

乌拉盖褐煤热解特性及反应动力学参数研究

李兴智,方顺利,姚伟,杨忠灿

(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

摘要:为获得较好的褐煤半焦制备工艺参数,研究了不同制备条件(热解终温、升温速率、原煤粒径、热解气氛)下制得的乌拉盖褐煤半焦的燃烧性能和燃烧动力学参数。结果表明,热解终温对半焦品质的影响最大,热解升温速率、原煤粒径和热解气氛对半焦燃烧特性的影响不显著。热解终温由350℃升至600℃时,反应指数RI由235℃升至292℃,半焦着火性能变差;燃尽指数 C_b 由4.68升至6.15,半焦燃尽性能变差;爆炸指数 K_d 由2.54降至0.46,半焦爆炸倾向性变低;反应活化能由44.4 kJ/mol升至63.4 kJ/mol,半焦燃烧动力学特性变差。热解终温为520℃时制得的半焦反应指数、燃尽指数、爆炸指数和反应活化能分别为265℃,5.34,0.80和53.2 kJ/mol,属于易着火、易燃尽、中等爆炸燃料,燃烧特性良好。

关键词:褐煤;半焦;热解特性;燃烧特性;动力学参数

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)02-0043-06

Study on pyrolysis characteristics and dynamic parameters of Wulagai lignite

Li Xingzhi, Fang Shunli, Yao Wei, Yang Zhongcan

(Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To obtain better process parameters of semi-coke for lignite, the effects of heating rate, temperature, atmosphere and particle size on pyrolysis characteristics and dynamic parameters of Wulagai lignite were investigated. The results show that the final pyrolysis temperature is the main influencing factor, the heating rate, pyrolysis atmosphere and particle size have little influence. When the final pyrolysis temperature increases from 350℃ to 600℃, the rejection index (RI) varies from 235℃ to 292℃, the burnout index (C_b) varies from 4.68 to 6.15, the explosive index (K_d) decreases from 2.54 to 0.46, the activation energy (E) varies from 44.4 kJ/mol to 63.4 kJ/mol. In the above changes, the fire behaviour, burnout performance and explosive tendency of Wulagai lignite semi-coke become worse. The semi-coke which is obtained at 520℃ pyrolysis temperature is easy to burn, burn out and difficult to explode, and the rejection index, the burnout index, the explosive index and the activation energy are 265℃, 5.34, 0.80, 53.2 kJ/mol.

Key words: lignite; semi-coke; pyrolysis characteristics; combustion characteristics; dynamic parameters

0 引言

乌拉盖褐煤属于高水分、高挥发分和低热值煤,这种煤作为动力燃料存在易爆炸、自燃和运输成本高等问题。目前褐煤的利用技术有褐煤气化、褐煤液化和褐煤的中低温热解等,褐煤利用技术中,中低温热解技术是一种重要利用途径^[1-2],热解主要产物半焦可直接作为动力燃料^[3-4]。因此研究乌拉盖

褐煤的低温热解特性对褐煤作为动力燃料具有重要意义。张庆伟等^[5]研究了热解终温和升温速率对半焦工业分析指标、燃烧性能和动力学参数的影响;王健等^[6]研究了热解气氛对低品质生物质废物半焦的燃烧特性影响;刘建忠等^[7]根据热重试验测定的TG-DTG曲线,利用Coats-Redfern积分法计算半焦反应的动力学参数。目前研究主要着重于研究半焦的工业分析指标、燃烧性能和反应动力学参

收稿日期:2016-08-13;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.02.008

基金项目:国家能源应用技术研究及工程示范资助项目(NY20130303);陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2015KTZDGY05-03)

作者简介:李兴智(1988—),男,陕西靖边人,工程师,硕士,从事燃煤特性与锅炉清洁燃烧技术研究。E-mail:lixingzhi@tpri.com.cn

引用格式:李兴智,方顺利,姚伟,等.乌拉盖褐煤热解特性及反应动力学参数研究[J].洁净煤技术,2017,23(2):43-48,55.

Li Xingzhi, Fang Shunli, Yao Wei, et al. Study on pyrolysis characteristics and dynamic parameters of Wulagai lignite[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 43-48, 55.

数^[8-11],以及热解终温和原煤粒径对半焦燃烧性能和反应动力学参数的影响^[12-14]。本文以乌拉盖褐煤为原料,利用实验室管式炉制取半焦,采用反应指数 RI、燃尽指数 C_b 、爆炸指数 K_d 研究不同制备条件(热解终温、原煤粒径、升温速率和热解气氛)对半焦燃烧性能、爆炸倾向性和燃尽性能的影响,以及不同制备条件对燃烧动力学参数的影响,得到乌拉盖褐煤的最佳热解条件,以期为半焦的工业化生产提供理论支持。

1 试验

1.1 试验设备

热解试验采用高温管式炉试验台,集控制系统与炉膛为一体。高温管式炉试验台如图1所示。

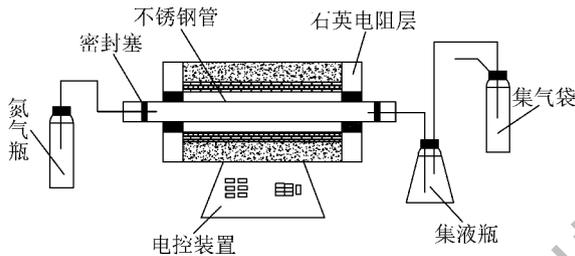


图1 高温管式炉试验台

Fig.1 high-temperature tube furnace

试验台使用过程操作简单,主要包括以下几个步骤:①装填被加热物料。取下不锈钢加热管,取出筒体内一端的隔热棉(另一端的隔热棉不动),从筒外用小铁铲将物料均匀铺到不锈钢管里,装填结束。②旋转加热物料。启动加热,被加热管体转动1~8 r/min,由底座操作面板上的调速器控制管体的转速。③取出物料。加热结束后,停机,取下筒体,取出筒体内一端的隔热棉,用小铁铲取出里面的物料,然后恢复试验台。

1.2 乌拉盖褐煤半焦制备

试验中改变褐煤热解工艺参数(包括热解终温、升温速率、原煤粒径和热解气氛),利用图1试验台制备实验室半焦,通过设定管式炉的升温程序实现对热解终温、升温速率的调整,热解温度达到设定值后,稳定热解100 min。升温前通入 N_2/CO_2 吹扫管式炉,保证管式炉内的无氧环境。褐煤半焦样品制备条件见表1。

1.3 乌拉盖半焦燃烧特性

对制得的半焦进行工业分析、元素分析、孔隙率和热重分析,计算出半焦的反应指数 RI、燃尽指数

C_b 、爆炸指数 K_d 等。

表1 半焦的制备条件

Table 1 Process parameters of semi-coke

样品编号	粒径/mm	终温/°C	升温速率/(°C·min ⁻¹)	气氛
T1	3~6	350	10	N ₂
T2	3~6	400	10	N ₂
T3	3~6	450	10	N ₂
T4	3~6	520	10	N ₂
T5	3~6	600	10	N ₂
T6	3~6	520	15	N ₂
T7	3~6	520	20	N ₂
T8	<1	520	10	N ₂
T9	1~3	520	10	N ₂
T10	6~13	520	10	N ₂
T11	3~6	520	10	CO ₂

1) 反应指数 RI。国外采用氧分析的着火温度来衡量煤点燃的难易程度,定义为反应指数 RI。试验方法是煤样在氧气条件下加热,将煤样的初始反应温度定为反应指数 RI,RI 值越大,说明着火性能越好。

2) 燃尽指数 C_b 。燃尽指数 C_b 反映半焦着火和燃烧稳定性等因素对半焦燃尽性能的影响, C_b 越大燃尽性能越好。通过氧分析测得半焦的反应指数 RI 和后期燃尽率 f ,利用这2个参数可以求得煤的燃尽指数 C_b 。

$$C_b = \begin{cases} 8.0474 \times 10^{-4} \times RI^{1.8151} f^{0.5505}, & RI \leq 350 \text{ °C} \\ 4.2804 \times 10^{-7} \times RI^{2.9383} f^{0.1416}, & RI > 350 \text{ °C} \end{cases} \quad (1)$$

3) 爆炸指数 K_d 。半焦的爆炸特性与燃料特性有关。爆炸指数 K_d 是考虑燃料惰性(燃料中灰分和固定碳)以及燃料活性(可燃挥发分及热值)的综合影响结果。爆炸指数 K_d 按下式计算:

$$K_d = \frac{V_d}{V_{vol,q}} \quad (2)$$

$$V_{vol,q} = \frac{V_{vol} \left(1 + \frac{100 - V_d}{V_d} \right)}{100 + V_{vol} \frac{100 - V_d}{V_d}} \times 100 \quad (3)$$

$$V_{vol} = \frac{1260}{Q_{vol}} \times 100 \quad (4)$$

$$Q_{vol} = \frac{Q_{net,daf} - 7850 \times 4.1816 \times FC_{daf}}{V_{daf}} \quad (5)$$

式中, K_d 为煤粉的爆炸指数; $V_{vol,q}$ 为燃烧所需可燃

基挥发分下限(考虑灰分和固定碳),%; V_{vol} 为所需可燃挥发分下限(不考虑灰分和固定碳时燃烧),%; Q_{vol} 为挥发分的热值,kJ/kg。

1.4 燃烧动力学特性

为反映半焦在燃烧过程的失重特性,半焦热重分析选取失重较为剧烈的阶段进行,对该阶段构建燃烧反应动力学模型^[7]。燃烧反应速度为

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} \exp(-E/RT) \times (1 - \alpha) \quad (6)$$

式中, α 为转化率,%; A 热反应频率因子; β 为升温速率, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$; E 为活化能,kJ/mol; R 为气体常数,8.314 J/(mol·K); T 为热力学温度,K。

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_1} \quad (7)$$

式中, m_0 、 m_1 分别表示试验开始和结束时试验样品的质量,g; m 为 t 时刻未参加反应的样品质量,g。

由 Coats-Redfern 一阶近似,对式(6)整理可得

$$\ln \left[\frac{-\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (8)$$

令 $Y = \ln \left[\frac{-\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right]$, $X = \frac{1}{T}$, 对 Y 和 X 利用最小二次进行线性回归,上式可简化为

$$Y = aX + b \quad (9)$$

其中,通常 E 的数值远大于 T ,所以 $1 - \frac{2RT}{E} \approx 1$,

$$a = -\frac{E}{R}, b = \ln \frac{AR}{\beta E}。$$

根据拟合方程式截距和斜率即可得到试样的燃烧动力学参数

$$E = -a \cdot R \quad (10)$$

2 结果分析与讨论

2.1 热解终温对半焦燃烧特性的影响

不同热解终温半焦的性质见表2。由表2可以看出,随着热解温度的提高,原煤水分和挥发分进一步析出,半焦灰分增加,孔隙率升高。半焦固定碳逐渐升高,半焦发热量呈升高趋势。热解终温达到520 $^{\circ}\text{C}$ 以后,半焦发热量基本不变。

不同热解终温下乌拉盖褐煤半焦的反应指数RI、燃尽指数 C_b 和爆炸指数 K_d 如图2所示。

表2 不同热解终温半焦的性质

Table 2 Property of semi-coke in different pyrolysis temperature

热解终温/ $^{\circ}\text{C}$	$M_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$w(C_{ad})/\%$	$Q_{net,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	孔隙率/ $\%$
350	1.13	33.70	13.03	52.14	66.42	25.51	34
400	2.66	25.45	12.89	59.00	67.74	25.53	69
450	1.71	21.61	14.57	62.11	68.41	25.81	70
520	0.53	15.84	14.99	68.64	73.83	28.05	74
600	0.29	10.82	15.43	73.46	75.08	28.30	78

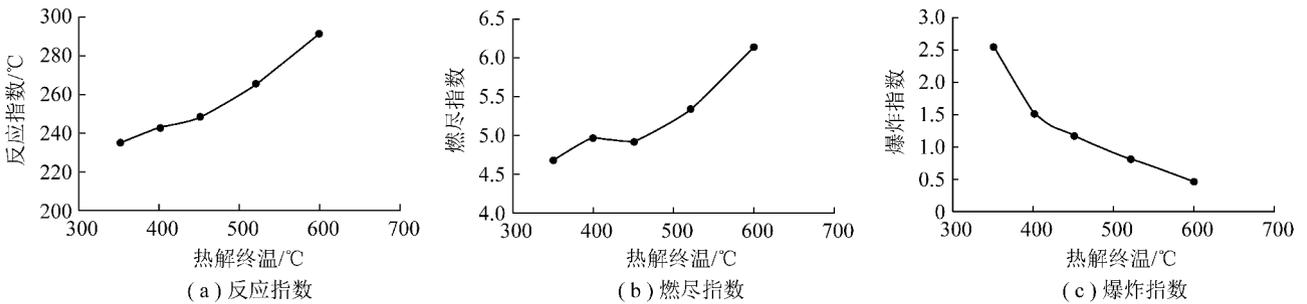


图2 热解终温对半焦燃烧特性的影响

Fig. 2 Influence of final pyrolysis temperature on the combustion characteristics of semi-coke

由图2可知,随着热解终温的升高,反应指数RI、燃尽指数 C_b 升高,爆炸指数 K_d 降低。这表明热解温度升高后,半焦的着火性能和燃尽性能均变差,

爆炸倾向变低,主要原因为:①煤的挥发分在较低温度就开始析出着火,然后固定碳着火。因此,挥发分对煤的着火性能有重要影响,煤的挥发分越高,着

火性能越好。随着热解温度不断升高,半焦的挥发分不断析出,因此半焦的着火性能变差^[8]。②煤在中低温热解过程中,会在煤颗粒表面形成灰壳,一方面灰壳会阻碍煤中可燃质与氧分子接触,降低了可燃质周围的氧浓度,另一方面会阻碍未燃尽碳粒与周围环境的传热,不利于半焦的着火燃烧和燃尽^[8]。因此,灰分对煤的着火燃烧和燃尽有重要影

响,煤的灰分越高,燃烧和燃尽性能越差。

2.2 原煤粒径对半焦燃烧特性的影响

不同原煤粒径半焦的性质见表3。由表3可以看出,520℃热解终温下,随着原煤粒径的增加,半焦的挥发分析出减少,灰分降低,孔隙率、固定碳、热值升高,说明半焦常规煤质特性受粒径变化的影响较小。

表3 不同原煤粒径半焦的性质

Table 3 Property of semi-coke in different different particle size

原煤粒径/mm	$M_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$w(C_{ad})/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	孔隙率/%
<1	0.40	14.99	18.39	66.56	70.83	26.81	16.00
1~3	0.80	15.38	16.89	67.04	71.55	27.11	73.00
3~6	0.81	15.84	14.99	68.64	73.83	28.05	74.00
6~13	0.71	16.56	13.41	69.56	74.68	28.21	77.00

原煤粒径对乌拉盖半焦燃烧特性的影响如图3所示。由图3可知,原煤粒径增加,制得的半焦反应指数RI先升高后降低,燃尽指数 C_b 小幅降低,爆炸指数 K_d 略有升高。表明原煤粒径增加后,由于挥发分析出减少,半焦的着火性能、燃尽性能变好,但制得的半焦容易发生爆炸。主要原因是:原煤颗粒增大,加热煤粒的时间较长,煤粒内部热量传递影响热

解,另外,煤的热解产物析出的阻力增大,挥发分析出减少。

2.3 升温速率对半焦燃烧特性的影响

不同升温速率半焦的性质见表4。由表4可知,热解终温为520℃,升温速率在10~20℃/min时,半焦挥发分、灰分、热值和孔隙率变化幅度很小,受灰分影响,固定碳先升高后降低,但总体变化幅度不大。

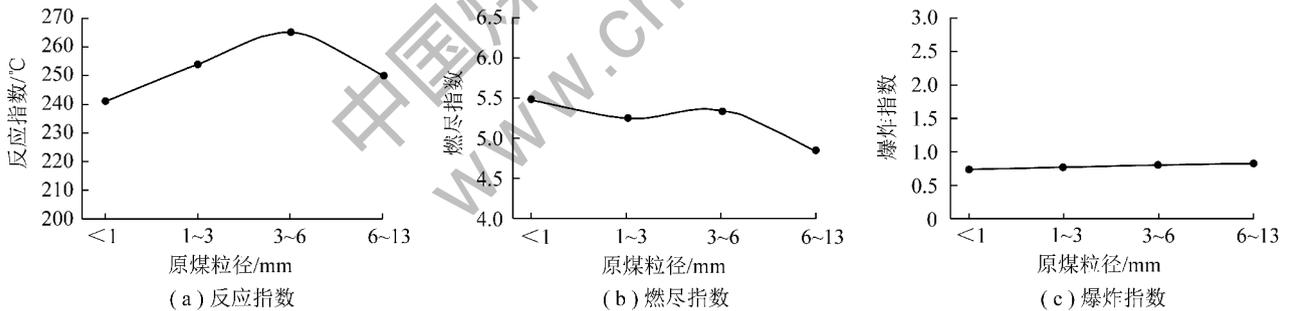


图3 原煤粒径对乌拉盖半焦燃烧特性的影响

Fig. 3 Influence of final pyrolysis temperature on the combustion characteristics of semi-coke

表4 不同升温速率半焦的性质

Table 4 Property of semi-coke in different different heating rate

升温速率/(℃·min ⁻¹)	$M_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$w(C_{ad})/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	孔隙率/%
10	0.53	15.84	14.99	68.64	73.83	28.05	74.00
15	0.86	16.06	14.15	68.93	74.10	28.06	76.00
20	1.24	15.22	15.56	67.99	72.13	27.21	78.00

升温速率对乌拉盖半焦燃烧特性的影响如图4所示。可知,随着升温速率的升高,半焦的反应指数RI、燃尽指数 C_b 、爆炸指数 K_d 均小幅降低,表明升温速率增大后,半焦的着火性能、燃尽性能均变好,

爆炸倾向略有降低。主要原因是:半焦热解速率提高,气体和挥发分析出速率升高,气体和挥发分的快速逸出使煤焦的孔隙增多,孔壁变薄,从而使热解焦具有更丰富的微孔结构,提高了半焦的反应活性。

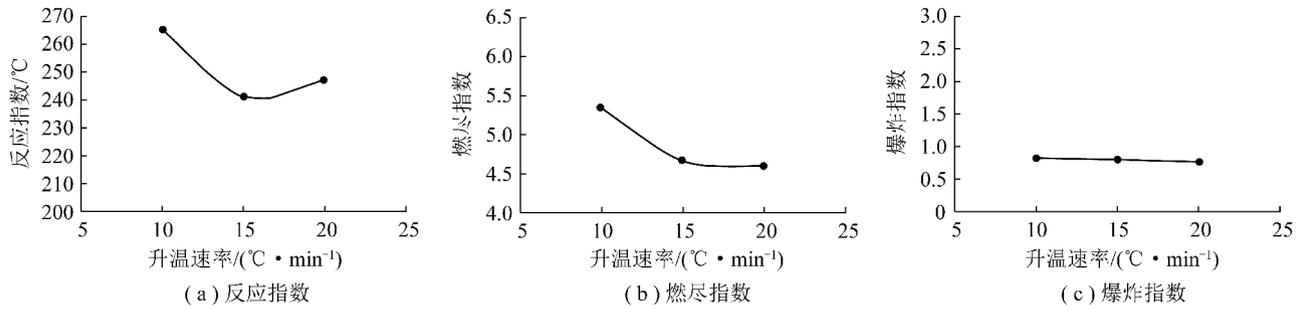


图4 升温速率对乌拉盖半焦燃烧特性的影响

Fig 4 Influence of final pyrolysis temperature on the combustion characteristics of semi-coke

2.4 热解气氛对半焦燃烧特性的影响

热解产物的组成和分布依赖于反应气氛。热解气氛主要有惰性气氛、氧化性气氛、还原性气氛。试验以 N₂ 和 CO₂ 两种气体为热解气氛进行了乌拉盖

褐煤低温热解试验。不同热解气氛下半焦的性质见表5。由表5可以看出,热解终温为 520 °C,在 2 种气氛下制得的半焦挥发分、灰分、固定碳和孔隙率变化很小。

表5 不同热解气氛下半焦的性质

Table 5 Property of semi-coke in different different pyrolysis atmosphere

热解气氛	M _{ad} /%	V _{ad} /%	A _{ad} /%	FC _{ad} /%	w(C _{ad})/%	Q _{net,ar} /(MJ · kg ⁻¹)	孔隙率/%
N ₂	0.53	15.84	14.99	68.64	73.83	28.05	74.00
CO ₂	0.54	15.60	16.31	67.55	72.70	27.70	71.00

热解气氛对乌拉盖半焦燃烧特性的影响如图5所示。已有研究表明,N₂ 基本不参与煤的热解反应^[11]。由图5可知,用 CO₂ 取代 N₂ 作为热载气后,

2 种气氛下制得的半焦反应指数 RI、燃尽指数 C_b 和爆炸指数 K_d 变化很小。说明 600 °C 前,CO₂ 对半焦燃烧特性基本未产生影响。

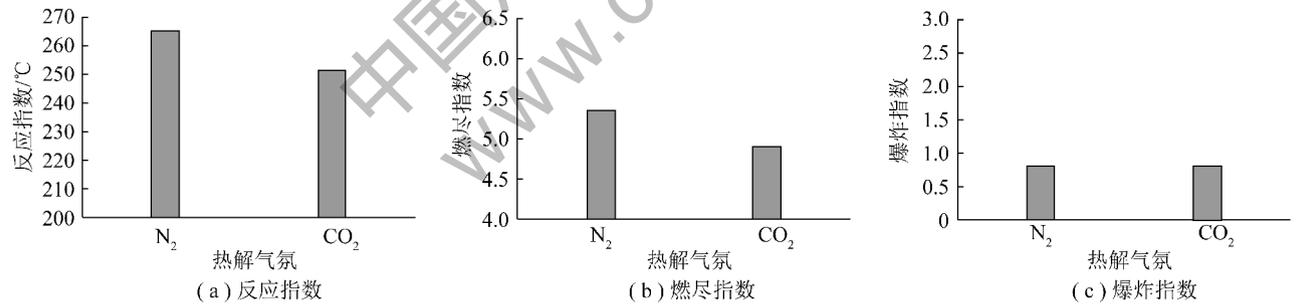


图5 热解气氛对乌拉盖半焦燃烧特性的影响

Fig. 5 Influence of pyrolysis atmosphere on the combustion characteristics of semi-coke

3 动力学参数分析

半焦的活化能 E 是描述半焦反应动力学特性的重要参数,可以反映化学反应进行的难易程度。活化能 E 的大小反映了普通分子变为活化分子所需能量,E 越大,普通分子变为活化分子所需能量越多,化学反应越难进行。热解条件对乌拉盖煤活化能的影响如图6所示。

由图6(a)可知,随着热解终温的升高,活化能由 350 °C 的 44.4 kJ/mol 升至 600 °C 的 63.4

kJ/mol,半焦燃烧活化能增加。随着热解终温的升高,高反应活性的挥发分逸出后,残留在半焦中的固定碳反应活性相对较低,因此随着热解终温的升高,半焦的反应活性下降。热解终温高于 520 °C 后,半焦的活化能迅速增加,对半焦燃烧较为不利。由图6(b)可知,随着原煤粒径增加,半焦的挥发分残留率越高,半焦的着火性能变好,半焦的活化能降低。由图6(c)可知,反应升温速率本身对热解过程没有太大影响,但由于固定了保温时间,所以较低升温速率使得整个反应的停留时间更长,挥发分更低,反应

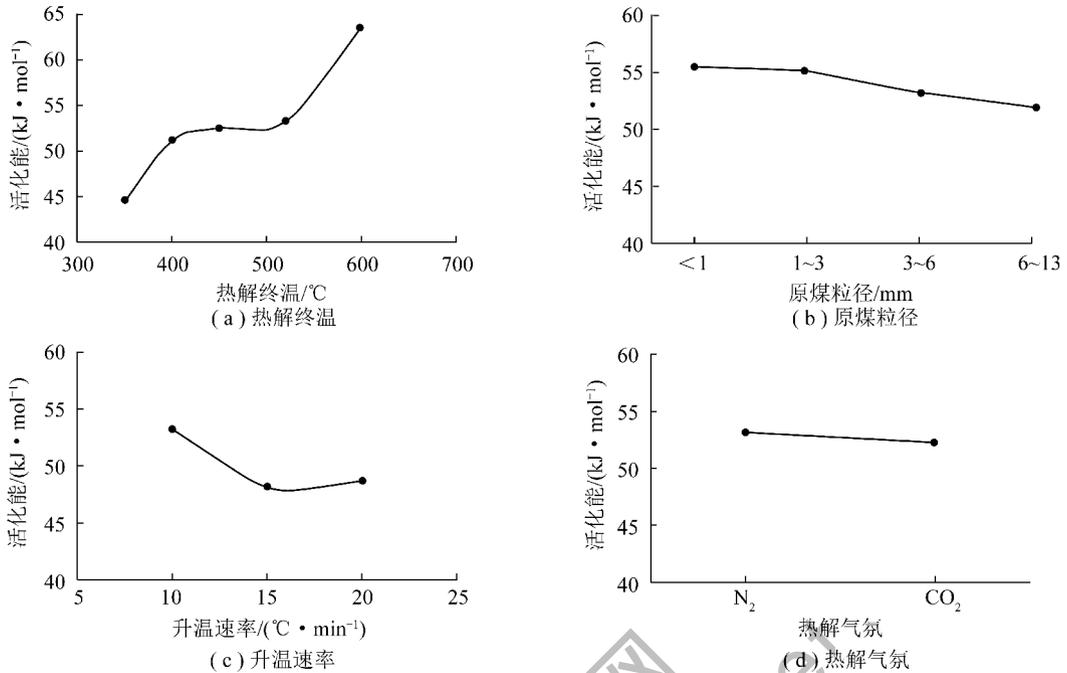


图6 热解条件对乌拉盖煤活化能的影响

Fig. 6 The influence of process parameters on activation energy

活化能提高,这使得升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的活化能高于升温速率 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的活化能。由图 6(d)可知,在 N_2 和 CO_2 两种气氛下制得的半焦活化能基本相同,说明 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前, CO_2 并未与水蒸气及半焦中固定碳发生反应,对煤的热解基本不产生影响,在 2 种气氛下制得的半焦性质差别很小。

4 结 论

1) 对褐煤进行低温热解得到褐煤半焦,制得的半焦 $V_{\text{ad}} = 15.84\%$, $Q_{\text{net,ar}} = 28.05\text{ MJ/kg}$,克服了褐煤易自燃、低热值,储存、运输困难等缺点,提高了褐煤的可利用性,并实现煤资源的经济利用。

2) 热解终温对半焦燃烧特性和燃烧动力学参数影响最大,随着热解终温升高,半焦的着火性能、燃尽性能和燃烧动力学特性均变差,爆炸倾向变低,推荐热解终温为 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$,制得的半焦属于易着火、易燃尽、中等爆炸,燃烧特性良好。

3) 受传热传质影响,原煤粒径增大,制得的半焦着火性能、燃尽性能和燃烧动力学特性均变好,爆炸倾向变高。随着升温速率的增大,半焦的着火燃烧性能、燃尽性能和反应动力学特性均变好,爆炸倾向变高。热解温度低于 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, CO_2 对褐煤热解和半焦活性基本不产生影响,可以用 CO_2 代替 N_2 作为载气。

参考文献 (References):

- [1] 孟祥嵩,贾相如,张晓龙. 褐煤半焦燃烧的研究现状与发展[J]. 煤炭技术,2014,33(9):258-260.
Meng Xiangsong, Jia Xiangru, Zhang Xiaolong. Research status and prospect of combustion characteristic of lignite char[J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 258-260.
- [2] 刘典福,魏小林,盛宏至. 半焦燃烧特性的热重试验研究[J]. 工程热物理学报,2007,28(2):229-232.
Liu Dianfu, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi. Thermo gravimetric experimental study on combustion characteristics of semicoke[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 229-232.
- [3] 白宗庆,李文,尉迟唯,等. 褐煤在合成气气氛下的低温热解及半焦燃烧特性[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(5):726-732.
Bai Zongqing, Li Wen, Yuchi Wei, et al. Low temperature pyrolysis of lignite in the presence of syngas and combustion characteristics of derived char[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 726-732.
- [4] 于广锁,祝庆瑞,许慎启,等. 煤及其拔头半焦的燃烧反应特性研究[J]. 燃料化学学报,2012,40(5):513-518.
Yu Guangsuo, Zhu Qingrui, Xu Shenqi, et al. Combustion characteristics of coal and coal char from coal topping process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(5): 513-518.
- [5] 张庆伟,申宝宏,曲思建,等. 内蒙古褐煤热解半焦燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术,2014,20(6):46-51.
Zhang Qingwei, Shen Baohong, Qu Sijian, et al. Combustion characteristics of Inner Mongolia lignite semi-coke[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 46-51.

(下转第55页)

- Chemistry Process Design and Development, 1967, 6(2): 166-173.
- [4] Brunson R J. Kinetics of donor-vehicle coal liquefaction in a flow reactor[J]. Fuel, 1979, 58(3): 203-207.
- [5] Han K W, Dixit V B, Wen C Y. Analysis and scale-up consideration of bituminous coal liquefaction rate processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1978, 17(1): 16-21.
- [6] 张德祥. 年轻煤在石油重油中加氢液化的研究: 煤液化动力学初探[J]. 淮南矿业学院学报, 1990, 10(1): 113-122.
Zhang Dexiang. Liquefaction of low-rank coals by hydrogenation in heavy oils of petroleum-preliminary investigations into coal liquefaction kinetics[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1990, 10(1): 113-122.
- [7] Gertenbach D D, Baldwin R M, Bain R L. Modeling of bench-scale coal liquefaction systems [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1982, 21(3): 490-500.
- [8] Xu B, Kandiyoti R. Two-stage kinetic model of primary coal liquefaction[J]. Energy & Fuels, 1996, 10(5): 1115-1127.
- [9] Kidoguchi A, Itoh H, Hiraide M, et al. Simulation of initial stage reactions in the direct coal liquefaction of sub-bituminous coals [J]. Fuel, 2001, 80(9): 1325-1331.
- [10] Onozaki M, Namiki Y, Ishibashi H, et al. A process simulation of the NEDOL coal liquefaction process[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 64(1/2/3): 253-269.
- [11] 王勇. 煤炭直接液化反应动力学研究进展[J]. 煤炭转化, 2006, 29(4): 84-88.
Wang Yong. Progress of research in the reactive kinetics of direct coal liquefaction[J]. Coal Conversion, 2006, 29(4): 84-88.
- [12] Ferrance J P, Holder G D. Development of a general model for coal liquefaction[J]. Preprints Paper American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 1996, 41(3): 941-945.
- [13] Ferrance J, Warzinski R P. A liquefaction kinetic research needs assessment[J]. Preprints Paper American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 1996, 41(3): 928-934.
- [14] Comolli A G, Lee T, Propper G A, et al. The Shenhua coal direct liquefaction plant[J]. Fuel Processing Technology, 1999, 59(2): 207-215.
- [15] Itoh H, Hiraide M, Akira K, et al. Simulator for coal liquefaction based on the NEDOL process [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40(1): 210-217.
- [16] Wang S, Wang K, Huang H, et al. Coal liquefaction kinetics[J]. Preprints Paper American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 1996, 41(3): 935-940.
- [17] Huang H, Wang K, Wang S, et al. Kinetics of coal liquefaction at very short reaction times[J]. Energy & Fuels, 1996, 10(3): 641-648.
- [18] Vassallo A M, Wilson M A, Attalla M I. Promotion of coal liquefaction by iodomethane[J]. Energy & Fuels, 2002, 2(4): 539-547.
- [19] Attalla M I, Wilson M A, Quezada R A, et al. Promotion of coal liquefaction by iodomethane. 2: Reaction of coal model compounds with iodomethane at coal liquefaction temperatures[J]. Energy & Fuels, 1989, 3(1): 59-64.
- [20] Shah Y T. Reaction engineering in direct coal liquefaction[M]. London: Addison-Wesley, 1981.
- [21] Ikeda K, Sakawaki K, Nogami Y, et al. Kinetic evaluation of progress in coal liquefaction in the 1 t/d PSU for the NEDOL process [J]. Fuel, 2000, 79(3): 373-378.
- [22] Petrakis L, Grandy D W. Free radicals in coals and coal conversion. 2: Effect of liquefaction processing conditions on the formation and quenching of coal free radicals[J]. Fuel, 1980, 59(4): 227-232.
-
- (上接第 48 页)
- [6] 王健, 张守玉, 彭定茂, 等. 制备条件对低品质生物质半焦燃烧特性的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(11): 1950-1956.
Wang Jian, Zhang Shouyu, Peng Dingmao, et al. Effect of the pyrolysis conditions on combustion characteristics of low-quality biomass char[J]. Acta Energetica Sinica, 2013, 34(11): 1950-1956.
- [7] 刘建忠, 刘明强, 赵卫东, 等. 褐煤半焦燃烧特性的热重试验研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 86-92.
Liu Jianzhong, Liu Mingqiang, Zhao Weidong, et al. Thermogravimetric study on combustion characteristics of lignite semicoke [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 86-92.
- [8] Zhang D K, Wall T F, Tate A G. The reactivity of pulverized coal char particles: Experiments using ignition, burnout and DTG techniques and partly burnt chars [J]. Fuel, 1992, 71(11): 1247-1253.
- [9] Tsai C Y, Scaroni A W. Reactivity of bituminous coal chars during the initial stage of pulverized coal combustion [J]. Fuel, 1987, 66(10): 1400-1406.
- [10] Trikkel A, Kuusik R, Martins A, et al. Utilization of Estonian oil shale semicoke [J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(8): 756-763.
- [11] 段伦博, 赵长遂, 李英杰. 不同热解气氛煤焦结构及燃烧反应性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 988-991.
Duan Lunbo, Zhao Changsui, Li Yingjie. Structure and combustion reactivity of coal char pyrolyzed in different atmosphere [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(5): 988-991.
- [13] 余学海, 廖海燕, 詹仲福, 等. 印尼高水分褐煤干燥特性研究[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(2): 39-42.
Yu Xuehai, Liao Haiyan, Zhan Zhongfu, et al. Research on drying of Indonesia's high moisture lignite [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(2): 39-42.
- [14] 周静, 何晶晶, 于遵宏. 用热失重仪研究煤快速热解[J]. 煤炭转化, 2004, 27(2): 30-36.
Zhou Jing, He Pinjing, Yu Zunhong. Tga behaviour of coals' fast pyrolysis [J]. Coal Conversion, 2004, 27(2): 30-36.