

## 40 kg 神东煤焦炉热解试验及产物分析

彭德军, 邸传耕, 张 飞

(国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315)

**摘 要:**神东煤为典型侏罗纪不黏煤, 具有低灰、低硫、低磷、低钾钠等优点, 焦油产率较高, 挥发分产率较高, 哈氏可磨性指数和热稳定性中等, 比较适合中低温热解加工。为全面研究神东煤的热解特征, 综合使用热重分析仪和 40 kg 热解装置, 研究神东煤在不同温度下焦油、热解气和半焦的生成规律及性质。结果表明, 神东煤煤质优良, 格金焦油产率较高, 比较适合中低温热解提质加工。随着热解温度的升高, 煤气产率显著增加, 半焦产率逐渐减少, 半焦的挥发分迅速下降, 碳含量增加, 机械强度变差, 反应活性和可磨性呈降低趋势, 比电阻急速下降。半焦的比表面积较小, 苯酚吸附量较低。提高热解温度可明显改善半焦性质, 对神东煤的提质作用比较明显。热解焦油性质优良, 比较适宜加氢制备清洁燃料。

**关键词:**热解特性; 半焦; 热解焦油; 神东煤

**中图分类号:**TQ523 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2022)04-0103-07

## Pyrolysis experiment and product analysis of Shendong coal in 40 kg experimental oven

PENG Dejun, DI Chuangeng, ZHANG Fei

(CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China)

**Abstract:** Shendong coal is a typical Jurassic non stick coal, which has the advantages of low ash, low sulfur, low phosphorus, low potassium and sodium content, high tar yield, high volatile yield, medium grindability index and thermal stability. It is more suitable for medium and low temperature pyrolysis processing. In order to study the pyrolysis characteristics of Shendong coal comprehensively, thermogravimetric analyzer and 40 kg pyrolysis unit were used to study the formation and properties of tar, pyrolysis gas and char of Shendong coal. The results show that excellent coal qualities with high tar yield are found of Shendong coal, which makes it suitable for upgrading in medium-low temperature pyrolysis. With the increasing of pyrolysis temperature, the yield of pyrolysis gas increases significantly while the yield of char decreases gradually. The content of volatile matter in char decreases rapidly, while the content of carbon increases gradually. The mechanical strength of char degrades gradually. The reactivity and grindability of char decrease while the specific resistance decreases rapidly. The specific surface and the phenol adsorption capacity of char are relatively low. Excellent properties are found of pyrolysis tar, which makes it suitable for hydrogenation to prepare clean fuel.

**Key words:** pyrolytic characteristics; semi-coke; pyrolysis tar; Shendong coal

## 0 引 言

低阶煤热解可得到高附加值的焦油、热解气和半焦, 开展低阶煤高效热解技术研究对煤炭资源的高效梯级利用具有重要意义。神东矿区是目前我国最大的低阶煤产区, 是低阶煤高效分质利用的重点区域。煤阶、温度、压力、气氛等热解条件对低阶煤

热解反应特性有重要影响<sup>[1]</sup>。解强等<sup>[2]</sup>利用 TG-DSC 同步联用仪解析煤热解反应热, 考察煤阶及温度对煤热解反应热的影响。闫华青等<sup>[3]</sup>利用加压聚光光热快速升温台, 研究压力及气氛对中低温热解过程中挥发物反应活性及煤焦结构特性的影响。煤岩显微组分结构特性对低阶煤的热解特性也有重要影响。王骏等<sup>[4]</sup>采用热重分析、气相色谱-质谱

收稿日期: 2021-08-13; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21081302

作者简介: 彭德军 (1986—), 男, 辽宁朝阳人, 工程师。E-mail: zhizhuo2577@163.com

引用格式: 彭德军, 邸传耕, 张飞. 40 kg 神东煤焦炉热解试验及产物分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 103-109.

PENG Dejun, DI Chuangeng, ZHANG Fei. Pyrolysis experiment and product analysis of Shendong coal in 40 kg experimental oven[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 103-109.



移动阅读

联用、FTIR、Raman 方法考察煤岩显微组分官能团和碳结构差别对低温热解产物组成的影响。王越等<sup>[5]</sup>利用离心分离获取低阶煤显微组分富集物,利用显微镜热台原位观测热解过程中显微组分的软化熔融特征。热解工艺技术对反应传热速率以及产物分布、热解气组成、焦油组成和品质等也产生重要影响<sup>[6-7]</sup>。周琦等<sup>[8-9]</sup>采用多级折流内构件移动床调控热解反应过程中气固两相的热质传递,利用多段集气系统可及时收集不同热解阶段释放出的油气产物。

目前对神东煤热解反应的研究多以实验室小型热解设备为主,生成产物量往往不足以对半焦进行全面系统分析。徐艳梅等<sup>[10]</sup>利用拉曼光谱研究了神东大柳塔原煤、富镜质组煤样、富惰质组煤样的热解焦结构。袁野等<sup>[11]</sup>利用管式热解炉研究神东煤的裂解特性及产物生成规律。李君<sup>[12]</sup>和苕亮<sup>[13]</sup>分别研究了神东煤固体热载体热解产物的分布及变化规律。杨雨濛等<sup>[14]</sup>研究了神东煤热解半焦的超细粉碎特性,谭静等<sup>[15]</sup>初步分析了神东热解半焦用作高炉喷吹原料的适用性。

低阶煤热解过程受自身因素和外部条件的影响较为显著,为全面研究神东煤的热解特征,笔者使用热重分析仪和 40 kg 热解装置,研究神东煤在中型热解装置中焦油、热解气和半焦的生成规律,并对不同温度下热解半焦和焦油的性质进行系统测试,为实现神东煤热解产物的定向转化,生产高品质油气产品,实现低阶煤的高值清洁化利用提供借鉴。

## 1 试验

### 1.1 原料煤基本性质

试验选用神东煤田典型侏罗纪不黏煤,按照 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》、GB/T 47—1991《煤的元素分析方法》、GB/T 214—2007《煤中全硫的测定方法》、GB/T 1574—2007《煤灰成分分析方法》、GB/T 219—1996《煤的灰熔性测定方法》、GB/T 2565—2014《煤的哈氏可磨性指数测定方法》、GB/T 1341—1987《煤的格金低温干馏试验方法》以及 GB/T 1573—2018《煤的热稳定性测定方法》对煤质进行分析。

### 1.2 热重热解特性分析

热重试验在上海天平公司生产的 WRT-3P 常压热天平上进行,  $N_2$  气氛,  $N_2$  流量为 40 mL/min, 每次试验样品质量 10 mg, 样品粒度小于 0.25 mm, 升温速率分别为 10、25 和 50  $^{\circ}C/min$ , 热解终温均为 900  $^{\circ}C$ 。为比较神东煤的热解失重过程, 定义热解

特性参数如下: ① 热解产物初始释出温度  $T_i$ : 试验样品失重率为 1% 时所对应的温度, 表征试验样品开始热解的温度; ② 最大热解质量变化速率对应温度  $T_{max}$ : 热解速率最大时对应的温度; ③ 热解失重半峰宽温度区间  $\Delta T_{1/2}$ : 最大热解质量变化速率一半所对应的温度区间, 表征热解产物释出的集中程度。

### 1.3 40 kg 热解试验

管式炉热解装置获取的样品量较少, 为全面研究热解半焦的性质, 采用 40 kg 试验焦炉进行热解试验, 焦炉长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 550 mm $\times$ 420 mm $\times$ 460 mm<sup>[16]</sup>。将 40 kg 粒度 6~60 mm 神东煤放入焦炉, 分别升温至 600、700、750、800 和 900  $^{\circ}C$ , 恒温热解 9 h 后出焦, 用水熄焦, 取样分析焦炭(半焦)性质。反应生成的粗煤气通过串联冰浴冷却, 并进行油水分离, 分别称重计量焦油和水的质量; 反应器及管路上附着的煤焦油通过反应前后质量差减获得, 并计入煤焦油质量中; 气体体积由湿式流量计计量, 并用注射器采集。

### 1.4 热解产物的性质分析

测试不同温度下热解半焦(焦炭)的工业分析、元素分析、全硫、磷含量、粒度组成、抗碎强度、耐磨强度、反应活性、哈氏可磨性指数、比表面积、苯酚吸附量、比电阻、燃点和爆炸性。焦炭的抗碎强度( $M_{25}$ )及耐磨强度( $M_{10}$ )均用焦炭 2 次落下试验后的样品, 进入 1/4 米库姆转鼓检验。

对热解半焦性质较好时生成焦油的密度、水分、灰分、游离碳、黏度进行测量, 并进行流程分析, 对 <360  $^{\circ}C$  馏分进行族组成分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤质特性

神东煤的煤质特性见表 1。由表 1 可知, 神东煤具有低灰、低硫、低磷、低钾钠含量等优点, 焦油产率较高, 挥发分产率较高, 哈氏可磨性指数和热稳定性中等, 比较适合中低温热解加工。

### 2.2 热重分析

不同升温速率下神东煤的热重曲线如图 1 所示, 神东煤热解特征参数见表 2。神东煤的热解过程可分为 3 个阶段: 100  $^{\circ}C$  左右有明显的失水峰; 350~550  $^{\circ}C$  以分解和解聚反应为主, 生成和释放大量的挥发物(热解气和焦油), 470  $^{\circ}C$  左右出现最大失重峰; 在 710~850  $^{\circ}C$ , 有 1 个小的失重峰, 可能是由于热缩聚反应生成大量的热解气, 在 770  $^{\circ}C$  左右出现了 1 个脱气峰, 该阶段为二次脱气阶段, 以缩聚反应为主。

表 1 神东煤的煤质特征  
Table 1 Properties of the coal sample

工业分析/%				元素分析/%						哈氏可磨性 指数 HGI
$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_d$	$C_d$	$H_d$	$N_d$	$S_d$	$O_d$	$S_{1,d}/\%$	
11.94	5.38	35.83	60.72	75.94	4.34	0.97	0.39	12.98	0.39	64
煤灰成分/%										
$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$TiO_2$	$K_2O$	$Na_2O$	$P_2O_5$	MnO	$SO_3$
27.84	9.19	27.06	18.14	1.21	0.55	0.75	0.50	0.40	0.66	9.10
热稳定性/%			煤灰熔融性温度/°C				格金低温干馏			
$TS_{+6}$	$TS_{3-6}$	$TS_{-3}$	$T_D$	$T_S$	$T_H$	$T_F$	焦型	半焦产率/%	焦油产率/%	总水产率/%
79.3	18.7	2	1 060	1 100	1 100	1 120	A	65.9	8.5	15.7

注:  $TS_{+6}$  为大于 6 mm 残焦质量占各级残焦质量之和的比;  $TS_{3-6}$  为 3~6 mm 残焦质量分别占各级残焦质量之和的比;  $TS_{-3}$  为小于 3 mm 残焦质量分别占各级残焦质量之和的比;  $T_D$ 、 $T_S$ 、 $T_H$ 、 $T_F$  分别为变形温度、软化温度、半球温度和流动温度。

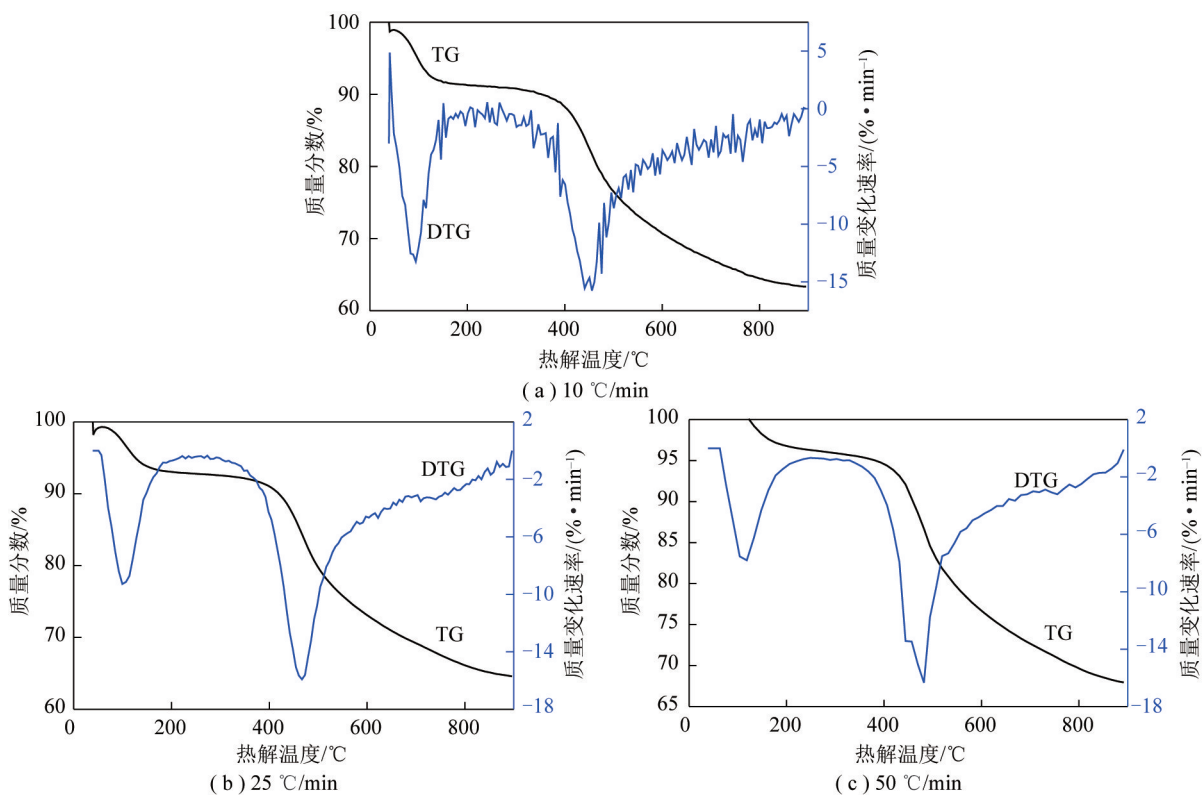


图 1 神东煤的热重曲线

Fig.1 Weight loss curves of Shendong coal

表 2 神东煤热解特征参数

Table 2 Characteristic parameters of Shendong coal pyrolysis

升温速率/ (°C·min <sup>-1</sup> )	$T_i/°C$	$T_{max}/°C$	$\Delta T_{1/2}/°C$
10	280	455	95
25	310	472	93
50	370	480	82

随着升温速率提高,神东煤的初始热解温度和最大热解温度提高,热解产物释出的集中程度(半

峰宽)降低,热解总失重量基本保持在 65%左右。

### 2.3 热解试验结果

不同热解终温下 40 kg 热解产物分布见表 3。随热解温度提高,半焦产率逐渐减少,煤气产率显著增加,焦油和热解水产率缓慢增加,但增幅很小。大型装置对热解焦油、煤气、水分收集较困难,因而损失相对较高。

### 2.4 热解半焦性质及利用途径

半焦利用影响煤低温热解经济性。不同热解终温下半焦的基本性质见表 4。随着热解温度提高,

表3 热解产物的产率(干基)

Table 3 Yield of pyrolysis product (dry basis)

热解温度/℃	半焦/%	焦油/%	煤气/%	水/%	损失量/%
600	79.39	6.01	9.89	4.27	0.44
700	78.90	6.08	10.16	4.46	0.40
750	73.46	6.21	15.26	4.56	0.51
800	71.76	6.36	16.54	4.75	0.59
900	71.59	6.52	16.68	4.85	0.36

半焦的灰分相对增加,这是成焦率降低所致。由于神东煤灰分低,半焦灰分仍较低(6%~8%),随热解

温度升高,半焦的挥发分产率快速降低,当温度高于750℃时,挥发分变化幅度较小;随着热解温度升高,半焦的固定碳含量快速增加,当温度高于750℃时增加缓慢。随着热解温度升高,半焦的碳含量增加,氢、氮、硫和氧含量不同程度地降低。随着热解温度升高,硫、磷以各种形式逸出,但受焦率的影响,半焦中硫、磷变化幅度不大。神东煤具有低硫、低磷的特点,因而半焦的硫、磷含量较低。在热解温度范围内,半焦中硫的质量分数约0.34%;磷质量分数约0.011%。提高热解温度可明显改善半焦性质,对低阶煤的提质作用明显。

表4 热解半焦性质分析

Table 4 Properties of char in pyrolysis experiment

热解温度/ ℃	工业分析/%					元素分析/%				
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_d$	$P_d$	$S_{1,d}$	$C_d$	$H_d$	$N_d$	$O_d$
600	4.40	6.09	22.22	72.67	0.010	0.32	81.33	3.33	1.02	7.91
700	4.45	6.82	12.73	81.02	0.011	0.34	85.65	2.44	1.00	3.75
750	5.88	7.32	7.29	86.18	0.011	0.34	86.73	1.81	0.87	2.93
800	5.74	7.50	5.59	87.23	0.012	0.34	87.56	1.31	0.73	2.56
900	8.89	7.72	3.52	89.07	0.012	0.34	89.94	0.59	0.56	0.85

半焦的粒级与热解温度的关系如图2所示。随着热解温度提高,60~40mm粒级的样品比例逐渐降低,<6mm样品粒级逐渐增多,其余粒级样品比例相差不大。

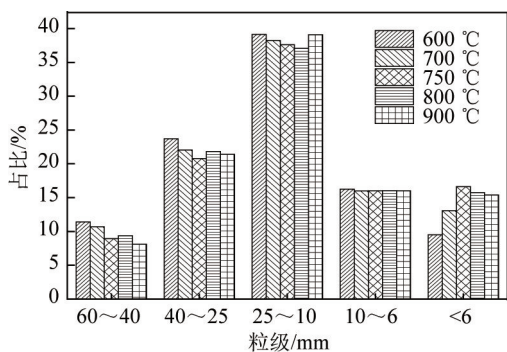


图2 半焦的粒级与热解温度的关系

Fig.2 Relationship between pyrolysis temperature and size of char

半焦的机械强度与热解温度的关系如图3所示。半焦的机械强度比较低,抗碎强度( $M_{25}$ )均小于10%,而耐磨强度( $M_{10}$ )高达50%~60%;随着热解温度提高,半焦的机械强度变差。

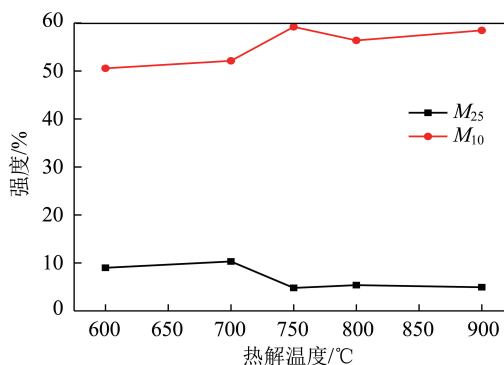


图3 半焦的机械强度与热解温度的关系

Fig.3 Relationship between pyrolysis temperature and mechanical strength of char

半焦的反应活性与热解温度的关系如图4所示。随着热解温度的提高,半焦的反应活性呈降低趋势。但不同热解温度下所得半焦的反应活性相差不大。

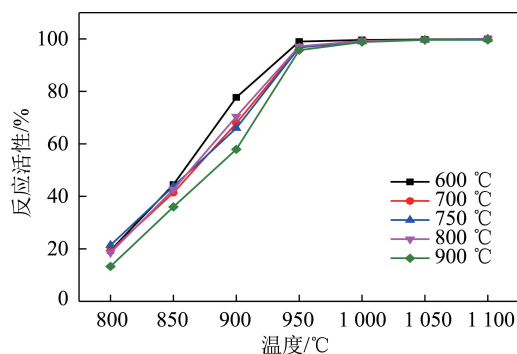


图4 半焦反应活性与热解温度的关系

Fig.4 Relationship between pyrolysis temperature and reactivity of char

半焦的可磨性与热解温度的关系如图 5 所示。与原煤相比,半焦的可磨性变差;随热解温度的提高,半焦的可磨性呈下降趋势。

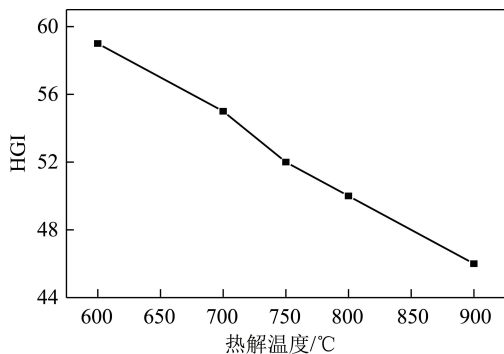


图 5 半焦的哈氏可磨性指数与热解温度的关系  
Fig.5 Relationship between pyrolysis temperature and grindability of char

半焦的比表面积、苯酚吸附量与热解温度的关系如图 6 所示。半焦的比表面积较小,最大值仅  $25 \text{ m}^2/\text{g}$  左右。随着热解温度升高,半焦的比表面积经历缓慢增长、快速增长和较快下降的过程,最大值在  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  附近出现。在  $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,煤受热后,挥发物从煤骨架中逸出,部分闭气孔被打开,产生了附加孔隙,部分敞开的气孔被扩大,因而比表面积随热解温度升高而增大。当温度继续升高,挥发分逸出较少,交联键被破坏,芳香结构的有序化程度提高,开孔体积和表面积明显下降,因而比表面积随热解温度升高而降低。

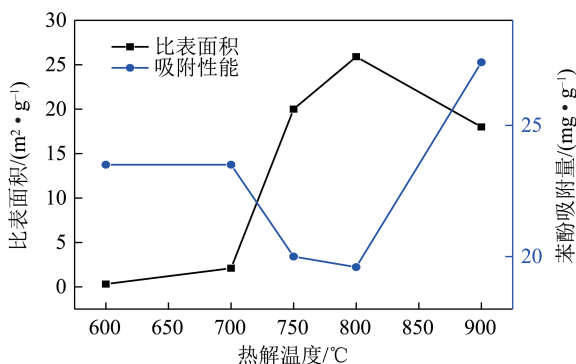


图 6 半焦的比表面积、苯酚吸附量与热解温度的关系  
Fig.6 Relationship between pyrolysis temperature and specific surface area, adsorption capacity of phenol

随热解温度升高,半焦的苯酚吸附量逐渐降低,在  $750 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  附近出现最小值,之后随热解温度的升高迅速增加。但是,半焦的最高苯酚吸附量不足  $30 \text{ mg/g}$ ,吸附容量较低,吸附性能较差,加之半焦的孔径较大,中孔较少,不适于代替活性炭处理废水、废气等。

半焦的比电阻与热解温度的关系见表 5。半焦

的比电阻随热解温度升高急速下降。热解温度低于  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  时,半焦的比电阻迅速下降;热解温度在  $750 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  时半焦的比电阻急速下降;热解温度高于  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,半焦的比电阻缓慢降低。

表 5 半焦的电阻率与热解温度的关系  
Table 5 Relationship between pyrolysis temperature and specific resistance of char

热解温度/°C	电阻率 $\rho /$ ( $10^9 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ )
600	$1.08 \times 10^7$
700	$5.15 \times 10^4$
750	$2.27 \times 10^3$
800	19.9
900	5.82

物质的比电阻反映物质内部电子规则化运动程度,煤分子结构内部含有较多导电性极差的基团如脂肪桥和基本结构单元内的多环、直链等,这些基团阻止电子的定向运动,导致煤的导电能力差<sup>[17]</sup>,通常煤的电阻率都大于  $10^{16} \Omega/\text{m}$ 。煤中导电性差的基团键能较小,大部分在热解过程中以挥发分的形式析出,煤的热解产物相互缩合形成导电性好的芳香缩合基团;热解温度越高,芳香基团越多,导电成分越多,因而煤热解半焦的比电阻远小于原煤的比电阻,且热解温度越高,比电阻越低。

半焦的爆炸性一般用返回火焰长度表示。通常,返回火焰长度大于  $700 \text{ mm}$  有极高的爆炸性,返回火焰长度在  $400 \sim 700 \text{ mm}$  有强爆炸性,返回火焰长度在  $30 \sim 400 \text{ mm}$  有弱爆炸性,返回火焰长度小于  $30 \text{ mm}$  则无爆炸性<sup>[18]</sup>。

半焦的燃点、爆炸性与热解温度的关系如图 7 所示。随热解温度升高,半焦的爆炸性快速减弱,热解温度在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  时所得半焦具有极强的爆炸性,当热解温度提高到  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  时爆炸性显著降低,当热解温度大于  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  时,半焦几乎无爆炸性。随热解温度升高,半焦的燃点呈线性增加趋势,当热解温度高于  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  后,半焦的燃点基本保持不变。

因此神东煤的适宜热解温度应在  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,该温度下制备的半焦无爆炸性,燃烧性能好,可磨性与无烟煤相当,符合高炉喷吹燃料的要求。神东半焦的固定碳含量高,反应性能好,比电阻大,灰分低,石墨化程度低,强度、粒度适宜,也是理想的铁合金还原剂<sup>[19-20]</sup>。

## 2.5 热解焦油性质分析

对热解温度  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  时收集的焦油进行分析,结

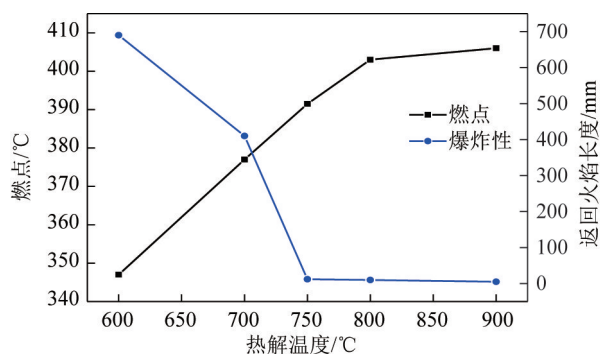


图7 半焦的燃点、爆炸性与热解温度的关系

Fig.7 Relationship between pyrolysis temperature and ignition temperature, explosibility of char

果见表6~8。可知该焦油产品属于典型的中低温煤焦油,焦油水分稍高,灰分低,密度和黏度低;馏程较宽,馏出温度<360℃占比接近50%,比较适宜加氢制备清洁燃料。

表6 热解焦油的基本性质

Table 6 Basic properties of pyrolysis tar

密度 $d_4^{20}$	灰分/ %	水分/ %	游离碳质量分数/ %	黏度(60℃)/ ( $10^{-3}$ Pa·s)
1.086 6	0.36	23.43	4.10	10

表7 热解焦油的馏程分析

Table 7 Analysis of distillation range of pyrolysis tar

馏程	IBP~	170~	210~	230~	300~	>360℃
	170℃	210℃	230℃	300℃	360℃	
占比/%	6.42	12.23	9.25	5.46	13.46	53.18

表8 &lt;360℃馏分的族组成分析

Table 8 Group composition analysis of distillation fraction (&lt;360℃)

族组成	饱和烃	一环芳烃	二环芳烃	三环芳烃	多环及极性物	萘含量	蒽含量
质量分数/%	14.12	12.04	16.38	0.45	57.20	7.56	0.78

### 3 结论

1) 神东煤具有低灰、低硫、低磷、低钾钠含量等优点,焦油产率较高,挥发分产率较高,哈氏可磨性指数和热稳定性中等,比较适合中低温热解加工。

2) 随着热解温度升高,半焦产率逐渐减少,挥发分产率迅速下降,固定碳含量快速增加,碳含量增加,氢、氮、硫和氧含量不同程度地降低。神东半焦的灰、硫和磷含量低,半焦质量较高。随着热解温度提高,半焦的机械强度变差,反应活性和可磨性降

低,比电阻急速下降,半焦比表面较小,苯酚吸附量较低。热解温度大于750℃时,半焦的着火温度高,爆炸性弱。提高热解温度可明显改善半焦性质,对低阶煤提质作用明显。

3) 神东半焦孔径较大,吸附容量较低,吸附性能较差,不适于代替活性炭处理废水、废气等。

4) 神东煤适宜热解温度应在750℃左右,750℃下制备的半焦无爆炸性、燃烧性能和反应活性高、比电阻大、固定碳含量高、灰分低,是理想的高炉喷吹燃料和铁合金还原剂。

5) 750℃热解焦油灰分低,密度和黏度低,馏程较宽,馏出温度<360℃占比接近50%,比较适宜加氢制备清洁燃料。

### 参考文献(References):

- [1] 刘壮,田宜水,胡二峰,等.低阶煤热解影响因素及其工艺技术研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(1):50-59.  
LIU Zhuang, TIAN Yishui, HU Erfeng, et al. Research progress on influencing factors and technology of low-rank coal pyrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 50-59.
- [2] 解强,梁鼎成,何璐,等. TG-DSC 同步联用测定煤热解反应热[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 538-546.  
XIE Qiang, LIANG Dingcheng, HE Lu, et al. Measurement of coal pyrolysis reaction heat by TG-DSC[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 538-546.
- [3] 闫华青,张先炼,许凯,等.压力对热解煤焦结构及其燃烧反应性的影响[J].洁净煤技术,2021,27(4):68-76.  
YAN Huaqing, ZHANG Xianlian, XU Kai, et al. Effect of pressure on char structure and combustion reactivity[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 68-76.
- [4] 王骏,张乾,梁丽彤,等.延长煤显微组分结构与低温热解反应性研究[J/OL].煤炭学报:1-8.[2021-06-09]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.0609.  
WANG Jun, ZHANG Qian, LIANG Litong, et al. The effect of functional characteristics of Yanchang coal micro-components on low-temperature pyrolysis reactivity[J]. Journal of China Coal Society: 1-8. [2021-06-09]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.0609
- [5] 王越,丁华,武琳琳,等.黄陵煤显微组分性质及原位热解实验研究[J].燃料化学学报,2021,49(11):1567-1576.  
WANG Yue, DING Hua, WU Linlin, et al. The properties of macerals in Huangling coal and the in-situ pyrolysis experiment[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(11): 1567-1576.
- [6] 李晓荣,靳鑫,王美君,等.四氢萘对漳毛湖煤热解挥发物反应行为的影响[J].燃料化学学报,2021,49(5):617-625.  
LI Xiaorong, JIN Xin, WANG Meijun, et al. Effect of tetralin on the reaction behavior of volatiles from pyrolysis of Naomaohu coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(5): 617-625.
- [7] 杨赫,谢周伟,尚妍,等.漳毛湖煤热解产物中不同大小芳核的数量分布及变化规律[J].燃料化学学报,2021,49(1):

- 1667-1675.
- YANG He, XIE Zhouwei, SHANG Yan, et al. The distribution and variation of aromatic nuclei in the pyrolysis products of Naomao-hu coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(1):1667-1675.
- [8] 周琦, 张旭, 王岩, 等. 折流内构件移动床中煤在不同停留时间下的热解行为特性[J]. 燃料化学学报, 2021, 49(5):703-711.
- ZHOU Qi, ZHANG Xu, WANG Yan, et al. Pyrolysis behavior of coal in a moving bed with baffled internals under different residence times[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(5):703-711.
- [9] 周琦, 张旭, 白效言, 等. 移动床中内构件对煤热解反应过程调控作用[J]. 化工进展, 2021, 40(3):1334-1343.
- ZHOU Qi, ZHANG Xu, BAI Xiaoyan, et al. Regulation effect of internals in moving bed on coal pyrolysis reaction process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3):1334-1343.
- [10] 徐艳梅, 潘志彦, 胡浩权. 利用拉曼光谱研究大柳塔煤热解焦结构及其燃烧性能[J]. 燃料化学学报, 2021, 49(11):1656-1666.
- XU Yanmei, PAN Zhiyan, HU Haoquan. Study on structure and combustion performance of Daliuta coal pyrolysis char by Raman spectroscopy[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(11):1656-1666.
- [11] 袁野, 李谦, 王智化, 等. 固定床上典型煤种高温裂解特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(6):433-438.
- YUAN Ye, LI Qian, WANG Zhihua, et al. Experimental study on high temperature pyrolysis characteristics of typical coals in a fixed bed[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(6):433-438.
- [12] 李君. 半焦基固体热载体法神东煤热解产物分布的试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1):290-295.
- LI Jun. Experimental study of flash pyrolysis product yield of Shendong long-flame coal with solid heat carrier[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1):290-295.
- [13] 莠亮. 神东煤热解产物分布调节方法[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(6):134-140.
- CHANG Liang. Adjusting method of pyrolysis product distribution of Shendong Coal[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(6):134-140.
- [14] 杨雨濛, 刘建忠, 陈明义, 等. 低阶煤及其热解半焦的超细粉碎特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11):3692-3698.
- YANG Yumeng, LIU Jianzhong, CHEN Mingyi, et al. Super-fine grinding characteristics of low-rank coals and their semi-coke[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11):3692-3698.
- [15] 谭静, 朱川. 神东煤热解特性及半焦用作高炉喷吹适用性分析[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4):65-71.
- TAN Jing, ZHU Chuan. Pyrolytic characteristics of Shendong coal and feasibility analysis of semi-coke used in pulverized coal injection[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4):65-71.
- [16] 高海荣, 王莉萍. 长焰煤热解特性及产物分布[J]. 化工管理, 2021(21):38-39.
- GAO Hairong, WANG Liping. Pyrolysis characteristics and product distribution of long flame coal [J]. Chemical management, 2021(21):38-39.
- [17] 解强, 梁鼎成, 何璐, 等. TG-DSC 同步联用测定煤热解反应热[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2):538-546.
- XIE Qiang, LIANG Dingcheng, HE Lu, et al. Measurement of coal pyrolysis reaction heat by TG-DSC[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2):538-546.
- [18] 中国钢铁工业协会. 炼焦试验用小焦炉技术规范: YBT 4526—2016[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2016.
- [19] 张双全. 煤化学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004:84.
- [20] 曾凡, 胡永平. 矿物加工颗粒学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001:298-301.