

高效水煤浆制浆燃烧集成技术研制与应用

刘建文¹, 谢雨晴², 陈楠³

(1. 湖南工业大学 建筑与城乡规划学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 财经学院, 湖南 株洲 412007;
3. 株洲市蓝宇热能科技研制有限公司, 湖南 株洲 412008)

摘要:为促进煤炭的清洁高效利用, 株洲市蓝宇热能科技研制有限公司依托子母炉层-悬浮燃烧水煤浆锅炉, 集成膜分离、功率超声处理与高效机械离心分离等绿色低碳技术, 构建了新型高效生物质水煤浆制浆燃烧系统。该系统由有机废液的高效预处理模块、污泥的高效预处理模块、生物质水煤浆制浆模块、生物质水煤浆燃烧模块和净化水生化处理模块 5 个模块组成。高效水煤浆制浆燃烧集成技术已有多项工程应用实例, 结果证明: 该技术能有效降低有害气体的排放, 同时实现污泥、有机废液的能源、资源化利用。

关键词:水煤浆; 低碳; 洁净煤; 节能减排

中图分类号: TQ534 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2015)02-0035-05

Research and application of preparation and combustion technology of efficient coal water mixture

LIU Jianwen¹, XIE Yuqing², CHEN Nan³

(1. Hunan University of Technology, School of Building and Urban and Rural Planning, Zhuzhou 412007, China;
2. Hunan University of Technology, College of Finance and Economics, Zhuzhou 412007, China;
3. Zhuzhou Lanyu Heat Energy Science and Technology Development Co., Ltd., Zhuzhou 412008, China)

Abstract: In order to improve coal utilization efficiency in clean ways, a new efficient bio-coal water mixture (CWM) pulping-combustion system which integrated membrane separation, power sonication and centrifugation efficient machinery and other green low-carbon technologies was developed by Zhuzhou Lanyu heat energy technology company based on oven floor-suspension burning coal boiler. The system was composed of five modules which were high efficient pretreatment module of organic waste liquid, sludge efficient preprocessing module coal water slurry pulping module, biomass, bio-CWM combustion module and purifying water biochemical processing module. There were lots of application examples of efficient CWM pulping-combustion integration technology. The results showed that the technology could effectively reduce harmful gas emissions and realize resource utilization of sludge, organic waste water.

Key words: coal water mixture (CWM); low carbon; clean coal; energy conservation and emission reduction

0 引 言

中国人类发展报告(2009年)指出,我国改革开放以来取得辉煌成就的同时,粗放型经济增长方式带来的问题也日益凸显,增长动力已逐渐衰退,高耗能、高污染问题也频频出现,环境与资源成为制约社会发展的影响因素。我国应当顺应低碳经济这一全

球范围内新的发展模式,加速转变经济增长方式^[1]。由于我国能源资源状况是“富煤、贫油、少气”,煤炭作为我国供能主力军的能源结构短期内不会改变。燃煤是 CO₂ 产生的根源,同时还排放有烟尘、SO₂、NO_x 等气体,对气候和环境影响都比较大。在还没找到能够替代的可持续能源的情况下,发展洁净煤技术是减少 CO₂ 排放的有效途径。因

收稿日期: 2014-10-28; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.008

基金项目: 湖南省自然科学基金联合基金资助项目(12JJ9035)

作者简介: 刘建文(1964—),男,湖南衡山人,教授,博士,主要研究方向是洁净煤技术、低碳经济与技术、环境工程。E-mail: 1194669770@qq.com

引用格式: 刘建文, 谢雨晴, 陈楠. 高效水煤浆制浆燃烧集成技术研制与应用[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 35-39, 44.

LIU Jianwen, XIE Yuqing, CHEN Nan. Research and application of preparation and combustion technology of efficient coal water mixture[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 35-39, 44.

此,做好煤炭的高效洁净利用,对促进我国节能减排、应对气候变化意义重大。水煤浆技术是将煤炭物理加工之后再利用的一种技术,是适应我国国情的煤炭高效洁净利用技术,与高效煤炭分选技术集成,是煤炭液化、气化等高效转化洁净煤技术的基础。水煤浆技术具有高效、节能、低成本的优点,其燃烧温度比燃油、燃气低 100~200℃,NO_x 排放量只有其 50% 左右,配备高效布袋除尘器后,水煤浆锅炉烟尘排放可以达到燃油、燃气相应的环保标准。水煤浆是液固浆态燃料,利用水煤浆含水的特性,集成生物质水煤浆制浆、高效燃烧技术,实现高浓度有机废液、污泥与固体生物质的资源化、能源化系统集成协同利用,是我国当前推进中小型工业燃煤锅炉节能减排,发展节能环保产业最现实的技术路径。

1 我国水煤浆技术的新发展

1.1 制浆工艺创新

我国制浆技术在不断进步,制浆工艺也不断完善。目前,制浆工艺已有多破少磨、分级研磨、强化超细磨,加强搅拌、剪切及多磨机并联、优化级配^[12]等新的研究成果,同时在国家专利方面也创造了如:利用低阶煤制备高浓度水煤浆的方法^[3-4]、生物质煤浆制备工艺技术^[5-7]、生物质水煤浆制浆、燃烧方法及集成系统^[8]、多元料浆二次湿磨制浆工艺^[9]等多项成果,另外还研制出了神华环保型水煤浆^[10]、低挥发分(石油焦)煤浆^[11]、低阶煤褐煤煤浆^[12]、造纸黑液或有机废液(污水)及污泥生物质煤浆^[13-15]、配煤煤浆^[16-17]、气化用煤浆^[18]、多元气化料浆及速溶煤粉^[19-20]等。这些新研制出的水煤浆品种目前已开始在市场上推广并得以使用。水煤浆技术的进步使得制浆用煤有了更多的选择,废弃物资源也得到了有效利用,同时也在一定程度上节约了煤炭和水资源,生产成本得到降低,具有很大的市场前景。

1.2 新型水煤浆添加剂的开发

在水煤浆的制备过程中,添加剂对水煤浆的性能起着关键作用,可改变煤粒的表面性质,使其在水中分散,煤浆因而获得良好的流动性和稳定性。

近年来,国内的水煤浆添加剂产品在原料及生产工艺方面都各有自己的特点^[2],国家水煤浆中心研制出的 SHPF 系列添加剂性价比很高,另外江苏昆山迪昆精细化工公司、北京紫东环保水处理药剂厂、淮南合成材料厂等企业也生产出各具特色的添

加剂,如有机酸羧酸为主体的共聚物合成制取的添加剂,成本相对不高,但是分散性能却相当好;ZDFS 系列添加剂显著的特点是与其它各类添加剂具有良好的共溶性;HNF 型添加剂既可以使煤粒分散又能保证水煤浆的稳定性。南京大学、中国矿业大学、华南理工大学等一批高校也致力于添加剂的研发,如 NDF 系列添加剂、聚丙烯酸系列添加剂、SAF 高负荷分散剂。NDF 系列添加剂对煤种的适应性较强,可适用于多种制浆工艺;聚丙烯酸系列添加剂在提高成浆浓度和降低添加剂用量上比萘系列添加剂有明显优势;SAF 是一种非常有效的高负荷水煤浆分散剂,发展前景广阔。此外,我国研发的新型多功能非离子型添加剂如 IA/AA/AMPS 三元共聚物水煤浆分散剂^[21]、淀粉接枝共聚物水煤浆分散剂^[22]、DCS 复合型水煤浆添加剂^[23]、磺化萘酚甲醛/萘系复合水煤浆分散剂^[24]、聚羧酸系水煤浆分散剂^[25]、APEO 烷基酚聚氧乙烯醚水煤浆分散剂^[26]的研究开发也取得了很大进展。

1.3 燃烧技术的创新与应用

1) 燃烧技术实现多元化。水煤浆品种不同,其着火性、稳燃性、结渣性、灰的沾污性及磨损性等燃烧特性也不同。针对各类煤浆的特点,水煤浆的燃烧方式也由单一的喷雾-悬浮燃烧发展到流化-悬浮燃烧、悬浮-层状复合燃烧、多重配风旋风燃烧、催化燃烧及水煤浆低温、低氧燃烧等。悬浮-层状复合燃烧方式的出现,也使得生物质(污泥)煤浆、低挥发分难燃烧浆以及成浆性差的煤浆有了新的利用空间。燃烧装置的多元化体现在煤浆的雾化喷嘴和燃烧器等方面,类型多样且适用度高。另外,燃烧装置在结构和材质方面得以优化,雾化质量有了改善,配风量也更合理,各类煤浆基本达到燃烧要求^[2]。

2) 燃烧装备的可靠性提升。水煤浆是液固两相浆态燃料,其灰分中不可避免含有氧化钾、氧化钠等碱金属氧化物,燃烧装备在燃烧过程中必然产生结渣现象,结渣是影响水煤浆锅炉可靠性和长期运行的关键因素。为应对燃烧结渣问题,国内近几年研发了多种应用于工程实践的关键技术与装置,如水煤浆锅炉炉膛底部的防结焦结构^[27]、水煤浆锅炉在线吹灰方法及装置^[28]等。

水煤浆含水的燃料特性,决定了水煤浆难以点火及稳定燃烧,我国水煤浆燃烧装备研发人员首次提出了子母炉膛水煤浆悬浮-层状复合燃烧技术与

锅炉^[29]、双炉膛水煤浆锅炉^[30]。这种燃烧技术可以使水煤浆锅炉在10%~110%的负荷范围内稳定燃烧,目前已拥有水煤浆锅炉稳定燃烧方法及装置^[31]、水煤浆悬浮-层状复合燃烧锅炉^[29]、水煤浆锅炉无油点火装置^[32]等国家发明专利。

2 高效水煤浆制浆燃烧集成技术

2.1 高效水煤浆制浆燃烧集成技术工艺原理

新型高效生物质水煤浆制浆燃烧系统集成技术

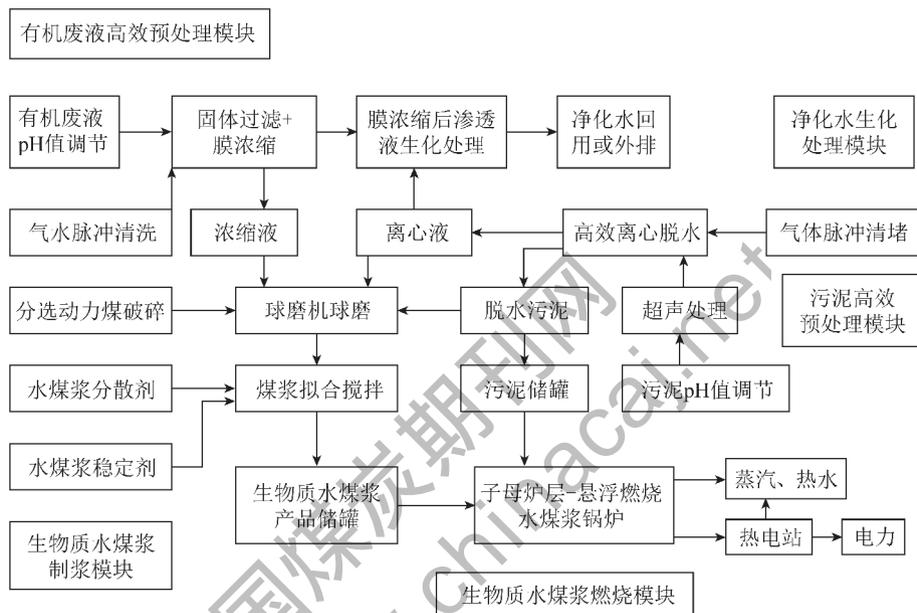


图1 新型高效生物质水煤浆制浆、燃烧工艺流程模块

子母炉层-悬浮复合燃烧水煤浆锅炉炉膛详细结构见文献[33]。锅炉采用子母炉膛设计,主要包括主、副燃烧器和主、副燃烧室,子炉膛为副燃烧室,母炉膛为主燃烧室。子母炉层-悬浮燃烧的技术原理是:副燃烧室兼具点火和负荷调节作用,并且有特殊的配风设计,不需要安装鼓风机;主燃烧室底部有活动炉排,炉底配风,从而也起到给炉底降温的作用,不易结焦,再加之不设挡火墙,也能防止喷射出来的水煤浆引起的结焦问题。锅炉的在线吹灰装置能够在线清灰、除渣,不需要中断生产,从而保证锅炉长时间连续、稳定、可靠地运行。采用悬浮层状复合燃烧,将炉排层状燃烧和煤粉悬浮燃烧进行优化组合,水煤浆通过浆枪喷入炉膛,大部分雾化的细小浆粒悬浮在空中燃烧,剩下那部分雾化颗粒较粗且未燃烬的浆粒团散落到炉膛底部的炉排上,这些浆粒团以层燃方式进行二次燃烧,炉排底部给风能使其充分燃烬。

子母炉层-悬浮燃烧技术具有如下特点:①免油

及装备是株洲蓝宇热能科技研制有限公司(以下简称蓝宇科技公司)自主开发的水煤浆系统产业链技术,依托公司核心自主创新知识产权的子母炉层-悬浮燃烧水煤浆锅炉,集成膜分离、功率超声处理与高效机械离心分离等绿色低碳技术,实现污泥、有机废液的能源、资源化利用。集成技术工艺可分为5个模块:即有机废液的高效预处理模块、污泥的高效预处理模块、生物质水煤浆制浆模块、生物质水煤浆燃烧模块和净化水生化处理模块,如图1所示。

点火,运行经济;②负荷调节范围大;③锅炉热效率高,燃料适应范围广;④连续稳定运行时间长;⑤锅炉运行的环保效果好。表1为层-悬浮燃烧、流化-悬浮燃烧和喷雾-悬浮燃烧水煤浆锅炉性能指标的比较。

2.2 高效水煤浆制浆燃烧集成技术工程应用

1) 株洲市龙泉洗水工业园集中供汽系统。本项目是由蓝宇科技公司依托自主创新的知识产权独立建设,建有20万t/a的水煤浆生产线和20t/h的水煤浆蒸汽锅炉,向洗水工业园各洗水企业提供蒸汽,部分抽取集中污水处理厂未经处理的高浓度有机废水制浆。水煤浆生产线生产的水煤浆产品除本项目自用一部分外,其他供应长株潭、衡阳及益阳地区。公司与各洗水企业通过蒸汽流量计进行耗量结算,由于服装加工企业利润较薄,部分洗水企业用生物质锅炉生产蒸汽,水煤浆集中供热未能在全工业园区推广,但在株洲市创建国家卫生城市和国家环保模范城市过程中,发挥了重要的作用。

表1 层-悬浮燃烧、流化-悬浮燃烧和喷雾-悬浮燃烧水煤浆锅炉性能指标比较

性能指标	层-悬浮燃烧水煤浆锅炉	流化-悬浮燃烧水煤浆锅炉	喷雾-悬浮燃烧水煤浆锅炉
点火方法	无油点火	油、气点火	油、气点火
燃烧温度	低温燃烧	低温燃烧	高温燃烧
燃烧效率/%	98.5~99	98	96
脱硫性能	炉排上及浆里可添加脱硫剂,实现炉内脱硫	流化媒体物料可用石灰石,实现炉内脱硫	浆里可添加脱硫剂,实现炉内脱硫
负荷调节/%	10~110	30~110	50~100
燃料适应性	经济型水煤浆、Ⅲ标准水煤浆、生物质水煤浆及生物质可燃固、液体废物	高挥发分优质浆、生物质(污泥)浆、低挥发分难烧煤浆、成浆性差的煤浆	高挥发分优质浆
启动性能	适用于频繁启动	可频繁启动	不适用于频繁启动
锅炉出力	锅炉出力足,达100%	锅炉出力足,95%	锅炉出力只有70%
排烟温度	高负荷 ≤ 180 ℃;中负荷 ≤ 120 ℃;排烟损失低	高负荷 ≥ 230 ℃;中负荷 ≥ 200 ℃;排烟损失大	高负荷 ≥ 230 ℃;中负荷 ≥ 200 ℃;排烟损失大
除尘脱硫方法与环保效果	采用布袋除尘器+湿式脱硫,从点火到停炉都不冒黑烟;粉尘质量浓度 < 10 mg/m ³ ;布袋使用寿命1~1.5 a;干法除尘,不产生二次污染;不耗电,运行费用低,占地小	电除尘器:价格高,需耗电,电耗高;湿法除尘:易产生二次污染,点火冒黑烟,水耗大(6 t/h 锅炉,日耗水290 t),引风机、烟囱维修频率高,沉淀池占地面积大	电除尘器:价格高,需耗电,电耗高;湿法除尘:易产生二次污染,点火冒黑烟,水耗大(6 t/h 锅炉,日耗水290 t),引风机、烟囱维修频率高,沉淀池占地面积大
长期运行性能	在线吹灰、防结渣性能好,可连续运行1 a以上	具有防结渣性能,连续运行比喷雾-悬浮燃烧时间长	需定期停炉打焦、渣,连续运行15~30 d
工程情况	2000年湖南株洲东苑宾馆安装第一台锅炉至今,已有约40台第1~4代产品在长株潭地区、南宁地区、宁波、淮安等地高效运行	工程示范阶段	2001年安装中小型水煤浆锅炉以来,全国各地都有应用,部分已被双炉膛层-悬浮燃烧水煤浆锅炉取代
运营模式	提供制浆、锅炉设计、供热系统设计、除尘脱硫关键设备配套及能源托管与能源合同管理技术服务(BOT)	提供锅炉	提供锅炉

2)广西南宁水煤浆的推广及应用。广西南宁市政府为推广水煤浆的应用,政府成立了专业的水煤浆推广办公室,并出台了《南宁市燃煤锅炉二氧化硫污染防治办法》、《南宁市人民政府关于推广应用水煤浆实施意见》、《南宁市推广应用水煤浆专项资金管理办法》等。蓝宇科技公司在2012年起全面管理原战略投资者建成的水煤浆厂,实现了对南宁水煤浆推广应用的全产业链服务。同时,在规模化的工业园集中供热站,实现能源托管服务,提高了系统能源效率与经济效益。

3)株洲市财政局水煤浆锅炉房的能源托管运行服务。株洲市财政局位于株洲市河西国家高新技术开发区,环境要求高;于21世纪初建成2×2 t/h的水煤浆锅炉,供办公楼及生活区用汽与热水。自2007年以后,公司负责系统运行、维修及管理(包括提供水煤浆燃料),按蒸汽、热水使用量,与居民及财政局结算。

4)长株潭及周边地区水煤浆的推广。蓝宇科

技公司承担了该地区水煤浆锅炉、炉窑改造及建设项目的90%以上业务,并提供与锅炉、炉窑相匹配的水煤浆产品和其他优质配套服务。用户改用水煤浆技术及产品后,无论是工业生产用能、还是生活用能,都取得显著的节能、环保效益。

5)株洲福尔程化工有限公司6 t/h水煤浆集中供热。株洲福尔程化工有限公司生产的产品主要有福美钠(二甲基二硫代氨基甲酸钠)、福美钾(二甲基二硫代氨基甲酸钾)、威百亩(甲基二硫代氨基甲酸钠)、橡胶促进剂TMTD(四甲基二硫化秋兰姆)、NOBS(次磺酰胺类)、TMTM(一硫化四甲基秋兰姆),新型浮选剂、选矿药剂、松醇油等。公司产品在国内市场享有一定的知名度,其中福美钠为公司产品里面的佼佼者。2007年建1台2 t/h的水煤浆锅炉,对化工生产工艺进行集中供热。2010年因扩建,配套建设6 t/h的水煤浆锅炉,蓝宇科技公司投资建设和运行管理,按每年5万t蒸汽的基准量,进行商务结算。

6) 株洲市霞湾建材有限责任公司加气混凝土砌块生产工艺集中供热。株洲市霞湾建材有限责任公司年产 100 万 m^3 加气混凝土砌块生产线,原蒸压工艺采用燃煤锅炉提供蒸汽,煤低位发热量 23.01 MJ/kg,加气混凝土砌块煤耗 30 kg/ m^3 。考虑到该公司年产百万立方米环保砖的用汽量,采用 2 台 15 t/h 水煤浆锅炉取代原燃煤锅炉。本体采用 SZS 型双锅筒、全水管纵置式 D 型布置,内设主副燃烧室,炉底配置活动炉排,具有点火迅速,热效率高,适用水煤浆品种广,负荷调节范围大(20% ~ 100%)等特点。项目投入运行后,选用水煤浆作燃料与煤进行对比,运行成本节约 10% 左右,具有显著的节能、减排效益;与天然气、油进行对比,经济效益显著。该项目是水煤浆技术取代燃煤在经济效益上具有明显效果的典型案例。

7) 贵州茅台镇水煤浆集中供热。水煤浆在贵州的推广使用最早是中烟公司贵定卷烟厂锅炉改造项目,将 10 t 链条燃煤锅炉改为燃水煤浆锅炉,由蓝宇科技公司提供设计、燃烧技术。2010 年 5 月完成锅炉的改造并开始运行,目前运行状况一切正常,热效率和燃烬率都有很大提高,而 SO_2 排放量大大减少,同时也节省了不少燃料。

3 高效水煤浆制浆燃烧集成技术发展展望

1) 依托高效水煤浆制浆燃烧集成技术的能源合同管理服务。充分利用高效水煤浆制浆燃烧集成技术的技术可靠性、节能环保性,开展能源合同管理服务。

2) 多能互补的热、电、冷分布式能源联供系统。水煤浆作为主导洁净能源,太阳能、风能、地热等可再生能源作为补充能源。运作方式上,最大限度使用可再生能源,达到节能、碳减排的最大效益。

3) 污水、污泥资源化、资源化利用热电系统。利用水煤浆制浆用水的特点,污水制浆,污泥与生物质水煤浆共燃,实现污水、污泥的资源化、资源化利用,达到能源环境目标的统一协调。

4) 生活垃圾等可燃固体废物处置热电系统。水煤浆作为垃圾生态化处置的辅助能源,实现生活垃圾的资源化、资源化、无害化利用。

5) 无机矿物焙烧的点火系统。采用水煤浆取代重油、天然气,进行烧节点火,目的是在保证环保效益的前提下降低生产成本。

6) 工业园区生态化建设能源环境一体化系统。

针对食品加工、生物医药等工业园区,采用高效生物质水煤浆制浆燃烧集成技术,把工业园区各生产企业产生的高浓度有机废液、生物质固体废物与水煤浆制浆燃烧工艺集成,实现工业园区能源环境一体化处置,达到资源的循环利用,构建生态循环产业链。

参考文献:

- [1] 联合国开发计划署驻华代表处. 中国人类发展报告: 迈向低碳经济和社会的可持续未来[R]. 北京: 中国人民大学, 2010.
- [2] 贾传凯, 王燕芳, 王秀月, 等. 水煤浆技术的应用与发展趋势[J]. 煤炭加工与综合利用, 2011(4): 55-57.
- [3] 张传忠, 刘宏亮, 方 铭. 一种用低阶煤制备高浓度水煤浆的方法: 中国, 102604698A[P]. 2012-07-25.
- [4] 何国锋, 段清兵, 王国房, 等. 一种利用低阶煤制备高浓度水煤浆的方法: 中国, 101173765B[P]. 2008-05-07.
- [5] 何国锋, 段清兵, 王国房, 等. 一种生物质煤浆的生产系统: 中国, 202576370U[P]. 2012-12-05.
- [6] 林荣英, 邓 晖, 罗祖云. 以水葫芦与无烟煤制备生物质煤浆: 中国, 101760268A[P]. 2010-06-30.
- [7] 吴荣标, 龙 森. 一种污泥生物质煤浆及其制作工艺: 中国, 101492621A[P]. 2009-07-29.
- [8] 刘建文, 陈 楠, 黄敦辉. 生物质水煤浆制浆、燃烧方法及集成系统: 中国, 101639225B[P]. 2010-02-03.
- [9] 王云刚. 水煤浆的制浆系统和多元料浆气化系统: 中国, 203487116U[P]. 2014-03-19.
- [10] 匿 名. 神华环保水煤浆简介[EB/OL]. [2011-12-14]. www.docin.com/p-307107980.html.
- [11] 虞育杰, 刘建忠, 张传名, 等. 低挥发分煤的成浆特性和水煤浆流变特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(2): 335-340.
- [12] 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.
- [13] 解永刚. 有机废液水煤浆燃烧试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [14] 饶 甦. 黑液水煤浆的燃烧、沾污结渣及其污染物排放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [15] 邓 晖, 林荣英, 罗祖云. 生物质水煤浆燃烧特性及动力学分析[J]. 可再生能源, 2011, 29(2): 81-84.
- [16] 李艳昌, 程 军, 刘 剑. 配煤提高煤种成浆性能的研究[J]. 煤炭转化, 2010, 33(3): 41-44.
- [17] 胡亚轩, 刘建忠, 王睿坤, 等. 配煤对水煤浆性质的影响[J]. 中国机电工程学报, 2012, 32(2): 31-38.
- [18] 龚 欣, 于遵宏, 王辅臣. 水煤浆气化技术在中国的应用及其进展[J]. 节能与环保, 2001(5): 21-23.
- [19] 罗进成, 贺根良, 郑亚兰, 等. 多元料浆气化技术在石油炼制行业中的应用分析[J]. 石油炼制与化工, 2010, 41(1): 16-20.

(下转第 44 页)

增加活性焦表面与汞的接触机会,有利于提高活性焦的汞吸附量。在实际应用中,应根据入口汞浓度,选择活性焦吸附层参数,以达到最优脱汞效果。

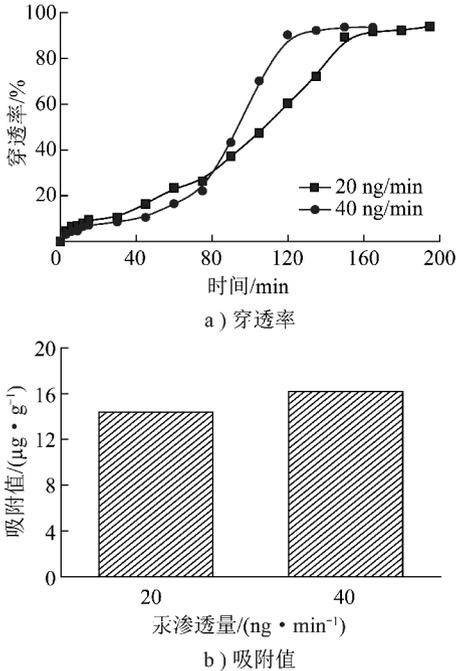


图4 汞渗透量对活性焦脱汞的影响

3 结 论

1) 与原始活性焦 AC 相比,通过化学改性得到的活性焦 AC-Na₂S、AC-S、AC-ZnCl₂ 比表面积和孔容积有所降低,活性焦对汞的吸附量分别增加 60%、113% 和 140% ;

2) 随着吸附温度的升高,化学反应变快,活性焦的初始脱汞效率提高,对 Hg⁰ 的总吸附量升高,但增加率呈减缓趋势,120 和 140 °C 吸附量接近。当 ZnCl₂ 负载量由 5% 提高至 15% 时,50% 穿透率对应时间由 75 min 延长至 120 min,活性焦吸附量增至 17.5 μg/g;入口烟气中 Hg⁰ 渗透量由 20 ng/min 增至 40 ng/min 时,活性焦吸附量由 14.4 μg/g 增至 16.2 μg/g,但穿透时间缩短。

参考文献:

[1] 高洪亮,周劲松,骆仲泱,等. 改性活性炭对模拟燃煤烟气中汞吸附的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(8):26-30.
 [2] 吴鹏,苗文华,姜军清,等. 煤基吸附剂脱除燃煤电厂烟气中汞的研究进展[J]. 洁净煤技术,2012,18(6):102-105,119.
 [3] 何伯述,王欣,朱玲,等. 燃煤电厂活性炭喷射脱汞的试验研究[J]. 应用科学与工程学报,2010,18(5):823-831.
 [4] 苗文华,白中华,史亚微,等. 活性焦烟气脱汞的试验研究与数值模拟[J]. 电力科技与环保,2014,30(1):16-19.

[5] 滕济林,张萌,李若征,等. 褐煤活性炭吸附焦化废水[J]. 环境工程学报,2011,7(10):3827-3832.
 [6] 苗文华,吴鹏. 低阶煤制备活性焦及其吸附性能研究[J]. 洁净煤技术,2014,20(6):32-35,41.
 [7] 熊银伍,杜铭华,步学朋,等. 改性活性焦脱除烟气中汞的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(35):17-22.
 [8] 任建莉,周劲松,骆仲泱,等. 汞吸附过程的试验研究和数学模型[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):1-6.
 [9] 陈俊杰,任建莉,钟英杰,等. 活性炭纤维吸附汞的量子化学研究[J]. 动力工程学报,2010,30(12):960-965.
 [10] 颜甜,左宁林,赵昕,等. 高温载硫活性炭的制备及脱汞能力研究[J]. 环境污染与防治,2012,34(4):1-4,10.
 [11] 鹿存房,刘清才,高威,等. 载硫活性炭微观结构和表面形态研究[J]. 环境工程学报,2009,3(8):1521-1523.
 [12] 张鹏宇,曾汉才,张柳. 活化处理的活性炭吸附汞的试验研究[J]. 电力科学与工程,2004(2):1-3.
 [13] 刘慷,柴小康,于洪,等. 燃煤电厂脱汞吸附剂的研究和应用[J]. 广东电力,2010,23(11):28-30,80.
 [14] 孙巍,晏乃强,贾金平. 载溴活性炭去除烟气中的单质汞[J]. 中国环境科学,2006,26(3):257-261.

(上接第39页)

[20] 薛弘晔,暴杰. 干法速溶型水煤浆粉生产线 PLC 控制系统实现[J]. 能源技术与管理,2007(2):77-79.
 [21] 米小慧,李小瑞,沈一丁,等. IA/AA/AMPS 水煤浆分散剂的制备及性能[J]. 精细化工,2012,29(10):1001-1004.
 [22] 赵方,张光华,韩文静,等. 淀粉接枝共聚物水煤浆分散剂制浆性能的研究[J]. 煤炭转化,2012,35(2):51-55.
 [23] 戴财胜,杨红波. 复合型水煤浆添加剂的合成与性能研究[J]. 煤化工,2008(1):41-43.
 [24] 熊伟,张光华,朱军峰. 磺化萘酚甲醛/萘系复合水煤浆分散剂的性能[J]. 煤炭转化,2013,36(2):40-43.
 [25] 潘晓懿,朱书全,杨玉立,等. 聚羧酸系水煤浆分散剂合成的影响因素[J]. 洁净煤技术,2013,19(2):85-87.
 [26] 苏毅,朱书全. 烷基酚聚氧乙烯醚水煤浆分散剂的成浆性能[J]. 煤炭学报,2011,36(8):1396-1400.
 [27] 顾利平. 水煤浆锅炉炉膛底部的防结焦结构:中国,200993375Y[P]. 2007-12-19.
 [28] 陈楠,许浦舟. 水煤浆锅炉在线吹灰方法及装置:中国,101737790A[P]. 2010-06-16.
 [29] 陈楠,许浦舟,朱恒辉. 水煤浆悬浮、层状复合燃烧锅炉:中国,201568954U[P]. 2010-09-01.
 [30] 贺新文. 浅谈双炉膛水煤浆锅炉的应用[J]. 科学之友,2011(18):58-59.
 [31] 陈楠,朱恒辉. 水煤浆锅炉稳定燃烧方法及装置:中国,101639216B[P]. 2010-02-03.
 [32] 陈楠,黄敦辉. 水煤浆锅炉无油点火装置:中国,201487940U[P]. 2010-05-26.
 [33] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 生物质水煤浆制浆燃烧集成系统技术经济分析[J]. 洁净煤技术,2014,20(1):88-92.