

# 240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺及中试研究

敬旭业<sup>1</sup>,王 坤<sup>1</sup>,董鹏飞<sup>1</sup>,孟广军<sup>1</sup>,朱治平<sup>1,2</sup>,吕清刚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**以粉煤分质梯级利用为背景,提出了一种固体热载体粉煤热解工艺,该工艺主要包含基于循环流化床技术的热解-缺氧燃烧耦合系统、缺氧燃烧煤气的脱灰及余热回收系统和热解煤气的脱灰及油气净化分离系统,并于2016年底完成了该工艺中试装置72 h满负荷连续稳定运行。中试试验以0~10 mm的神木煤为原料,原料煤满负荷输入量为240 t/d,试验结果表明:热解煤气中CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>的体积分数分别为35.3%和12.5%,热解煤气热值达到20 920 kJ/Nm<sup>3</sup>以上;热解焦油产率为9.24%,为原料煤格金焦油产率的81.8%;产品焦油的含尘率为0.47%,焦油中的正庚烷可溶物质量分数为84.3%;热解半焦的固定碳含量为86.3%,热值为29 985.5 kJ/kg。计算表明,该中试装置72 h连续稳定运行期间的物料平衡偏差为1.93%,能量利用效率为87.95%。

**关键词:**固体热载体;粉煤;热解;中试;焦油品质;热解煤气品质

中图分类号:TQ530 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2018)01-0050-07

## Pilot plant study on 240 t/d pulverized coal pyrolysis technology with solid heat carrier

JING Xuye<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, DONG Pengfei<sup>1</sup>, MENG Guangjun<sup>1</sup>, ZHU Zhiping<sup>1,2</sup>, LYU Qinggang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Taking the cascade utilization of pulverized coal as the background, a pulverized coal pyrolysis technology with solid heat carrier was proposed in this study. The proposed technology mainly includes the pyrolysis-gasification coupled system based on circulating fluidized bed, the system for removing coal ash and waste heat recovery from gasification gas and the system of deashing, purification and separation for pyrolysis oil-gas. The pilot plant of this technology has achieved a continuous and stable operation for 72 hours at the end of 2016. In the pilot experiment, the coal of 0-10 mm was used as the raw material and the feed amount of raw coal was a full load of 240 t/d. The experimental results show that the volume content of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> in the pyrolysis gas are 35.3% and 12.5%, and the calorific value of the pyrolysis gas is over 20 920 kJ/Nm<sup>3</sup>; the yield of pyrolysis tar is 9.24%, which is 81.8% of the Gray-King tar yield of raw coal; the dust content of the product tar is 0.47%, and the mass fraction of n-heptane soluble in tar is 84.3%; the fixed carbon content in the pyrolysis semicoke is 86.3% and the calorific value of the semicoke is 29 985 kJ/kg. For the pilot plant that operated continuously and steadily for 72 hours, the calculated mass balance deviation and energy efficiency are 1.93% and 87.95%, respectively.

**Key words:** solid heat carrier; pulverized coal; pyrolysis; pilot; tar quality; pyrolysis gas quality

## 0 引 言

我国“缺油、少气、煤炭资源相对丰富”的资源

禀赋条件,决定了煤炭将长期作为我国的主导能源<sup>[1]</sup>,而在我国的煤炭资源结构中,褐煤、长焰煤、弱黏煤和不黏煤等低阶煤在煤炭总储量和总开采量

收稿日期:2017-12-25;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.01.009

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA07010300)

作者简介:敬旭业(1986—),男,河北安平人,助理研究员,博士,从事循环流化床粉煤热解气化关键技术的研究开发与应用。E-mail:jingxuye@iet.cn。通讯作者:朱治平,研究员。E-mail:zhuzhiping@iet.cn

引用格式:敬旭业,王坤,董鹏飞,等.240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺及中试研究[J].洁净煤技术,2018,24(1):50-56.

JING Xuye, WANG Kun, DONG Pengfei, et al. Pilot plant study on 240 t/d pulverized coal pyrolysis technology with solid heat carrier[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 50-56.

的占比均在 50% 以上<sup>[2]</sup>。随着采煤机械化程度的提高,块煤产率降低至 20% ~ 30%,造成了粉煤的长期大量积压<sup>[3]</sup>。低变质粉煤的煤化程度低,具有挥发分高、化学反应性高、发热量低、水分高等特点<sup>[4-5]</sup>,以这部分低阶粉煤为原料,通过低温热解方式将其分解为气、液、固三相产品<sup>[6]</sup>,以此首先实现原料的分质,然后再根据各类产物性质及结构差异梯级转化,是实现低阶粉煤清洁高效梯级利用的主要途径,具有重要的经济价值和社会效益<sup>[7-9]</sup>。

针对低阶粉煤热解技术,国内外学者展开了大量研究。德国的 Lurgi-Ruhgas(LR) 工艺,以自产半焦作为热载体,系统所需热量由半焦和空气燃烧提供。该工艺焦油收率高、煤气发热量高(12.6 ~ 13.5 MJ/m<sup>3</sup>)、系统热效率高(86.6% ~ 89.0%),但是存在焦油含尘量高、分离困难、后处理系统容易堵塞的问题<sup>[10-11]</sup>。美国的 Toscoal 固体热载体粉煤热解工艺,处理的原料煤粒度在 12 mm 以下,以陶瓷球作为固体热载体,其粒度略大于原煤粒度,陶瓷球加热所需燃料为自产煤气。Toscoal 工艺具有加热速度快、焦油产率高等优点,但系统热效率低、设备复杂<sup>[5,12-13]</sup>。大连理工大学开发的褐煤固体热载体热解技术(DG 工艺)以 0 ~ 6 mm 的粉煤为原料,以半焦作为固体热载体,固体热载体升温由空气和煤气燃烧提供热量。DG 工艺的优点是热效率高、产品焦油产率较高,热解煤气发热量大于 16.73 MJ/m<sup>3</sup>;主要缺点是存在固-固混合不均匀且耗时较长、气-固分离设备多、热解粉尘带出量过大<sup>[5]</sup>。此外,还有苏联的 ETCH 工艺<sup>[10]</sup>、浙江大学

的循环流化床多联产工艺<sup>[14]</sup>、陕煤化的低阶煤气化-热解一体化技术、河南龙城集团的旋转床低温热解等诸多热解技术。上述技术在工程化过程中或多或少存在诸如高温物料输送困难、高温密封不严、高温热解气除尘不净、焦油品质差等问题,均未能实现工业化长期稳定运行。

中国科学院工程热物理研究所从 20 世纪 90 年代开始依次建设了每小时的煤处理量公斤级、百公斤级的试验平台和 240 t/d 固体热载体粉煤低温热解热态中试装置,该 240 t/d 固体热载体粉煤热解中试装置,于 2016 年底实现了 72 h 满负荷连续稳定运行。

## 1 中试试验

### 1.1 试验用煤

以 0 ~ 10 mm 的神木煤为原料,其粒径分析如图 1 所示, $d_{50}=2.3$  mm, $d_{90}=6.3$  mm。其工业分析、元素分析和格金焦油产率见表 1。

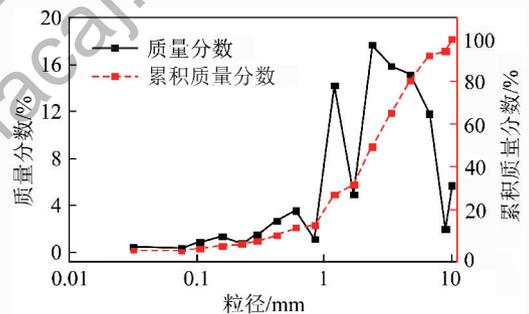


图 1 试验用煤的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of experimental coal

表 1 试验用煤的工业分析、元素分析和格金焦油产率

Table 1 Compositions and Gray-King tar yield of coal used in the experiment

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{ar,net}/$	格金焦油
$FC_{ar}$	$V_{ar}$	$A_{ar}$	$M_{ar}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$	(MJ · kg <sup>-1</sup> )	产率/%
55.48	35.18	4.10	5.24	72.14	4.58	12.60	1.06	0.28	27.99	11.3

### 1.2 240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺流程及原理

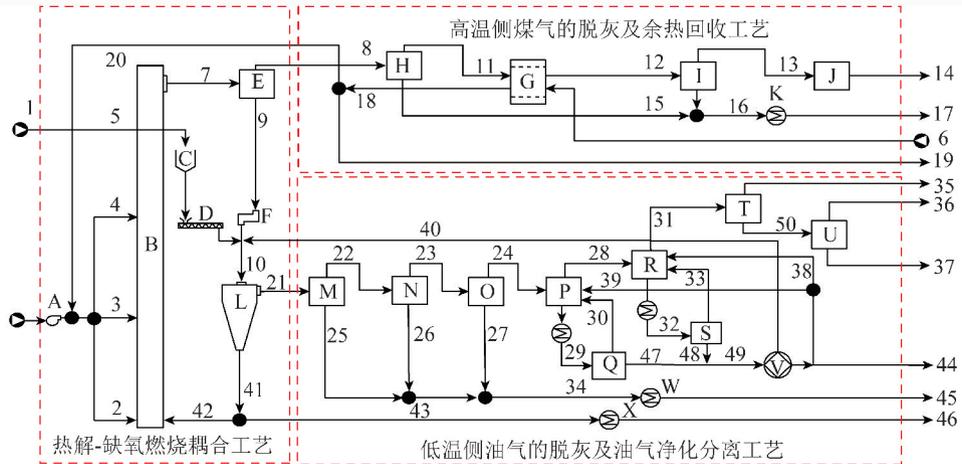
#### 1.2.1 240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺流程

240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺流程如图 2 所示。输送来的原煤 1(粒度 0 ~ 10 mm)首先进入原料煤仓 C,然后经螺旋给煤机 D 输送至热解炉 L,与由燃烧炉 B 来的高温固体热载体 9 在热解炉 L 中混合接触换热,煤粉温度逐步升高,发生脱除挥发分等一系列复杂的煤热解反应,产生热解油气 21 和

粉焦 41。热解炉出口的粉焦 41 分为 2 部分:一部分经过半焦冷却器 X 冷却后,作为固体产品 46 送出;另一部分则作为低温固体热载体 42 进入燃烧炉 B 与进入燃烧炉 B 的空气气化剂 2,3,4 发生缺氧燃烧而被加热形成新一轮循环的高温固体热载体,缺氧燃烧气体产物和高温固体热载体 7 经过旋风分离器 E 进行分离,分离出来的高温固体热载体 9 经过上返料螺旋 F 进入热解炉 L 与焦粉 5 混合。半焦作

为固体热载体,循环于热解炉 L 和燃烧炉 B 之间,

连续为热解提供热源。



A—风机; B—燃烧炉; C—煤斗; D—给煤螺旋; E—高温一选; F—上返料器; G—余热锅炉; H—高温二选; I—布袋除尘器; J—引风机; K—冷灰器; L—热解炉; M—低温一选; N—低温二选; O—静电除尘器; P—洗涤分离器; Q—分离器; R—激冷塔; S—分离器; T—煤气冷却器; U—油水分分离器; V—离心机; W—冷灰器; X—半焦冷却器

图2 240 t/d 固体热载体粉煤低温热解中试装置流程

Fig. 2 Schematic diagram of the system

热解反应产生的气相产物 21 从热解炉 L 顶部排出后,进入热解煤气的脱灰及油气净化分离系统。热解煤气 21 经过两级旋风分离器 M、N 和高温静电除尘器 O 除尘后,进入沥青洗涤分离器 P。在沥青洗涤分离器 P 内,采用温度低的焦油 30、39 直接对热解油气 24 进行喷淋,进一步除尘和降温。降温除尘后的热解油气 28 进入激冷塔 R 底部,与激冷塔喷淋的焦油 33、38 在激冷塔 R 内部逆流接触,再次降温后从激冷塔 R 顶部排出。经激冷塔 R 再次降温后的热解油气 31 进入冷却分离器 T 冷却,进一步降温并析出热解水与轻油。经过冷却分离器 T 冷却的热解气 35 输出系统,热解水与轻油在油水分离器 U 内静置后可分离为热解水 37 和轻油 36 分别输出系统。沥青洗涤分离器 P 底部和急冷塔 R 底部分别获得沥青 29 和重油 32,沥青与重油分别经过冷却后,一部分沥青作为循环沥青 30 喷淋到沥青洗涤分离器 P 内部、一部分重油作为循环重油 33 喷淋到激冷塔 R 内部,剩余的沥青 47 与重油 48 混合在一起,经过离心机 V 深度除尘后一部分作为沥青洗涤分离器 P 的喷淋焦油 39,一部分作为激冷塔 R 的喷淋焦油 38,剩余部分沥青 44 输出系统。离心机脱除下来的油渣 40,输送至热解炉 R 提油。两级旋风分离器 M、N 和高温静电除尘器 O 脱除下来的焦粉经过冷却后 45 输出系统。

燃烧炉 R 产生的高温煤气从旋风分离器 E 顶部分离后进入缺氧燃烧煤气的脱灰及余热回收系

统。高温煤气 8 先后通过二级旋风分离器 H、余热锅炉 G 冷却和布袋除尘器 I 除尘净化后排出系统。余热锅炉 G 产生的蒸汽 18,一部分作为气化剂 20 通入燃烧炉 R,另一部分作为副产品输出系统 19。

该工艺主要包含基于循环流化床技术的热解-缺氧燃烧耦合系统、缺氧燃烧煤气的脱灰及余热回收系统和热解煤气的脱灰及油气净化分离系统。基于循环流化床技术的热解-缺氧燃烧耦合系统,实现半焦固体热载体的循环和 0~10 mm 粒径煤的热解,产生未经处理的热解油气和高温缺氧燃烧煤气,并输出洁净半焦;燃烧炉为流化床,热解炉为流化床耦合移动床的复合热解炉,热解炉上部的物料在热解产生的气相产物流化下,实现固体热载体与粉煤快速掺混,热解炉下部的物料以移动床形式下行,杜绝了含氧气氛窜入热解炉;旋风分离器分离出来的物料,通过非机械阀返入热解炉,返料速率可通过松动风与流化风调控;热解炉出口物料通过机械返料装置返回燃烧炉,返料速率通过机械返料装置的运行频率调控。缺氧燃烧煤气的脱灰及余热回收系统,实现高温缺氧燃烧煤气余热的回收利用和脱灰,并副产蒸汽。热解煤气的脱灰及油气净化分离系统,则是对热解油气进行逐级的脱灰和冷却分离,保证高品质焦油和中低热值热解气的输出。

### 1.2.2 240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺原理

中试装置采用的固体热载体粉煤热解技术的工艺原理如图 3 所示,该工艺采用半焦作为固体热载

体。高温固体热载体从热解炉顶部进入热解炉,为粉煤热解提供热源,粉煤热解产生的热解油气产物从热解炉顶部排出,热解产生的半焦一部分从热解炉底部冷却排出,另一部分则作为低温固体热载体进入燃烧炉,与进入燃烧炉的空气发生缺氧燃烧而被加热形成新一轮循环的高温固体热载体。固体热载体作为热解热源媒介循环于热解炉和燃烧炉之间,连续为热解提供热源。

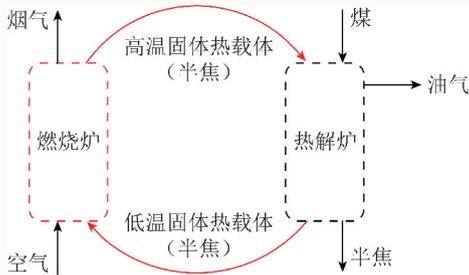


图 3 240 t/d 固体热载体粉煤低温热解工艺原理

Fig. 3 Technical principle diagram of the system

### 1.3 试验分析与测量

#### 1.3.1 煤气成分分析

热解煤气成分及热值分析方法,采用 GB 12208—2008 中规定的人工煤气成分分析方法。

#### 1.3.2 焦油取样及分析

焦油样品从离心机至成品焦油罐油管路上的取样口获取。焦油分析指对焦油取样进行正庚烷可溶物含量、四组分、黏度、密度、元素分析、热值、焦油含尘量进行分析。其中,焦油的正庚烷可溶物含量、四组分、黏度、密度、元素分析和热值分析,均委托煤炭科学技术研究院有限公司按照国家标准或行业标准进行分析。焦油的含尘率,则采用丙酮作为焦油溶剂,通过过滤的方式实现焦油和粉尘的分离,获得焦油含尘率数据,其分析步骤如下:

- 1) 从离心机至成品焦油罐油管路上的取样口获取焦油样品;
- 2) 称量焦油样品质量为  $m_1$  (g);
- 3) 采用丙酮充分溶解焦油;
- 4) 称量放入干燥器中恒重的滤纸和器皿(2 次

称量之差不超过 0.2 mg) 质量  $m_2$  (g);

5) 通过布氏漏斗对丙酮充分溶解的焦油进行过滤,并通过丙酮对滤饼进行冲洗,直至冲洗液没有颜色为止;

6) 将滤饼连同滤纸放入器皿中,并在 105 °C 烘箱中干燥,至 2 次称量之差不超过 0.4 mg,滤饼连同滤纸和器皿质量为  $m_3$  (g);

7) 焦油含尘率为  $(m_3 - m_2) / m_1 \times 100\%$ 。

#### 1.3.3 关键物流的流量计量

##### 1) 原料煤量

原料煤量按试验阶段输送带秤累计计量为准。

##### 2) 半焦量

产品半焦量按输送带秤累计计量为准。

##### 3) 热解煤气量

热解煤气量按收油系统出口总管上的煤气流量计测量值为准。

##### 4) 焦油量、热解水

焦油量和热解水量计量则按试验阶段前后储罐液位差值计算为准。

##### 5) 余热锅炉给水

余热锅炉水消耗量的计量按余热锅炉给水泵出口流量计数值计算为准。

##### 6) 耗电量

中试装置运行耗电量的计量按电表读数为准。

##### 7) 烟气量

燃烧炉排出的烟气量的计量按布袋除尘器出口总管上的流量计测量值为准。

## 2 试验结果

### 2.1 中试装置的典型运行特性

240 t/d 固体热载体粉煤热解中试装置于 2016 年底完成了 72 h 的满负荷连续稳定和运行,该中试装置的典型运行特性见表 2。72 h 满负荷运行期间,燃烧炉和热解炉上、中、下 3 部分的整体运行温度曲线如图 4 所示,试验期间燃烧炉和热解炉的运行温度分别在 950、690 °C 左右。

表 2 装置典型运行特性

Table 2 Typical operation conditions of the system

煤处理量/ (t · h <sup>-1</sup> )	热解炉温 度/°C	燃烧炉 温度/°C	燃烧炉过量 空气系数	收油量/ (kg · h <sup>-1</sup> )	热解气产量/ (Nm <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	半焦产量/ (kg · h <sup>-1</sup> )	焦粉产量/ (kg · h <sup>-1</sup> )
10	690	950	0.56	930	735	5 200	1 200

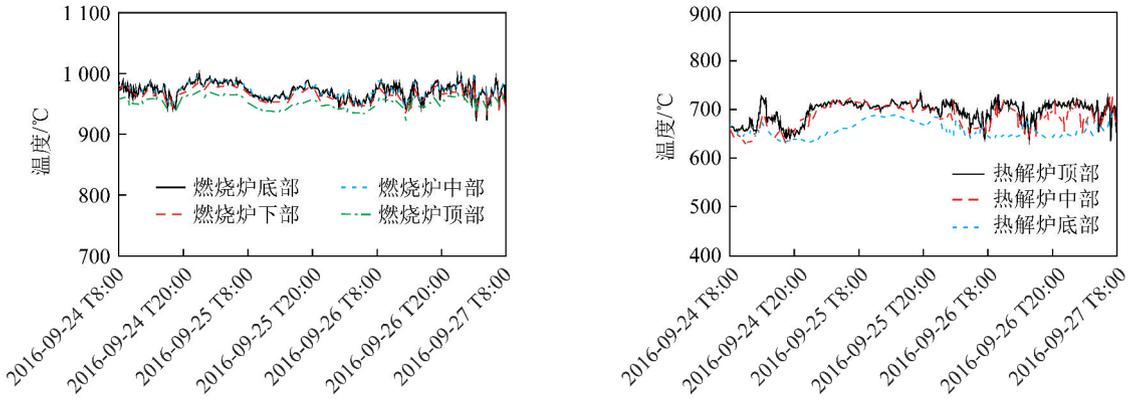


图4 连续运行工况下燃烧炉和热解炉的温度曲线

Fig. 4 Temperature curves of the gasification and pyrolysis furnaces under continuous operating conditions

2.2 产物分析结果

2.2.1 热解煤气组分

固体热载体粉煤热解工艺生产的煤气成分见表3。CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>和CO的体积分数分别为35.3%、12.5%和15.6%，热解气热值在20 920 kJ/Nm<sup>3</sup>以上。该工艺生产的热解煤气既可作为优质的人工煤气，也可作为化工原料。

2.2.2 焦油分析

固体热载体粉煤热解工艺生产的焦油物性与组

表3 热解煤气成分分析

Table 3 Pyrolysis gas compositions

成分	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	不饱和烃	O <sub>2</sub>
体积分数/%	15.6	12.5	35.3	25.9	10.7	0.1

分含量见表4。焦油含尘率仅0.47%，焦油中正庚烷可溶物达到85%，密度为986.7 kg/m<sup>3</sup>，H元素含量为10.03%，焦油组分中沥青质含量仅2.32%，表明焦油品质好，是焦油深加工的优质原料。

表4 焦油物性和组分含量分析

Table 4 Physical property analysis and compositions of tar

水分/%	含尘率/%	黏度(40℃)/(mPa·s)	密度(20℃)/(kg·m <sup>-3</sup> )	净热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	正庚烷可溶物含量/%	元素分析/%				四组分含量/%			
						C	H	N	S	饱和分	芳香分	胶质	沥青质
0.67	0.47	22.0	986.7	39.53	85	84.73	10.03	0.45	0.09	18.24	31.93	21.52	2.32

2.2.3 半焦与焦粉分析

产品半焦和焦粉的工业分析、元素分析和热值分别见表5。本工艺生产的半焦产品挥发分均小于

10%，固定碳大于85%。既可以作为有色金属还原剂、电极材料、制取活性炭原料，又可作为炼焦配煤瘦化剂或型焦原料。

表5 产品半焦和焦粉的工业分析和元素分析

Table 5 Compositions of char and power char produced in the experiment

产品	工业分析/%				元素分析/%				Q <sub>d,net</sub> /(MJ·kg <sup>-1</sup> )
	FC <sub>d</sub>	V <sub>d</sub>	A <sub>d</sub>	C <sub>d</sub>	H <sub>d</sub>	O <sub>d</sub>	N <sub>d</sub>	S <sub>d</sub>	
半焦	86.23	6.32	7.45	86.62	1.70	2.98	0.96	0.29	30.04
焦粉	85.03	7.50	7.47	85.70	1.95	3.61	1.01	0.26	30.53

2.3 物料平衡与系统能效

240 t/d 固体热载体粉煤热解中试装置72 h 满负荷连续运行物料平衡与能效计算见表6。焦

油产率9.24%，为原料煤格金焦油产率的81.8%；热解半焦中约16%的半焦去往燃烧炉气化，剩余半焦作为产品输出，半焦与焦粉产率为

63.8%,热解煤气的产率为 7.6%。输入输出物流的质量偏差为 1.93%,系统能效为 87.95%。

表 6 系统的物料平衡与能效

Table 6 Mass balance and energy efficiency of the system

系统	序号	反应物	质量流量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	热值/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	热量/MJ
输入	1	原煤	10 044.7	27 990	281 150.3
	2	空气	6 958.5	0	0
	3	除氧水	2 456.7	0	0
	4	电	643.3	3 600	2 316.0
共计		19 460		283 466.3	
输出	1	煤焦油	928.7	37 220.0	34 565.1
	2	煤气	766.9	22 512.4	17 264.4
	3	半焦	5 226.7	30 040.0	157 009.2
	4	粉焦	1 185.0	30 530.0	36 178.1
	5	烟气	8 153.3	0	0
	6	热解水	859.7	0	0
	7	蒸汽	1 554.9	2 763.0	4 296.3
	8	损失	375		
共计		19 085		249 312.9	
物料平衡偏差/%			1.93		
能效/%			87.95		

## 2.4 工艺技术特点

目前工艺在工程化过程中出现了诸如高温物料输送困难、高温密封不严、高温热解气除尘不净、焦油品质差、系统长周期运行不稳定等问题。而本文提出的 240 t/d 固体热载体粉煤热解中试装置,实现了 72 h 满负荷连续稳定运行,解决了固体热载体粉煤热解系统运行不稳定、焦油含尘率高等难题,以此为基础形成了模型化设计技术及设计开发平台,为后续固体热载体粉煤热解提油工业化装置的设计、运行奠定了坚实的基础。

提出的基于循环流化床技术的热解-缺氧燃烧耦合工艺,以半焦作为固体热载体,通过对固体热载体运输和加热的协同控制,实现了热解反应温度的精确控制,大幅提高了焦油及半焦的品质;解决了粉煤热解焦油含尘率高的问题;本工艺流化床耦合移动床的复合热解炉中,热解炉上部的物料在热解产生的气相产物流化下,可实现固体热载体和粉煤的快速掺混,热解炉下部的物料以移动床形式下行,杜绝了含氧气氛窜入热解炉,避免了燃烧析出的挥发

分;属于国内首台稳定运行的 240 t/d 规模的基于循环流化床技术的高温半焦固体热载体粉煤低温热解生产焦油、洁净半焦和热解煤气的中试项目。

## 3 结 论

1) 针对低阶粉煤的分质清洁利用,提出了一种固体热载体粉煤热解工艺,并对工艺技术特点进行了总结。该工艺的 240 t/d 中试装置实现了 72 h 满负荷连续稳定运行,试验期间可连续稳定生产焦油、半焦和热解气。本次中试试验的进出口物料偏差为 1.93%、系统能效为 87.95%。

2) 240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺生产的焦油品质好、产率高;产品焦油的含尘率为 0.47%,焦油中正庚烷可溶物达到了 85%,密度为 986.7 kg/m<sup>3</sup>;焦油产率为原料煤格金焦油产率的 81.8%。

3) 240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺生产的热解煤气品质高,CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 和 CO 的含量分别为 35.3%、12.5% 和 15.6%,热解气热值>20 920 kJ/Nm<sup>3</sup>。

### 参考文献 (References):

- [1] 宋华岭,金智新,于斌,等. 高科技发展战略支持下的我国煤炭资源安全战略研究[C]//第五届中国软科学学术年会论文集. 北京:中央文献出版社,2005:512-518.
- [2] 尚建选,王立杰,甘建平,等. 煤炭资源逐级分质综合利用的转化路线思考[J]. 中国煤炭,2010,36(9):98-101.  
SHANG Jianxuan, WANG Lijie, GAN Jianping, et al. Thinking of donversion route of comprehensive utilizationof coal resources by categories and qualities[J]. China Coal,2010,36(9):1-3.
- [3] 李鑫,张生军,徐婕,等. 粉煤热解产物焦粉的综合利用[J]. 洁净煤技术,2013,19(5):74-76.  
LI Xin,ZHANG Shengjun,XU Jie,et al. Comprehensive utilization of pulverized coal pyrolysis product coke powder[J]. Clean Coal Technology,2013,19(5):74-76.
- [4] 尚庆雨. 褐煤干燥脱水提质技术现状及发展方向[J]. 洁净煤技术,2014,20(6):1-4,45.  
SHANG Qingyu. Status and development direction of lignite dehydration upgrading technologies[J]. Clean Coal Technology,2014,20(6):1-4,45.
- [5] 潘生杰,陈建玉,范飞,等. 低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望[J]. 洁净煤技术,2017,23(5):7-12.  
PAN Shengjie, CHEN Jianyu, FAN Fei, et al. Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route[J]. Clean Coal Technology,2017,23(5):7-12.
- [6] MORGAN T J, KANDIYOTI R. Pyrolysis of coals and biomass: Analysis of thermal breakdown and its products[J]. Chem. Rev.

- 2014,114:1547-1607.
- [7] 国家能源局. 国家能源局关于印发《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》的通知[EB/OL]. (2017-02-08) [2017-12-25]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303\\_2606.htm?keywords](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303_2606.htm?keywords).
- [8] 甘建平, 马宝歧, 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, 41(1): 3-6.  
GAN Jianping, MA Baoqi, SHANG Jianxuan, et al. Formation and development of the coal grading conversion ideas[J]. Coal Chemical Industry, 2013, 41(1): 3-6.
- [9] 王向辉, 门卓武, 许明, 等. 低阶煤粉煤热解提质技术研究现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 36-41.  
WANG Xianghui, MEN Zhuowu, XU Ming, et al. Research status and development proposals on pyrolysis techniques of low rank pulverized coal[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 36-41.
- [10] 郭树才. 煤化工工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] ZHANG J, WU R, ZHANG G, et al. Technical review on thermochemical conversion based on decoupling for solid carbonaceous fuels[J]. Energy Fuels, 2013, 27(4): 1951-1966.
- [12] 赵振本. 高挥发分煤的合理利用途径-低温干馏和半焦联合发电工艺[J]. 煤炭加工与综合利用, 1984(2): 86-92.
- [13] ATWOOD M T, SCHULMAN B L. Toscoal process emdash pyrolysis of western coals and lignites for char and oil production[J]. Preprints of Papers American Chemical Society Division of Fuel Chemical, 1977, 22(2): 233-252.
- [14] 方梦祥, 岑建孟, 石振晶, 等. 75 t/h 循环流化床多联产装置实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 9-15.  
FANG Mengxiang, CEN Jianmeng, SHI Zhenjing, et al. Experimental study on 75 t/h circulating fluidized bed poly-generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(29): 9-15.

(上接第37页)

- [15] 冯利利, 朱岳麟, 陈锁忠, 等. 采空区处理含悬浮物矿井水的效果研究[J]. 能源环境保护, 2004, 18(6): 40-42.  
FENG Lili, ZHU Yuelin, CHEN Suozhong, et al. Research of results on disposal of mine drainage containing suspended solids through goaf[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(6): 40-42.
- [16] 陈苏社, 鞠金峰. 大柳塔煤矿矿井水资源化利用技术[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 125-128.  
CHEN Sushe, JU Jinfeng. Utilization technology of mine water resources in Daliuta mine[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 125-128.
- [17] 张春晖, 何绪文, 张凯, 等. 膜科学新技术在矿业环境保护中的应用[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 125-128.  
ZHANG Chunhui, HE Xuwen, ZHANG Kai, et al. Membrane science new technology and its application in mining environmental protection[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 125-128.
- [18] 唐刚, 马燕燕. 矿井废水零排放处理技术方案的研究[J]. 东方电气评论, 2014, 28(4): 76-80.  
TANG Gang, MA Yanyan. Study on zero discharge technology program of mine wastewater[J]. Dongfang Electric Review, 2014, 28(4): 76-80.
- [19] 顾大钊. “能源金三角”地区煤炭开采水资源保护与利用工程技术[J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 33-37.  
GU Dazhao. Water resource protection and utilization engineering technology of coal mining in "energy golden triangle" region[J]. Coal Engineering, 2014, 46(10): 33-37.