

煤炭洁净燃烧

煤热解工艺中挥发分除尘技术的现状分析及建议

张生军^{1,2} 郑化安^{1,2} 陈静升^{1,2} 樊英杰^{1,2} 李学强^{1,2}

(1. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司 陕西 西安 710065; 2. 国家能源煤炭分质清洁转化重点实验室 陕西 西安 710065)

摘要: 针对粉煤热解多联产工艺中热解挥发分除尘的技术难题,阐述了热解挥发分所含粉焦及煤灰颗粒的特性、热解工艺对除尘器的要求,对热解挥发分除尘技术的研究现状进行分析并提出建议,认为煤热解工艺中挥发分除尘技术应该从热解工艺本身出发,采用加氢(催化)热解方式,促进热解气中重质焦油组分裂解,使热解产物轻质化,从而降低煤热解挥发分的除尘难度。此外,可以采用多种除尘设备有机组合的方式并辅以分离前对细小粉尘进行预团聚等手段,强化除尘效果、提高煤热解工艺中挥发分的除尘效率。

关键词: 煤热解; 挥发分; 除尘技术

中图分类号: TQ533.2; TD849

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2014)03-0079-04

Status analysis and improvement measures of volatile dust removal technology in coal pyrolysis process

ZHANG Shengjun^{1,2}, ZHENG Huaan^{1,2}, CHEN Jingsheng^{1,2}, FAN Yingjie^{1,2}, LI Xueqiang^{1,2}

(1. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co., Ltd. Xi'an 710065, China;

2. State Energy Key Laboratory of Clean Coal Grading Conversion, Xi'an 710065, China)

Abstract: To improve the volatile dust removal efficiency in the process of pulverized coal pyrolysis, investigate the characteristics of fine coke and coal ash in volatile and the requirements for dust collector. Expound the research status and development of dust removal technology in the process of coal pyrolysis. The results show that the way of catalytic hydrogenation pyrolysis can promote cracking of heavy tar components, which can reduce the dust removal difficulty markedly. The combination of different dust removal devices and agglomeration of fine particles before entering dust collector also can improve the dust removal efficiency.

Key words: coal pyrolysis; volatile; dust removal technology

0 引言

煤热解技术是煤炭分质高效清洁转化利用的重要途径之一,通过煤热解可以生产清洁的气、液、固 3 种不同形态的产品,继而对煤中不同成分进行分质利用,即气、液产品作为化学品使用,固态煤焦作为进一步气化的原料^[1]。煤炭热解技术包括块煤热解和粉煤热解技术,考虑到目前机械采煤粉煤产量高达煤炭开采总量的 80% 左右,因而以粉煤为原

料的热解工艺必将成为今后煤热解的主流工艺。然而目前国外开发的粉煤热解工艺,如 Garrett 工艺、L-R 工艺和国内开发的 DG 新法干馏工艺虽然都完成了过程的放大,但均未大规模的工业化应用。其中,含尘挥发分的除尘技术是上述粉煤热解工艺普遍遇到的技术难题^[2-3]。究其原因,粉煤中低温热解过程中产生的热解气具有成分复杂、重质焦油组分多、粉尘含量高、粉尘形状不规则、气体温度高等特点,造成热解粉焦和热解油气高温在线分离效

收稿日期: 2014-02-26; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.03.020

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2013KTZB01-04-02)

作者简介: 张生军(1979—),男,甘肃武威人,工程师,博士,从事煤化工与精细化工领域研究。E-mail: zhangsj@sxcccti.com。通讯作者: 陈静升, E-mail: chenjs123@sina.com

引用格式: 张生军,郑化安,陈静升,等.煤热解工艺中挥发分除尘技术的现状分析及建议[J].洁净煤技术,2014,20(3):79-82,86.

ZHANG Shengjun, ZHENG Huaan, CHEN Jingsheng, et al. Status analysis and improvement measures of volatile dust removal technology in coal pyrolysis process[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(3): 79-82, 86.

果不理想,导致热解系统运行不稳定、焦油中灰分含量高,阻碍了粉煤热解技术的工业化进程。因此,热解工艺中挥发分的除尘技术成为低阶煤中低温热解工业化过程中亟需解决的关键问题。本文旨在对热解工艺中挥发分除尘的特点及对本领域现有的除尘技术进行总结,以期对热解工艺中挥发分高效除尘技术的开发提供参考。

1 热解工艺中除尘技术的特点

热解挥发分除尘是煤热解工艺中非常重要的环节。在中低温热解工艺中,由于分离对象(粉焦及煤灰)的特殊性以及热解工艺对除尘的特殊要求,热解挥发分除尘一直是煤热解多联产工艺开发的技术瓶颈。

1.1 粉焦及煤灰颗粒的特性

煤中低温热解工艺中产生的荒煤气是黄褐色、具有强烈刺激性臭味的气汽混合物,除含有 H_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2S 、 NH_3 、水蒸气和焦油蒸汽等成分外,还含有大量的粉尘颗粒^[4]。荒煤气中夹带的粉尘颗粒主要来自粉煤热解过程中由于受强热后崩碎所产生的细小焦粉及煤灰颗粒,这些细小的粉尘颗粒具有如下特点^[5-6]:①焦粉及煤灰颗粒粒度细、密度小,容易漂浮且随气流流动,运动轨迹不确定;②颗粒形状不规则,多为大量针状物、细粉和片状物的混合物,其密度与热解油气接近;③黏结性较强,容易与热解气中冷凝出的少量焦油一同黏附在容器壁上,堵塞除尘设备和管道。

1.2 中低温煤热解工艺对除尘器的要求

1) 干法除尘。结合煤热解工艺除尘的要求,热解荒煤气通过除尘设备与粉尘分离时要保证不发生冷凝,因此,干法式除尘是煤热解工艺除尘较为合理的选择。

2) 除尘器内热解气停留时间短。为得到较高的焦油产率,热解气从产生到冷凝停留时间应尽可能短。热解气在除尘器中滞留时间很大程度上影响到热解油气的二次裂解,所以热解产生的荒煤气必须迅速通过除尘器,以防止焦油蒸汽发生二次裂解而转化为烃类小分子气体,从而保证有较高的焦油产率^[6]。

3) 除尘器内热解气的温度变化小。热解荒煤气对温度变化非常敏感,容易由气固两相变为气液固三相,除尘过程中热解荒煤气变相后除尘难度将会增加。因此,一般情况下热解煤气穿过除尘器时温度要保持在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,

并且除尘器内热解气的温度变化要尽可能小,避免热解气中所含重质焦油组分在除尘器内冷凝,与热解气中夹带的粉尘一同黏附于除尘器或连接管道内壁,从而影响除尘系统长时间稳定运行。

4) 除尘器具有较高的过滤精度。除尘器除尘效率不高,则热解气中未除去的细粉尘颗粒会进入后续焦油冷却回收工段,导致煤焦油中灰分偏高,焦油品质差,无法达到煤焦油深加工的质量指标。因此,煤热解气固分离工段对除尘器的过滤精度有较高要求。

5) 除尘器能耐高温,具有较好的抗腐蚀性。热解工艺中荒煤气的温度一般维持在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,因此热解挥发分除尘工艺要求除尘设备能耐高温,保证除尘设备在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温工作环境下能连续稳定运行。此外,热解气中焦油蒸汽、 H_2S 和 NH_3 等成分在较高温度下会加速对除尘设备的腐蚀,因此,除尘设备应该具有较好的抗腐蚀性。

2 热解挥发分除尘技术的研究现状

目前,国内外开发了很多以煤热解为核心的多联产工艺,但是热解气除尘一直是多联产热解工艺开发的技术难题,特别是在粉煤热解工艺中,热解油气中粉尘夹带问题更加突出。针对粉煤热解多联产工艺中热解挥发分高效除尘的技术难题,很多科研单位尝试各种分离、除尘方法,但在工业上尚未见到成功案例,相关研究仅停留在实验室研究及相关工业试验阶段。目前应用于热解煤气除尘的技术主要包括:旋风除尘技术、静电除尘技术、金属过滤材料除尘技术和颗粒床除尘技术等。

2.1 旋风除尘技术

旋风分离器是利用含尘气体旋转时产生的离心力将尘粒与气体分离的装置,是工业中广泛应用的除尘设备,尤其在高温、高压、高含尘浓度以及强腐蚀性环境等苛刻场合。与其他除尘器相比,旋风除尘器具有结构简单、无运动部件、造价便宜、除尘效率较高、维护管理方便以及适用面宽的特点^[7]。然而旋风除尘器压降一般较高,而且对于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的尘粒捕集效率低,故一般旋风除尘器只能作为预除尘设备。

综合粉焦及煤灰颗粒的特性以及热解工艺的特殊要求,选用耐高温材料的旋风除尘器是目前煤热解工艺中一级除尘最普遍的选择。目前国内开发的煤热解工艺都选用旋风分离器或改进的旋风分离器

作为一级除尘设备。神木富油科技有限公司 60 万 t/a 的粉煤快速热解工艺中挥发分一级除尘采用的是环流式旋风分离器,工业试验表明,环流式旋风分离器除尘效率较低,远达不到工业要求^[4]。其原因如下:①热解气中夹带的粉焦及煤灰颗粒粒度细、密度小,在旋风分离器内旋转时产生的离心力较小;②粉焦及煤灰颗粒形状不规则、比表面积大,其密度与热解油气接近,因此粉尘颗粒向气壁运动时容易漂浮且随气流流动,无法彻底到达除尘器壁面而实现分离;③热解荒煤气对温度变化非常敏感,除尘器底部灰尘出口温度若发生变化,则部分焦油会冷凝析出并湿润灰尘,使得旋风除尘器排灰不畅,从而导致除尘效率较低^[5-6]。

旋风除尘设备具有结构简单、运行成本低的特点,因此工业上多采用单级或多级旋风除尘器作为除尘设备,然而旋风除尘器对于 5~10 μm 尘粒捕集效率低,只有 60%~80%,因此在煤热解工艺中旋风分离器只能作为预除尘设备,将荒煤气含尘浓度降低到 0.5% 以下,再进行精密除尘。

2.2 静电除尘技术

静电除尘技术是利用高压电场使气体电离,当含尘气体流过电场时,粉尘颗粒受离子撞击而带负电,带负电的粉尘颗粒向阳极板移动,从而被捕获,然后通过震打装置敲击极板,将捕获的尘粒清除。静电除尘一般可分为 4 个阶段:气体电离、粉尘获得离子而带电、带电粉尘向电极移动和清除电极上的粉尘。静电除尘技术是一种高效的除尘技术,具有除尘效率高、压降低、无堵塞等优点,广泛应用于燃煤电厂高温烟气除尘等领域^[8]。

目前将静电除尘器应用于热解挥发分除尘的案例较少,大多处于试验探索阶段。2006 年 7 月浙江大学和淮南矿业集团合作,在淮南市新庄孜电厂合作建立了一套 12 MW 循环流化床热电气焦油多联产工业示范装置^[9]。该项目在高温热解油气分离方面进行了积极探索,该系统中热解煤气除尘工段采用了两级旋风除尘和静电除尘相结合的方式。其中静电除尘器由浙江菲达环保科技股份有限公司制造提供。12 MW 循环流化床热电气焦油多联产工业示范装置试运行期间,装置运行状况良好,其中静电除尘器工作温度在 400~500 °C,连续运行 264 h 以上,除尘效率达到 85% 左右。

目前静电除尘器应用于高温煤气除尘尚存在以下问题:电极腐蚀、电晕稳定性差、对粉尘的比电阻和气体成分等性质敏感、一次性投资高和电能消耗

大等。在热解煤气除尘工况下,电极腐蚀和电晕不稳定等问题会更加突出。因此,静电除尘技术应用于热解煤气除尘有一定的局限性。

2.3 金属过滤材料除尘技术

金属过滤材料是一类具有明显孔隙特征的金属材料,该类金属材料一方面具有优异的耐温性和机械性能,适于连续反向脉冲清洗,再生性好,使用寿命长;另一方面还具有很好的加工性能和焊接性能。因此,这些优异性能使得金属过滤材料在高温气体除尘应用中表现出很好的适应性和优越性^[10-12]。

目前金属过滤材料除尘技术主要应用于高温烟气除尘、高温煤气除尘和合成气除尘等领域,而在中低温热解荒煤气除尘工况的应用研究相对较少。随着高温耐腐蚀金属多孔材料的研究,目前学者正在尝试将金属膜过滤系统应用于中低温热解煤气的除尘工段中。中国科学院山西煤炭化学研究所梁鹏等^[3,13]为了寻求优化炉前煤低温干馏工艺中的挥发分除尘方案,低温煤干馏气除尘采用 38 μm 金属丝网作为过滤介质,多次试验表明,滤网过滤效率大于 99.9%,随着滤网表面形成一定厚度的滤饼,除尘效率会进一步提高。甘肃乔氏油页岩综合利用有限公司将 Fe-Al 金属过滤器应用于岩油气高温气固分离工段,并进行了相应除尘测试,结果表明,Fe-Al 金属过滤器的应用缩短了工业流程,较好解决了高温油页岩气净化难题。此外,成都易态科技有限公司就煤热解工艺中热解粉焦和热解油气在线分离技术进行了积极探索,开发出应用于热解荒煤气高温除尘领域的 Fe-Al 金属间化合物膜过滤滤芯及成套过滤系统,目前正与国内某大型煤化工企业进行技术合作,开发的装置及技术过滤精度高、稳定性良好且能够实现高温在线反吹,其在煤热解工艺中的除尘性能正在测试。

目前金属过滤材料除尘技术在中低温煤热解气除尘工况的研究相对较少,正处于探索阶段。但由于金属过滤材料优异的耐温性和机械性能,并且适于连续的反向脉冲清洗、再生性好、使用寿命长,金属过滤材料除尘技术在中低温煤热解气除尘方面有较大的应用潜力。

2.4 颗粒床除尘技术

颗粒床除尘技术是利用物理和化学性质稳定的固体颗粒(煤颗粒、石英砂、石灰石、压制成型的氧

化硅、氧化铝球等)组成过滤层,通过直接拦截、惯性碰撞、扩散沉积、重力沉积、静电吸引的过滤原理实现对含尘气体的过滤技术^[14-15]。颗粒层除尘技术先后经过了由固定床层到移动床层的发展,移动颗粒层过滤除尘系统兼顾了除尘效率与过滤压力降,易于大型化,并实现了过滤和清灰一体化,适于高温气体除尘。

中国科学院山西煤炭化学研究所梁鹏等^[13]为了验证颗粒床除尘技术在循环流化床燃烧/煤热解多联产系统中的可行性,将颗粒床除尘器应用于移动床热解系统中,试验表明,通过改变滤料性质、料层高度、表观过滤气速等参数,可以将热解焦油含尘量控制在一定范围内。中科院山西煤炭化学研究所就高温气固在线分离问题进行了相关中试试验。中科院山西煤炭化学研究所联合陕西府谷县恒源煤电有限公司在府谷地区合作开发了一套产能75 t/h的煤热解-燃烧多联产系统,该系统中高温气焦分离采用移动颗粒床过滤器,介质采用热解系统自产的块状半焦,颗粒床运行温度500℃以上,以防止煤气中重质组分凝结。中试运行结果表明,该多联产系统得到的焦油中粉尘质量分数小于5%,满足工业要求。初荣等^[16]采用颗粒床过滤器对热解粉焦和热解油气进行分离,除尘器采用移动床,过滤介质采用筛分后的高温半焦,装置在运行过程中出现一些问题,如除尘过程中颗粒床温度、压力不易控制、焦油组分易冷凝析出容易死床等。此外,哈尔滨瑞格能源环境技术发展有限责任公司、冀州中科能源有限公司和中国科学院过程工程研究所等单位在低温热解煤气除尘方面也做过相关试验研究,热解挥发分除尘均采用颗粒床过滤器,具体除尘效果正在处于试验测试阶段^[17-18]。

目前,颗粒床除尘器应用于低温干馏煤气除尘领域尚存在不足:细微尘粒的捕集效率不高,过滤介质磨损严重,过滤介质循环再生能耗大,颗粒床内部温度、压力不易控制等。因此,今后在颗粒床除尘技术的开发过程中,应从改善过滤介质的强度、加强新设备的研发以及优化除尘工艺等方面入手,促进颗粒床除尘技术在热解煤气除尘领域的工业化应用。

3 煤热解工艺中挥发分除尘的建议

1) 煤加氢(催化)热解。针对中低温热解油气中重质焦油组分多、黏度大等特点,从热解工艺本身出发,在热解过程中引入氢气或催化剂,促进热解气

中重质焦油组分的裂解,使热解生成的气态产物轻质化,从而有利于热解油气中粉尘的高效分离。

2) 使颗粒进入旋风分离器之前发生团聚。针对中低温粉煤热解气中粉尘粒度细、密度小等特点,可以通过细微尘粒的预团聚技术,促进热解油气中细小粉尘进一步成核和凝聚,提高旋风分离器除尘效率,从而强化除尘效果。目前,利用团聚效应来分离超细颗粒已经成为超细粉除尘技术的发展趋势。

3) 多种除尘设备有机组合。除尘技术处于不断研究和发展中,不同除尘技术的机理和效果各有特点。因此,将多种除尘设备有机组合有利于发挥各自优势,提高除尘效率。随着气体除尘技术的不断发展与完善,多种形式和功能的组合除尘技术将成为研究的热点。

4 结 语

鉴于煤热解过程中产生的热解气具有成分复杂、重质焦油组分多、粉尘含量高、粉尘形状不规则、气体温度高等特点,以及热解工艺为保证煤焦油质量而对除尘器净化效率提出的要求,决定了需要根据具体热解工艺、有针对性地选择除尘方式与除尘器。为此,从热解工艺本身出发,采用加氢(催化)热解方式,使热解反应产物轻质化,是解决除尘过程中部分重质焦油冷凝导致除尘系统无法长时间稳定运行的重要方式之一。此外,可以采用多种除尘设备有机组合的方式并辅以分离前对细小粉尘进行预团聚等手段,这也是今后热解挥发分除尘的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 甘建平,马宝岐,尚建选,等.煤炭分质转化理念与路线的形成和发展[J].煤化工,2013(1):3-6.
- [2] RAMMLER R W, LURGIK. Synthetic fuels Lurgi coal pyrolysis [J]. Energy Prog, 1982, 2(2): 121-129.
- [3] 梁鹏,曲旋,毕继诚.炉前煤低温干馏的工艺研究[J].燃料化学学报,2008,36(4):401-405.
- [4] 甘建平.大规模粉煤热解示范的探索与实践[D].西安:西北大学,2011.
- [5] 李永军,易维明,何芳,等.旋风除尘器对生物炭粉的除尘特性[J].农业工程学报,2012,28(3):60-63.
- [6] 李永军,易维明,柏雪源,等.下降管式生物质热解液化技术中的除尘设备[J].农机化研究,2009(4):187-190.
- [7] 上官炬,常丽萍,苗茂谦.气体净化分离技术[M].北京:化学工业出版社,2012.

(下转第86页)

结焦特性。利用相关软件对煤焦油在普通碳钢管道和镀镍涂层管道表面的减少量实验数据进行数学回归,得到煤焦油在两种管道表面的流动特性曲线,见式(2)和式(3)。

$$m = 7.14644 - 21.38277 \exp(-T/110.57419) \\ R^2 = 0.99492 \quad (2)$$

$$m = 7.15086 - 35.66469 \exp(-T/78.09203) \\ R^2 = 0.99512 \quad (3)$$

式中 R 为相关系数。

由式(2)和式(3)可以看出煤焦油的流动特性与温度呈现出很好的指数关系, R^2 越接近1,表示所选函数越能准确表示两者之间的关系^[16]。式(2)和式(3)中的相关系数都非常接近1,说明两个模型很好地反映了普通管道和镀镍涂层管道表面煤焦油流动特性和温度之间的关系,为推导煤焦油流动特性随温度变化的关系奠定了理论基础。

3 结 论

1) 实验测定了普通碳钢管道和镀镍涂层管道两种换热管道表面煤焦油的流动特性,并建立了描述煤焦油在这两种管材表面流动特性的数学模型,为进一步除去荒煤气显热回收管道表面结焦的煤焦油提供了理论基础。

2) 煤焦油流动特性与温度之间呈现出很好的指数关系。普通碳钢管道在400℃以前管壁表面煤焦油变化较剧烈,镀镍涂层管道在350℃以前管壁表面煤焦油变化剧烈;实验所测换热管道的最佳除焦温度在350~400℃,此温度与文献描述的380℃基本吻合。

3) 通过对普通碳钢管道和镀镍涂层管道实验数据进行分析,发现镀镍管道抑制煤焦油结焦的效

果明显优于普通碳钢管道,其抑制结焦率约20%。

参考文献:

- [1] 岳益锋,张忠孝,胡广涛.焦炉荒煤气物性参数的研究[J].洁净煤技术,2012,18(4):61-62.
- [2] 张政,郁鸿凌,杨东伟,等.焦炉上升管中荒煤气余热回收的结焦问题研究[J].洁净煤技术,2012,18(1):79-82.
- [3] 翟志清,杨志强,程前进.延迟焦化加热炉应用在线机械清焦技术探讨[J].炼油技术与工程,2010,40(5):41-42.
- [4] 董 罡,范海玲,谢崇亮,等.焦化加热炉除焦实践与在线除焦流程的设计优化[J].化工设备与管道,2013,50(3):39-40.
- [5] 孙云娟,蒋剑春.生物质气化过程中焦油的去除方法综述[J].生物质化学工程,2006,40(2):31-32.
- [6] 刘建明,杨培志,曹祖宾,等.中、低温煤焦油延迟焦化的工艺研究[J].燃料与化工,2006,37(2):46-47.
- [7] 吴 艳.高温高压下油煤浆测定方法的研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2007:25-30.
- [8] 李克健,赵 鹏,史士东.油煤浆中溶剂的黏度与油煤浆黏度关系的研究[J].洁净煤技术,2006,12(2):36-38.
- [9] 李伟生.低碳钢表面电沉积镍涂层材料设计及其性能研究[D].厦门:厦门大学,2008:34-40.
- [10] Ishida A, Sato M, Kimura T et al. Stress-strain curve of sputter-deposited Ti-Ni thin films [J]. Philosophical Magazine A, 2000, 80(4):967-980.
- [11] 王瑞祥.我国镀镍40年[J].材料保护,2000,33(1):59-60.
- [12] 林化春,丁润刚.镍基合金-碳化铬复合涂层材料的研究[J].钢铁研究学报,1996,8(1):33-36.
- [13] 岳益锋.焦炉荒煤气显热回收的理论分析[D].上海:上海理工大学,2012:23-25.
- [14] 欧阳福承,王振凡.焦炉荒煤气显热回收利用的研究[J].吉林化工学院学报,1993,10(3):1-8.
- [15] 肖瑞华.煤焦油化学[M].2版.北京:冶金工业出版社,2009:100-110.
- [16] 刘汉生,张宝玉.应用数理统计基础[M].太原:山西科学教育出版社,1987:168.
- [8] 李海广,马 艳,白 皓.静电除尘器对CFB锅炉可吸入颗粒物排放特性的影响[J].热力发电,2014,43(2):96-99.
- [9] 王勤辉,方梦祥,孙仲决,等.煤的热电气焦油多联产技术的研究与开发[J].热工技术,2010(1):1-5.
- [10] 刘会雪,刘有智,孟晓丽.高温气体除尘技术及其研究进展[J].煤气与热力,2008,28(10):18-21.
- [11] 奚正平,汤慧萍,朱纪磊,等.金属多孔材料在能源与环保中的应用[J].稀有金属材料与工程,2006,35(2):414-417.
- [12] Wei Yuan, Yong Tang, Xiaojun Yang et al. Porous metal materials for polymer electrolyte membrane fuel cells—A review [J]. Applied Energy, 2012, 94(1):309-329.
- [13] 梁 鹏,王志峰,董众兵,等.炉前煤低温干馏工艺中的挥发分除杂[J].燃料化学学报,2006,34(1):25-29.
- [14] 刘会雪,刘有智,孟晓丽.高温气体除尘技术及其研究进展[J].煤化工,2000,2(13):14-17.
- [15] 夏军仓,许世森,郝时旺,等.移动颗粒层过滤高温高压煤气除尘技术的试验研究[J].动力工程,2003,23(2):2337-2341.
- [16] 陶贻功,陈家全,李志建,等.半焦作为过滤介质应用于高温除尘的探讨[EB/OL]. [2011-06-02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201106-64>.
- [17] 赵建涛,吴 勃,王 淳.低温干馏煤气的颗粒床除尘设备及除尘方法:中国,201210299374.9[P].2012-08-22.
- [18] 宋文立,姚建忠,郝丽芳.一种颗粒除尘过滤器及除尘过滤方法:中国,201210180811.5[P].2012-06-04.

(上接第82页)