

煤粉压力燃烧特性及动力学分析

左启伟^{1,2}, 苍大强^{1,2}, 赵军³, 杨静波^{1,3}, 安霞³

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083; 3. 唐山钢铁集团有限责任公司技术中心, 河北唐山 063016)

摘要:利用加压热重分析天平,采用非等温燃烧方法对国内某钢铁厂高炉典型喷吹煤粉的燃烧特性及反应动力学参数进行了实验研究。研究了在 0.1, 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 MPa 压力等级下试样煤粉的着火温度、最大燃烧速率温度、燃尽温度、综合燃烧特性指数(S)、最大燃烧速率等燃烧特征参数,计算了煤粉燃烧过程的活化能(E)和指前因子(A)。结果表明,北区煤粉在压力等级由 0.1 MPa 升至 4.1 MPa 的燃烧过程中,着火点温度最多下降了 85.7 K,失重峰值温度最多提前了 249.3 K,燃尽温度最多下降了 375 K,最大燃烧速率最多提升了 10 倍,燃烧特性指数最大为常压下的 33.6 倍;两段热解活化能和指前因子的对数值之间存在动力学补偿效应;煤粉的反应控制条件及燃烧方式转变的临界压力为 3.1 MPa。

关键词:炼铁;煤粉;压力热重分析;燃烧;动力学参数;临界压力

中图分类号:TF536.1 **文献标志码:**A

Combustion characteristics and kinetic analysis of pulverized coal under different pressure grades

ZUO Qiwei^{1,2}, CANG Daqiang^{1,2}, ZHAO Jun³, YANG Jingbo^{1,3}, AN Xia³

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, Beijing 100083, China; 3. Technology Center, Tangshan Iron and Steel Company Limited, Tangshan, Hebei 063016, China)

Abstract: By using thermo gravimetric balance, experimental research on combustion characteristics and dynamics parameters of the typical coal injection from some domestic steelworks are conducted with non-isothermal method. The combustion characteristic parameters of the sample pulverized coal such as ignition temperature, peak temperature at maximum weight loss rate, burnout temperature, general burn exponent(S), and maximum combustion rate are studied under pressure grades of 0.1, 1.1, 2.1, 3.1 and 4.1 MPa, the activation energy (E) and pre-exponential factor in the combustion process are calculated. The results show that when the pressure increases from 0.1 to 4.1 MPa, ignition temperature decreases by 85.7 K at most, peak temperature at maximum weight loss rate decreases by 249.3 K at most, burnout temperature decreases by 375 K at most, maximum weight loss rate increases by 10 times, and S increases by 33.6 times at most. It is also shown that there exists a kinetic complementation between E and ln A from the view point of dynamics, and the critical pressure of pulverized coal reac-

收稿日期:2015-04-16;修回日期:2015-06-12;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51034008)

作者简介:左启伟(1980—),男,河北唐山人,博士研究生,主要从事煤粉燃烧方面的研究。

通讯作者:苍大强教授。E-mail:cangdaqiang@metall.ustb.edu.cn

左启伟,苍大强,赵军,等.煤粉压力燃烧特性及动力学分析[J].河北科技大学学报,2016,37(1):88-95.

ZUO Qiwei, CANG Daqiang, ZHAO Jun, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of pulverized coal under different pressure grades[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(1): 88-95.

tion control requirement and combustion mode transform is 3.1 MPa for the pulverized coal.

Keywords: iron making; pulverized coal; pressure thermo gravimetric analysis; combustion; kinetics parameters; critical pressure

煤粉在直吹管内被热风加速到 100~200 m/s,在高炉的回旋区内停留的时间只有十几个毫秒。因此,限制煤粉喷吹量提升的重要因素之一是煤粉在风口前的燃烧速率太低^[1-3],大量未燃的煤粉随气流进入到高炉渣中,导致煤粉利用率降低,煤焦置换比减小,引起炉况不顺,制约高炉的正常生产^[4-5]。压力燃烧可以提高煤粉在高炉回旋区的燃烧速率,是改良煤粉燃烧状况的重要途径。

实验室中测定煤粉燃烧特性的方法有较多,其中热天平方法(即热重法)的应用最为广泛^[6-9]。王贤华等^[10]研究了神府烟煤的热解特性及动力学分析,王春波等^[11]研究了烟煤压力下煤粉燃烧灰的矿相演变。

本文采用热分析方法^[12],模拟了北区煤粉在不同压力等级下的燃烧过程,对燃烧动力学参数进行分析,对活化能(E)和指前因子(A)的对数值进行线性拟合,为煤粉在有压力的高炉风口燃烧提供真实可靠的实验数据。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验用的煤粉来自中国某钢铁企业北区高炉喷煤用煤粉,其工业分析见表 1,元素分析和弹筒发热值如表 2 所示,分析方法依照 GB/T 212—2001,GB/T 214—2001 进行。

表 1 北区煤粉工业分析
Tab.1 Ultimate analysis of Beiqu pulverized coal

煤 种	工业分析			
	$w(\text{固定碳}/\text{FC}_{\text{ad}})$	$w(\text{灰分}/\text{A}_{\text{ad}})$	$w(\text{挥发分}/\text{V}_{\text{ad}})$	$w(\text{水分}/\text{M}_{\text{ad}})$
北区煤粉	65.22	9.77	21.53	3.48

注:表中数据均为空干基。

表 2 北区煤粉元素分析及弹筒发热值
Tab.2 Proximate analysis and calorific value of Beiqu pulverized coal

煤 种	元素分析					弹筒发热值/ (MJ · kg ⁻¹)
	$w(\text{C}_{\text{ad}})/\%$	$w(\text{H}_{\text{ad}})/\%$	$w(\text{O}_{\text{ad}})/\%$	$w(\text{N}_{\text{ad}})/\%$	$w(\text{S}_{\text{ad}})/\%$	
北区煤粉	74.37	3.64	5.35	1.16	0.36	27.1

1.2 实验设备及方法

煤粉燃烧设备为北京恒久科学仪器厂生产的型号为 TFT 的压力热天平,整套该设备的组成系统包括测试天平、充气系统和温制控系统、气氛压力维持阀、自动记录采集系统等。

将煤粉在 105 °C 下干燥 2 h,压力分别设定为 0.1,1.1,2.1,3.1,4.1 MPa 5 个等级。然后将 10.0 mg 左右煤粉试样放入差热天平的坩埚内,尽量保持每次煤粉的加入量相同,一般装入量为额定容积的 2/3,材质为氧化铝。

向差热天平通入适量的空气打压,并以 10 °C/min 的升温速率升至 1 000 °C,加热过程维持燃烧氛围的压力为设定压力,北区煤粉燃烧完全。在实验煤粉燃烧过程中,系统动态采集数据,并将数据转化为可视图像。

1.3 北区煤粉燃烧性评价指标

燃烧特性指数(S)可以用来考察煤粉的燃烧状况^[13], S 的数值越大,表明北区煤粉的燃烧特性越好。

$$S = \frac{(d\omega/dt)_{\max} (d\omega/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_f}, \quad (1)$$

式(1)中, $(dw/dt)_{\max}$ 为北区煤粉的最大燃烧速率, %/min; $(dw/dt)_{\text{mean}}$ 为北区煤粉的平均燃烧速率, %/min; T_i 为北区煤粉的着火温度, K; T_f 为北区煤粉的燃尽温度, K。

北区煤粉的着火温度的确定方式可以用 TG-DTG法确定^[14], 具体方法如图 1 所示。

在 DTG 曲线最大值处作温度轴的垂线, 交北区煤粉热重曲线于 A 点, 通过 A 点作 TG 曲线的延长切线, 交煤粉失重为 0(初始点)的水平直线于一点, C 点所对应的水平轴温度 T_i 点就是北区煤粉的着火温度, 燃尽温度 T_f 定义为北区煤粉质量变化率为 98% 且稳定时的温度, 即图中 E 点, 也是 F 点对应的失重温度, 燃烧时间定义为从开始着火温度到质量稳定温度所经历的时间。

2 结果与讨论

2.1 煤粉在压力下的燃烧过程分析

依据北区煤粉燃烧实验所得到的数据绘制图像, 如图 2—图 7 所示。由不同压力等级下的热重曲线和微分热重曲线(见图 1)可以看出, 煤粉的燃烧过程受压力影响是显著的。在压力等级不断升高的情况下, 煤粉的燃烧速率也提高, 在压力为 3.1 MPa 时达到最大, 随后在增加压力的条件下燃烧反而滞后, 燃烧曲线的形状也有明显的改变。从 DTG 曲线可以看出, 失重的最大速率向低温区域转移, 失重峰形状由平滑宽阔向陡峭变化, 表明煤粉的燃烧特性由平缓向急速燃烧方向发展。

由图 2 可以看出, 随着燃烧环境压力的升高, 失重速率加快, 在压力达到 3.1 MPa 时燃烧特性发生改变, 如果继续提高压力等级, 失重速率呈下降趋势。学者王贤华等^[10]认为, 在系统压力小于 3 MPa 的情况下, 随着压力的升高, 煤粉颗粒在热解之前首先是膨胀的, 并且随着压力等级的升高, 膨胀度有所加大, 此种情况改善了煤颗粒内部的孔洞结构, 从而促进了有机官能团在低温下的裂解。当系统压力超过 3 MPa 时, 随着压力等级的进一步升高, 高压状态不利于神府煤的热解行为移向高温, 另一特点是最大失重速率显著降低, 其原因为系统压力过高不利于挥发分的析出和键断裂。王春波等^[11]认为煤粉常压时的非均相着火逐渐转变为均相着火, 当压力升高到 3 MPa 开始再次向非均相着火过渡, 并在 5 MPa 时完全转变成非均相着火。

经过实验验证及理论分析, 并且对燃烧过程中煤灰的微观形貌分析, 认为燃烧特性改变是两者的综合因素的结果, 在前期燃烧侧重于结构变化, 而后期燃烧则是燃烧状态为主要控制因素。

2.2 燃烧特性分析

在北区煤粉的压力燃烧过程中, 煤粉挥发分析出快慢和多少影响着火燃烧过程。在北区煤粉压力燃烧过程实验中显著影响挥发分析出的主要特征参数有: 1) 开始燃烧温度 T_i , K; 2) 最大燃烧速率 $(dw/dt)_{\max}$, %/min; 该数值越大, 表明燃烧过程越剧烈; 3) 失重峰值温度 T , K; 该数值越小, 表明燃烧高峰向低温移动, 容易燃烧, 着火温度降低^[15-16]。煤粉燃烧后期表征在热重曲线上就是质量不再变化, 曲线趋于平直, 失重恒定且为质量的 2% 时对应的温度为燃尽温度, 用 T_f 来表示。

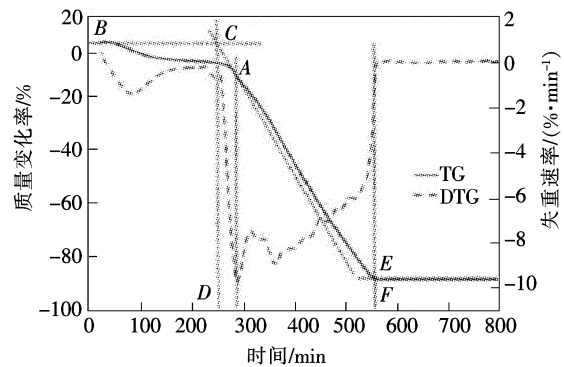


图 1 着火温度与燃尽温度示意图

Fig. 1 Sketch diagram of ignition temperature and burn-out temperature

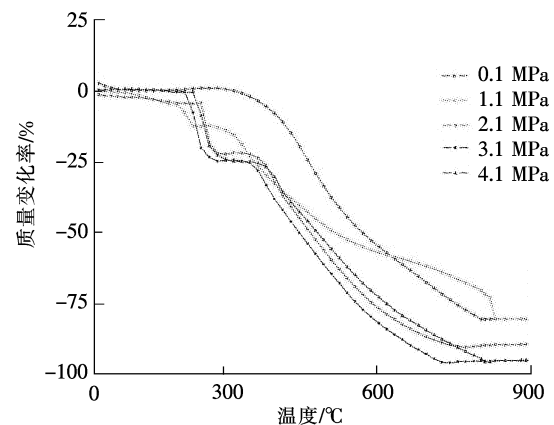


图 2 北区煤粉压力热重曲线

Fig. 2 TG curves of Beiqu pulverized coal

2.2.1 北区煤粉着火温度和燃烧特性分析

着火特性的重要特征参数之一是着火温度,该参数可以表征北区煤粉着火的难易程度。在本实验中采用热重曲线法来确定着火温度,并以微分热重曲线加以校核,虽稍有差异,其影响基本可忽略。

结果如表 3 所示,当燃烧氛围的气压由常压 0.1 MPa 分别升至 1.1,2.1,3.1,4.1 MPa 时,北区煤粉的着火温度分别下降了 58.6,73.3,80.8,85.7 K。

表 3 煤粉压力等级燃烧综合燃烧特性指数

Tab.3 Kinetics parameters of samples under different pressure grade

压力/MPa	T_i /K	T /K	$(dw/dt)_{max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$(dw/dt)_{mean}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	T_f /K	$S \times 10^8 / ((\% \cdot \text{min}^{-1})^2 \cdot \text{K}^{-3})$
0.1	558.2	723.2	3.25	1.05	1 023	1.07
1.1	499.6	502.21	12.5	1.23	873	7.06
2.1	484.9	487.7	20.2	1.16	723	13.8
3.1	477.4	479.3	27.5	1.42	673	25.5
4.1	472.5	473.9	32.5	1.60	648	35.9

注: T_i 为开始燃烧温度; T 为 DTG 曲线峰值对应的失重峰值温度; $(dw/dt)_{max}$ 为最大燃烧速率; $(dw/dt)_{mean}$ 为平均燃烧速率; T_f 为燃尽温度。

从图 3—图 7 的微分热重曲线可以看出,随着压力的增加,失重峰值温度提前,4.1 MPa 与 0.1 MPa 相比,温度提前了 249.3 K,效果显著。对比失重峰的形状可以看出,失重峰更加陡直,表明反应更加集中剧烈。

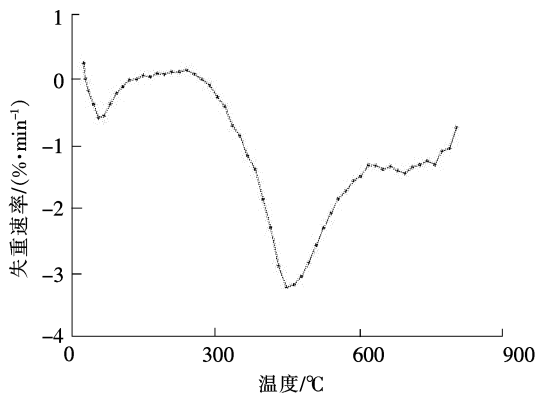


图 3 0.1 MPa 时的 DTG 曲线

Fig.3 DTG curve under pressure of 0.1 MPa

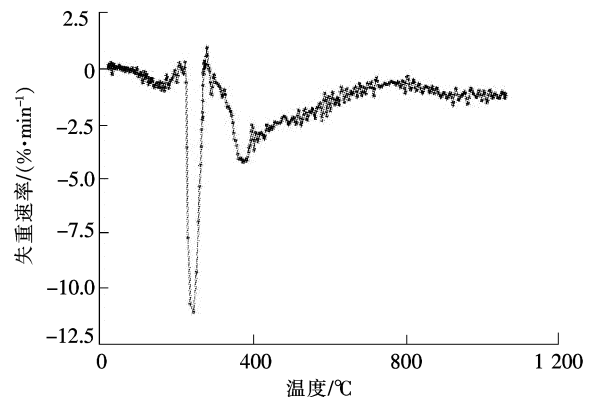


图 4 1.1 MPa 时的 DTG 曲线

Fig.4 DTG curve under pressure of 1.1 MPa

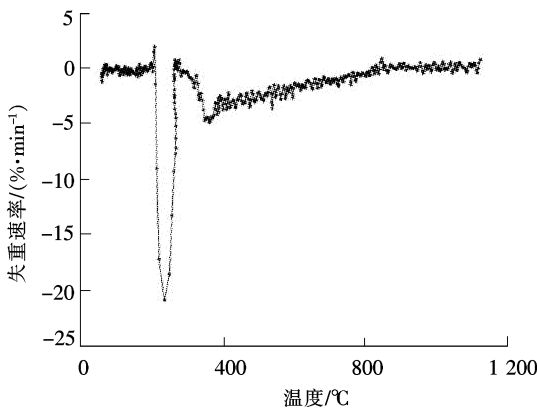


图 5 2.1 MPa 时的 DTG 曲线

Fig.5 DTG curve under pressure of 2.1 MPa

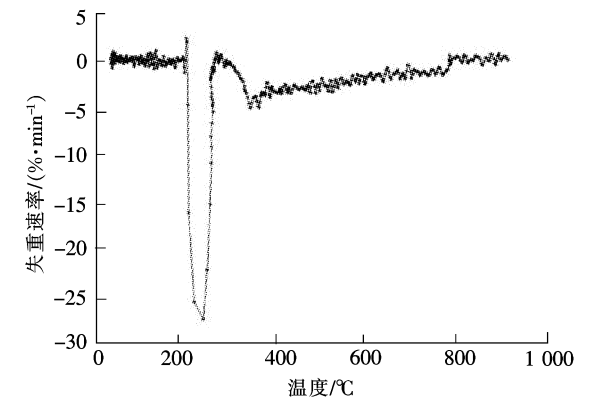


图 6 3.1 MPa 时的 DTG 曲线

Fig.6 DTG curve under pressure of 3.1 MPa

2.2.2 燃烧速率和综合燃烧特性指数分析

从表4中可以看出,北区煤粉的最大燃烧速率受压力影响明显,当压力由常压0.1 MPa分别升至1.1, 2.1, 3.1, 4.1 MPa时,北区煤粉的最大燃烧速率由3.25 %/min升高为12.5, 20.2, 27.5, 32.5 %/min,最多升至原来的10倍,平均燃烧速率也有提高,但不如最大燃烧速率明显。

表4 北区煤粉不同压力等级下燃烧动力学参数表

Tab. 4 Kinetics parameters of Beiqu pulverized coal under different pressure grade

压力/MPa	第1阶段			第2阶段		
	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	$\ln(A/min^{-1})$	相关系数	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	$\ln(A/min^{-1})$	相关系数
0.1	105.10	8.70	0.991 8	52.69	3.78	0.989 1
1.1	645.00	67.26	0.963 5	324.37	32.55	0.983 6
2.1	466.61	49.67	0.972 1	119.60	12.58	0.928 4
3.1	396.81	42.95	0.956 1	268.17	27.27	0.935 3
4.1	644.65	70.13	0.938 2	548.26	56.44	0.984 7

对于燃尽温度 T_f 来说,0.1 MPa时的燃尽温度为1 023 K,4.1 MPa时则降低为648 K,下降了375 K,表明压力对燃尽温度影响明显。

燃烧特性指数 S 是综合评价燃烧性能的参数,试样的燃烧特性指数越大,其燃烧特性越佳。从表4中可以看出,当压力由常压0.1 MPa分别升至1.1, 2.1, 3.1, 4.1 MPa时,北区煤粉的 S 值分别为7.06, 13.8, 25.5和35.9,最多为常压的33.6倍,由图8可以看出, S 值随压力升高而快速增大。

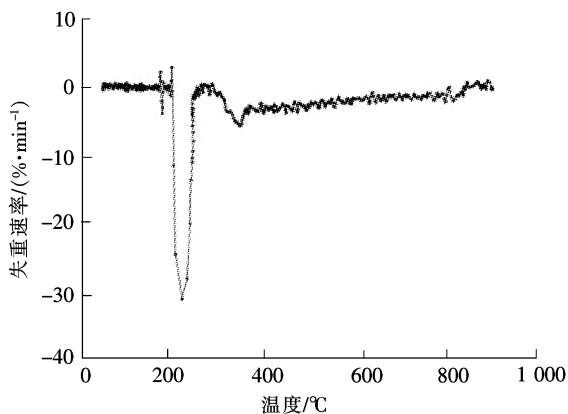


图7 4.1 MPa时的DTG曲线

Fig. 7 DTG curve under pressure of 4.1 MPa

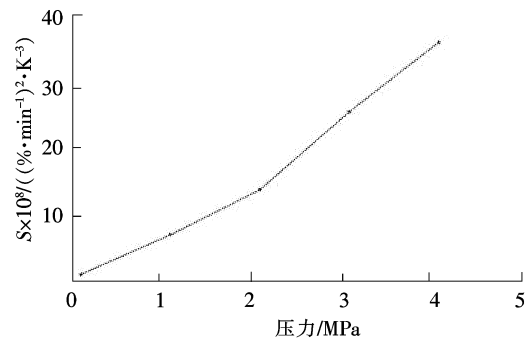


图8 综合燃烧特性指数变化趋势

Fig. 8 General burn exponent trend

3.1 MPa是煤粉燃烧的临界转变压力,随着压力等级的升高,综合燃烧特性指数 S 升高,4.1 MPa下的 S 值大于3.1 MPa,燃烧反应的速率常数随着压力的升高而升高,但是反应的扩散通量在压力达到临界值时达到峰值,压力继续升高,扩散通量减小,因此,燃烧效果降低,总之,在3.1 MPa时燃烧效果最好。

2.3 北区煤粉压力下的燃烧动力学分析

2.3.1 燃烧动力学过程分析

北区煤粉压力下燃烧为非等温、非均相燃烧反应过程,反应速率常数 k 与煤粉热解速率 $d\alpha/dt$ 以及燃烧计算函数 $f(\alpha)$ 存在线性关系^[17-18],三者间的关系可以用式(2)表示

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha), \quad (2)$$

式(2)中, α 为北区煤粉燃烧过程中的失质量; A 为反应的指前因子; E 为燃烧过程的活化能; R 为气体热力学常数; $f(\alpha)$ 为北区煤粉燃烧动力学反应函数; T 为燃烧率等于 α 时对应的反应温度; t 为燃烧率为 α 时的升温时间。

$f(\alpha)$ 可以表达为

$$f(\alpha) = (1-\alpha)^n, \quad (3)$$

式(3)中,指数 n 为北区煤粉的燃烧级数。

燃烧率 α 的表达式为

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_\infty}, \quad (4)$$

式(4)中, m_i , m_t 和 m_∞ 分别定义为反应开始前、反应具体时刻和反应结束时的反应物质量。

升温速率可以定义为

$$\beta = \frac{dT}{dt}. \quad (5)$$

将式(3)和式(5)代入式(2)得到:

$$\frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT. \quad (6)$$

北区煤粉燃烧反应一般可视为一级反应,因此对式(6)进行积分变换得到

$$\ln \left| -\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2} \right| = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \right] - \frac{E}{RT}. \quad (7)$$

在正常反应的温度区间内, $\frac{E}{RT} \geq 1$, $(1 - \frac{2RT}{E}) \approx 1$, 所以式(7)第一项近似为常数,对 $1/T$ 作图,通过线性拟合处理,可以得线性方程 $y=kx+b$, 其中斜率 $k = -\frac{E}{R}$, $b = \ln \frac{AR}{\beta E}$, 以及方差等。由拟合结果可以求出反应的活化能 E , 由直线的截距则可以求得指前因子 A 。

2.3.2 北区煤粉压力燃烧动力学参数解析

北区煤粉的压力燃烧过程可以分为第 1 阶段和第 2 阶段。分界点为 DTG 曲线上最大燃烧速率对应的温度,对前后 2 个阶段各自分析,所得的动力学参数结果如表 4 所示。

由表 4 数据和图 5 的拟合结果可以看出,活化能与指前因子有着一致的变化趋势。对北区煤粉反应的活化能与指前因子数值的关系处理,其结果如图 9 所示。

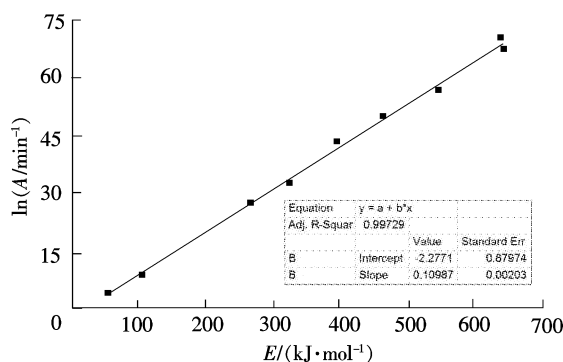


图 9 直线拟合图

Fig. 9 Linear fitting

由图 9 可见,显然活化能 E 与指前因子 A 的对数值之间有良好的线性关系,即两者存在着动力学补偿效应,可用关系式(式(8))表达:

$$\ln A = kE + b, \quad (8)$$

式(8)中, k 和 b 定义为补偿参数。

经过拟合,可以得到: $\ln A = 0.10987E - 2.2771$, $R^2 = 0.99729$ 。

崔洪等^[19]认为,用动力学补偿效应参数来描述燃烧反应过程特征比用动力学参数或曲线峰值温度来描述好,其原因为前者不受升温速率等实验条件因素的影响。

由图 10 和图 11 可以看出,随着压力的增加,第 1 阶段和第 2 阶段的活化能、指前因子对数值均呈波浪

形变化,在 1.1 MPa 时第 1 次达到波峰,活化能达到最大值,随后下降,第 2 阶段在 2.1 MPa 达到波谷,活化能达到最小值,随后加压则活化能持续上涨,第 1 阶段则持续下降,在 3.1 MPa 达到波谷,活化能最小,指前因子对数值也有类似的变化规律。

从 Arrhenius 方程 $k=Ae^{-E/RT}$ (k 为反应速率常数)可以看出,在较低温度下,活化能的数值越小,反应速率是越大的;而在较高温度下,活化能的值越大,反应速率越快^[20]。因而从上述反应动力学角度来说,3.1 MPa 为系统最小活化能,是北区煤粉反应控制条件及燃烧方式转变的临界压力。

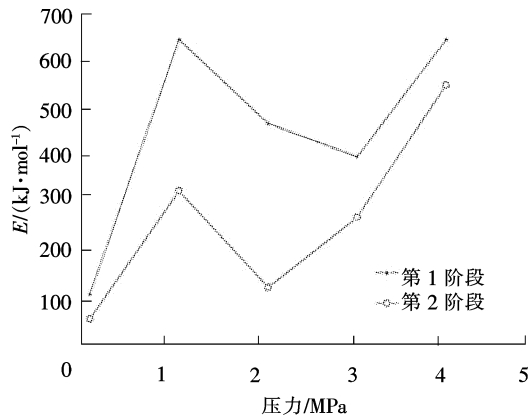


图 10 活化能与压力的关系

Fig. 10 Relationship between activation energy and pressure

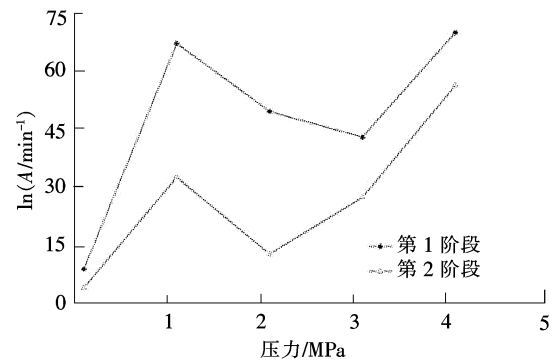


图 11 指前因子对数值与压力的关系

Fig. 11 Relationship between $\ln A$ and pressure

3 结 论

1) 北区煤粉燃烧压力由 0.1 MPa 升至 4.1 MPa 的过程中,着火温度最多下降了 85.7 K,失重峰值温度最多提前了 249.3 K,燃尽温度最多下降了 375 K,最大燃烧速率最多提升了 10 倍,燃烧特性指数 S 最大为常压下的 33.6 倍,表明煤粉在压力下的燃烧性能优于常压下的燃烧。

2) 动力学分析结果表明,煤粉在压力下的燃烧反应可视为一级反应,并可求得反应动力学参数活化能和指前因子。进一步发现,北区煤粉压力下燃烧的两段热解活化能 E 和指前因子对数值 $\ln A$ 之间存在线性关系($\ln A=0.10987E-2.2771$),即存在动力学补偿效应。

3) 从北区煤粉动力学反应角度分析,第 1 阶段的活化能与第 2 阶段的活化能有相同的变化趋势,综合二者可知,3.1 MPa 为反应控制条件及燃烧方式转变的临界压力。

参考文献/References:

- [1] SUSHIL G, VEENA S, YASER A, et al. Influence of carbon structure and mineral association of coals on their combustion characteristics for pulverized coal injection application [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(3):457-473.
- [2] MYOHANEN K, HYPPANEN T, PIKKARAINEN T, et al. Near zero CO₂ emissions in coal firing with oxy-fuel circulating fluidized bed boiler [J]. Chem Eng Technol, 2009, 32(3): 355-363.
- [3] SAASTAMOINEN J J, AHO M J, HAMALAINEN J P, et al. Pressurized pulverized fuel combustion in different concentrations of oxygen and carbon dioxide [J]. Energy Fuels, 1996, 10(1): 121-133.
- [4] LWANAGA Y J. Investigation on behavior of unburnt pulverized coal in blast furnace [J]. ISIJ International, 1991, 31(5):194.
- [5] YANG H P, CHEN H P, JU F D, et al. Influence of pressure on coal pyrolysis and char gasification [J]. Energy Fuels, 2007, 21(6): 3165-3170.
- [6] 刘亮,周臻,李录平,等.混煤燃烧反应动力学参数的实验研究[J].电站系统工程,2006,22(2):7-8.
LIU Liang, ZHOU Zhen, LI Luping, et al. Experimental study of kinetic parameters of combustion reaction of blended coals [J]. Power System Engineering, 2006, 22(2):7-8.
- [7] 周俊虎,平传娟,杨卫娟,等.混煤燃烧反应动力学参数的热重研究[J].中国动力工程学报,2005,25(2):207-210.
ZHOU Junhu, PING Chuanjuan, YANG Weijuan, et al. Thermo-gravimetric research on dynamic combustion reaction parameters of blended coals [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(2):207-210.
- [8] RUSELL N V, BEELEY T J, MAN C K, et al. Development of TG measurements of intrinsic char combustion reactivity for industrial

- and research purposes [J]. *Fuel Processing Technology*, 1998, 57(2):113-130.
- [9] ALONSOM J G, BORREGO A G, ÁLAREZ D, et al. A reactivity study of chars obtained at different temperatures in relation to their petrographic characteristics [J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 69(3):257-272.
- [10] 王贤华,鞠付栋,杨海平,等. 神府煤加压热解特性及热解动力学分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(11):40-44.
WANG Xianhua, JU Fudong, YANG Haiping, et al. Kinetics and properties analysis of Shenfu coal pressurized pyrolysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(11):40-44.
- [11] 王春波,雷鸣,阎维平,等. 煤粉的增压富氧燃烧特性及煤灰矿物演变[J]. *燃料化学学报*, 2012, 40(7):790-794.
WANG Chunbo, LEI Ming, YAN Weiping, et al. Combustion characteristics of pulverized coal and mineral conversion under pressurized oxy-fuel condition [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2012, 40(7):790-794.
- [12] KASTANAKI E, VAMVUKA D, GRAMMELIS P, et al. Thermo-gravimetric studies of the behavior of lignite-biomass blends during devolatilization [J]. *Fuel Process Technology*, 2002, 77/78: 159-166.
- [13] 公旭中,郭占成,王志. 热重法研究 K_2CO_3 与 Fe_2O_3 对煤粉燃烧反应性的影响[J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(1):42-48.
GONG Xuzhong, GUO Zhancheng, WANG Zhi. Effect of K_2CO_3 and Fe_2O_3 on combustion reactivity of pulverized coal by thermo gravimetric analysis [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2009, 37(1):42-48.
- [14] 姜秀民,李巨斌,邱建荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(6):71-74.
JIANG Xiumin, LI Jubin, QIU Jianrong. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(6):71-74.
- [15] 聂其红,孙绍增,李争起,等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2001, 7(1):72-76.
NIE Qihong, SUN Shaozeng, LI Zhengqi, et al. Thermo gravimetric analysis on the combustion characteristics of brown coal blends [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(1):72-76.
- [16] ELENI K, DESPINA V. A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal-biomass char blends [J]. *Fuel*, 2005, 85(9):1186-1193.
- [17] ZHAO H, YAN H X, LIU M, et al. The pyrolysis characteristics and kinetics of the marine macroalgae *Enteromorpha prolifera* using a thermo gravimetric analyzer [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2012, 34(21):1958-1966.
- [18] BANJONG B, POTE S. Thermodynamics and kinetics of the dehydration reaction of $FePO_4 \cdot 2H_2O$ [J]. *Phys B: Physics of Condensed Matter*, 2010, 405(9):2350.
- [19] 崔洪,朱珍平,刘振宇,等. 程序升温热重法研究扎赉诺尔煤的气化动力学[J]. *燃料化学学报*, 1996, 24(5):399-403.
CUI Hong, ZHU Zhenping, LIU Zhenyu, et al. Gasification kinetics of ZL coal using TG/DTG method [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 1996, 24(5):399-403.
- [20] 郭汉杰. 冶金物理化学教程[M]. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2006.