

多因素影响下的煤低温氧化特性试验研究

周西华^{1,2} 郭晓阳^{1,2} 宋东平^{1,2} 白刚^{1,2} 张菊³ 吴猛³

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室 辽宁 阜新 123000;
3. 吉林省安全科学技术研究院 吉林 长春 130051)

摘要:为研究氧浓度、粒度和挥发分对采空区遗煤低温氧化过程的影响,利用油浴式程序升温试验装置设计了煤低温氧化试验,研究了不同影响因素条件下煤的耗氧速率和放热强度,验证了氧浓度、粒度和挥发分等对煤低温氧化特性的影响,通过对试验数据分析,得到了煤低温氧化特性受各因素影响的变化规律。试验结果表明:在一定范围内,氧浓度的增加会加快煤的耗氧速率,提高反应的放热强度,促进煤的氧化,但不会改变氧化反应的趋势;粒度较大的煤耗氧速率低,反应释放的热量小,氧化过程缓慢且强度较低;煤的挥发分降低后,耗氧速率和反应的放热强度也随之减小,其自燃临界温度将显著提高。

关键词:采空区;遗煤;程序升温;低温氧化;耗氧速率;放热强度

中图分类号:TQ534 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2016)06-0082-06

Experimental research on coal low-temperature oxidation kinetics under multiple influencing factors

ZHOU Xihua^{1,2}, GUO Xiaoyang^{1,2}, SONG Dongping^{1,2}, BAI Gang^{1,2}, ZHANG Ju³, WU Meng³

(1. School of Safety Science and Engineering Liaoning Technical University Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education Fuxin 123000, China; 3. Jilin Institute of Safety Science and Technology Changchun 130051, China)

Abstract: In order to study the effects of oxygen concentration, particle size and volatile matter on low-temperature oxidation of coal in goaf, the experiment of coal low-temperature oxidation was designed by using oil bath temperature programmed experimental device. The oxygen consumption rate and heat release rate of coal under different influencing factors were tested, the effects of oxygen concentration, particle size and volatile matter on the oxidation characteristics of coal at low-temperature were verified through the processing and analysis of experimental data. At last, the change law of the characteristics of coal low-temperature oxidation which were influenced by various factors was obtained. Experimental results showed that, in a certain range, the increasing of oxygen concentration could speed up the oxygen consumption rate of coal, increase the heat release rate of the reaction and promote the oxidation of coal, while it didn't change the trend of the oxidation reaction. The increase of coal particle size led to the decrease of oxygen consumption rate, the reduction of the heat in reaction, the reduction of the oxidation process and the decrease of the strength. When the volatile matter of coal decreased, and the rate of oxygen consumption and the heat release rate of the reaction decreased, and the critical temperature of the coal spontaneous combustion was significantly increased.

Key words: goaf; remnant coal; temperature programmed method; low-temperature oxidation; oxygen consumption rate; heat release intensity

0 引 言

在回采过程中,综放工作面的采空区遗煤极易

自燃,是制约煤炭安全开采的灾害之一。张国枢等^[1]、张辛亥等^[2]、王德明等^[3]对煤自燃机理进行研究,煤氧复合理论对其作了阐释,得到了学者的认

收稿日期:2016-08-15;责任编辑:孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.016

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274115)

作者简介:周西华(1968—),男,安徽淮北人,教授,博士,博士生导师,从事煤矿火灾、瓦斯、高温防治的研究。E-mail: xihua_zhou68@163.com。通讯作者:郭晓阳(1990—),男,硕士研究生,从事矿井火灾防治研究。E-mail: 447848206@qq.com

引用格式:周西华,郭晓阳,宋东平,等.多因素影响下的煤低温氧化特性试验研究[J].洁净煤技术,2016,22(6):82-87.

ZHOU Xihua, GUO Xiaoyang, SONG Dongping et al. Experimental research on coal low-temperature oxidation kinetics under multiple influencing factors[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 82-87.

同^[4]。煤自燃的过程非常复杂且不断变化,原因是煤表面的活性因子与氧气发生物理作用和化学反应,产生热量,外界良好的蓄热条件使热量累积,煤体温度上升,高于自燃临界温度后,煤氧复合反应加快,煤温加速上升,消耗更多的氧气并释放出热量,导致放热量与散热量的失衡,引发自燃。因此,煤的耗氧速率与放热强度可以反映出煤的低温氧化特性,是衡量煤自燃能力的重要指标。影响煤自燃的因素有氧浓度、煤的粒度和挥发分等^[5],研究煤自燃的主要影响因素对于预防自燃火灾有重要意义。

目前,煤的低温氧化试验广泛应用于煤自燃特性领域^[6-8],试验系统主要有程序升温系统^[9]和绝热氧化系统^[10]两大类,大多利用空气对煤样进行加热。但由于空气导热效果差,各处煤样温差大、受热不平衡,导致耗氧量计算不准确^[11-12]。相比较而言,液体则具有比热大、对流换热系数大等特性,可以使各处煤温均匀分布,更好地保证试验数据的准确性。

本文采用油浴式煤低温氧化试验系统进行试验,系统反应炉内的导热介质为硅油,同时细长的圆柱形煤样罐,增加煤样受热的均衡程度。试验通过测试多组煤的低温氧化过程,对各因素影响下采空区遗煤的低温氧化特性进行了研究。

1 采空区遗煤低温氧化试验

试验所用煤样均采集于下沟煤矿 ZF301 工作面,该工作面长 180 m,综采放顶煤开采,主采 4 号煤层。4 号煤为烟煤,属低灰、低硫、特低磷含油不黏煤,煤样工业分析见表 1。试验选取该工作面 60 号支架处粒径为 0~10 mm 的遗煤作为研究对象,在现场密封后运至实验室。试验过程分为 3 部分,分别研究氧浓度、粒度和挥发分对采空区遗煤耗氧速率和放热强度的影响。

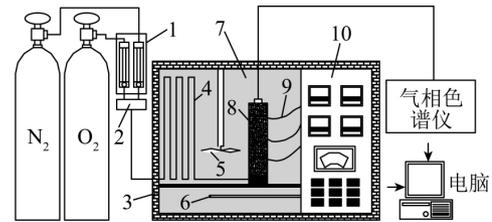
表 1 煤样工业分析

Table 1 Proximate analysis of coal sample

灰分/ %	水分/ %	挥发 分/%	真密度/ (t·m ⁻³)	视密度/ (t·m ⁻³)	孔隙 率/%
7.53	4.87	24.62	1.46	1.33	9.57

1.1 试验系统

试验系统包括供气系统、升温/恒温系统、气相色谱分析仪、温度数据采集系统,同时在罐的顶部、中部和底部依次装有 3 个热电偶探头,用于监测试验中不同位置处的煤体温度(见图 1)。



1—质量流量计;2—混气室;3—反应炉;4—预热铜管;
5—搅拌器;6—加热圈;7—硅油;8—煤样罐;
9—测温线路;10—控制面板

图 1 试验装置结构

Fig. 1 Structure of experimental device

1.2 采空区遗煤粒度分布特征

为了真实反映采空区遗煤的低温氧化规律,要求粒度分布与现场情况具有较高的契合度,故需要对采空区实际的粒度分布进行研究。试验随机选取 5 份煤样,每份质量 800 g,然后筛分出粒度为 0~0.9、0.9~3、3~5、5~7、7~10 mm 的煤样,分别计算各粒度煤粒占整体煤样分布的概率。筛分结果见表 2。

表 2 采空区遗煤粒度筛分结果

Table 2 The grain size results of remnant coal in goaf

粒度/ mm	质量/g					各粒度煤所 占比例/%
	1号 煤样	2号 煤样	3号 煤样	4号 煤样	5号 煤样	
0~0.9	126.9	127.8	128.8	128.8	127.2	16.0
0.9~3	178.5	179.7	181.1	181.1	178.8	22.5
3~5	180.8	182.1	183.5	183.6	181.2	22.8
5~7	129.3	130.2	131.2	131.2	129.6	16.3
7~10	177.7	178.9	180.3	180.3	178.0	22.4
总计	793.2	798.6	804.7	805.1	794.8	—

1.3 试验过程

1) 将煤样破碎筛分,按表 2 中的粒度配比制备 5 份混合粒度煤样,每份质量 180 g 左右,参数见表 3。试验开始时,先将试样装入煤样罐并通入氮气,在 100 ℃ 的反应炉内干燥 10 h,待煤温降低至室温后通入氧气和氮气,将进气量控制在 80 mL/min。煤样加热时先以 1.5 ℃/min 的速度将温度升高 15 ℃,再恒温处理 20 min,当温度在 5 min 内上升幅度不超过 0.5 ℃ 时,开始采集出口气体,使用色谱分析仪测定氧气浓度,重复该过程,使煤样从 30 ℃ 开始加热到 210 ℃。分别在入口氧气体积分数为 5%、8%、12%、15%、21% 情况下进行 5 组试验。

2) 将煤样破碎后筛分出 0~0.9、0.9~3、3~5、5~7、7~10 mm 5 种粒度的煤样,同时按照表 2 中的粒度

配比制备混合煤样1份,每份质量150 g左右,参数见表4。分别进行6组试验,试验过程与1)相同。

表3 氧气浓度不同时的试验参数

Table 3 Experimental parameters of different oxygen concentration

煤样	入口氧气体积分数/%	体积/mL	质量/g	孔隙率/%
1号	5	241	180.6	0.455
2号	8	245	180.2	0.464
3号	12	244	180.5	0.462
4号	15	243	179.7	0.460
5号	21	240	179.8	0.453

表4 煤样粒度不同时的试验参数

Table 4 Experimental parameters of different coal particle sizes

煤样	粒度/mm	入口氧气体积分数/%	体积/mL	质量/g	孔隙率/%
6号	0~0.9	20.75	191.1	150.4	0.448
7号	0.9~3	21.04	195.5	151.2	0.433
8号	3~5	21.08	202.3	149.1	0.457
9号	5~7	20.89	214.5	148.9	0.465
10号	7~10	20.82	230.4	150.3	0.459
11号	0~10	21.03	205.3	150.1	0.452

3) 经过破碎、筛分处理后制备出5组0~0.5 mm粒度的煤样,每份质量150 g左右。其中,12号煤样为干燥后的混合粒度煤样,13号、14号、15号煤样则是利用GF-A2000型自动工业分析仪分别在200、500、800℃下灼烧8 min获得的,16号煤样则是在800℃灼烧5 min,煤样完成灼烧后,依据GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》中要求的方法依次测定5组煤样的挥发分,各煤样的参数见表5,然后分别按1)的方法进行5组试验。

表5 煤样挥发分不同时的试验参数

Table 5 Experimental parameters of different coal volatile matter

煤样	挥发分/%	粒度/mm	入口氧气体积分数/%	体积/mL	质量/g	孔隙率/%
12号	24.62	0~0.5	20.93	241.3	150.3	0.457
13号	17.27	0~0.5	21.08	241.1	149.6	0.466
14号	10.92	0~0.5	21.06	240.8	149.8	0.453
15号	2.87	0~0.5	20.98	241.1	150.2	0.458
16号	3.44	0~0.5	21.07	241.0	149.7	0.451

2 各参数的动力学推导

2.1 耗氧速率

由于煤样罐的装煤量较少,煤的低温氧化过程极其缓慢,因此可以忽略煤温变化的不均匀性。若将罐内气体近似看作理想气体,可得到煤样在单位长度内的耗氧速率

$$V(T) = -\frac{QdC}{Sdx} \quad (1)$$

依据化学动力学原理,氧气浓度正比于煤的耗氧速率^[13-14],可推出单位体积内煤的耗氧速率为

$$V_0(T) = \frac{C_0 V(T)}{C} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)并作积分运算可得到平均的耗氧速率公式

$$V_0(T) = \frac{C_0 Q}{22.4 \times 60(1-n)SL} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (3)$$

式中, $V(T)$ 为温度为 T 时,在任意处煤的耗氧速率, $\text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; Q 为进气量, mL/min ; C 为煤样罐内的氧气浓度,%; S 为煤样罐断面积, cm^2 ; $V_0(T)$ 为温度为 T 时,煤通入新风的平均耗氧速率, $\text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; C_0 为新风中的氧气体积分数,%; C_1 为入口处氧气体积分数,本试验中视为 $C_0 = C_1$; C_2 是出口处氧气体积分数,%; L 为装煤高度, cm ; n 为煤样的孔隙率,%。

2.2 放热强度

煤在低温氧化时会产生热量,是放热反应。在常温常压下,氧化生成 CO 、 CO_2 的标准生成热分别是313.7和436.4 kJ/mol。为简化运算,假设整个耗氧过程只生成 CO 、 CO_2 ,利用化学键能守恒原理^[15]的方法建立煤低温氧化反应的放热强度公式

$$q(T) = q(\text{O}_2)(T) + q(\text{CO})(T) + q(\text{CO}_2)(T) \quad (4)$$

$$q(\text{O}_2)(T) = q_a(V^T(\text{O}_2) - V^T(\text{CO}) - V^T(\text{CO}_2)) \quad (5)$$

$$q(\text{CO})(T) = V^T(\text{CO}) [(h_{298}^0)(\text{CO}) + \Delta h^0(\text{CO})] \quad (6)$$

$$\Delta h^0(\text{CO}) = C(\text{CO})M(\text{CO})(T - T_{25}) \quad (7)$$

$$q(\text{CO}_2)(T) = V^T(\text{CO}_2) [(h_{298}^0)(\text{CO}_2) + \Delta h^0(\text{CO}_2)] \quad (8)$$

$$\Delta h^0(\text{CO}_2) = C(\text{CO}_2)M(\text{CO}_2)(T - T_{25}) \quad (9)$$

式中 $q(T)$ 、 $q(\text{O}_2)(T)$ 、 $q(\text{CO})(T)$ 、 $q(\text{CO}_2)(T)$ 分别为煤在温度 T 时氧化反应放热强度、煤对氧气的

化学吸附放热强度、产生CO时反应放热强度、产生CO₂时反应的放热强度 J/(m³·s); q_a 为煤与氧气复合时由于吸附氧气所放出的热量,取 58.8 kJ/mol; $V^T(O_2)$ 为煤在 T 下的氧化进程中的耗氧速率, mol/(m³·s); $V^T(CO)$ 、 $V^T(CO_2)$ 分别为 T 时煤在氧化进程中所产生 CO、CO₂ 的速率, mol/(m³·s); T_{25} 为基准温度 25 °C; $\Delta h^0(CO)$ 、 $\Delta h^0(CO_2)$ 分别为在压力 101 kPa、 T 时煤氧化进程中生成 CO 与 CO₂ 放热量之差, J/mol; $C(CO)$ 、 $C(CO_2)$ 分别为 CO、CO₂ 的定压比热容 J/(g·K); $M(CO)$ 、 $M(CO_2)$ 分别是 CO、CO₂ 的摩尔质量, g/mol; $(h_{298}^0)(CO)$ 在压力 101 kPa、温度为 298 K 条件下 CO 的标准生成热, J/mol, 取 110.6 kJ/mol; $(h_{298}^0)(CO_2)$ 在压力 101 kPa、温度为 298 K 条件下 CO₂ 的标准生成热, J/mol, 取 393.5 kJ/mol。

3 试验结果及数值分析

通过各组煤样在不同条件下的低温氧化试验,并由式(3)和式(4)处理各组试验数据,并绘出在各种影响条件下煤的耗氧速率、氧化反应的放热强度随温度的变化曲线,如图2~图4所示。

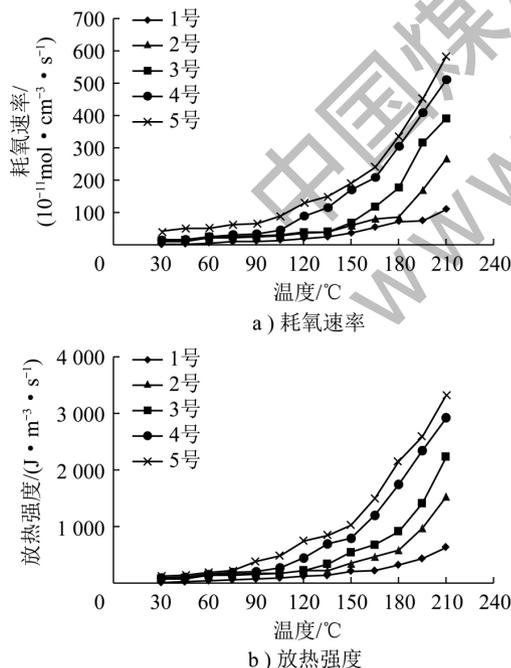


图2 氧气浓度对煤低温氧化特性的影响

Fig. 2 Effect of oxygen concentration on characteristics of coal low-temperature oxidation

从图2a分析发现,在整个低温氧化进程中,各组煤样的耗氧速率随温度的增高呈指数上升。升温

氧化初期,耗氧速率低、增长慢,当煤体温度高于自燃临界温度^[16-17]后,耗氧速率加速增长,其中1~5号煤样的自燃临界温度依次为165、135、120、105、90 °C,这表明氧气浓度的提高一定程度上降低了煤的自燃临界温度,加快了煤的氧化进程。温度一致时,煤的耗氧速率随外界氧浓度的增长而加快,而对比5条曲线,耗氧速率随温度的变化规律基本相同,说明氧浓度只对煤的耗氧速率有影响,不会改变其随温度变化的规律。对比图2a与图2b,放热强度与耗氧速率的变化有极为相似的规律,这里不再加以描述。

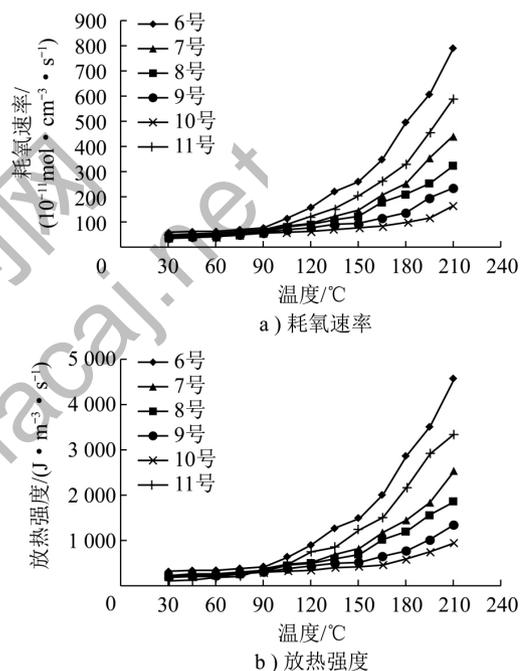


图3 粒径对煤低温氧化热性的影响

Fig. 3 Effect of particle size on the thermal properties of coal low-temperature oxidation

由图3a分析可知,在升温氧化初期,各粒径煤样的耗氧速率基本相同且趋势平缓,当煤温升至90 °C后,各组煤样的耗氧速率几乎呈直线式增长,此时反应进入急剧加速阶段,其中0~10 mm 粒径煤样的耗氧速率介于其他几组之间,剩下5组的耗氧速率则因粒径的增大而总体降低^[18],分析其原因有两方面:①煤样粒度的变小导致煤表面的活性因子增多,且与氧气的接触面积增大,从而促进氧化反应;②粒径小的煤样易挥发成分更利于热解,其所吸附气体更易于解吸,氧化速度更快。煤的氧化放热强度随温度的变化有着类似的规律,详见图3b。

从图4可以分析出,升温氧化初期各组煤样氧化速率和放热强度上升平缓且大致相同,90 °C后

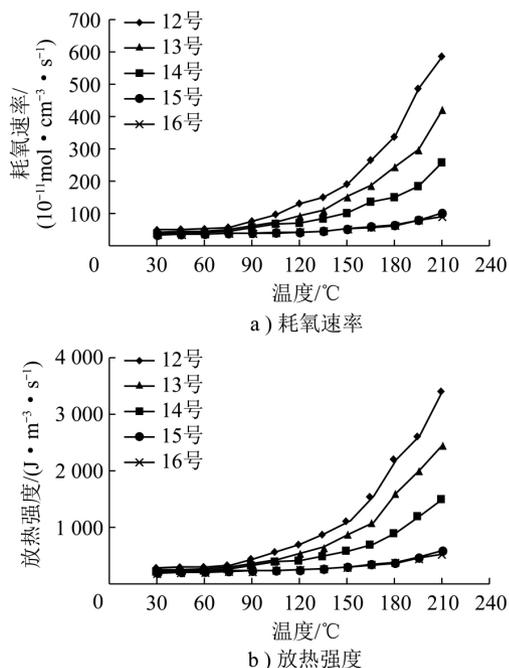


图4 挥发分对煤低温氧化热性的影响

Fig. 4 Effect of volatile matter on the thermal properties of coal low-temperature oxidation

开始加速上升且差距逐渐增大。同一温度下,减少挥发分后的煤样耗氧速率和放热强度明显降低,尤其是4号、5号煤样最为缓慢且相比于其他煤样更低,而4号、5号煤样灼烧时间的不同并没有对挥发分造成太大影响,故耗氧速率和放热强度差别较小。究其原因,挥发分小的煤具有数量较多的苯环且大都具有较高的稳定性,而侧链、桥键及官能团等活泼性含氢结构较少,与之结合的氧分子数量低^[19],耗氧量也随之降低,出口氧气浓度则偏高,根据式(3)、式(5)知煤的耗氧速率放慢、放热强度减弱、放热量变小,从而使化学吸附过程并没有为后续反应提供良好的供热条件,导致煤的低温氧化过程速度慢,因此,挥发分低的煤不易自燃。

在挥发分大于10%时,煤的自燃临界温度出现在90℃左右,但当挥发分降低到3%时,煤的自燃临界温度出现在140℃左右,说明煤的挥发分大幅减少后,自燃临界温度会显著提高,煤需要更多的热量才能进入到自加速反应阶段,这也从另一个角度说明挥发分太低的煤难以自燃。实际上,煤表面的侧链、桥键、官能团等活性结构的数量构成了煤自燃特性的决定性因素,活性结构的氧化裂解形成挥发分,因此,挥发分的高低反映出活性结构数量的多少,间接地表明了煤自燃能力的强弱^[20]。

4 结 论

1) 在同一前提下,煤的耗氧速率和氧化反应的放热强度均随煤温的增加呈指数上升,在氧化初期,耗氧速率和放热强度较低且增长慢,煤温达到自燃临界温度后则变高且增长快。

2) 氧浓度的高低严重影响着煤的低温氧化特性,同一温度下增加外界氧浓度会导致耗氧速率和放热强度的显著升高,但不会影响总体变化规律;同时,煤的自燃临界温度也将有所降低,一定程度上加快了煤的低温氧化反应。

3) 通过对不同粒度煤样进行低温氧化试验发现,增大煤的粒度可以降低煤的耗氧速率,减弱氧化反应的放热强度,从而抑制煤自燃的整个过程。

4) 煤的挥发分一定程度上表征了煤的自燃能力。挥发分越少的煤,其耗氧速率和放热强度会越小,自燃临界温度越高,越不易与氧气发生复合反应,更难以自燃。

参考文献(References):

- [1] 张国枢,戴广龙.煤炭自燃理论与防治实践[M].北京:煤炭工业出版社,2002.
- [2] 张辛亥,徐精彩,邓军,等.煤的耗氧速度及其影响因素恒温试验研究[J].西安科技学院学报,2002,22(3):243-246.
Zhang Xinghai, Xu Jingcai, Deng Jun, et al. Rate of oxygen consumption and the influence factors of coal oxidation with constant temperature experiment[J]. Xi'an University of Science & Technology Journal, 2002, 22(3): 243-246.
- [3] 王德明.煤氧化动力学理论与应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [4] 王省身,张国枢.矿井火灾防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990.
- [5] 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):31-36.
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): 31-36.
- [6] 文虎,徐精彩,葛岭梅.煤自燃特性测试技术及数值分析[J].北京科技大学学报,2001,23(6):499-501.
Wen Hu, Xu Jingcai, Ge Lingmei. Technique of measurement and test of coal spontaneous combustion characteristic and numerical analysis[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23(6): 499-501.
- [7] 于水军,余明高,潘荣钡.煤升温氧化过程中气体解析规律研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2008,27(5):487-502.
Yu Shuijun, Yu Minggao, Pan Rongkun. Study on the law of gas releasing in the process of coal oxidation and warming-up[J]. Jour-

- nal of Henan Polytechnic University (Natural Science) ,2008 ,27 (5) : 487-502.
- [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] 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.
- [10] 谭 波,朱红青,王海燕,等.煤的绝热氧化阶段特征及自然临界点预测模型[J].煤炭学报,2013,38(1):38-43.
Tan Bo, Zhu Hongqing, Wang Haiyan, *et al.* Prediction model of coal spontaneous combustion critical point and the characteristics of adiabatic oxidation phase [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 38-43.
- [11] 景兴鹏.煤样自燃性升温程序试验研究[J].中国煤炭地质,2011,23(4):11-22.
Jing Xingpeng. An experimental research on coal sample spontaneous combustible heating up process [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(4): 11-22.
- [12] 李金帅,王德明,仲晓星,等.低温阶段程序升温法对煤氧化过程影响的研究[J].中国安全科学学报,2011,21(5):72-76.
Li Jinshuai, Wang Deming, Zhong Xiaoxing, *et al.* Effect of temperature rising programmed test on process of coal oxidation in low temperature stage [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(5): 72-76.
- [13] Sahay N, Varma N K, Ahmad I *et al.* Critical temperature—an approach to define proneness of coal towards spontaneous heating [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2007, 55(10): 510-516.
- [14] 赵学庄.化学反应动力学原理[M].北京:高等教育出版社,1984.
- [15] 徐精彩,张辛亥,文 虎,等.煤氧复合过程及放热强度测算方法[J].中国矿业大学学报,2000,29(3):254-257.
Xu Jingcai, Zhang Xinghai, Wen Hu, *et al.* Procedure of reaction between coal and oxygen at low temperature and calculation of its heat emitting intensity [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 254-257.
- [16] 仲晓星,王德明,尹晓丹.基于程序升温的煤自燃临界温度测试方法[J].煤炭学报,2010,35(S0):128-131.
Zhong Xiaoxing, Wang Deming, Yin Xiaodan. Test method of critical temperature of coal spontaneous combustion based on the temperature programmed experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S0): 128-131.
- [17] 王文才,张 培,任春雨,等.煤田露头火区标志性气体确定的试验研究及应用[J].煤炭科学技术,2016,44(3):55-59, 128.
Wang Wencai, Zhang Pei, Ren Chunyu, *et al.* Experiment research and application on mark gas of coalfield outcrop fire area [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 55-59, 128.
- [18] 秦跃平,宋宜猛,杨小彬,等.粒度对采空区遗煤氧化速率影响的试验研究[J].煤炭学报,2010,35(S1):132-135.
Qin Yueping, Song Yimeng, Yang Xiaobin, *et al.* Experimental study on coal granularity influencing oxidation rate in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 132-135.
- [19] 周西华,李 昂,聂荣山,等.不同变质程度煤燃烧阶段碳氧化物生成规律[J].中国安全科学学报,2016,26(4):34-39.
Zhou Xihua, Li Ang, Nie Rongshan, *et al.* Carbon oxides formation law of different metamorphic degree coals at combustion phrase [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(4): 34-39.
- [20] 邓存宝,王继仁,邓汉忠,等.氧在煤表面—CH₂—NH₂基团上的化学吸附[J].煤炭学报,2009,34(9):1234-1238.
Deng Cunbao, Wang Jiren, Deng Hanzhong, *et al.* Chemical asorption of O₂ adsorbed in the coal surface—CH₂—NH₂ group [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1234-1238.
- ~~~~~
- (上接第108页)
- [6] 罗颖都,李英华.氧弹量热法中的冷却校正公式的理论探讨和建立最佳校正公式的准则[J].燃料化学学报,1986,14(1):84-93.
Luo Yingdu, Li Yinghua. Theoretical examination of cooling correction formula in bomb calorimetry and guidelines for establishing the best formula [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1986, 14(1): 84-93.
- [7] 胡日恒,安绪武,谈 夫.精密氧弹量热计及苯甲酸燃烧热的测定[J].化学学报,1981(S1):18-26.
Hu Riheng, An Xuwu, Tan Fu. A precision bomb calorimeter and the heat of combustion of benzoic acid [J]. Acta Chimica Sinica, 1981(S1): 18-26.
- [8] 叶春松,杨万生.高准确度冷却校正公式及其应用[J].武汉水利电力大学学报,1996,29(3):58-62.
Ye Chunsong, Yang Wansheng. High precision cooling correction formula and its application [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1996, 29(3): 58-62.
- [9] 王文堂,王英琛,施力田.螺旋桨搅拌槽中液体的流动结构[J].化学反应工程与工艺,1994,10(3):274-282.
Wang Wentang, Wang Yingchen, Shi Litian. The flow structure of liquid and scaling-up in an agitated tank with propellers [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 1994, 10(3): 274-282.
- [10] GB/T 30991—2014, 智能氧弹式热量计通用技术条件[S].
- [11] GB/T 31423—2015, 氧弹热量计性能验收导则[S].
- [12] JJG 672—2001, 氧弹热量计[S].
- [13] 李英华.煤质分析应用技术指南[M].2版.北京:中国标准出版社,2009:198-204.