

文章编号:1671-251X(2019)03-0018-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018090037

采空区内煤自燃气体特征及产生规律分析

周冬^{1,2}, 刘贞堂^{1,2}, 钱继发^{1,2}, 林松^{1,2}, 刘冠华^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)



扫码移动阅读

摘要:针对目前对在模拟逐渐升温的采空区环境条件下不同变质程度煤自燃现象的研究较少的问题,以采集的4种变质程度的焦瘦煤、气肥煤、无烟煤、肥焦煤为例,利用煤自燃模拟系统进行了煤自燃实验,研究在采空区环境条件下煤的燃烧特征及自燃气体的产生规律。实验结果表明,焦瘦煤、气肥煤、无烟煤、肥焦煤自燃时,温度会呈现“S”型上升趋势,前期温度先缓慢积累,而后开始快速升温,最后在300℃时趋于平衡,而后缓慢上升;不同煤样在自燃过程中均会产生碳氢化合物和碳氧化合物等挥发性气体,且生成速率受温度影响,并出现极大值和极小值2个拐点;无烟煤温度上升曲线近似于直线,气体曲线随温度波动不明显;气肥煤和肥焦煤自燃时会产生大量CO和CH₄,气肥煤产生CO的速率最快,CO最大体积分数可达8%,肥焦煤产生CH₄的速率最快,CH₄最大体积分数可达14%,焦瘦煤和无烟煤产生的CO和CO₂的体积分数分别在2%和4%左右。

关键词:采空区;煤自燃;焦瘦煤;气肥煤;无烟煤;肥焦煤;升温;气体分析

中图分类号:TD75

文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20190227.0935.001.html>

Analysis of gas characteristics and generation rules of coal spontaneous combustion in goaf

ZHOU Dong^{1,2}, LIU Zhentang^{1,2}, QIAN Jifa^{1,2}, LIN Song^{1,2}, LIU Guanhua^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: At present, there are few researches on coal spontaneous combustion with different metamorphic degree under environment conditions of simulated gradually heated goaf. Taking 4 kinds of metamorphic coal samples, such as coke lean coal, gas-fat coal, anthracite coal and fat coke coal as example, the experiment of coal spontaneous combustion was carried out by using simulation system of coal spontaneous combustion to study combustion characteristics of coal and generation rules of spontaneous combustion gas under goaf environment. Experiment results show that when coke lean coal, gas-fat coal, anthracite and fat coke coal are warmed up, the temperature will rise "S" type. The early temperature will have a slow accumulation process at first and then start to heat up quickly, and finally tend to balance at 300℃, and then slowly rising. Different coal samples produce volatile gases such as hydrocarbons and carbon oxides during the spontaneous combustion process and the rate of formation is affected by temperature, as well as the maximum and minimum two inflection points are present. The temperature rise curve of anthracite coal is similar to a straight line, and the gas curve does not fluctuate

收稿日期:2018-09-13;修回日期:2018-12-26;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174200)。

作者简介:周冬(1995—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为瓦斯煤尘爆炸及防治,E-mail:511214304@qq.com。

引用格式:周冬,刘贞堂,钱继发,等.采空区内煤自燃气体特征及产生规律分析[J].工矿自动化,2019,45(3):18-22.

ZHOU Dong, LIU Zhentang, QIAN Jifa, et al. Analysis of gas characteristics and generation rules of coal spontaneous combustion in goaf[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(3): 18-22.

obviously with temperature. Large amounts of CO and CH₄ are produced in spontaneous combustion of gas-fat coal and fat coke coal, the rate of CO production of gas-fat coal is the fastest, the maximum volume fraction of CO can reach 8%; and the rate of CH₄ production of fat coke coal is the fastest, the maximum volume fraction of CH₄ can reach 14%. The volume fraction of CO and CO₂ produced by coke lean coal and anthracite is about 2% and 4% respectively.

Key words: goaf; coal spontaneous combustion; coke lean coal; gas-fat coal; anthracite coal; fat coke coal; temperature rise; gas analysis

0 引言

在我国,煤自燃灾害十分严重^[1-2],煤自燃会产生高温并释放大量有毒有害气体。过高的温度会造成热损伤,引起矿井热害,甚至会进一步造成煤矿爆炸事故;有毒有害气体会侵蚀人体器官,影响健康。煤自燃灾害一旦发生,轻则影响工作效率,重则危害生命、破坏国家财产。为了更好地预防与治理煤自燃灾害,国内外学者开展了大量实验研究。黄素果^[3]分析了采空区残煤自燃指标气体,为孤岛综放工作面采空区残煤自燃的防控与治理提供了指导。蒋曙光等^[4]根据特定气体的成分及含量的变化预测采空区的煤自燃发火状况,为提前采取针对性的预防措施奠定了基础。文献^[5-8]根据升温过程中温度曲线的变化状况来判断特征温度点,表现煤自燃时煤本身的氧化特性。李林等^[9]确定了指标气体生成速率的分界线,分界线之上,速率缓慢增大;分界线之下,速率急剧增大。寇砾文等^[10]认为初始温度是影响气体产生规律的关键因素,煤样质量和程序升温速率次之。邓军等^[11]发现煤自燃发火过程中所产生的CO随温度升高而增多,CO在反应初始阶段增加缓慢,温度到达某一温度点后增加迅速。秦波涛等^[12]发现煤的自然能产生CO,当CH₄内混入CO以后,混合气体的爆炸上下限范围会增加,爆炸危险性会增大。陈舸等^[13]认为煤自燃气体中多数成分与CH₄同类,比空气轻,比O₂轻,它们极易相混,混合后改变了原CH₄与O₂混合气的爆炸极限,使爆炸更容易。

上述研究主要是针对单一煤种在不同温度下的气体生成规律进行分析,而对在模拟逐渐升温的采空区环境条件下,不同变质程度的煤自燃现象的研究较少。因此,本文以采集的不同变质程度的煤种为例,利用煤自燃模拟系统进行煤自燃实验,更全面地探究在采空区环境条件下煤的燃烧特征及自燃气体的产生规律。

1 煤自燃模拟系统

多数采空区环境条件基本具备煤自燃的3个要

素,即煤本身要有自燃倾向性、有足够的氧气供给和氧化产生的热量聚集,一旦煤发生自燃,会产生多种可燃气体,极易发生矿井火灾和爆炸事故。为了分析煤自燃产生的气体组分,设计了采空区内煤自燃模拟系统,系统结构如图1所示。该系统可以用来进行煤自燃实验,也可以用于模拟采空区环境下的瓦斯爆炸实验。

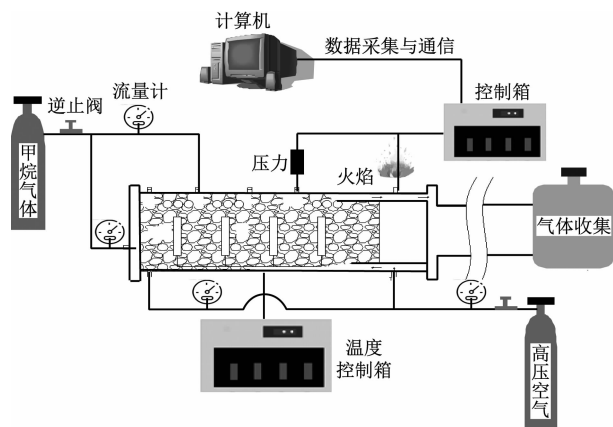


图1 煤自燃模拟系统结构

Fig. 1 Structure of coal spontaneous combustion simulation system

煤自燃模拟系统主要包括燃烧爆炸腔体、控制系统和数据采集系统等部分。其中燃烧爆炸腔体为内径为100 mm、长为760 mm的不锈钢腔体,壁厚为10 mm,是系统的主要构成部分,主要用于模拟采空区气流流场环境,使腔体内发生的燃烧、爆炸实验更接近于采空区实际状况;控制系统用来控制瓦斯、空气进气装置以及加热装置;数据采集系统用来记录实验过程中的燃烧温度、爆炸压力等数据。

2 实验

2.1 实验样品

采空区内残留的煤体形状不规则,其尺寸大小不同。为了充分模拟采空区内煤自燃环境,煤样选自不同矿区的新鲜煤岩,经过破碎后,用于本次实验。本次实验选取的煤样品质差别较大,对其进行了工业分析和分类,煤样的工业分析结果见表1。从表1可看出,1号煤样为焦煤,2号煤样为气肥煤,3号煤样为无烟煤,4号煤样为肥焦煤。

表 1 煤样的工业分析结果
Table 1 Industrial analysis results of coal samples

煤样编号	挥发分/%	灰分/%	水分/%	固定碳/%
1 号	4.77	5.42	23.74	66.07
2 号	8.94	3.91	30.71	56.44
3 号	2.24	11.01	7.77	78.98
4 号	2.93	9.36	27.71	60.00

2.2 实验方法

将煤样加入腔体,使不同尺度的煤样在腔体内随机全面分布,并将加热装置完全覆盖,关闭腔体密封盖。打开控制系统,设置进气装置流量为 7.6 dm³/h。待腔体内流场稳定后,在控制面板上设定自动断电温度,打开加热装置。在加热过程中按照煤自燃不同阶段用注射器抽取气体,放入气体收集袋中,用气相色谱分析仪检测收集的气体。

3 煤自燃气体特征及产生规律分析

3.1 煤体温度随时间变化规律

为了研究煤体温度随时间变化的规律,搭建了煤自燃模拟系统,模拟了不同变质程度的煤在采空区环境条件下的煤自燃现象,实验结果如图 2 所示。

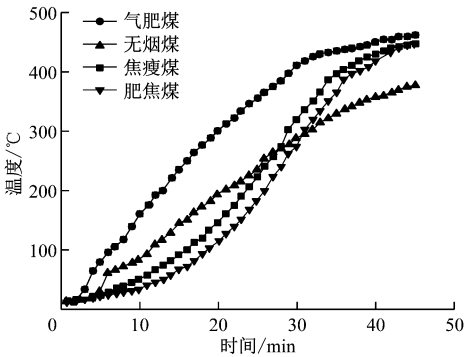


图 2 煤自燃温度随时间变化曲线

Fig. 2 Change curve of temperature with time of coal spontaneous combustion

由图 2 可知,煤在自燃时可分为 3 个阶段:第 1 个阶段的时间为 0~15 min,在该阶段温度缓慢上升,能量不断累积;第 2 个阶段的时间为 15~30 min,此时能量达到限值,温度陡增,能量快速积累,煤岩内部发生强烈的氧化还原反应,释放出大量气体;第 3 个阶段的时间为 30 min 后,该阶段温度曲线趋于平缓,直至平衡状态。

不同变质程度的煤在自燃时的温度上升曲线存在差异。焦瘦煤和肥焦煤存在明显的温度积累、快速上升、缓慢上升的 3 个过程,肥焦煤温度曲线滞后于焦瘦煤曲线,在 45 min 时两者温度存在交叉,之后肥焦煤自燃温度高于焦瘦煤;无烟煤温度曲线较为平直,在 5 min 时温度陡增之后与时间几乎成正

比关系增长,并且在 45 min 时达到的最高温度比其他 3 种煤样更低;气肥煤从 0 时刻开始温度直线上升,没有明显的能量缓慢累积过程,至 30 min 时出现拐点,温度缓慢上升。在 0~45 min 内,虽然焦瘦煤、肥焦煤和气肥煤温度上升曲线不同,但在 45 min 时都达到了最高温度,无烟煤略低于其他煤样。

3.2 气体体积分数随温度变化规律

为了研究各种挥发性气体的生成速率随温度的变化规律,在进行煤自燃实验的过程中收集了不同阶段的气体并通过气相色谱分析仪进行检测,实验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,气肥煤、焦瘦煤、肥焦煤和无烟煤自燃时,生成的气体种类基本相同。在不同变质程度的煤自燃过程中,CH₄、CO、CO₂ 等气体大量析出,而 C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂、C₃H₈ 等气体均维持在较低的水平。气肥煤、焦瘦煤、肥焦煤的气体曲线均出现拐点,在拐点之前,气体体积分数随着温度上升而增加,在拐点处达到最高;拐点之后,曲线均出现不同程度的下降。这是由于煤中的碳在高温下与氧气发生氧化反应,导致空气中的氧气大量消耗;在煤自燃缓慢升温阶段中,CH₄、CO₂、CO 等附着在煤体内部的气体在第 1 阶段挥发完毕;在煤自燃快速升温阶段,脱气和解聚的过渡阶段,由于富含气体挥发完毕、解聚反应较弱导致 CH₄、CO₂、CO 等体积分数和生成速率降低,气体曲线呈现下降趋势;当解聚和分解阶段完全开始之后,煤分子发生热解,结构单元之间的桥键断裂生成自由基,脂肪侧链受热裂解形成气态烃,含氧官能团(-COOH)裂解形成碳氧化物,CH₄、CO₂、CO 等气体开始大量生成,其累积速率逐渐大于消散速率,形成累积趋势。

3.3 气体成分对比分析

煤自燃过程中涉及到的挥发性气体虽然很多,但是最主要的气体成分为 CH₄、O₂、CO₂、CO,各气体成分对比如图 4 所示。

由图 4 可知,不同变质程度的煤在自燃时均产生 CO,气肥煤自燃时挥发出大量的 CO₂ 和 CO,且产生 CO 的速率最快,最大体积分数可达 8%,CH₄ 体积分数略低于 CO;焦瘦煤变质程度较高,黏结性较强,在自燃时各气体成分的产气量稳定,CO 和 CH₄ 体积分数保持在 2%左右;肥焦煤自燃产生大量的 CH₄ 气体,且产生速率最快,最高体积分数可达 14%,说明煤体中吸附的大量瓦斯受热解析;无烟煤由于其物理特性导致其自燃时产生的烟气量较少,但依然生成了大量的 CO 气体,达到 4%左右。4 种煤样自燃时,受限空间内的 O₂ 体积分数都呈现

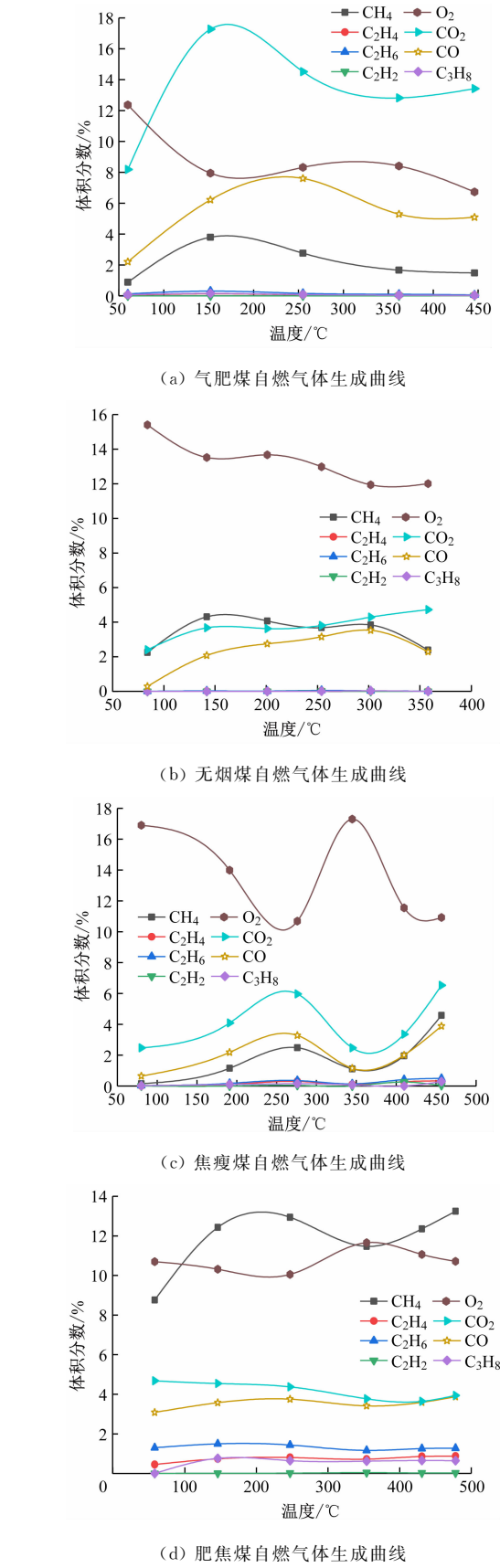


图3 不同变质程度煤自燃气体生成曲线

Fig.3 Gas formation curves of coal spontaneous combustion with different metamorphic degree

研究表明,受限空间内CH₄、CO、CO₂易发生

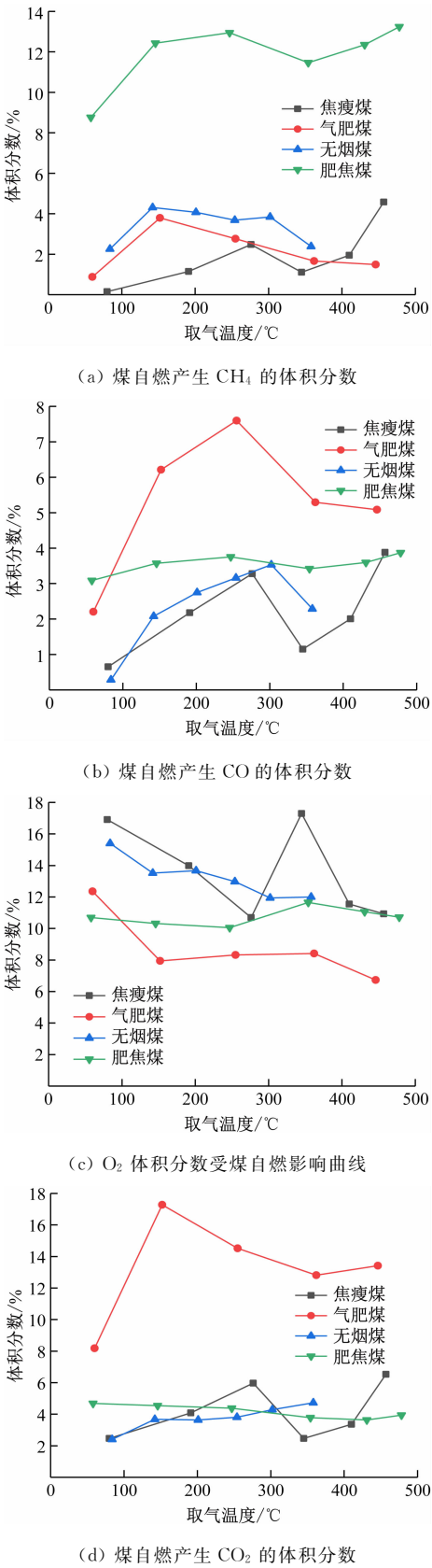


图4 煤自燃产生的主要气体对比分析曲线

Fig.4 Contrastive analysis curves of main gas produced in coal spontaneous combustion

相互作用,少量CO气体可使空气中CH₄的爆炸上限上升、爆炸下限有所下降,爆炸范围增加,增加了爆炸的危险度^[14-16];瓦斯爆炸时,CO₂的存在会减

弱 CH_4 爆炸强度;加入 CO 后, CO_2 对瓦斯爆炸的抑制效果减小,并且随着 CO 体积分数的增大,抑制效果逐渐降低。

4 结论

(1) 焦瘦煤、气肥煤和肥焦煤自燃时,温度会呈“S”型上升趋势,即先缓慢累积然后快速上升,当达到 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时再缓慢上升至第3个阶段,各阶段经历的时间与煤的种类有关;无烟煤温度上升曲线近似于直线。

(2) 不同变质程度的煤自燃时会产生 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_3H_8 等碳氢化合物以及 CO 、 CO_2 等碳氧化合物,其中 CO 和 CH_4 体积分数较大。焦瘦煤、气肥煤、肥焦煤气体生成曲线出现了2个拐点,在第1个拐点处气体体积分数出现极大值,在第2个拐点处出现极小值;无烟煤气体曲线较为平直,随温度波动不明显。

(3) 气肥煤产生 CO 速率最快,最大体积分数可达8%;肥焦煤产生 CH_4 速率最快,最大体积分数可达14%;焦瘦煤和无烟煤产生 CO 和 CO_2 的体积分数分别在2%和4%左右。

参考文献(References):

- [1] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [2] 肖旸,李青蔚,鲁军辉. 空气相对湿度对煤自燃特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报,2015,25(3):34-40.
XIAO Yang, LI Qingwei, LU Junhui. Effects of air relative humidity on coal spontaneous combustion properties [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(3):34-40.
- [3] 黄素果. 孤岛综放工作面采空区残煤自燃指标气体及“三带”特征研究[J]. 煤炭技术,2015,34(6):143-146.
HUANG Sugu. Investigation on indicator gas on residual coal spontaneous combustion and spontaneous combustion three zone in gob of isolated fully mechanized caving face[J]. Coal Technology, 2015,34(6):143-146.
- [4] 蒋曙光,李亚东,邹力力,等. 基于气相色谱技术的采空区煤自燃火灾预测预报研究[J]. 工矿自动化,2010,36(6):38-40.
JIANG Shuguang, LI Yadong, ZOU Lili, et al. Research of forecasting of spontaneous combustion of coal in mined-out area based on technology of gas chromatography [J]. Industry and Mine Automation, 2010,36(6):38-40.
- [5] 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.
- [6] 邹剑明,彭举,吴玉国. 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. Experiment study on index gas selection of coal spontaneous combustion in Pingshuo Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2012,40(2):67-69.
- [7] 张嫵妮,李士戎,罗振敏,等. 基于油浴程序升温试验系统的煤自燃特性研究[J]. 煤炭科学技术,2010,38(8):85-88.
ZHANG Yanni, LI Shirong, LUO Zhenmin, et al. Study on coal spontaneous combustion features of temperature rising system based on oil bathing program [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(8):85-88.
- [8] 朱令起,杨帆,刘聪. 煤自燃加速氧化阶段指标气体优选实验研究及分析[J]. 煤矿机械,2016,37(6):40-43.
ZHU Lingqi, YANG Fan, LIU Cong. Experimental study and analysis on optimization of index gas in accelerated oxidation phase of coal spontaneous combustion [J]. Coal Mine Machinery, 2016,37(6):40-43.
- [9] 李林,陈军朝,姜德义,等. 煤自燃全过程高温区域及指标气体时空变化实验研究[J]. 煤炭学报,2016,41(2):444-450.
LI Lin, CHEN Junchao, JIANG Deyi, et al. Experimental study on temporal variation of high temperature region and index gas of coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2):444-450.
- [10] 寇砾文,蒋曙光,王兰云,等. 煤自燃指标气体产生规律及影响因素分析[J]. 矿业研究与开发,2012,32(2):67-70.
KOU Liwen, JIANG Shuguang, WANG Lanyun, et al. Analysis on the production law of index gases for spontaneous combustion of coal and their influencing factors [J]. Mining Research & Development, 2012,32(2):67-70.
- [11] 邓军,赵婧昱,张嫵妮. 基于指标气体增长率分析法测定煤自燃特征温度[J]. 煤炭科学技术,2014,42(7):49-52.
DENG Jun, ZHAO Jingyu, ZHANG Yanni. Study on

- determination of coal spontaneous combustion characteristic temperature based on analysis method of index gas growth-rate [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 49-52.
- [12] 秦波涛,张雷林,王德明.等.采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J].煤炭学报,2009,34(12): 1655-1659.
QIN Botao, ZHANG Leilin, WANG Deming, et al. Mechanism and restraining technology on spontaneous combustion of coal detonating gas in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1655-1659.
- [13] 陈舸,陈孟伯.煤自燃发火促成瓦斯爆炸作用的讨论[J].煤矿安全,2012,43(增刊1):142-145.
CHEN Ge, CHEN Mengbo. Discussion on the effect of coal spontaneous combustion causing gas explosion [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(S1): 142-145.
- [14] 贾宝山,肖明慧,尹彬,等.采空区遗煤氧化标志性伴生气体对瓦斯爆炸的影响[J].煤炭科学技术,2017, 45(4):56-61.
JIA Baoshan, XIAO Minghui, YIN Bin, et al. Symbolic associated gas of left coal oxidation in goaf affected to gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 56-61.
- [15] 周西华,孟乐,史美静,等.高瓦斯矿发火区封闭时对瓦斯爆炸界限因素的影响[J].爆炸与冲击,2013, 33(4):351-356.
ZHOU Xihua, MENG Le, SHI Meijing, et al. Influences of sealing fire zone in high gas mine on impact factors of gas explosion limits[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 351-356.
- [16] 程方明,邓军.一氧化碳影响二氧化碳惰化甲烷爆炸的实验研究[J].西安科技大学学报,2016,36(3): 315-319.
CHENG Fangming, DENG Jun. Experimental study on the influence of carbon monoxide on carbon dioxide-inerted methane explosion[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(3): 315-319.