

# 生产褐煤活性焦用立式炉的热工评价与分析

张培林<sup>1,2</sup>, 吴鹏<sup>1,2</sup>, 张旭辉<sup>1,2</sup>

(1. 北京国电富通科技发展有限公司, 北京 100070; 2. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**褐煤活性焦具有孔隙发达、吸附能力强等特点,用立式炉生产活性焦可以减少中间产品转移环节,提高系统热效率,从而降低生产成本。简述了GF立式炉的主要结构、炭化和活化流程,根据采集的运行数据和化验结果,计算得到物料平衡和热量平衡表,分析煤气和活性焦等产品的各项性质。结果表明:以原煤为基准时活性焦产率为27%,占物料总支出的14.95%,水分带走的热量占总支出热量的60.22%,干燥段热负荷最大;采用干法熄焦可以回收活化段底部物料显热,并用于原煤的预干燥,系统热效率为84.2%。GF立式炉具有气体和物料温度分布均匀,内部结构设置合理,运行稳定等特点。建议结合市场需求,调整生产运行参数,拓宽产品应用范围,提高褐煤提质产品经济附加值。

**关键词:**褐煤;活性焦;热平衡;立式炉;干熄焦

中图分类号:TQ523 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)05-0091-04

## Thermal evaluation and analysis of vertical furnace for lignite activated coke production

ZHANG Peilin<sup>1,2</sup>, WU Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuhui<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Guodian Futong Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Lignite activated coke had abundant pores and strong adsorption ability. The production cost could be reduced when the coke produced by vertical furnace, which decreased the intermediate transfer links and improved the thermal efficiency. The main structure of GF vertical furnace, carbonization and activation processes were described. Depending on operating data and experiment results, the material balance and heat balance were calculated, and the properties of products including coal gas and activated coke were analyzed. The results showed that, using raw coal as benchmark, the activated coke yield was 27%, accounting for 14.95% of the total materials expenditure. Heat consumption for water evaporation accounted 60.22% of the total calories expenditure, and the dry segment was the largest heat load. The coke cooling method with flue gas could recover the heat from the bottom of activation section, which used for pre-drying of raw coal. The system thermal efficiency was 84.2%. GF vertical furnace had the features of temperature distribution uniformly of gas and materials, internal structure set reasonable and operational stability. Combined with market demand and adjusted production operating parameters, the application range of product broadened and the economic value increased.

**Key words:** lignite; activated coke; heat balance; vertical furnace; coke dry quenching

## 0 引言

我国褐煤资源丰富、价格低廉,由于含水量高、

机械强度差、易自燃,在利用前应先提质<sup>[1-2]</sup>,提质方法分为干燥和干馏,其中干馏所得固体产品半焦炭分高、粉煤含量高,主要用于锅炉燃烧,利用方式

收稿日期:2015-03-27;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.05.021

基金项目:国家科技部科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2011EG121189)

作者简介:张培林(1964—),男,山西祁县人,高级工程师,硕士,主要从事节能环保资源再利用技术、管道设计与施工技术方面的研究和开发工作。E-mail:zhangpeilin@sgepri.sgcc.com.cn

引用格式:张培林,吴鹏,张旭辉.生产褐煤活性焦用立式炉的热工评价与分析[J].洁净煤技术,2015,21(5):91-94,98.

ZHANG Peilin, Wu Peng, ZHANG Xuhui. Thermal evaluation and analysis of vertical furnace for lignite activated coke production[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 91-94, 98.

有限,经济附加值低<sup>[3]</sup>。以褐煤半焦为原料生产活性焦,可以延长褐煤加工产业链,实现褐煤的分级综合利用<sup>[4-5]</sup>。活性焦具有丰富的孔隙和较大的比表面积,在电厂脱硫脱硝<sup>[6]</sup>、污水处理<sup>[7]</sup>等领域有较好的应用前景。褐煤活性焦的制备与一般活性炭的制备方法与设备类似,通过对原料进行炭化、活化以及后处理来生产。目前国内生产活性炭一般将炭化与活化分开进行,炭化炉生产出半焦后经冷却、筛选后再送入活化炉中。炭化炉的种类有立式炉、回转炉、转底炉等<sup>[8-9]</sup>,其中回转炉是活性炭生产中广泛应用的炭化设备。活化炉主要有耙式炉、斯列普炉和回转炉3种设备,3种炉型均有各自特点<sup>[10]</sup>。GF立式炉在用于褐煤活性焦生产时,可以实现一步法,一步法是将原来分别在2个设备中完成的炭化、活化2个工序合并在一个设备中,在此设备中干燥、热解、利用蒸汽活化同时完成<sup>[11-12]</sup>。为评价一步法制备活性焦工艺的优劣和GF立式炉的运行条件,笔者在分析锡林浩特国能能源公司0号炉运行参数的基础上,计算物料平衡和热量平衡,开展热工评价和分析,考察该设备的能耗水平和节能效果。

## 1 立式炉简介

干馏活化立式炉结构示意图如图1所示。

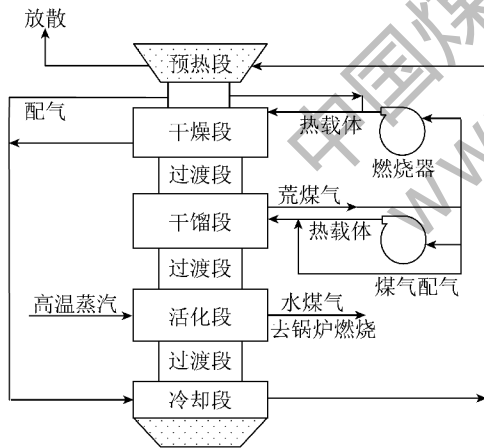


图1 GF立式炉结构示意图

GF立式炉采用外燃内热式气体热载体工艺,并实现炭化活化连续进行。具体工艺流程:筛分后的原煤经过输送带被送入煤斗,在重力作用下依次经过预热段、干燥段、干馏段、活化段和冷却段,最终活性焦经刮板机排出炉外。在整个过程中,原料煤首先被来自冷却段的热烟气预热到80℃,脱除部分水分,然后进入干燥段被热烟气加热到170℃左右,脱除全部水分;干燥后的煤进入干馏段被热烟气与煤气的混合气体加热到800℃左右,脱除大部分挥发

分,完成干馏后的半焦进入活化段,与高温蒸汽发生活化反应,形成发达的孔隙结构,成为活性焦,最后进入冷却段,被来自干燥段的净化烟气冷却到100℃左右并排出炉外。在干燥段,出口烟气分成2部分,一部分作为配气重新被送入干燥段,用于调节干燥段热载体温度,另一部分经水洗干净后被送入冷却段吸收半焦中的热量;在干馏段,出口荒煤气分成3部分,一部分被作为配气重新送入干馏段,另2部分分别被送入干燥段和干馏段燃烧,提供所需热量;在活化段,出口水煤气经冷却后被送往锅炉燃烧;在冷却段,出口热烟气被送入预热段与原煤进行换热,实现半焦显热回收,提高GF立式炉热效率。

GF立式炉有以下主要特点:①干燥段与干馏段独立设计,避免干燥过程产生的大量废气和煤尘进入煤气净化系统,提高了煤气热值,降低了焦油中的含尘量;②采用多层布气方式,降低了气体阻力,热载体流量大,保证大处理量对热量的需求;③炭化、活化连续运行,减少了热量损失,提高了活性焦炉的热效率;④采用废烟气作为冷却介质冷却产品半焦,避免了水资源浪费;⑤没有转动部件,内部构件全部国产化,投资低,运行可靠。

## 2 热工评价方法

生产原料来自内蒙古大唐国际锡林浩特矿业有限公司胜利东二号露天煤矿褐煤,原煤和产品性质来自实验室化验分析。气体流量、温度、压力等均由现场DCS(Distributed Control System)数据采集,并实时监测,物质比热、密度、热值等参数由相关标准文件<sup>[13]</sup>和专业手册<sup>[14]</sup>查得,部分数值见表1。

表1 平衡计算部分参数

项目	数值
褐煤密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	760
净煤气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.25
干燥煤比热(10℃)/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.004
半焦比热/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.431
活性焦比热/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.370
荒煤气比热(300℃)/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.828
水煤气比热(800℃)/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	2.033
烟气的比热(120℃)/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.347
冷却煤气比热/( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.682
煤气冷凝温度/℃	25

## 3 结果与分析

### 3.1 炉体各段温度分析

通过在炉体内部设置温度测点监测物料温度变

化,可为运行参数的调整提供指导。炉体干燥段、干馏段和活化段物料入口与出口温度、烟气入口和出口温度随时间的变化如图2所示。

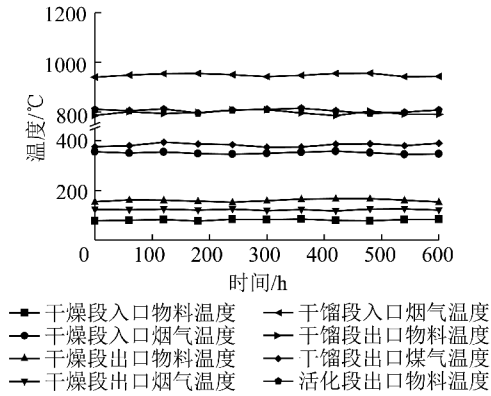


图2 GF立式炉各段温度

物料进入炉体后,从预热段开始温度逐步上升,到冷却段后与冷烟气换热,温度降至150℃左右排出,先后发生相应的反应,具体如下:

- 1) 预热段:与热烟气换热后,物料脱除部分水分,煤的外形基本上没有变化,不发生化学反应;
- 2) 干燥段:与350℃烟气接触,煤的温度升高至150℃左右,煤中的水分受热蒸发,并脱去煤内部孔隙吸附的气体,如CO、CO<sub>2</sub>等;
- 3) 干馏段:用950℃气体加热物料至800℃,此阶段物料先后经过活泼分解阶段和二次脱气阶段,前者以分解和解聚反应为主,煤结构中不太稳定的侧链和桥键首先断裂,产生大量气体,气体组分包括

小分子气态烃类、H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>和液态焦油等,热解水也主要在此阶段产生<sup>[15]</sup>;二次脱气阶段以缩聚反应为主,即煤结构中环数较小的芳环缩聚成环数更大的芳环,并释放出H<sub>2</sub>;

4) 活化段:此阶段高温水蒸汽与碳接触,产生大量水煤气,在干馏过程中由于炭骨架的收缩被焦油物质覆盖的孔隙,被活化剂分子打开,成为开孔,这些开孔正是活性焦的有效吸附面积;

5) 冷却段:活性焦产品与冷却烟气直接接触换热,物料冷却后通过推焦机排出炉外。

### 3.2 煤气热值分析

采用干馏活化一步法生产活性焦时,一般将干馏和活化产生的气体分别引出,不仅可以提高活化效率,还可以使水煤气中有效成分增加,热值提高。原煤在干馏时产生的煤气与热载体烟气混合,导致荒煤气热值降低,该部分气体主要为干燥和干馏段提供热量,由系统自身所消耗。活化段产生的水煤气出口温度为800℃,含有大量水蒸汽,通过余热锅炉进行热量回收后冷却至200℃左右,然后在间接冷却器中气体温度降至<30℃。荒煤气和水煤气组分见表2。由表2可知,尽管800℃时干馏时原煤析出绝大部分挥发分形成煤气,但干馏产生的荒煤气中含有大量烟气,N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>的含量占76.85%。活化段的热量全由高温蒸汽提供,水煤气中有效成分较高,H<sub>2</sub>+CO的含量为70.01%,可作为发电或蒸汽锅炉燃料。

表2 煤气组分与热值

气体	体积分数/%							低位热值/ (MJ·m <sup>-3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	
荒煤气	5.96	2.55	14.27	7.65	1.44	62.58	3.55	5.01
水煤气	58.40	11.61	25.17	1.03	—	—	3.79	8.11

### 3.3 物料平衡和热量平衡分析

原煤工业分析见表3,干馏产品产率如下:半焦36.7%,焦油4.63%,水45.86%,煤气12.81%,其中煤气热值23.88MJ/kg。分析可知,褐煤外水含量很高,干燥过程需要消耗较多热量,物料在进入干馏段前必须完全干燥,否则将产生大量含酚废水。由于褐煤挥发分高,800℃干馏时煤气产率为12.81%,热解水产率6.86%,煤气中CO<sub>2</sub>含量偏高,煤气热值为22.57MJ/kg。此外,活化过程中有部分炭与蒸汽发生反应,产生大量高热值水煤气,可

以作为锅炉燃料。

表3 原煤工业分析

样品	M <sub>t</sub> / %	A <sub>d</sub> / %	V <sub>d</sub> / %	FC <sub>d</sub> / %	Q <sub>net,ar</sub> / (MJ·kg <sup>-1</sup> )
原煤	38.25	10.45	35.10	56.20	14.56
800℃半焦	0	29.27	4.71	66.02	22.57
活性焦	0	38.70	4.02	57.28	20.09

根据工艺计算出的物料平衡见表4,热量平衡见表5。由表5可知,由于褐煤含水量很高,在干馏

过程中又产生了一部分热解水,水分带走的热量占总支出热量的60.22%。在活化段中,有大量高温水蒸汽作为活化介质进入系统,蒸汽与炭反应生产水煤气,水煤气带走的显热占总热量的23.42%,此部分热量应进行回收利用。此外,在炉体不同区域测量外表面温度计算炉体散热,该值占总热量的3.60%,活化段和冷却段由于炉内温度高,散热量较大。GF活化炉单体设备热效率为84.2%,与传统干馏炉相比热效率较高,这是因为采取烟气干熄焦,将冷却段热量回收后用于原料的预干燥。此外,通过炉内的集气与布气装置,气体分布均匀,换热效率高。

表4 系统物料平衡表

项目	含量/(kg·t <sup>-1</sup> )	百分比/%	
物料收入	干燥原煤	617.5	34.19
	外在水分	382.5	21.18
	空气	406	22.48
	水蒸汽	400	22.15
物料支出	活性焦	270	14.95
	水煤气	487	26.97
	排放烟气	539	29.84
	焦油	46.30	2.56
	干燥回收水	270.50	14.98
	随烟气排放	102	5.65
	酚水回收	55	3.05
	其他	36.20	2.00

表5 系统热量平衡表

项目	数值/(kJ·t <sup>-1</sup> )	百分比/%	
热量收入	干燥原煤显热	22.572	0.06
	原煤水分显热	55.8866	0.16
	空气显热	20.7328	0.06
	燃烧煤气显热	178.1934	0.50
	蒸汽带入显热	11948.45	33.46
	煤气燃烧热量	23486.75	65.77
	活性焦显热	631.0128	1.77
	烟气显热	1128.684	3.16
热量支出	干馏气带出显热	1248.441	3.50
	水煤气带出显热	8365.518	23.42
	水分带出热量	21506.64	60.22
	焦油带出热量	777.7308	2.18
	表面散热	1286.52	3.60
	其他热量损失	768.0332	2.15

### 3.4 活性焦性质分析

褐煤化学反应活性高,经过活化得到的活性焦具有中孔发达、脱色能力强等特点。活性焦由于灰分高,机械强度较差,对颗粒活性焦的再生产生不利影响。经检测,其装填密度为654 g/L,强度值为

87%,比表面积和孔容分别为673 m<sup>2</sup>/g和0.84 cm<sup>3</sup>/g,碘吸附值为325 mg/g。

进行活性焦吸附实验时,当吸附用水的化学需氧量(COD)为3106 mg/L时,COD去除量为2183 mg/L,单位活性焦的吸附值为32.75 mg/g,脱色效果明显。褐煤价格低廉,生产的活性焦用于废水吸附处理可以降低成本,具有较好的市场应用前景。

## 4 结 论

对干馏活化一体炉进行物料平衡和热量平衡计算,分析产品性质。结果表明,该炉型具有炉内气体分布均匀,热效率高,运行稳定等优点,可广泛用于褐煤活性焦的生产。

1) 炉体干燥段、干馏段和活化段分开设置,各段单独布气和出气,水煤气可燃气体组分比例为74.83%,热值较高;由于在冷却段采用烟气干法熄焦方式,活性焦产品质量稳定、比表面积大,对废水COD吸附效果较好。

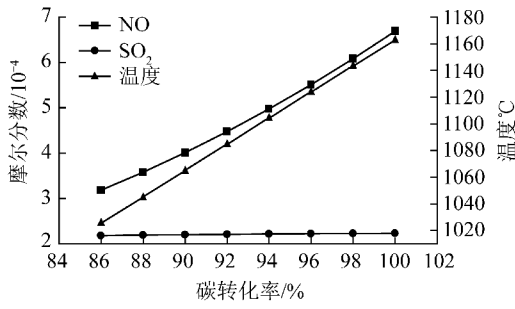
2) 由于褐煤含水量高,干馏活化一体炉在干燥段的热负荷较大,水分带走的热量占总支出热量的60.22%,不利于提高设备处理能力。

3) 活性焦的机械强度较低,可以考虑将产品按粒度分级后应用于不同领域。

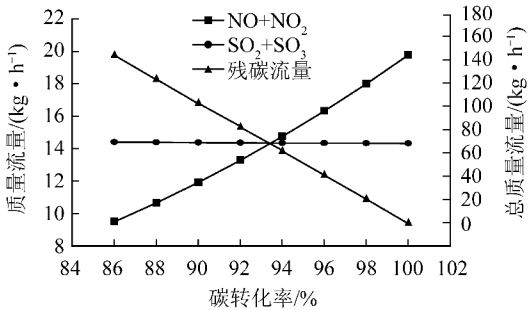
### 参考文献:

- [1] 武广富,黄素华,王健.褐煤全周期利用经济性分析[J].电力与能源,2014,35(5):624-626.
- [2] 刘思明.低阶煤热解提质技术发展现状及趋势研究[J].化学工业,2013,31(1):7-13,22.
- [3] 尚建选,马宝岐,张秋民,等.低阶煤分质转化多联产技术[M].北京:煤炭工业出版社,2013.
- [4] 张旭辉,苗文华,刘振强,等.中国褐煤在活性焦制备及应用方面的发展前景[J].洁净煤技术,2011,17(1):59-61.
- [5] 贺斌,沈强华,陈雯.褐煤活性焦处理含铜、铅、砷工业废水的研究[J].矿业,2013,22(3):114-118.
- [6] 杨巧文,王坤,任艳娇,等.褐煤基活性焦的制备及脱硝应用[J].煤炭科学技术,2013,41(6):122-124,128.
- [7] 尹连床,张军,滕济林,等.吸附法深度处理煤制气生化废水的研究[J].水处理技术,2011,37(11):104-106.
- [8] 赵杰,陈晓菲,高武军,等.内热式直立炭化炉干馏工艺及其改进方向[J].冶金能源,2011,30(3):31-33.
- [9] 华建社,陈海波,王建宏,等.低温干馏炉热工评价与分析[J].洁净煤技术,2012,18(4):65-67.
- [10] 段友丽,李萍,杨洲祥,等.我国煤质活性炭设备发展动态[J].中国给水排水,2013,29(2):19-21.
- [11] 谷丽琴.煤基活性炭制备研究进展[J].煤炭科学技术,2008,36(7):107-109.

(下转第98页)



a) 摩尔分数



b) 质量流量

图4 碳转化率对污染物和残碳影响

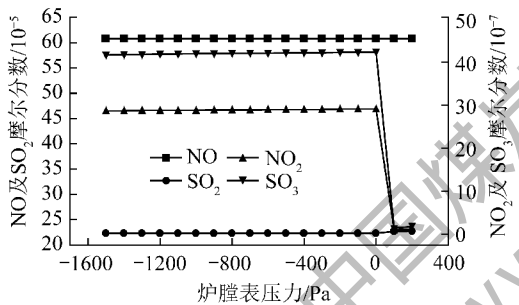


图5 炉膛表压对污染物影响

量在炉膛表压小于0时也几乎没有变化,当炉膛表压大于0时排放量则会突然下降,但是由于NO<sub>2</sub>和SO<sub>3</sub>含量不多,污染物总量减少有限,所以从实际角度考虑锅炉运行时炉膛表压选择为负。

### 3 结 论

1) 污染物的排放随着空气量的增加呈现出先增大后减小的趋势,当给风量为21300 m<sup>3</sup>/h,空气过量系数达到1.82,污染物的排放量达到最大,质量流量达到32.5 kg/h;

2) 投煤量由20 kg/min增加到50 kg/min时,火焰温度由900℃增加到1940℃,污染物的排放量先增大后减小,当投煤总量达到42.5 kg/min时,污染物的排放总量到达最高,约为130 kg/h;

3) 碳转化率对温度影响明显,当碳的转化率由86%提高到100%时,烟气温度由1026℃提高到

1163℃,NO的排放量由9.5 kg/h增加到19.5 kg/h,NO<sub>x</sub>排放总量随之增加,SO<sub>x</sub>排放量基本维持不变,其中SO<sub>2</sub>的排放量稍有减小,SO<sub>3</sub>稍有增加。

4) 炉膛表压在负压范围内对污染物生成几乎没有影响,当由负压升高为正压时污染物排放降低。

#### 参考文献:

- [1] 梁兴,王乃继. 煤粉工业锅炉及其污染物联合控制现状[J]. 区域供热,2014(6):52-58.
- [2] 何心良. 我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨[J]. 工业锅炉,2010(3):1-8.
- [3] 姚芝茂,邹兰,王宗爽,等. 我国中小型燃煤锅炉SO<sub>2</sub>排放特征与控制对策[J]. 中国环境科学,2011,31(S1):1-5.
- [4] GB 13271—2014, 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [5] 冯现河,尚庆雨,王乃继,等. 新型大容量高效煤粉蒸汽锅炉[J]. 工业锅炉,2013(2):8-14.
- [6] 王颖. 200MW级IGCC系统优化及静态特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:82-104.
- [7] Frey H C, Akunuri N. Probabilistic modeling and evaluation of the performance, emissions, and cost of texaco gasifier-based integrated gasification combined cycle systems using Aspen [D]. North Carolina State University, 2001:40-86.
- [8] 陈隆. 煤气化及高温显热回收设备的数值模拟及系统优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:45-53.
- [9] 宋新南,徐惠斌,房仁军,等. 基于Aspen Plus的生物质燃烧NO<sub>x</sub>生成模拟[J]. 环境科学学报,2009,29(8):1696-1700.
- [10] 张小桃,贾耀磊,卢毅,等. 生物质气与煤混合燃烧污染物排放特性研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(5):89-92.
- [11] Li J, Yang W, Blasiak W, et al. Volumetric combustion of biomass for CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> reduction in coal-fired boilers[J]. Fuel, 2012, 102:624-633.
- [12] Li J, Zhang X, Yang W, et al. Effects of Flue Gas Internal Recirculation on NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> Emissions in a Co-Firing Boiler[J]. Scientific Research, 2013, 2(2):13-21.
- [13] 裘啸,阎维平. 基于Gibbs自由能最小化原理模拟生物质流化床气化[J]. 可再生能源, 2011, 29(4):32-39.
- [14] 张宗飞,汤连英,吕庆元,等. 基于Aspen Plus的煤粉气化模拟[J]. 化肥设计, 2008, 46(3):14-19.
- [15] 马广大. 大气污染控制技术手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2010:138-140.

(上接第94页)

- [12] 邹炎,李晓芸,孟辉. 活性焦干法烟气污染控制技术与褐煤活性焦的开发[J]. 华电技术, 2010, 32(9):78-82.
- [13] HG/T 20682—2005, 化学工业炉燃料燃烧设计计算规定[S].
- [14] 刘光启,马连湘,项曙光. 化学化工物性数据手册(有机卷)[M]. 北京:化学工业出版社, 2013.
- [15] 朱银惠. 煤化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.