

文章编号:0253-9993(2010)S0-0132-04

粒度对采空区遗煤氧化速度影响的实验研究

秦跃平,宋宜猛,杨小彬,秦川

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083)

摘要:为研究采空区遗煤粒度的大小对氧化速度的影响,利用程序控温的方法设计了遗煤的升温氧化实验,测得了实验炉出口侧在一定温度下的氧气浓度,计算了几种粒径的煤样在一定温度下的耗氧速度,比较了几种粒径煤样在不同温度时的耗氧速度的大小,拟合了几种粒径的煤样在一定温度时耗氧速率的曲线。结果表明:不同粒径的煤样氧化速度随着温度升高而增大,粒径较小的煤样,耗氧速度增加较快。在相同温度条件下,氧化速度有随着煤粒度的增大而减小的规律性,并且当温度高于70℃时耗氧速率和煤样粒径之间满足负指数关系。实验加深了对采空区遗煤自燃过程的认识。

关键词:粒度;采空区;遗煤;氧化速度;自燃

中图分类号:TD752.2 **文献标志码:**A

Experimental study on coal granularity influencing oxidation rate in goaf

QIN Yue-ping, SONG Yi-meng, YANG Xiao-bin, QIN Chuan

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to find out the impact of coal granularity on heating and oxidizing rate, an experiment on heating and oxidizing of remnant coal with a temperature-programmed method was designed, and oxygen concentration of experiment furnace at certain temperatures was measured, and oxygen consumption rates of different coal granularity at certain temperatures were calculated, and the rates of diameters coal at different temperatures were compared, and drew curves. The results show that the oxidation rate of coal samples increase as temperature rising, and smaller diameters samples with faster rates. At a certain temperature, oxidation rate is decreasing with the coal diameters increasing. Besides, there is negative index relationship between oxidation rate and coal granularity when the temperature is 70℃ above. This experiment deepens the cognition of spontaneous combustion process of remnant coal in goaf.

Key words: coal granularity; goaf; remnant coal; oxidation rate; spontaneous combustion

治理采空区火灾工作要求对采空区遗煤氧化规律有全面的认识。目前研究者普遍认为工作面推进速度,遗煤的厚度和粒度,采空区漏风情况以及遗煤自身的自燃特性影响着采空区的自然发火的进度^[1-5]。然而,采空区遗煤的自燃是一个非常复杂的物理化学变化过程,也是一个多变的自动加速放热过程。微观上煤的自燃过程就是一个煤表面分子与氧不断地复合、不停地发生各种氧化反应,连续释放出反应热的过程。当采空区其他条件相同时,如果遗煤

的粒度不同,则采空区遗煤表现出来的氧化升温速度就不可能相同。因为煤的粒度不同,孔隙率不同会导致煤的表面积不同,跟氧气结合的表面活性结构的数量就不同^[6-9]。最后致使煤的氧化速度不一致。本文以煤氧复合理论为基础,通过几种粒径煤的氧化升温实验,尝试找出遗煤粒度对氧化速度的影响规律。

1 试验装置

煤的氧化升温实验装置如图1所示。主要包括:

① 升温氧化炉,包括煤样罐,程序控温系统和保温层,其中圆柱形煤样罐直径9.5 cm,长24.5 cm;② 供风系统,包括高压空气瓶、流量计和气路;③ 气体分析系统,采用气相色谱仪,配以氢焰检测器和热导检测器,碳氢类气体的分析精度为 $0.01 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$,CO的分析精度为 $0.1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ 。

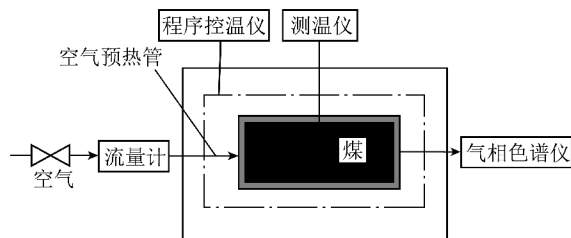


图1 煤样升温氧化装置

Fig. 1 The heating and oxidizing equipment of coal sample

2 实验准备和实验条件

煤样的采集及制备是根据氧化试验的需要和采样标准,在新暴露煤壁采集新鲜煤样,并现场密封,然后运至实验室。本实验用煤采自大同煤矿集团有限责任公司同忻煤矿8101采煤工作面。将煤样用颚式破碎机破碎,筛分出7~10 mm、5~7 mm、2.5~5.0 mm、0.9~2.5 mm、0~0.9 mm五种粒径。每种粒径筛分质量为750 g。每种粒径具体参数见表1。最后把煤样标号,封口待用。实验时将每种粒径的煤样装入煤样罐,通入压缩空气流量为80 mL/min,并控制氧化升温的速率为1 °C/min。程序设定的恒温温度从25 °C开始,然后分别相差15 °C,最终温度设定在205 °C。当升温温度达到这些温度后,不再加

热,保持恒温,气相色谱仪开始取气样进行色谱分析气体成分及浓度^[10]。恒温一定时间后,然后继续升温,达到下一个预定温度时,保持恒温,再取气样进行色谱分析,如此反复。

表1 不同粒径煤样实验参数

Table 1 Experimental parameters of different diameter coal

参数	煤样				
	粒径1	粒径2	粒径3	粒径4	粒径5
粒径/mm	7~10	5~7	2.5~5	0.9~2.5	0~0.9
平均粒径/mm	8.50	6.00	3.75	1.70	0.50
装煤高度/cm	23.5	21.5	20.3	18.7	16.5
煤质量/g	750.1	750.2	749.8	749.9	750.0
煤体积/cm ³	1 665.73	1 523.97	1 438.91	1 325.50	1 169.56
孔隙率/%	0.514 2	0.503 7	0.496 2	0.460 6	0.421 7

3 实验结果及分析

对每个粒径的煤样分别进行氧化升温实验,测得的出口氧气浓度见表2。由于升温过程中升温速度较慢,试样的量不大,可以认为煤罐内的温度均匀变化。入口侧氧气含量为21%,则可推导出单位体积煤的平均耗氧速率^[11-13]为

$$v(T) = -\frac{QdC}{Sdx} \times \frac{1}{22.4} \quad (1)$$

式中, $v(T)$ 为温度 T 时煤样的耗氧速度, $\text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; C 为氧气浓度,%; t 为时间,s; x 为单位长度,cm; v 为速度, cm/s ; Q 为供风量, mL/min ; S 为煤罐断面积, cm^2 。

表2 不同粒径煤样氧浓度和耗氧速率

Table 2 Oxygen concentration and oxygen consumption velocity of different diameter coal samples

$T/^\circ\text{C}$	粒径1		粒径2		粒径3		粒径4		粒径5	
	$C/\%$	v_0	$C/\%$	v_0	$C/\%$	v_0	$C/\%$	v_0	$C/\%$	v_0
25	20.90	6.63	20.89	8.68	20.89	9.06	20.91	7.51	20.90	8.82
40	20.87	9.59	20.80	11.05	20.78	18.16	20.81	15.89	20.87	11.48
55	20.75	18.50	20.68	17.41	20.59	34.00	20.56	37.02	20.65	31.06
70	20.66	25.21	20.50	26.18	20.41	49.14	20.22	66.17	20.12	79.12
85	20.51	36.47	20.39	48.72	20.28	60.16	19.93	91.43	19.25	143.00
100	20.20	52.00	20.09	67.00	19.56	81.00	19.55	137.00	18.97	187.89
115	19.87	65.00	19.80	97.24	19.02	170.76	18.67	205.61	18.23	261.43
130	19.06	131.00	18.98	167.15	18.51	217.63	17.08	361.23	16.85	406.91
145	18.75	158.00	18.54	205.91	18.01	264.85	16.43	409.00	16.11	489.91
160	18.50	195.80	17.86	267.67	17.12	352.24	15.69	509.63	15.14	585.00
175	18.02	236.40	17.52	299.43	16.24	43.23	15.02	585.93	14.13	658.00
190	17.56	276.35	16.71	377.66	15.10	568.73	14.38	662.06	13.70	789.39
205	16.83	341.94	15.43	509.37	14.39	651.77	12.97	842.48	12.58	947.01

注:耗氧速率单位为 $10^{-11} \text{ mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。

从化学动力学和化学平衡理论得知,耗氧速率与氧浓度成正比。因此,新鲜空气中耗氧速率为

$$v_0(T) = C_0 v(T) / C \quad (2)$$

式中, $v_0(T)$ 为新鲜风流中煤样耗氧速度, $\text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; C_0 为进风氧浓度, 取 21%。

积分并把耗氧速度单位换算成 $\text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 得

$$v_0(T) = - \frac{QC_0}{SL(1-n) \times 22.4 \times 60} \ln \frac{C}{C_0} \quad (3)$$

其中, L 为装煤的高度(包含孔隙), cm ; n 为煤样的孔隙率, %。由式(3)计算后不同粒径煤在不同温度下的耗氧速率见表 2。以温度为横坐标, 耗氧速率为纵坐标, 可以绘制不同粒径的煤样在不同温度下的耗氧速率, 如图 2 所示。

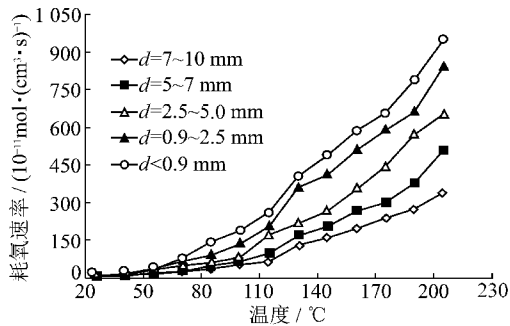


图 2 不同温度下煤样粒径和耗氧速度关系曲线
Fig. 2 The relation of oxygen consumption velocity with coal temperature

从图 2 可以看出, 随着炉内温度的增加, 不同粒径煤样耗氧速率整体均呈增加趋势。在低温阶段, 耗氧速率均较小, 当达到一定温度(100 °C 以上)后, 耗氧速率迅速增加。从而得出了煤在低温阶段氧化较慢, 到某一温度氧化速度迅速增加的升温氧化规律^[14-16]。从图 2 还可以看出, 随着炉内温度的增加, 不同粒径煤样耗氧速率整体均呈增加趋势。在低温阶段, 耗氧速率均较小, 当达到一定温度(100 °C 以上)后, 耗氧速率迅速增加。从而得出了煤在低温阶段氧化较慢, 到某一温度氧化速度迅速增加的升温氧化规律^[14-16]。为了得到粒度对遗煤氧化升温速度的影响, 把煤样的平均粒径作为横坐标, 耗氧速率作为纵坐标。得到的遗煤在某一温度时粒径和氧化速率的关系曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 随着粒径的增加, 不同粒径的煤样的耗氧速率整体均呈减小趋势。并且在同一温度下, 耗氧速率随着粒径的增加也呈减小趋势, 并且温度越高, 减小的越快。这种现象是因为, 在相同温度和质量条件下, 粒径越大的煤样, 表面积越小, 在与氧气发生吸附时表面活性结构就越少, 所以耗氧速率就会随着粒径的增大而减小。

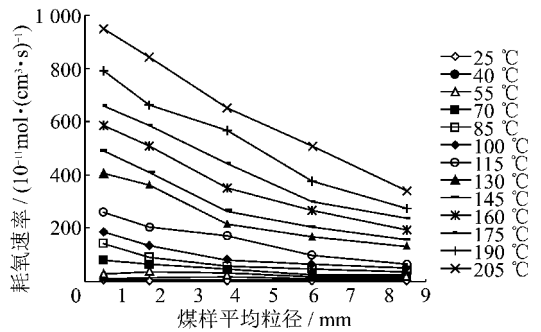


图 3 相同温度下耗氧速率和煤样粒径的关系
Fig. 3 The relation of oxygen consumption velocity with coal granularity at the same temperature

把图 3 中平均粒径和耗氧速率关系曲线按指数关系拟合, 可以发现 70 °C (含) 以上曲线满足

$$v_0(T) = ae^{-bd} \quad (4)$$

式中, d 为粒径, mm ; a 、 b 为常数。

每条曲线的 a 和 b 的值和相关系数见表 3。总体而言, 随着温度的增加, a 的值逐渐增大, b 的值变化并不明显。70 °C 以下的曲线之所以不满足式(4)的关系, 原因之一可能是实验仪器测量的误差导致的, 另一方面在氧化升温低温阶段, 由于温度较低, 煤样与氧的结合处在物理吸附阶段, 几种粒径的煤的化学反应进展都比较缓慢。从而导致耗氧速率和平均粒径的曲线比较平直和密集。

表 3 粒径和耗氧速率拟合的系数值

Table 3 Coefficient values of coal granularity and oxygen consumption velocity

温度/°C	$a/(\text{10}^{-11} \text{ mol} \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{s})^{-1})$	b/mm^{-1}	R^2
70	84.12	0.157 0	0.935 4
85	130.17	0.160 7	0.935 4
100	178.79	0.157 7	0.937 7
115	290.51	0.174 8	0.984 4
130	429.01	0.148 3	0.968 2
145	504.15	0.143 6	0.978 5
160	624.16	0.139 2	0.994 6
175	715.66	0.134 1	0.990 6
190	855.45	0.131 7	0.987 1
205	1 035.80	0.126 0	0.993 4

从中选取有代表性的 100、130、175 和 205 °C 时耗氧速率曲线进行分析, 拟合后曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着粒径的增加, 煤样耗氧速率整体呈减少趋势, 拟合后的曲线有较高的相关性。因而可以作为平均粒径和耗氧速度的关系曲线。

4 结 论

(1) 采空区遗煤随着温度增加, 氧化速度呈加速

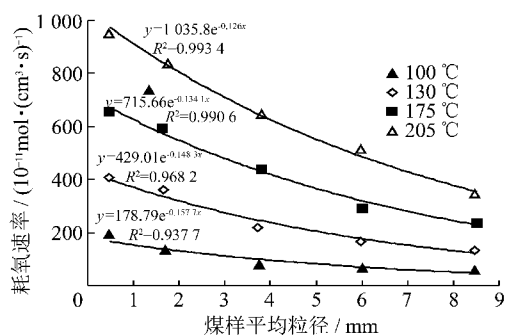


图4 平均粒径和耗氧速度拟合曲线

Fig. 4 The fitted curves about coal average granularity and oxygen consumption velocity

趋势。在低温阶段增幅较小,达到一定温度(100 °C以上)增幅较大。

(2) 遗煤粒度是影响氧化速度的一个重要的物理参数;在相同的温度条件下,耗氧速率随着粒径的增大而减小。

(3) 不同粒径的煤样耗氧速率和粒径之间满足负指数关系 $v_0(T) = ae^{-bd}$ 。随着温度的增加, a 的值逐渐变大, b 的值变化并不明显。

参考文献:

- [1] 徐精彩,邓 军.采空区浮煤粒度与自然性关系的测试[J].陕西煤炭技术,1999,8(4):6-9.
Xu Jingcai, Deng Jun. Test on the relation of spontaneous combustion property and granularity of float coal in goaf[J]. Shaanxi Coal Technology, 1999, 8(4): 6-9.
- [2] 徐精彩,薛韩玲,文 虎,等.煤氧复合热效应的影响因素分析[J].中国安全科学学报,2001,11(2):31-35.
Xu Jingcai, Xue Hanling, Wen Hu, et al. Analysis on influential factors of thermal effect in coal oxidation[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(2): 31-35.
- [3] 文 虎,徐精彩.煤自燃过程的动态数学模型及数值分析[J].北京科技大学学报,2003,25(5):387-390.
Wen Hu, Xu Jingcai. Dynamic mathematical model and numerical analysis of coal spontaneous combustion process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(5): 387-390.
- [4] Wen Hu, Xu Tongmu, Xu Jingcai. Analysis of the danger zone liable to spontaneous ignition around coal roadway at fully mechanized long-wall top-coal caving face[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 2002, 8(2): 5.
- [5] 王振平,文 虎,黄福昌.松散煤体中的氧气扩散模型及数值分析[J].煤炭学报,2002,27(3):229-232.
Wang Zhenping, Wen Hu, Huang Fuchang. Oxygen pervasion model in loose coal and its numerical analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 229-232.
- [6] 姜秀民,李巨斌,邱健荣.煤粉颗粒粒度对煤质分析特性与燃烧特性的影响[J].煤炭学报,1999,24(6):643-647.
Jiang Xiumin, Li Jubin, Qiu Jianrong. The influence of particle size on compositions analyzing and combustion characteristics of pulver-

ized coal[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 643-647.

- [7] 姜秀民,杨海平,李 彦,等.煤粉颗粒粒度分形分析[J].煤炭学报,2003,28(4):414-418.
Jiang Xiumin, Yang Haiping, Li Yan, et al. Fractal characteristics of coal powder[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 414-418.
- [8] 冯俊小,乐 恺,刘应书,等.粉煤粒度对其燃烧特性的影响[J].北京科技大学学报,2001,23(5):460-462.
Feng Junxiao, Yue Kai, Liu Yingshu, et al. Effect of powder coal granularity on its combustion[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23(5): 460-462.
- [9] 刘 忠,阎维平,高正阳,等.超细煤粉粒度对煤质分析特性的影响[J].华北电力大学学报,2004,31(4):63-65.
Liu Zhong, Yan Weiping, Gao Zhengyang, et al. Dependence of coal compositions on micro-pulverized coal fineness[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(4): 63-65.
- [10] Qin Yueping, Song Yimeng, Zhu Jianfang, et al. Experimental study on oxidation and heat emission law of lost coal in goaf[A]. Proceedings of the 2008 International Symposium on Safety Science and Technology[C]. Beijing, 2008.
- [11] 王从陆,伍爱友,蔡康旭.煤炭自燃过程中耗氧速率与温度耦合研究[J].煤炭科学技术,2006,34(4):65-67.
Wang Conglu, Wu Aiyu, Cai Kangxu. Research on coupling between oxygen consumption rate and temper during coal spontaneous combustion process[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(4): 65-67.
- [12] 梁运涛,罗海珠.不同粒度松散煤体的氧扩散特性实验研究[J].煤炭学报,2003,28(5):470-472.
Liang Yuntao, Luo Haizhu. Experimental study on the free diffusing characteristics of oxygen in different granularity loose coal[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 470-472.
- [13] 罗海珠,钱国胤.煤吸附流态氧的动力学特性及其在煤自燃倾向性色谱吸氧鉴定法中的应用[J].煤矿安全,1990(6):1-11.
Luo Haizhu, Qian Guoyin. Oxygen adsorption and flow dynamics and oxygen in coal spontaneous combustion tendency chromatographic method of identification[J]. Safety in Coal Mines, 1990(6): 1-11.
- [14] 戴广龙.煤低温氧化及自燃特性的综合实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2005.
Dai Guanglong. Comprehensive experimental study on coal low-temperature oxidation and spontaneous combustion property[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2005.
- [15] 文 虎.煤自燃过程的实验及数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2003.
Wen Hu. Study on experimental and numerical simulation of coal self-ignition process[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2003.
- [16] 梁运涛.煤自燃过程热物理场效特性实验研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2002.
Liang Yuntao. Experimental research on themol-physical field properties of coal in spontaneous combustion process[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2002.