

低阶煤无热载体快速热解炉工艺试验研究

陈勤根

(浙江浙能技术研究院有限公司,浙江 杭州 310003)

摘要:为实现煤炭热解分质梯级利用,提出了低阶煤无热载体粉煤快速热解炉工艺,以印尼褐煤为研究对象,对无热载体粉煤快速热解工艺所产焦油、热解气、半焦等进行分析,验证低阶煤无热载体热解炉工艺的技术可行性。结果表明,试验煤种经低阶煤无热载体粉煤快速热解炉工艺处理后热解焦油产率达11.84%、热解气产率14.08%,半焦产率64.97%,其中焦油产率比格金干馏试验提高了1.49%,半焦发热量较原煤提高了2.63 MJ/kg,热解气有效气体含量达80%以上。表明该低阶煤无热载体粉煤快速热解炉工艺具有热解温度可区域精确控制、热解速度快、焦油产率高、产品品质好等优点。

关键词:低阶煤;无热载体;热解;分质梯级利用

中图分类号:TQ530.2

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2016)03-0020-06

Fast pyrolysis technology of low rank coal without heat carrier

CHEN Qin gen

(Zhejiang Zheneng Technology Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310003, China)

Abstract: In order to realize cascade utilization of coal, a rapid low rank coal pyrolysis process without heat carrier was introduced. In order to explore the feasibility of the technology, Indonesia lignite was adopted as research object, the pyrolysis products including tar, pyrolysis gas, semi-coke were investigated. The results showed that, the yield of tar, pyrolysis gas and semi-coke could reach 11.84%, 14.08% and 64.97%. The tar yield was 1.49% higher than that of Gray-King test. Compared with raw coal, the calorific value of semi-coke was improved by 2.63 MJ/kg. The useful gas of pyrolysis gas reached above 80%. In addition to fast pyrolysis speed, high tar yield and great products quality, the technology also had the advantage of accurately controlling temperature in certain area.

Key words: low rank coal; without heat carrier; pyrolysis; cascade utilization

0 引 言

煤炭的热解分质梯级利用是煤炭清洁高效利用的方向,与煤的直接燃烧或气化相比,具有资源高效利用、潜在经济效益好等优势,符合现代煤炭转化的发展要求^[1]。其中低阶煤煤化程度低,挥发分及油含量相对较高,更适合煤炭热解分质梯级利用^[2]。低阶煤的中低温快速热解是一种有效的煤炭分质梯级利用技术,浙江大学、大连理工大学、中国科学院山西煤化所、湖南华银能源技术有限公司、河南龙成集团等对低阶煤的中低温热解技术进行了大量研究^[3]。但因高温热解气带尘严重、焦油品质差,或

热解效率低装置无法大型化应用等问题,到目前为止还没有成功的大型煤炭分质梯级利用工业示范应用。煤炭分质梯级利用最关键的是热解技术,热解效果与热解热源有较大关系^[4]。目前煤炭热解技术的热源均采用有热载体方式,根据工艺的不同热载体可采用热灰、热半焦和热烟气等。不同的有热载体热解技术因热解温度控制不均匀、热载体与介质直接接触等问题,存在着焦油产率低、油气含尘高等缺点。部分技术采用块煤热解,存在热解速度慢,生产效率低,装置大型化困难等问题^[5]。本文研究的热解工艺采用热辐射管技术^[6],为无热载体粉煤快速热解工艺,可热解粒径3 mm以下粉煤,具有系

收稿日期:2015-12-07;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.005

作者简介:陈勤根(1969—),男,浙江长兴人,工程师,从事电站锅炉燃烧及煤炭加工利用技术研究。E-mail:22752219@qq.com

引用格式:陈勤根.低阶煤无热载体快速热解炉工艺试验研究[J].洁净煤技术,2016,22(3):20-25.

CHEN Qin gen. Fast pyrolysis technology of low rank coal without heat carrier[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 20-25.

统简单、热解温度控制均匀、热解快速等特点。笔者以印尼褐煤为研究对象,通过试验对所产焦油、热解气产率及产品组分进行分析,以期验证无热载体低阶煤快速热解装置技术的可行性。

1 试验

1.1 试验煤种

试验煤种为印尼褐煤,水分 35%,前期经过原料预处理系统进行了预干燥,预干燥后的煤种水分 6.70%、灰分 8.06%、挥发分 36.39%,低位发热

量为 27.15 MJ/kg,原料煤性质分析见表 1。原料煤粉碎后的粒径为 0.09~1 mm,原料煤粒径分布和堆密度见表 2。

1.2 格金干馏试验

格金干馏试验参照 GB/T 1341—2007《煤的格金低温干馏试验方法》进行。通过格金试验可测定煤样热解后所得热解气、焦油、半焦等各产物的产率,产率可作为衡量煤样快速热解特性的指标,也可作为扩大试验中热解气、焦油、半焦产率的评价标准。试验煤种格金干馏试验结果见表 3 和表 4。

表 1 原料煤性质分析

Table 1 Property analysis of coal

工业分析/%				元素分析/%					发热量/	燃点/℃
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{t,ad})$	(MJ·kg ⁻¹)	
6.70	8.06	36.39	48.88	68.90	3.60	17.40	1.40	0.62	27.15	280

表 2 原料煤粒径分布和堆密度

Table 2 The particle size distribution and bulk density of coal

粒径分布/%							堆密度/
>1 mm	1~0.355 mm	0.355~0.25 mm	0.25~0.18 mm	0.18~0.125 mm	0.125~0.09 mm	<0.09 mm	(kg·m ⁻³)
2	74	10	3	5	3	3	690

表 3 印尼褐煤格金试验结果

Table 3 Gray-King test of Indonesia lignite

产物分布/%			
焦油	半焦	热解气	热解水
10.35	71.15	9.75	8.75

由表 3、表 4 可知,印尼褐煤干基下焦油产率为 10.35%,热解气产率 9.75%,半焦产率 71.15%。其半焦挥发分较低为 7.75%,热值较高为 29.78 MJ/kg。印尼褐煤存在焦油产率高、热解气产率偏低的情况。

表 4 印尼褐煤格金半焦性质分析

Table 4 Property analysis of Gray-King's coke

工业分析/%				元素分析/%					低位发热量/
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{t,ad})$	(MJ·kg ⁻¹)
2.34	12.13	7.75	77.78	80.03	2.46	2.89	1.81	0.68	29.78

1.3 试验装置

1.3.1 无热载体粉煤快速热解工作原理

无热载体粉煤快速热解炉采用蓄热式辐射管加下行床立式炉模式(图 1)。其辐射管采用独特的蓄热体后能燃烧低热值煤气,燃烧效率高、经济性好,辐射管温度可通过燃气量进行精确调整,温度最高可达 1 200 ℃,而热辐射管温差仅在 30 ℃ 以内^[7]。热辐射管呈 U 型,控制端在热解炉外,工作

端伸入热解炉内。多个辐射管按一定组合方式布置在立式热解炉内,每只热辐射管可单独工作也可组合工作。热辐射管温度可通过改变进入热辐射管的燃气量进行精确控制,从而可根据煤质及产品需要调整热解炉内热解温度。热解炉工作时,煤粉从热解炉顶部给料机进入热解炉,经炉顶布煤器布煤后煤粉在炉内自由下落,煤粉在炉内停留 3~6 s,下落过程中被热辐射管辐射加热热解。热解后的半焦由

炉子底部排出,热解气由炉侧出气管导出进行除尘及气、油分离。因采用蓄热式热辐射管技术,热解温度场控制均匀,利用无热载体方式对粉煤进行热解,具有热解速度快、焦油产率高等特点。

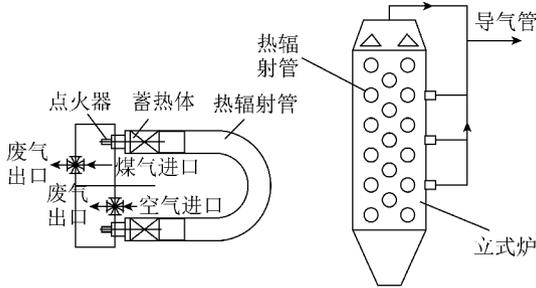


图1 热辐射管及下行床快速热解炉示意

Fig. 1 Structure scheme of heat radiation tube and downer fast pyrolysis furnace

1.3.2 无热载体粉煤快速热解炉结构及工艺流程

无热载体粉煤快速热解炉试验装置的热解炉横截面为长方形(200 mm×150 mm),有效加热高度9 m,热解炉设计处理煤量3 t/h。数十支热辐射管在炉内顺列布置,热辐射管燃气为低热值煤气,燃烧空气由炉外离心风机供给。炉内辐射管由上至下分4个区3段(预热段、快速热解段和完全热解段)进行温度控制。热解炉内布置有辐射管、布料器、导流板、温度测量元件、导气管等。在外部气体导出管上安装有流量测量元件和取样管进行连续取样。系统动力由一台罗茨风机提供,并维持热解炉一定的压力。除快速热解炉系统,试验装置还包括油气除尘系统、喷淋系统、燃气净化系统等。试验装置工艺流程如图2所示。

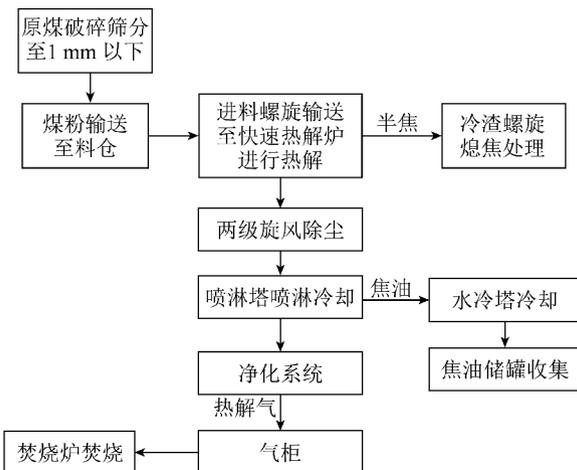


图2 下行床快速热解试验工艺流程

Fig. 2 Process flow of downer fast pyrolysis test

1.4 快速热解试验

按快速热解炉运行操作工艺,对燃气管线及热解炉炉膛进行 N_2 吹扫,吹扫结束后辐射管点小火,炉子预热后辐射管点大火,将热解炉炉膛四区温度缓慢升至近 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。炉温稳定后开始投煤粉,并逐渐增加给煤量,投煤过程中炉温通过调节大火选择性控制各反应区温度。热解炉运行稳定后四区平均温度控制在 $580\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,炉膛压力控制在 1.5 kPa 。热解反应过程中半焦采用间歇式排料,热解气由热解炉4个反应区的出气管汇总进入下道工序。因试验煤种有限,且试验期间多次出现罗茨风机故障等问题,导致系统稳定运行时间偏短。

1.5 焦油、热解气、半焦收集

粒径小于 1 mm 的印尼褐煤经斗提提升至炉顶料仓中,通过进料螺旋机将煤粉送至快速热解炉内。在热解炉内煤粉通过布料气打散,在炉内自由下落经过各反应区并发生快速热解反应,得到热半焦和热解油气。热半焦在热解炉炉底经过出渣螺旋熄焦处理得到冷半焦;热解油气经两级旋风除尘去除杂质,经喷淋塔喷淋冷却得到焦油,焦油存储于焦油储罐;热解气经净化系统净化处理后于气柜贮存,并送入燃气焚烧炉。

1.6 焦油、热解气、半焦产率计算方法

1.6.1 理论计算产品产率

煤炭热解产品产率是指产品质量占煤质量的百分数^[8]。本工艺流程所产焦油和煤气都在热解炉中产生。假定热解炉炉顶布料气 N_2 全部进入热解煤气,煤中氮含量忽略不计。根据煤气色谱分析结果,按氮元素平衡计算煤气量,不涉及反应机理和反应速度。理论计算公式为

$$V_g = \frac{QX_1}{WX_2} \quad (1)$$

式中, V_g 为理论煤气产量, m^3/h ; Q 为拨料风风量, m^3/h ; X_1 和 X_2 分别为拨料风和煤气中 N_2 的体积分数; W 为给煤量, kg/h 。

半焦产量 V_s 为装置螺旋熄焦机实际产出的半焦质量 W_s 与稳定运行时间 t 之比

$$V_s = \frac{W_s}{t} \quad (2)$$

根据给煤量、煤气量、半焦产量以及煤的元素分析、热解煤气色谱分析和焦油元素分析,通过热解炉碳平衡计算可估算焦油量

$$V_l = \frac{Ww(C_1) - V_s w(C_2) - V_a w(C_3)}{w(C_1)} - \frac{12V_g(X_3 + X_4 + X_5)}{22.4 \times \left(\frac{298}{273}\right) w(C_1)} \quad (3)$$

式中, V_l 为理论焦油产量, kg/h; $w(C_1)$ 、 $w(C_2)$ 、 $w(C_3)$ 和 $w(C_4)$ 分别为煤、半焦、飞灰和焦油中碳的质量分数; V_a 为飞灰产量, kg/h; X_3 、 X_4 和 X_5 分别为煤气中 CO_2 、 CO 、 CH_4 的体积分数。

1.6.2 实际测量计算产率

试验过程中, 焦油和热解水总产率通过试验前后喷淋塔液位差值, 再沉淀分离后分别计算; 热解气产率通过罗茨风机运行频率计算; 半焦产率通过差值法计算; 最终结果与取样口得到焦油、热解气和热解水的产率进行校正。热解气实际测量计算产量

$$V_q = (f \times 9.43 \times 60 - q) t_s \quad (4)$$

式中, V_q 为实际热解气产量, m^3 ; f 为罗茨风机实际运行频率, Hz; q 为氮气流, m^3/h ; t_s 为试验实际运行时间, h。

本文实际焦油产量按试验结束后喷淋塔实际测量计算所得

$$V_j = \pi r^2 \times h \times \rho \quad (5)$$

式中, V_j 为实际焦油产量, kg; r 为喷淋塔半径, m; h 为喷淋塔始末液位高度差, m; ρ 为焦油密度, kg/m^3 。

本文半焦实际产量按反应总煤量减去热解气、焦油和热解水产量所得

$$V = M - V_q - V_j - V_w \quad (6)$$

式中, V 为实际半焦产量, kg; M 为实际反应总煤量, kg; V_w 为实际热解水产量, kg。

由理论计算与试验测量数据计算比较, 两者误差在 6% 左右。以下所分析产品产率均为试验实际所得产品计算所得。

2 试验结果分析

2.1 快速热解产物分布

热解炉温度稳定在 580 °C 左右连续运行, 快速热解炉印尼褐煤热解试验产物分布见表 5。

由表 5 可知, 印尼褐煤经快速热解炉反应后, 焦油产率达到 11.84%, 热解气产率为 14.08%, 半焦产率为 64.97%。其中焦油产率较格金焦油产率提高了 1.49%, 半焦发热量较原煤提高了 2.63 MJ/kg。

表 5 快速热解炉印尼褐煤热解试验产物分布

Table 5 Product distribution of Indonesia lignite in fast pyrolysis furnace

热解温度/°C				反应总煤量/kg	产物分布/%			
一区	二区	三区	四区		半焦	热解气	焦油	热解水
550	580	600	585	7 909	64.97	14.08	11.84	9.11

焦油产率与热解速度、温度场控制均匀有关^[9]。无热载体快速热解炉采用辐射管煤粉热解方式, 能保证热解炉中 4 个温度场温度均匀, 且各温度场的温度可精确控制。因此, 煤在热解炉内均匀受热, 实现快速和充分热解, 提高了煤的快速热解效率和焦油产率。因热解速度快, 产生的热解气被快速导出并快速冷却, 减少了在热解、导出和冷却过程中可能发生的二次反应^[10]。

热解气产率高于格金干馏试验, 但相对原煤挥发分, 其热解气产率相对偏低。根据格金干馏试验及相关研究表明热解产气率偏低与试验煤种有较大关系^[11]。焦油、热解气产率与热解温度、压力等有很大关系, 煤粉在炉内停留时间及煤粉粒径也有一定影响^[12-13]。

2.2 热解焦油

快速热解焦油物理性质、馏程分析及元素分析见表 6。

由表 6 可知, 焦油馏出温度 < 390 °C 的馏分体积分数 50% 以上, 其中馏出温度 < 170 °C 轻油体积分数约 10%, 170 ~ 390 °C 馏分体积分数约 40%, 沥青及其余固态物约 50%。焦油密度 1.09 kg/m³, 灰分 0.14%, 但甲苯不溶物含量明显偏高达 12.47% (其中粉尘量占比 5% 左右)。

根据馏分分析及其物理性质, 煤焦油密度较低、轻质焦油占比较高、含尘少, 焦油品质较好, 但其甲苯不溶物明显偏高, 对焦油品质有较大影响。甲苯不溶物含量偏高与试验过程中炉膛压力多次出现波动及细粉煤进入集气系统有关; 而馏分固态物偏高

由试验装置流程打通后罗茨风机经常性故障导致稳定运行时间偏短引起。后期通过炉温及压力的调整控制及有足够的稳定运行时间做保障,焦油品质应该有进一步的提升^[13]。

2.3 热解气体

热解气体成分组成见表7。由表7可知,热解

气中有效气体成分含量为81%,其中CH₄含量较高达38.09%,多烷烃类气体15%。热解气体低位热值达到了27 MJ/m³以上,属于高热值燃气。热解煤气有效气含量达80%以上,热解气品质较高,可以用于制氢、制甲醇、制天然气等高附加值化工产品。

表6 快速热解焦油元素分析、物理性质及馏程

Table 6 The elemental analysis, physical property and distillation range of fast pyrolysis tar

元素分析/%					物理性质			馏程/°C					
$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{1,ad})$	$w(O_{ad})$	20 °C 密度/ (kg · m ⁻³)	灰分/ %	甲苯不溶物 质量分数/%	初馏点	10%	30%	50%	70%	剩余
88.49	7.58	1.22	0.41	2.30	1.09	0.14	12.47	62	163	228	378	470	>470

表7 热解气气体组成

Table 7 Gas composition of pyrolysis gas

气体组成(体积分数)/%									低位热值/ (MJ · m ⁻³)
CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	其他	
38.09	13.04	13.83	15.19	6.03	4.81	5.02	0.20	5.02	28.41

注:其他项包括少量N₂、微量O₂及色谱无法识别部分。

2.4 热解半焦性质和粒径

印尼褐煤快速热解半焦性质、粒径分析见表8。由表8可知,半焦热值29.78 MJ/kg,较原煤热值提高了2.63 MJ/kg;半焦硫含量为0.65%,与原煤相比没有降低;半焦挥发分为15.60%,比原煤降低了20.79%;半焦燃点也因热解后半焦挥发分减少从原煤的280 °C升至350 °C。从煤炭分质梯级利用的角度分析半焦挥发分明显偏高,这与热解炉温度控制较低有关,可通过调整热解温度控制。试验半焦硫

含量变化不大与原煤有机硫含量较高有关,研究表明在惰性气氛下煤热解时有机硫难于分解析出^[14]。

印尼褐煤快速热解半焦粒径分析见表9。由表2、表9可知,热解半焦粒径呈减小趋势,其中原煤粒径主要分布在1~0.355 mm,而经过快速热解的半焦粒径主要分布在0.25~0.355 mm。堆密度为690 kg/m³的印尼褐煤经快速热解处理后堆密度降至316 kg/m³。热解后的半焦孔隙明显增加,结构较原煤更松散^[15]。

表8 半焦性质分析

Table 8 Property analysis of coke

工业分析/%				元素分析/%					发热量/ (MJ · kg ⁻¹)	燃点/ °C
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{t,ad})$		
0.59	8.91	15.60	74.90	78.07	2.70	7.53	2.14	0.65	29.78	350

表9 印尼褐煤半焦粒径分布和堆密度

Table 9 The particle size distribution and bulk density of coke

粒径分布/%							堆密度/ (kg · m ⁻³)
>1 mm	0.355 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.355 mm	0.18 ~ 0.25 mm	0.125 ~ 0.18 mm	0.09 ~ 0.125 mm	<0.09 mm	
3.21	31.08	41.74	6.20	6.20	8.68	2.89	316

3 结 论

1) 无热载体粉煤快速热解试验装置采用粉煤快速热解技术,试验时煤粉粒径在 1 mm 左右,煤粉在 3~6 s 即完成热解,热解速度快。热解装置更易大型化。

2) 根据热解试验产物分布,印尼褐煤热解焦油产率达到 11.84%,热解气产率 14.08%,半焦产率 64.97%。其中焦油及热解气产率较格金干馏试验产率分别提高了 1.49% 和 4.33%,热解效率高。

3) 根据试验所产焦油产品分析,焦油馏出温度 <390 °C 的馏分体积分数占 50% 以上,其中馏出温度 <170 °C 轻油体积分数约 10%,170~390 °C 馏分体积分数约 40%。根据馏分分析及物理性质,热解煤焦油密度较低,轻质焦油占比较高,含尘少,焦油品质较高。

4) 根据试验所产热解气分析,热解气中有效气体成分含量达 81%,其中 CH₄ 含量较高达 38.09%,多烷烃类气体 15%。热解气体低位热值达到了 27 MJ/m³ 以上,属于高热值燃气。

5) 热解后半焦低位发热量较原煤提高了 2.63 MJ/kg,半焦挥发分减少至 15.60%。热解半焦粒径呈减小趋势,堆密度从原煤的 690 kg/m³ 降至 316 kg/m³,热解后的半焦孔隙增加明显。

参考文献 (References):

[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):1-4.
Gan Jianping, Ma Baoqi, Shang Jianxuan, *et al.* Formation and development of the coal grading conversion ideas[J]. Coal Chemical Industry, 2013(1):1-4.

[2] 韩永滨,刘桂菊,赵慧斌.低阶煤的结构特点与热解技术发展概述[J].中国科学院院刊,2013,28(6):772-780.
Han Yongbin, Liu Guiju, Zhao Huibin. Structural characteristics of low-rank coal and its pyrolysis technology development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(6):772-780.

[3] 曾凡虎,陈钢,李泽海,等.我国低阶煤热解提质技术进展[J].化肥设计,2013,51(2):1-7.
Zeng Fanhu, Chen Gang, Li Zehai, *et al.* Technical progress for pyrolysis/upgrade of low rank coal in China[J]. Chemical Fertilizer Design, 2013, 51(2):1-7.

[4] 苏婷,卢艳强.低变质煤的热解技术[J].榆林学院学报,2014,24(2):9-12.

Su Ting, Lu Yanqiang. On the pyrolysis technology of the low metamorphic coal[J]. Journal of Yulin University, 2014, 24(2):9-12.

[5] 刘光启,邓蜀平,钱新荣,等.我国煤炭热解技术研究进展[J].现代化工,2007,27(2):37-43.
Liu Guangqi, Deng Shuping, Qian Xinrong, *et al.* Research progress of coal pyrolysis technology in China[J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27(2):37-43.

[6] 吴道洪.低热值煤气双预热蓄热式辐射管:200910076577. X [P]. 2009-01-09.

[7] 吴道洪,陈水渺,肖磊.煤快速热解的系统和方法:201510625040. X [P]. 2015-09-25.

[8] 吕清刚,于旷世,朱治平,等.固体热载体快速热解粉煤提油中试研究[J].煤炭学报,2012,37(9):1591-1595.
Lyu Qinggang, Yu Kuangshi, Zhu Zhiping, *et al.* Pilot plant research on fast pyrolysis of coal in circulating fluidized bed with hot char carrier[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9):1591-1595.

[9] 岑建孟,方梦祥,王勤辉,等.煤分级利用多联产技术及其发展前景[J].化工进展,2011,30(1):88-94.
Cen Jianmeng, Fang Mengxiang, Wang Qinhui, *et al.* Development and prospect of coal staged conversion poly-generation technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(1):88-94.

[10] 陈昭睿.煤热解过程中热解气停留时间对热解产物的影响[D].杭州:浙江大学,2015:9-16.

[11] 崔银萍,秦玲丽,杜鹃,等.煤热解产物的组成及其影响因素分析[J].煤化工,2007(2):10-14.
Cui Yinping, Qin Lingli, Du Juan, *et al.* Products distribution and its influencing factors for coal pyrolysis[J]. Coal Chemical Industry, 2007(2):10-14.

[12] 魏砾宏,李润东,李爱民,等.煤粉热解特性实验研究[J].中国电机工程学报,2008,28(26):53-57.
Wei Lihong, Li Rundong, Li Aimin, *et al.* Thermogravimetric analysis on the pyrolysis characteristics of pulverized coal[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(26):53-57.

[13] 苗青,郑化安,张生军,等.低温煤热解焦油产率和品质影响因素研究[J].洁净煤技术,2014,20(4):77-82.
Miao Qing, Zheng Huanan, Zhang Shengjun, *et al.* Influencing factors of coal tar yield and quality from low-temperature coal pyrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(4):77-82.

[14] 段玉亲.煤中形态硫在热解过程中的转化和迁移规律[D].太原:太原理工大学,2010:6-10.

[15] 马克富,刘文礼.褐煤热解半焦研究[J].煤质技术,2013(6):1-4.
Ma Kefu, Liu Wenli. Study on properties of semi-coke from lignite pyrolysis[J]. Coal Quality Technology, 2013(6):1-4.