5月

2014 年

刘 伟,秦跃平,杨小彬,等. 挥发分对煤自燃特性影响的实验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(5):891-896. doi:10.13225/j. cnki. jccs. 2013.0493

Liu Wei, Qin Yueping, Yang Xiaobin, et al. Experimental study for impact of volatile matter on spontaneous combustion characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5):891-896. doi:10.13225/j. cnki. jccs. 2013.0493

# 挥发分对煤自燃特性影响的实验研究

刘 伟1,秦跃平1,杨小彬1,张国玉2

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;2. 北京天地华泰采矿工程技术有限公司,北京 100013)

摘 要:为了研究挥发分对煤本身自燃能力的影响作用,在氮气环境中对同一处采集的煤样分别在 300,600,900 ℃高温下进行了灼烧处理,获得了挥发分不同的5份煤样;利用自制的油浴式煤低温 氧化实验系统对所得煤样进行了升温氧化实验,测得了不同温度下煤样罐出口中的O<sub>2</sub>,CO,CO<sub>2</sub>等 气体的体积分数;推导了煤的耗氧速率与放热强度计算公式,结合实验数据,得到了不同煤样的耗 氧速率及放热强度变化情况,以此来判断减少挥发分后煤的自燃能力强弱。结果表明,相同条件 下,挥发分越低,煤的耗氧速率、放热强度越小,越不易自燃。

关键词:挥发分;自燃;耗氧速率;放热强度;低温氧化

中图分类号:TD752.2 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2014)05-0891-06

# Experimental study for impact of volatile matter on spontaneous combustion characteristics of coal

LIU Wei<sup>1</sup>, QIN Yue-ping<sup>1</sup>, YANG Xiao-bin<sup>1</sup>, ZHANG Guo-yu<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Tiandi Huatai Mining Engineering & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the influence of the volatile matter on the ability of coal spontaneous combustion, the coal samples which were collected at the same place were processed respectively at 300,600,900 °C in a nitrogen environment to get 5 coal samples which were in different volatile matter. The coal samples were carried out by the oil bath type coal low temperature oxidation experimental system, and the  $O_2$ , CO,  $CO_2$  concentration at the outlet of coal samples tank at different temperature were measured. Then the formulas of oxygen consumption rate and heat emission intensity were deduced respectively. By calculating the changes of the two parameters of self-ignite characteristic according to the test data, the spontaneous combustion ability of coal which was strong or weak after reducing volatile matter was judgment. The results show that, under the same conditions, the lesser the volatile matter content is, the smaller the oxygen consumption rate and the heat emission intensity of coal are, and the more difficult the self-ignition is.

Key words: volatile matter; spontaneous combustion; oxygen consumption rate; heat emission intensity; low temperature oxidation

煤燃烧过程中,其表面的活性结构会热解生成多种气体<sup>[1]</sup>,如羧基裂解产生 $CO_2$ ,羟基裂解产生 $H_2O$ , 醚键裂解产生CO,脂肪烃裂解产生 $CH_4$ , $C_2H_6$ , C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>,芳香烃裂解产生H<sub>2</sub>,这些气相产物统称为挥发 分<sup>[2]</sup>。挥发分能在较低温度下析出并燃烧,剩下固 定碳与灰分的混合物称之为焦炭。挥发分对煤的燃

收稿日期:2013-05-17 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174211)

作者简介:刘 伟(1985—),男,安徽宁国人,博士研究生。E-mail:liuwei7230@qq.com。通讯作者:秦跃平(1964—),男,山西夏县人,教授,博士生导师。E-mail:qyp\_0127@163.com

烧<sup>[3]</sup>至关重要,一方面挥发分燃烧放热,迅速提高焦炭的温度,为其着火和燃烧提供条件;另一方面挥发分的析出使得炭粒的内部孔隙与反应面积增大,有利于加快焦炭的燃烧速度。然而,煤自燃过程中有关挥发分影响作用的研究还处于起步阶段<sup>[4]</sup>,挥发分对煤自燃特性的影响,特别是对于同一煤样,减小其挥发分后,它本身的自燃能力是否会降低以及降低程度都有待实验检验。为此,本文通过煤低温氧化实验来研究不同挥发分下煤本身的自燃特性变化。

# 1 实验煤样制备

实验所用煤样采集于山西省大同市唐山沟煤矿

8201 工作面,属不黏煤,易自燃。依据《GB/T 212—2008 煤炭工业分析方法》中有关挥发分测定的要求, 筛分出粒度为0~0.2 mm 的煤,制备出1~5 号煤 样。其中,1 号煤样为105 ℃干燥40 min 后的原煤; 2,3,4 号煤样则是利用 GF-A2000 型自动工业分析 仪分别在300,600,900 ℃下灼烧7 min 获得的;5 号 煤样则是在900 ℃灼烧4 min 获得的。灼烧过程通 入纯氮,避免了煤样与氧气接触而发生反应。各煤样 的挥发分及具体参数见表1。

从表1可以看出,煤的挥发分析出量主要受灼烧 温度高低的影响。相同灼烧时间下,灼烧温度越高, 煤中剩余的挥发分越少。

Table 1         Specific parameters of coal samples					
参数	1 号煤样	2 号煤样	3 号煤样	4 号煤样	5 号煤样
处理过程	105 ℃干燥 40 min	300 ℃灼烧7 min	600 ℃灼烧7 min	900 ℃灼烧7 min	900 ℃灼烧4 min
粒度/mm	0 ~ 0. 2	0 ~ 0. 2	0~0.2	0~0.2	0 ~0.2
装煤体积/mL	241. 3	241. 1	240. 8	241. 1	241.0
煤质量/g	150. 1	150.2	149.8	150. 1	149. 9
真密度/(g・cm <sup>-3</sup> )	1. 494	1.453	1.431	1.412	1.419
空隙率/%	0. 580	0. 576	0. 563	0. 556	0. 559
空气干燥基挥发分 V <sub>ad</sub> /%	23.624	19. 229	10.810	2.877	3.329
煤样罐进气处的 氧气体积分数/%	20. 08	19. 31	19. 87	19. 90	19.44

表 1 实验煤样的具体参数 Table 1 Specific parameters of coal samples

# 2 实验装置及过程

现阶段的煤低温氧化实验系统,主要有程序升 温<sup>[5]</sup>与绝热氧化<sup>[6-7]</sup>两种类型,都是利用空气浴对煤 样罐加热。由于空气的导热性差,空气浴箱内各处温 度并不相等,会造成煤样罐受热不均匀,从而导致罐 内各处温度差异很大。这样就会带来很多问题,例 如,在计算煤的耗氧速率<sup>[8]</sup>时,温度和氧体积分数都 对它有影响,为了排除温度的影响,要求煤样罐内的 温度处处相等,这样氧气沿罐轴向上的消耗量看作是 线性分布,从而可以积分得到单位时间内整个罐内煤 样的耗氧总量。若罐内温度差异很大,则无法准确计 算出耗氧总量。

为此,自主开发了油浴式煤低温氧化实验系统, 如图1所示。利用液体比热大、对流换热系数大以及 温度分布更均匀的特点,采用硅油作为传热介质,同 时将煤样罐制作成细圆柱形( $\phi$ 25 mm×300 mm),如 此煤样罐的受热更为均匀。实验系统包括:①供气 系统,由气瓶、质量流量计和混气室构成;②升温/恒 温系统,由煤样罐、升温箱、硅油和程序温控表组成; ③ 气相色谱分析仪;④ 温度数据采集系统。为了分 析升温过程中煤样罐内不同位置的温度变化情况,在 罐的顶部(距顶3 cm)、中部和底部(距底3 cm)依次 装有3个热电偶探头,图2为1号煤样上升过程中3 个探头的温度变化情况。可以看出,整个实验过程中 3个探头的温度变化曲线基本吻合,说明该实验系统 基本能保证煤样罐内各处温度均匀一致。

实验开始前,利用质量流量计将煤样罐的进气量





图 2 煤温上升变化曲线

Fig. 2 Curves of coal temperature rise

控制在 60 mL/min,并测得进气口处的氧气体积分数,见表 1。开始实验时,先将试样装入煤样罐,然后采用间续升温法升高煤温,即先以 1 ℃/min 的速度将油温升高 15 ℃,再保持温度恒定 40 ~ 60 min。油 温恒温期间,当煤温稳定后,即 5 min 内上升幅度不 超过 0.5 ℃时,开始收集煤样罐出口气体,使用气相 色谱仪检测其中各气体的体积分数,故图 2 中的煤温 呈阶梯状上升,这样确保了所得各气体体积分数为当 前稳定温度下的。然后继续升温,重复这个过程直至 煤温达到 200 ℃。

### 3 实验结果及分析

# 3.1 出口的各气体体积分数及分析

将所测得的出口  $O_2$  体积分数换算为标准进气条 件下( $O_2$  体积分数为 21%)的  $O_2$  体积分数,得到图 3(a),同时得到其他气体的体积分数变化曲线,如图 3(b)~(d)所示。由于 3~5 号煤样的挥发分过低, 实验过程中基本检测不到  $C_2H_4, C_2H_6$ 。

图 3 中,随着温度升高,煤样罐出口处的 O<sub>2</sub> 体积 分数逐渐降低,CO,CO<sub>2</sub>,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 及 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 体积分数逐渐 升高;在同一温度下,挥发分越低,出口的 O<sub>2</sub> 体积分 数越高,CO,CO<sub>2</sub>,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 及 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 体积分数越低;随着 挥发分的降低,出口 O<sub>2</sub> 体积分数的降幅以及各气体 体积分数的增幅显著变缓。

#### 3.2 耗氧速率分析

煤样罐内碎煤各点的氧气量变化主要受空气对 流、分子扩散以及煤氧化作用等因素的影响。根据组 分质量守恒方程推导出氧气在破碎煤体中的对流— 扩散方程<sup>[9]</sup>,表示为

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = n \operatorname{div}(k \operatorname{grad} C) - \operatorname{div}(C \boldsymbol{\nu}) - V^{T} \qquad (1)$$

式中,C为单位体积内氧气的物质的量浓度,简称氧浓度,计算过程需要将氧气的体积分数转换为氧浓度,mol/cm<sup>3</sup>; 7为单位时间,s; n为空隙率,%; k为氧浓度的扩散系数,m<sup>2</sup>/s; v为气体在空隙中的流动速





度,m/s;V<sup>T</sup>为温度T时煤的耗氧速率,mol/(cm<sup>3</sup>·s)。 实验中的煤样罐直径较小,且在距顶、底1 cm 处 安装有均匀开孔的隔板,进气经隔板均匀流过煤样, 故认为空气全部沿罐轴向 x 方向流动,另外空气流量 很小,可忽略氧气随时间的变化项及浓度扩散项,得 到

$$V^{T} = -\nu \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}x} = -\frac{Q\mathrm{d}C}{Sn\mathrm{d}x}$$
(2)

式中, *x* 为轴向单位长度, cm; *Q* 为气体流量, cm<sup>3</sup>/min; *S* 为罐的断面积, cm<sup>2</sup>。

根据化学动力学原理,耗氧速率与氧浓度成正 比,得到

$$V^T = KC \tag{3}$$

式中,K为化学反应速率常数。

从而推导出新鲜风流中的标准耗氧速率<sup>[10]</sup>表达 式为

$$V_0^T = \frac{C_0 V^T}{C} \tag{4}$$

式中,  $V_0^T$  为煤样在新鲜风流中的标准耗氧速率, mol/(cm<sup>3</sup> · s);  $C_0$  为标准状况下的氧浓度, 9.375 mol/m<sup>3</sup>。

由式(2)和(4)可以得到在罐的轴向长度上相距 dx 内煤样的耗氧量

$$\mathrm{d}C = -V_0^T \frac{Sn}{Q} \frac{C}{C_0} \mathrm{d}x \tag{5}$$

在油浴式煤低温氧化试验系统中,煤样罐内部温 差很小,可以认为罐内温度处处相等。因此,当煤温 一定时在整个罐的长度上进行积分得到

$$\int_{c_1}^{c_2} \frac{\mathrm{d}C}{C} = -V_0^T \frac{Sn}{QC_0} \int_0^L \mathrm{d}x \tag{6}$$

$$V_0^T = \frac{QC_0}{SLn} \ln \frac{C_1}{C_2} \tag{7}$$

式中,L为罐内煤样的高度,cm; $C_1$ , $C_2$ 分别为进、出口处的氧浓度, $mol/m^3$ 。

根据式(7)来处理实验数据,得到各煤样的标准 耗氧速率随温度上升的变化曲线,如图4所示。







Q

从图 4(a) 可以看出,煤温越高,煤的耗氧速率越 大,且耗氧速率与温度呈指数变化关系;挥发分减少 后,同一温度下的耗氧速率明显降低,且温度越高,高 挥发分与低挥发分煤样之间的耗氧速率差值越大,特 别是 4 号煤样,相对于 1~3 号煤样,其耗氧速率上升 趋势很平缓;图 4(b)则表明虽然 4,5 号煤样的灼烧 时间不同,但由于它们的挥发分相接近,其耗氧速率 差距较小且变化趋势相同。

# 3.3 放热强度分析

根据煤氧复合理论<sup>[11]</sup>,煤氧反应分为3阶段:第 1阶段是煤表面分子对氧分子进行物理吸附;第2阶 段是煤表面的活性结构对氧分子进行化学吸附<sup>[12]</sup>; 第3阶段是在部分已发生了化学吸附的活性结构中 发生化学反应并生成 CO 或 CO<sub>2</sub>。这3个阶段都会 释放热量,但物理吸附阶段所放的热量很少,可忽略。 因此,在计算煤的放热量时,可以假定温度*T*时煤样 罐进、出口所减少的氧气,除反应生成 CO 或 CO<sub>2</sub>外, 其余部分全部发生化学吸附,这样根据化学键能守恒 原理<sup>[13]</sup>来建立煤的放热强度<sup>[14]</sup>计算公式,见式 (8)~(13)。

$$Q^{T} = Q^{T}(O_{2}) + Q^{T}(CO) + Q^{T}(CO_{2})$$
 (8)

$$Q^{T}(O_{2}) = q(O_{2}) (V^{T}(O_{2}) - V^{T}(CO) - V^{T}(CO_{2}))$$
(9)
(9)

$$Q^{T}(CO) = V^{T}(CO) \left[ \left( \Delta h^{0}_{298} \right) (CO) + \Delta h^{0}(CO) \right]$$

$$\Delta h^{0}(CO) = C(CO) M(CO) (T - T_{25})$$
(11)  

$${}^{T}(CO_{2}) = V^{T}(CO_{2}) [(\Delta h^{0}_{298}) (CO_{2}) + \Delta h^{0}(CO_{2})]$$
(12)

$$\Delta h^{0}(CO_{2}) = C(CO_{2})M(CO_{2})(T - T_{25}) \quad (13)$$

式中, $Q^{T}$ , $Q^{T}$ ( $O_{2}$ ), $Q^{T}$ (CO), $Q^{T}$ ( $CO_{2}$ )分别为温度 *T* 时的煤放热强度、氧的化学吸附放热、CO 的生成热、 CO<sub>2</sub> 的生成热, $J/(m^{3} \cdot s)$ ;  $q(O_{2})$ 为煤对氧的化学吸 附热,J/mol,取值为 58 800 J/mol; $V^{T}(O_{2})$ , $V^{T}(CO)$ ,  $V^{T}(CO_{2})$ 分别为温度 *T* 时的耗氧速率和 CO,CO<sub>2</sub> 的生 成速率, $mol/(m^{3} \cdot s)$ ; $(\Delta h_{298}^{0})$ (CO), $(\Delta h_{298}^{0})$ (CO<sub>2</sub>)分 别为1 个标准大气压、温度 298 K 时的 CO,CO<sub>2</sub> 的标准 生成热,约为 110 540 和 393 510 J/mol;  $\Delta h^{0}$ (CO),  $\Delta h^{0}$ (CO<sub>2</sub>)分别为 CO,CO<sub>2</sub> 在温度 *T* 时与标准生成热 的差值,J/mol; C(CO),C(CO<sub>2</sub>)分别为 CO,CO<sub>2</sub> 的定 压比热容, $J/(g \cdot K)$ ; M(CO),M(CO<sub>2</sub>)分别为 CO, CO<sub>2</sub> 的摩尔质量,g/mol; $T_{25}$ 为基准温度 25 °C。 按式(8)~(13)对实验数据进行处理,得到各煤 样的放热强度随温度上升的变化曲线,如图5所示。



图 5 放热强度随温度变化曲线



从图 5(a)可以看出,与耗氧速率的变化类似,煤 的放热强度随温度增大呈指数上升;同一温度下,煤 的挥发分越低,其放热强度也越小;减少挥发分后,放 热强度随温度上升的变化会趋于平缓;图 5(b)则表 明挥发分相近的 4,5 号煤样的放热强度,在 140 ℃前 基本相同,上升趋势较缓,但在 140 ℃后差距增大并 开始加速上升。

# 4 讨 论

煤表面与氧气分子发生化学吸附、化学反应时所 放出的热量是煤温上升的根本原因<sup>[15]</sup>,而温度的升 高又会加速煤氧复合反应,消耗更多的氧气并释放出 更多的热量,当放热量持续大于环境的散热量时,煤 温会一直升高使自燃发生。因此,煤的耗氧速率与放 热强度直接表征了煤自燃能力的大小,是反映煤自燃 特性的关键参数,故挥发分对煤自燃特性的影响,可 以通过计算不同挥发分下煤耗氧速率与放热强度的 变化情况来判断。从所推导的耗氧速率与放热强度 计算公式可以看出,耗氧速率主要与进、出口氧浓度 的比值有关,而放热强度则主要受 CO,CO<sub>2</sub> 生成量大 小的影响。

根据实验结果,对于同一煤样,其挥发分减少后, 在同一温度下的耗氧速率与放热强度会大大降低,表 明减少挥发分会显著减弱煤本身的自燃能力。这是 因为煤表面易氧化的活性结构在高温无氧环境下裂 解析出大量挥发分后,会导致这些活性结构的数量大 大减少,从而减小了与煤发生化学吸附、化学反应的 氧气总量,故实验中煤样挥发分越低,煤样罐出口中 的氧气体积分数越高,因此煤的氧化放热总量也大大 减少,煤温难以持续升高至自燃着火点。而对于变质 程度不同的煤,朱红青<sup>[4]</sup>等通过热重实验对来自8个 矿的8个煤样进行研究,也得到了挥发分越低的煤样 越难以自燃这一结论。事实上,煤表面的活性结 构(如各种活泼的侧链、桥链和官能团)的总数量才 是煤自燃特性的决定性因素,这些活性结构氧化裂解 或热裂解生成大量的挥发分,故挥发分的大小反映了 这些活性结构数量的多少,因此,挥发分间接地反映 了煤自燃能力的强弱。

随着煤变质程度的加深,煤中稳定性较好的苯环 数量增多,而较活泼、易氧化的侧链和桥键逐渐减少, 导致煤中的挥发分也在减少。如无烟煤的挥发分一 般低于10%,烟煤的在10%~37%,而褐煤的则大于 37%。从自燃难易程度上来看,褐煤最易自燃,烟煤 次之,无烟煤则很难自燃。这也说明挥发分在一定程 度上反映了煤的自燃难易程度。当然,在现场条件 下,煤自燃还与煤的破碎程度、堆积厚度、孔隙率大小 以及漏风情况等因素有关,是各因素综合作用的结 果。

# 5 结 论

(1)自主研制了油浴式煤升温氧化实验系统。 利用硅油的比热大、对流换热系数大等特点实现了升 温箱内部温度均匀一致,保证了煤样罐受热均匀,大 大提高了实验的精度。

(2)在理论上推导了煤的耗氧速率以及放热强度的计算公式,结合实验数据得到了不同挥发分的煤在不同温度下的耗氧速率与放热强度变化曲线。研究表明,煤的挥发分越低,同一温度下的耗氧速率与放热强度越小。

(3)研究通过人为减少同一煤样的挥发分,在煤 低温氧化实验的基础上,定量分析了挥发分对煤自燃 特性的影响,得到的结论为相同条件下,煤的挥发分 越低,越难以自燃,最后阐述了原因。

#### 参考文献:

[1] 傅维镳.煤燃烧理论及其宏观通用规律[M].北京:清华大学出版社,2003.

Fu Weibiao. Coal combustion theory and its macro general rules [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[2] 朱学栋,朱子彬,韩崇家,等.煤的热解研究Ⅲ:煤中官能团与热 解生成物[J].华东理工大学学报,2000,26(1):14-17. [3] 万俊华,部 治,夏允庆.燃烧理论基础[M].哈尔滨:哈尔滨工 程大学出版社,2007.

Wan Junhua, Gao Ye, Xia Yunqing. Combustion theory basis [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007.

- [4] 朱红青,郭艾东,屈丽娜. 煤热动力学参数、特征温度与挥发分关系的试验研究[J]. 中国安全科学学报,2012,22(3):55-60.
  Zhu Hongqing,Guo Aidong,Qu Lina. Experimental study on the relationship among the coal kinetics parameters, characteristic temperatures and volatile[J]. China Safety Science Journal, 2012,22(3): 55-60.
- [5] 谢振华,金龙哲,宋存义.程序升温条件下煤炭自燃特性[J].北 京科技大学学报,2003,25(1):12-15.
   Xie Zhenhua, Jin Longzhe, Song Cunyi. Coal spontaneous combustion characteristics at programmer temperatures[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2003,25(1):12-15.
- [6] 谭 波,朱红青,王海燕,等.煤的绝热氧化阶段特征及自燃临 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.
- [7] 陆 伟,王德明,周福宝,等. 绝热氧化法研究煤的自燃特性
  [J].中国矿业大学学报,2005,34(2):213-217.
  Lu Wei, Wang Deming, Zhou Fubao, et al. Study on spontaneous combustion of coal by adiabatic oxidation[J]. Journal of China University of Minging and Technology,2005,34(2):213-217.

 [8] 秦跃平,宋宜猛,杨小彬,等. 粒度对采空区遗煤氧化速率影响 的实验研究[J].煤炭学报,2010,35(S):132-135.
 Qin Yueping, Song Yimeng, Yang Xiaobin, et al. Size influence for the coal oxidation rate of goal in experiment study[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S): 132–135.

- [9] 朱建芳,蔡 卫,秦跃平.基于移动坐标的采空区自然发火模型 研究[J].煤炭学报,2009,34(8):1095-1099.
  Zhu Jianfang,Cai Wei,Qin Yueping. Study on the spontaneous combustion mathematical model in goaf based on the moving coordinate [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(8):1095-1099.
- [10] Qin Yueping, Liu Wei, Yang Xiaobin, et al. Experimental study on oxygen consumption rate of residual coal in goaf [J]. Safety Science, 2012, 50(4):787-791.
- [11] 秦跃平,刘 伟,杨小彬,等.基于非达西渗流的采空区自然发 火数值模拟[J].煤炭学报,2012,37(7):1177-1183.
  Qin Yueping, Liu Wei, Yang Xiaobin, et al. Impact of non-Darcy seepage on numerical simulation of spontaneous combustion in goaf
  [M]. Journal of China Coal Society,2012,37(7):1177-1183.
- [12] 邓存宝,王继仁,邓汉忠,等. 氧在煤表面—CH<sub>2</sub>—NH<sub>2</sub> 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 adsorption of O<sub>2</sub> adsorbed in the coal surface —CH<sub>2</sub>—NH<sub>2</sub> group[J].
   Journal of China Coal Society,2009,34(9);1234-1238.
- [13] 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):253-257.

Xu Jingcai, Zhang Xinhai, 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 and Technology, 2000, 29(3):253-257.

 [14] 陈晓坤,易 欣,邓 军.煤特征放热强度的实验研究[J].煤 炭学报,2005,30(5):623-626.

Chen Xiaokun, Yi Xin, Deng Jun. Experiment study of characteristic self-heating intensity of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5):623-626.

[15] Wang Haihui, Dlugogorski B Z. Coal oxidation at low temperatures: Oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003,29:487-513.