089-1098.
- [3] Honaker R Q, Mondal K. Dynamic modeling of fine coal separations in a hindered-bed classifier[J]. Coal Preparation 2000, 21(2): 211-232.
- [4] Das A, Sarkar B, Biswas P *et al.* Performance prediction of floatex density separator in processing iron ore fines: a relative velocity approach[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2009, 118(2): 78-84.
- [5] Das A, Sarkar B, Mehrotra S P. Prediction of separation performance of floatex density separator for processing of fine coal particles[J]. International Journal of Mineral Processing 2009, 91(1/2): 41-49.
- [6] Mukherjee A K, Mishra B K, Kumar R V. Application of liquid/solid fluidization technique in beneficiation of fines[J]. International Journal of Mineral Processing 2009, 92(1/2): 67-73.
- [7] Sarkar B, Das A. A comparative study of slip velocity models for the prediction of performance of floatex density separator[J]. International Journal of Mineral Processing 2010, 94(1/2): 20-27.
- [8] 石后盛. TBS 在新阳选煤厂的应用[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 110-112.
- [9] 张永清, 王 婕, 付晓恒. TBS 分选机在王家岭选煤厂的应用[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(3): 28-32.
- [10] 徐 凤, 张晓洲, 李云红, 等. 干扰床分选机(TBS)的评述[J]. 煤炭加工与综合利用 2008(3): 1-5.
- [11] Galvin K P, Pratten S J, Nicol S K. Dense medium separation using a teetered bed separator[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(9): 1059-1081.
- [12] Galvin K P, Pratten S J, Lambert N *et al.* Influence of a jiggling action on the gravity separation achieved in a teetered bed separator[J]. Minerals Engineering 2002, 15(12): 1199-1202.
- [13] Galvin K P, Callen A M, Spear S. Gravity separation of coarse particles using the reflux classifier[J]. Minerals Engineering 2010, 23(4): 339-349.
- [14] 焦红光, 惠 兵, 冯金涛, 等. 新型粗煤泥干扰床分选技术的研究[J]. 煤炭工程 2009, 41(2): 85-87.
- [15] 唐利刚. 带内构件干扰床细粒煤分选实验研究[J]. 煤炭工程 2012, 44(7): 103-105, 108.
- [16] 陈荣荣, 常宏宏, 魏文珑, 等. 水煤浆用分散剂的研究进展[J]. 选煤技术 2007(5): 45-47.
- [17] 杜小茹, 李光美, 黄 欣, 等. 水煤浆技术以及难制浆煤种成浆性的提高途径[J]. 煤炭技术 2010, 29(1): 176-178.
- [18] 武成利, 钱先锋, 程 翼. 丙烯酸系水煤浆添加剂的制浆性能研究[J]. 煤炭科学技术 2006, 34(7): 7-10.
- [19] 武成利, 陈彩静, 单 婉, 等. 分散剂对低阶煤制备高浓度气化水煤浆的影响[J]. 煤炭技术 2012, 10(31): 220-222.
- [20] 李婷婷, 吴国光, 孟献梁, 等. 煤泥对木质素系分散剂的吸附性能研究[J]. 煤炭科学技术 2014, 42(3): 117-120, 124.
- [21] 王国房, 颜淑娟, 郭志新, 等. 低阶煤气化水煤浆添加剂的评价研究[J]. 洁净煤技术 2009, 15(6): 39-41.
- [22] 苗真勇, 李婷婷, 孟献梁, 等. Gemini 型分散剂对低阶煤制浆性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 1054-1059.
- [23] 董 平, 吕玉庭, 聂丽君. 洁净煤与褐煤水煤浆技术[J]. 应用能源技术, 1997(3): 7-10.

#### (上接第63页)

- [7] 陈怀珍. 神华煤制水煤浆特性及工业试验研究[J]. 洁净煤技术 2007, 13(5): 38-40.
- [8] 李 振, 于 伟, 杨 超, 等. 低阶煤提质利用现状及展望[J]. 矿山机械 2013, 41(7): 1-6.
- [9] 范艳青, 陈 雯, 蒋训雄, 等. 褐煤半焦水蒸气活化法制备活性炭的工艺研究[J]. 煤炭加工与综合利用 2005(3): 35-39.
- [10] 虞育杰. 褐煤水热脱水提质制备高浓度水煤浆的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学 2013.
- [11] 顾小愚. 改善神华低阶煤成浆性的实验研究[J]. 煤炭科学技术 2009, 37(1): 111-113.
- [12] 颜艳东. 褐煤提质及其成浆性能研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学 2012.
- [13] 袁善录, 戴爱军. 制备高浓度水煤浆的影响因素探讨[J]. 应用化工 2007, 36(12): 1242-1251.
- [14] 高志芳. 提质褐煤制浆及配煤成浆特性的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京) 2009.
- [15] 纪明俊, 李寒旭, 燕春福. 淮化 Texaco 气化配煤制取水煤浆的