

文章编号:1671-251X(2018)07-0061-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17341

预测煤自燃的复合气体指标优选实验研究

武福生^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要:通过煤程序升温氧化实验对比分析了不同干空气流量、氧气浓度下复合气体指标的变化规律,实验结果表明:在不能确定干空气流量的情况下,应选取 $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 作为预测煤自燃的气体指标;煤温在 100 °C 以下时, $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 可作为预测煤自燃的气体指标;煤温超过 100 °C 时, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 和 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 可作为预测煤自燃的气体指标;煤温超过 160 °C 且氧气体积分数为 5 % 左右时, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 也可作为预测煤自燃的气体指标。

关键词:煤自燃;复合气体指标;程序升温氧化实验;干空气流量;氧气浓度

中图分类号:TD752 文献标志码:A

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180627.1427.001.html>

Experimental study on composite gas indexes optimization for coal spontaneous combustion prediction

WU Fusheng^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

2. Tiandi(Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: Changing rule of composite gas indexes under different dry air flow and oxygen concentration was analyzed through coal temperature-programmed experiment. The experimental results show that $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ should be selected as gas indexes for coal spontaneous combustion prediction in the case of uncertain dry air flow. $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ can be used as gas indexes for coal spontaneous combustion prediction when coal temperature is below 100 °C. $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ and $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ can be used as gas indexes for coal spontaneous combustion prediction when coal temperature exceeds 100 °C. $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ can also be used as gas indexes for coal spontaneous combustion when coal temperature exceeds 160 °C and oxygen volume fraction is approximately 5 %.

Key words: coal spontaneous combustion; composite gas indexes; temperature-programmed experiment; dry air flow; oxygen concentration

0 引言

目前中国煤自燃火灾早期预测预报方法主要有
气味检测法、测温法、物探分析法、指标气体分析法、

示踪气体定位法等,其中指标气体分析法由于其测试技术比较系统、完善、简单、便捷,分析结果具有可靠性而被矿井火灾现场广泛应用^[1-4]。常用的指标气体有 CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 ^[5-7]。张玉

收稿日期:2018-06-04;修回日期:2018-06-24;责任编辑:盛男。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801804)。

作者简介:武福生(1974—),男,陕西渭南人,高级工程师,博士,主要从事煤矿安全技术方面的研究工作,E-mail:wfs@cari.com.cn。

引用格式:武福生. 预测煤自燃的复合气体指标优选实验研究[J]. 工矿自动化,2018,44(7):61-65.

WU Fusheng. Experimental study on composite gas indexes optimization for coal spontaneous combustion prediction[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(7): 61-65.

龙等^[8]研究了不同干空气流量、煤样粒径、升温速率、氧气浓度条件下 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CH}_4)$, $\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{CO})$, $\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{CO}_2)$, $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$, $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{CO}_2)$ 变化规律, 结果表明复合指标气体分析法比单一指标气体分析法稳定性更好, $\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{CO})$, $\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{CO}_2)$ 受实验条件波动较小, 满足气体指标选择原则。刘乔等^[9]对比分析了上下煤层煤样在程序升温氧化实验条件下, 烷烃气体浓度比值随温度变化趋势, 结果显示 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 初始出现温度、 $\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)$ 峰值点温度均揭示了煤氧复合进入加速阶段, 可用来作为判断煤自然发火的气体指标。陈汝豪等^[10]利用灰色关联法将指标气体与温度关联, 考察了初始温度、干空气流量、煤样

粒度、煤样质量、升温速率 5 种因素对单一指标气体产生规律的影响。笔者通过煤程序升温氧化实验, 研究不同干空气流量、氧气浓度条件下复合气体指标的变化规律, 优化气体指标选择, 为预测预报煤自然发火提供依据, 从而提高煤自燃早期预报可靠性。

1 实验

1.1 实验装置

实验采用煤自燃综合特性测试装置, 如图 1 所示。高压气瓶气体通过气体预热管路从煤样罐底部进入, 煤样罐内置铂丝温度探头实时测定煤样温度, 通过出气管收集煤样罐上方出口的气体, 利用 GC-950N 型气相色谱仪分析气相产物变化规律。

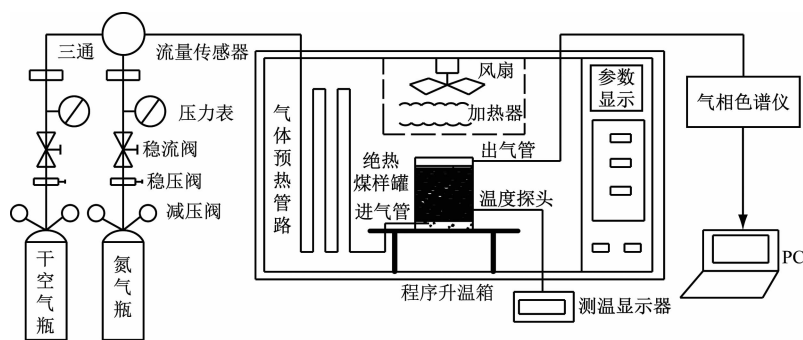


图 1 煤自燃综合特性测试装置

Fig. 1 Test device for comprehensive characteristic of coal spontaneous combustion

1.2 实验过程

将工作面采集的新鲜大块煤样装进密封真空袋内, 并迅速带回实验室。实验前, 在氮气环境下, 先剥去煤样表面氧化层, 取煤芯部分, 经破碎、缩分并筛分出粒径为 0.18~0.25 mm 的颗粒, 将所得煤样置于真空干燥箱 30 °C 条件下, 干燥 24 h 得到实验煤样。

煤样罐顶底部预先垫上一层石棉, 防止煤粉堵塞气体通道, 然后称取 50 g 实验煤样放入煤样罐内, 再铺上一层石棉, 连接好实验装置, 检查气路的气密性。测试时向煤样内通入干空气, 通过调整稳流阀控制气体流量, 并设置程序升温箱的初始温度为 30 °C, 以 1 °C/min 升温速率对煤样进行程序升温至 220 °C, 煤样温度每升高 10 °C, 恒温运行 5 min 后, 利用气相色谱仪检测生成气体浓度, 将 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$, $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO}) + \varphi(\text{CO}_2))$, $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 作为复合气体指标, 研究不同干空气流量、氧气浓度条件下复合气体指标变化规律。

2 实验结果及分析

2.1 干空气流量

干空气流量变化可提供不同的氧气量参与煤氧反应。为研究干空气流量对复合气体指标的影响, 在氧气体积分数为 20.96%, 干空气流量分别为 50, 100 mL/min 条件下进行实验, 复合气体指标变化规律如图 2 所示。

从图 2(a) 可看出, 干空气流量为 100 mL/min 时, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 先突变上升后稍微下降, 再近似线性增加; 煤样温度达到 180 °C 之后, 50 mL/min 干空气流量下 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 略高于 100 mL/min 时。从图 2(b) 可看出, 不同干空气流量对 $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO}) + \varphi(\text{CO}_2))$ 几乎没有影响。从图 2(c) 可看出, 干空气流量为 100 mL/min 时氧气充足, $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 增长速率在 30~100 °C 时较快, 100~150 °C 时增大, 150 °C 之后相对减缓, $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 整体随着温度升高而增大; 干空气流量为 50 mL/min 时, $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 增长速率持续上升。

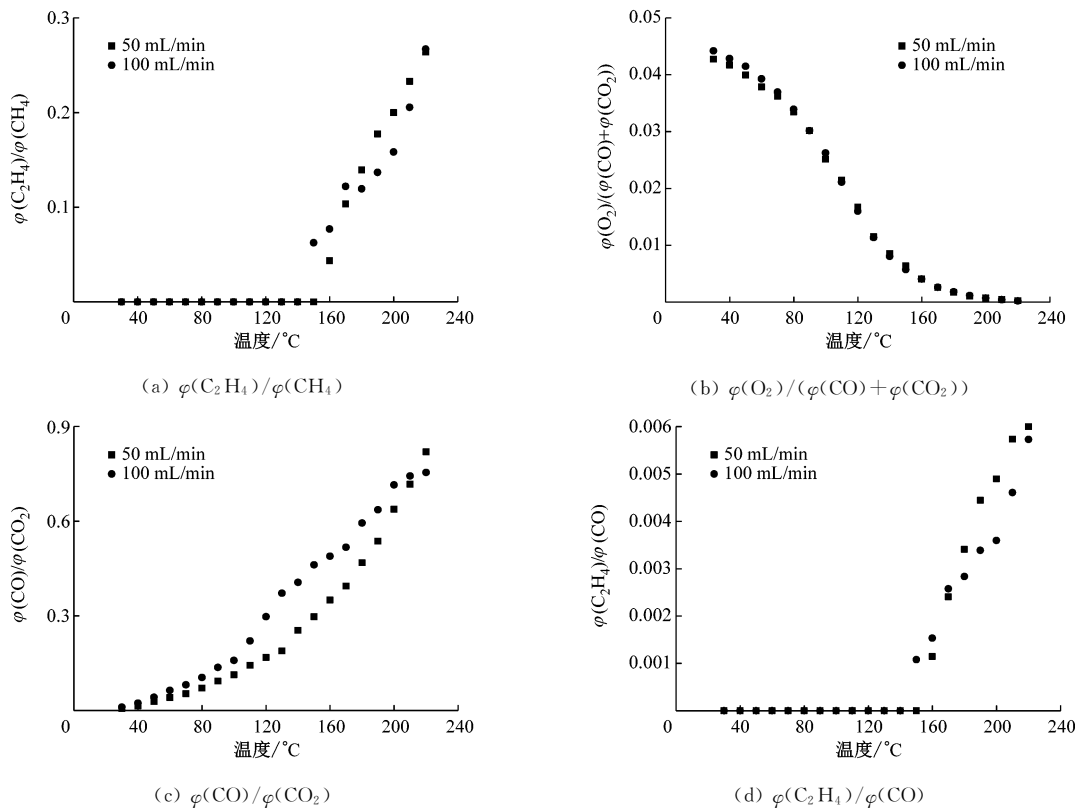


图 2 干空气流量对复合气体指标的影响

Fig. 2 Influence of dry air flow on composite gas indexes

从图 2(d)可看出,在煤样温度达到 150 ℃之前, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 接近 0, 150 ℃之后 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 快速上升, 低于 0.006。

2.2 氧气浓度

煤与氧气的相互作用是引起煤自燃的重要原因。煤氧复合是个十分复杂的变化过程, 不同氧气浓度对煤自燃各阶段有重要影响, 充足的氧气有利于煤氧反应进程加快^[11-13]。为研究氧气浓度对复合气体指标的影响, 在干空气流量为 50 mL/min, 氧气体积分数分别为 20.96%, 18%, 12.5%, 5% 条件下进行实验, 复合气体指标变化规律如图 3 所示。

从图 3(a)可看出, 在煤样温度达到 110 ℃之前, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 为 0; 随着温度上升, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 开始逐渐增大, 基本呈指数型上升, 20.96%, 18%, 12.5% 氧气体积分数下 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 基本重合, 满足气体指标选取原则^[14-15]; 5% 氧气体积分数下, 温度越高, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 变化率越大, 在 160 ℃之后开始急剧上升。

从图 3(b)可看出, 在煤样温度达到 100 ℃之前, 不同氧气体积分数下 $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 均随温度升高呈单调下降趋势; 100 ℃之后, 不同氧气体积分数对 $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 基本没有影响, $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$

逐步趋向稳定。

从图 3(c)可看出, 在煤样温度达到 100 ℃之前, 不同氧气体积分数下 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 变化趋势不明显; 随着温度上升, 在 100~160 ℃时, 18% 氧气体积分数下 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 最大; 超过 160 ℃时, 20.96% 氧气体积分数下 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 最大; 不同氧气体积分数下 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 均随温度升高而上升。

从图 3(d)可看出, 在煤样温度达到 160 ℃之前, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 变化趋势不明显; 温度超过 160 ℃后, 20.96%, 18%, 12.5% 氧气体积分数下 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 变化仍不明显, 但 5% 氧气体积分数下 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 变化显著。

3 结论

(1) 不同干空气流量对 $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 几乎没有影响, 因此在不能确定干空气流量的情况下, 应选取 $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 作为预测煤自燃的气体指标。

(2) 煤温在 100 ℃以下时, $\varphi(\text{O}_2)/(\varphi(\text{CO})+\varphi(\text{CO}_2))$ 可作为预测煤自燃的气体指标; 煤温超过 100 ℃时, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 和 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 可作为预测煤自燃的气体指标; 煤温超过 160 ℃且氧

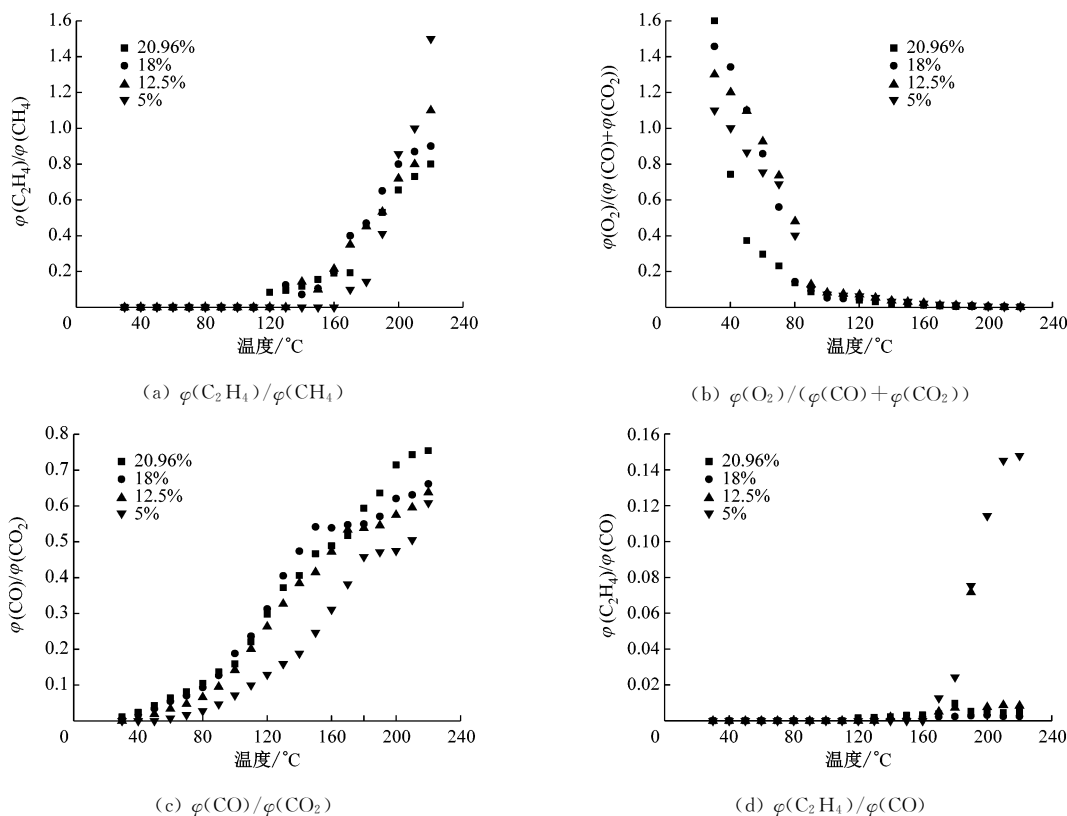


图 3 氧气浓度对复合气体指标的影响

Fig. 3 Influence of oxygen concentration on composite gas indexes

气体积分分数为 5% 左右时, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CO})$ 也可作为预测煤自燃的气体指标。

参考文献 (References):

[1] 邓军, 李贝, 李珍宝, 等. 预报煤自燃的气体指标优选试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 55-59.
DENG Jun, LI Bei, LI Zhenbao, et al. Experiment study on gas indexes optimization for coal spontaneous combustion prediction[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 55-59.

[2] 武建军, 蒋卫国, 刘晓晨, 等. 地下煤火探测、监测与灭火技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1669-1674.
WU Jianjun, JIANG Weigu, LIU Xiaochen, et al. Innovative technologies for exploration, monitoring and extinction of underground coal fires[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1669-1674.

[3] 朱红青, 王海燕, 王斐然, 等. 煤堆测温技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 50-54.
ZHU Hongqing, WANG Haiyan, WANG Feiran, et al. Research progress on coal stockpile temperature measuring technology [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 50-54.

[4] 邬剑明, 彭举, 吴玉国, 等. 平朔矿区煤自然发火指标

气体选择的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 67-69.

WU Jianming, PENG Ju, WU Yuguo, et al. Experiment study on index gas selection of coal spontaneous combustion in Pingshuo Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 67-69.

[5] 姚海飞, 张体镇, 阚国栋, 等. 典型整合矿井煤自燃标志气体判定[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 50-53.
YAO Haifei, ZHANG Tizhen, KAN Guodong, et al. Judgment on signs of gas for coal spontaneous combustion in typical integrated mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 50-53.

[6] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.

[7] 许延辉, 许满贵, 徐精彩. 煤自燃火灾指标气体预测预报的几个关键问题探讨[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(1): 16-18.
XU Yanhui, XU Mangui, XU Jingcai. Discussion on several problems in indication gas prediction of coal spontaneous combustion [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2005, 32(1): 16-18.

[8] 张玉龙, 王俊峰, 王涌宇, 等. 环境条件对煤自燃复合指标气体分析的影响[J]. 中国煤炭, 2013, 39(9):

- 82-86.
- ZHANG Yulong, WANG Junfeng, WANG Yongyu, et al. Effect of experimental conditions on composite index method of gas analysis in spontaneous combustion[J]. China Coal, 2013, 39(9): 82-86.
- [9] 刘乔, 王德明, 仲晓星, 等. 基于程序升温的煤层自然发火指标气体测试[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 362-366.
- LIU Qiao, WANG Deming, ZHONG Xiaoxing, et al. Testing on indicator gases of coal spontaneous combustion based on temperature program [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(3): 362-366.
- [10] 陈汝豪, 王德明, 曹凯, 等. 煤炭低温氧化自燃过程指标气体影响因素关联分析[J]. 矿业工程研究, 2012, 27(1): 32-38.
- CHEN Ruhao, WANG Deming, CAO Kai, et al. Relational analysis of the influencing factors for index gases of coal spontaneous combustion in low temperature mine[J]. Mineral Engineering Research, 2012, 27(1): 32-38.
- [11] ZHANG Yulong, WU Jianming, CHANG Liping, et al. Changes in the reaction regime during low-temperature oxidation of coal in confined spaces[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1221-1229.
- [12] 朱令起, 周心权, 谢建国, 等. 自然发火标志气体实验分析及优化选择[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 440-443.
- ZHU Lingqi, ZHOU Xinquan, XIE Jianguo, et al. Analysis of indicator gas of spontaneous combustion and its optimal selection[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 440-443.
- [13] 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 Mining & Technology, 2005, 34(2): 213-217.
- [14] 马汉鹏, 陆伟, 王宝德. 煤自燃过程指标气体产生规律的系统研究[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(12): 4-6.
- MA Hanpeng, LU Wei, WANG Baode. Systematic study on generation law of index gases in process of coal spontaneous combustion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(12): 4-6.
- [15] WANG Lanyun, JIANG Shuguang, WU Zhengyan, et al. Oxidation kinetics regularity in spontaneous combustion of gas coal[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2010, 20(1): 59-63.