

煤自燃早期预报指标的研究与应用

陈晓坤,于志金

(西安科技大学 安全科学与工程学院 陕西 西安 710054)

摘要:为得到出实用性和可靠性更强的现场煤自燃早期预报方法,选取鸳鸯湖矿区典型煤样,通过煤自然发火试验获得了煤自燃过程主要指标气体的产生规律与特征参数,确定了以 CO 、 C_2H_4 作为主要的早期预报指标。结合 CO 的主要来源和工作面干扰气体浓度的因素,提出了上隅角 CO 浓度理论模型,并计算得出了体积分数为0.04%的极限指标,来预报采空区遗煤的氧化程度。基于鸳鸯湖矿区典型工作面回采期间上隅角 CO 浓度的观测数据,分析了上隅角 CO 浓度动态波动的主要原因以及灌浆、注氮、提高推进度等防治措施的关联性。同时验证了建立的极限预报指标体系能够满足煤自燃早期预报的要求。

关键词:自然发火;上隅角; CO 浓度;极限指标

中图分类号:TD75 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2016)10-0013-05

Study and application on early prediction index of coal spontaneous combustion

Chen Xiaokun, Yu Zhijin

(School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to obtain a practical and more reliable early prediction method of the site coal spontaneous combustion, the typical coal samples were selected from Yuanyang Lake Mining Area. With the coal spontaneous combustion experiment, the production law and feature parameters of the main index gases were obtained from the coal spontaneous combustion process. CO and C_2H_4 were determined as the main early prediction indexes. In combination with the main sources of CO and the factors that interference gas concentration in the coal mining face, a theoretical model of CO concentration in the top corner was provided and the limit index value of volume fraction 0.04% from the calculation was applied to predict the oxidation degree of the coal left in the goaf. Based on the observed data of CO concentration in the top corner during the mining period of the typical coal mining face in Yuanyang Lake Mining Area, the main causes of CO concentration dynamic fluctuation in the top corner were analyzed, including the relevance with grouting, nitrogen injection, improved advancing rate and other prevention and control measures. Meanwhile, the established limit predicted index system was confirmed could meet the early warning requirements of coal spontaneous combustion.

Key words: spontaneous combustion; top corner; carbon monoxide concentration; limit index

0 引言

长期以来,宁东各矿井煤层自然发火现象频繁^[1-4]。究其根源,除煤层自燃倾向性高等因素外,无法依据早期预报指标预测自燃程度,从而导致煤自燃的防控错过了最佳时机。新建矿井煤自燃基础

参数匮乏,迫切需要对煤层自然发火特性进行研究并建立科学的煤自燃早期预报指标。

依据气体浓度、温度等参数指标进行早期识别和预警是预防煤自燃灾害的根本预报方法^[5]。如秦红星等^[6]通过低温氧化试验确定了 CO 、 C_2H_4 、 C_3H_8 分别为由低温至高温阶段的标志气体。彭伟

收稿日期:2016-05-12;责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.10.003

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51404195, 51404192)

作者简介:陈晓坤(1961—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师。通讯作者:于志金, Tel: 029-8558749, E-mail: chengxk@xust.edu.cn

引用格式:陈晓坤,于志金.煤自燃早期预报指标的研究与应用[J].煤炭科学技术, 2016, 44(10): 13-17, 111.

Chen Xiaokun, Yu Zhijin. Study and application on early prediction index of coal spontaneous combustion[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 13-17, 111.

等^[7]利用 TG-DSC-GC 联用技术同样得到了在低温氧化阶段,应以 CO 为主, C_2H_4 为辅作为指标气体的结论。朱令起等^[8]认为在 50~350 °C,选择 CO 作为煤自燃预测预报的标志气体是可行的。但在现场条件下,仅依据试验结果或《煤矿安全规程》定义的上隅角 CO 体积分数 24×10^{-6} 来判断煤自燃的危险程度,往往具有较大偏差^[9]。文献[10-11]在对神东和宁东两地煤层自燃规律的研究中均提到了因开采因素导致的 CO 积聚和超限严重干扰了煤自燃预测预报,为防火措施的实施和工作面 CO 的管理带来了困难。因此,应将试验测试的基础数据与具体的矿井环境相结合,并通过相关数学模型计算,从而建立科学的早期煤自燃预报指标。

鉴于此,笔者以建立宁东煤田鸳鸯湖矿区自燃早期预报指标的过程为例,旨在提出一种建立科学的煤自燃早期预报指标的思路。为掌握标志气体浓度变化与煤自然发火之间的关系提供依据与指导。

1 煤自然发火试验

为掌握鸳鸯湖矿区主采煤层的自然发火特性,利用西安科技大学研制的 XK-VI 型煤自然发火试验台分别对鸳鸯湖矿区内清水营煤矿、梅花井煤矿、石槽村煤矿和红柳煤矿煤样进行自然发火试验。

1.1 试验过程

试验装置内部结构和具体试验原理及方法可参考文献[12],具体的试验条件见表 1。

表 1 试验条件

Table 1 Experimental conditions

煤样	平均粒 径/mm	高度/ cm	质量/ kg	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	供风量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	起始温 度/°C
清水营	3.57	170	1 574.24	0.819 2	0.1~1.5	27.5
梅花井	2.20	180	1 644.46	0.808 2	0.1~1.5	25.2
石槽村	2.70	185	1 788.22	0.855 1	0.1~1.5	37.8
红柳	2.19	180	1 706.32	0.838 6	0.1~0.8	25.1

在环境温度下将采集的原煤样进行破碎后装入试验装置。试验过程中,通过试验炉内布置的自动温度测试采集系统得到煤体升温过程的温度特征,在试验炉内检测点处取气,然后利用色谱仪进行分析气体成分,得到对应温度下不同位置的气体变化情况。试验至测点煤温达 170 °C 时停止。

1.2 试验结果及分析

1) CO 产生规律。CO 作为煤低温氧化产生的

主要气体,是预测早期煤自燃最为灵敏和准确的指标参数之一^[13]。通过试验测得出口位置的 CO 浓度随各试验煤体的最高温度变化,如图 1 所示。同时,考虑 CO 主要是煤氧化复合反应的产物,可由炉内气体浓度变化量来推算出自燃过程中 CO 的产生率^[14-15]。其计算公式为

$$V_{CO}^0(T) = \frac{V_{O_2}^0(T) (C_{CO}^2 - C_{CO}^1)}{C_{O_2}^0 \{1 - [\exp - V_{O_2}^0(T) SL / (QC_{O_2}^0)]\}} \quad (1)$$

其中: $V_{CO}^0(T)$ 、 $V_{O_2}^0(T)$ 分别为在标准氧浓度时 CO 的产生率、煤的耗氧速率, $mol / (m^3 \cdot s)$; C_{CO}^2 、 C_{CO}^1 分别为入口和出口的 CO 浓度, mol / m^3 ; $C_{O_2}^0$ 为新鲜空气中的氧气浓度, mol / m^3 ; S 为罐体底面积, m^2 ; L 为两测点之间的距离, m ; Q 为供风量, mL / min 。通过式(1)计算得到煤升温过程 CO 产生率与煤最高温度间的关系,如图 2 所示。

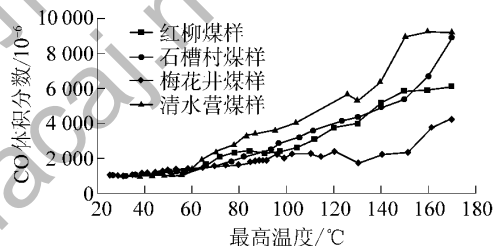


图 1 CO 体积分数与煤最高温度变化关系

Fig. 1 Relationships between CO concentration and maximum temperature of coal

由图 1 可知,鸳鸯湖矿区各矿煤样均在常温下就存在 CO,且在自然升温过程中,CO 体积分数与温度成良好的对应关系,体现为非线性指数规律上升的特点。由图 2 可知,在 CO 产生率随煤温升高而增加的过程中,各煤样 CO 产生率明显增加的第 1 个突变温度出现在 50~60 °C,说明该温度范围为自然升温的临界温度,超过该温度范围,煤加速升温导致 CO 产生量急剧增加。图 2b 给出了临界温度内各煤样 CO 产生率的变化特征,可以看出除梅花井外,各煤样在临界温度内均出现了较为明显的 CO 产生率突变点。从整个升温过程来看,鸳鸯湖矿区内各煤样 CO 的产生规律与煤温升高呈现较好的对应关系,可作为煤自燃早期预报指标气体。

2) 主要特征参数。自然发火期、特征温度等主要参数是预防煤自燃的基本依据,表 2 总结了自然发火试验过程中部分试验结果。

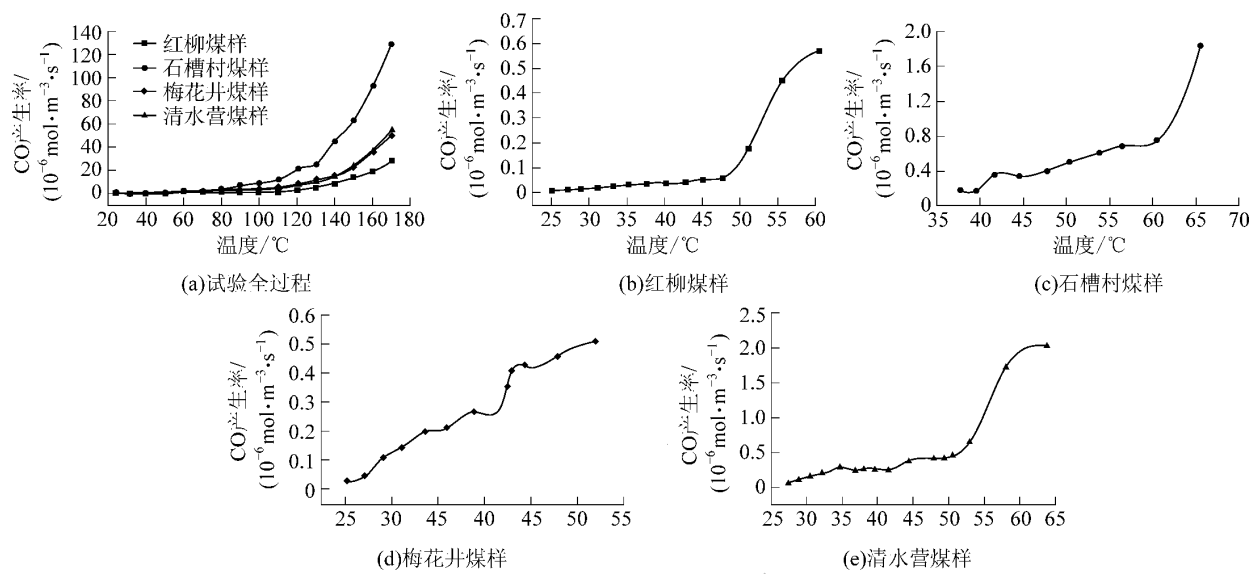


图 2 CO 产生率与煤最高温度的关系

Fig. 2 Relationships between CO generation rate and maximum temperature of coal

表 2 自然发火试验结果

Table 2 Experimental result for spontaneous combustion test

项目	取样地点			
	清水营	梅花井	石槽村	红柳
试验最短自然发火期(25~170℃)/d	32	23	28	29
临界温度/℃	60~65	45~50	58~62	58~62
临界温度升至170℃的时间/d	14	10	9	11
临界温度时的CO产生率/(mol·m ⁻³ ·s ⁻¹)	1.75×10 ⁻⁶	0.51×10 ⁻⁶	1.52×10 ⁻⁶	0.54×10 ⁻⁶
出现C ₂ H ₄ 的温度/℃	84.5	55.7	81.8	84.6

由表 2 可知,鸳鸯湖矿区各煤样自然升温的临界温度范围大致相同,跨度较小,说明从自燃火灾预防的角度,相同矿区内的各矿井具有类似的自燃特性。同时,测得各煤样试验最短自然发火期为 23~32 d。而由临界温度升至 170℃ 的时间则明显缩短,仅为 9~14 d。说明煤温一旦突破临界温度,各煤样升温速率迅速上升,表现为在很短的时间内达到燃点,发生自燃火灾。因此,控制临界温度范围内煤自燃程度的发展是预防自然发火事故的关键。此外,除梅花井煤样外,各煤样均在 80℃ 以上出现了 C₂H₄,说明可定义 C₂H₄出现作为煤自燃进入高温阶段的预报指标。

2 上隅角煤自燃早期预报指标

自然发火试验虽测算出了预报自燃程度的量化

参考指标,但现场进行煤自燃早期预报时,应结合开采条件对影响指标气体涌出的因素进行分析,从而建立科学的指标预测模型。

2.1 上隅角 CO 理论计算模型

通过分析鸳鸯湖矿区典型工作面上隅角 CO 的来源和影响因素,以工作面上隅角 CO 浓度预测模型来计算不同时期上隅角 CO 指标气体预报的极限值^[12],见式(2)。

$$[CO] = \frac{(\alpha Z_1 + \beta Z_2)(1 - \varphi) LV_{CO}(T)}{Q_f} \quad (2)$$

式中:[CO]为模型计算得到的 CO 浓度, mol/m³;α为采空区氧化带浮煤氧化修正系数(综采工作面取 0.3~0.5,综放工作面取 0.2~0.4);Z₁为采空区氧化带的宽度, m;β为采空区散热带浮煤氧化修正系数(正常通风情况下取 0.8~1.0,漏风率低于 1%时取小于 0.5);Z₂为采空区散热带的宽度, m;V_{CO}(T)为对应温度下 CO 的产生率, mol/(m³·s);L为工作面面积, m²;φ为采出率, %;Q_f为采空区漏风量, m³/min。

2.2 典型工作面条件

选取鸳鸯湖矿区内的典型工作面:清水营 110205 工作面、石槽村 210602 工作面、梅花井 110205 工作面和红柳 110205 工作面为例。

通过现场观测和采空区自燃“三带”划分,得到典型工作面 CO 预测模型的主要计算参数见表 3。

表 3 CO 预测模型的主要计算参数

Table 3 Major calculation parameters of CO prediction model

	清水营	石槽村	梅花井	红柳
工作面名称	110205	210602	1106106	1010204
	工作面	工作面	工作面	工作面
工作面长度/m	283	292	272	303.5
配风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	943~986	1 200~1 290	950~1 100	850~1 000
开采厚度/m	4.8	3.5	4.3	5.56
平均推进度/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	7	3.2	9.5	6.8
采出率/%	93	93	90	88
漏风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	47.85	40.25	30.4	42.8
氧化带宽度/m	63	95	125	92
散热带宽度/m	37.5	55	63	41.6
修正系数 α	0.5	0.5	0.5	0.5
修正系数 β	1	1	1	1

2.3 上隅角预报指标参数

将表 3 中的参数和自然发火试验结果代入式 (2), 计算得到表征不同煤自燃程度的上隅角 CO 体积分数预测极限值, 见表 4。

由表 4 可知, 利用不同温度阶段对应的上隅角 CO 预测极限值, 可对自燃程度进行定性的分析。具体而言, 鸳鸯湖矿区各生产矿井正常开采期间, 上隅

表 4 上隅角 CO 体积分数预测极限值

Table 4 Predicted extreme value of CO concentration

at upper corner			
工作面	煤自燃程度	温度/ $^{\circ}\text{C}$	上隅角 CO 体积分数 预测极限值/ 10^{-6}
清水营	常温条件	18~30	75
110205 工作面	临界温度	60~65	322
石槽村	常温条件	18~30	89
210602 工作面	临界温度	58~62	361
梅花井	常温条件	18~30	97
1106106 工作面	临界温度	45~50	364
红柳	常温条件	18~30	51
1010204 工作面	临界温度	58~62	296

角 CO 观测体积分数不会超过 0.01%。CO 体积分数在 0.01%~0.04% 波动时, 应适当采取防火措施或加快回采速度, 抑制煤的氧化升温。当观测值达到 0.04% 时, 则说明氧化煤体已经至少升温至临界温度, 应立即采取针对性的防火灭火措施, 否则将在很短的时间内发生煤自燃灾害。

3 现场应用与分析

通过对鸳鸯湖矿区各矿井主采工作面上隅角进行气体取样色谱分析得到了回采过程上隅角 CO 的涌出规律, 如图 3 所示(图 3 中的虚线为 CO 体积分数预测极限值)。

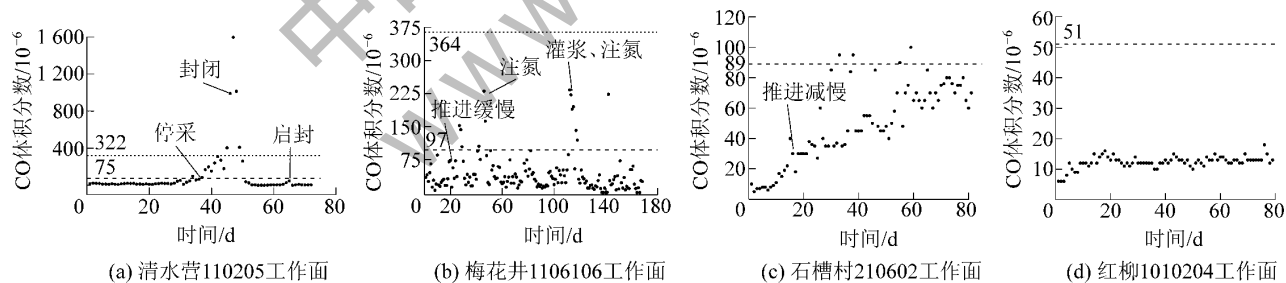


图 3 上隅角 CO 体积分数现场观测数据

Fig. 3 Field observation data of CO concentration at upper corner

图 3a 选取了清水营 110205 工作面末采期间的上隅角 CO 统计数据。可以看出, 末采期间由于推进减慢、布置回收等原因, 造成上隅角 CO 缓慢上升。而工作面停采回撤时, 由于工作面处于静态, 煤体快速氧化升温。回撤第 8 天, 上隅角 CO 超过临界温度下的极限预测值, 并快速上升。同时, 经架间监测得到部分支架后尾梁处 CO 体积分数达 1% 以上, 遂工作面迅速采取了封闭措施。封闭后通过施工的架间钻孔向采空区灌注了大量的液态 CO_2 、胶

体等灭火材料。封闭第 5 天, 上隅角 CO 体积分数下降至 0.007 5% 以下, 并于此后维持稳定。封闭 19 天后, 工作面实现成功启封。

由图 3b 可知, 在正常回采期间, 梅花井 1106106 工作面上隅角 CO 均低于常温状态预测极限值。但当因地质构造和生产技术等原因导致部分区段内推进缓慢时, 上隅角 CO 出现了一定程度的上升。而通过采空区两侧的预埋管进行注氮、注浆等措施后, 随着回采加快, 上隅角 CO 浓度逐步恢复

正常。

图3c选取了石槽村210602工作面初采时期上隅角CO的统计数据,初采期间由于开切眼等位置易出现自然发火。工作面加快了推进速度,达5~6 m/d,此后随着工作面进入稳定开采阶段,推进速率有所减慢,稳定在3~4 m/d。上隅角CO虽略有升高但总体则维持在0.006%~0.008%。

由图3d可知,红柳1010204工作面回采期间,上隅角CO浓度明显低于常温状态下的理论预测值。说明一方面现有开采条件下工作面自然发火的危险性较小。另一方面说明基于极限参数计算的上隅角CO预测值即最大上隅角CO安全浓度值。

通过上述4个鸳鸯湖矿区典型工作面不同回采阶段现场数据的反馈信息,验证了基于上隅角CO浓度极限值建立的煤自燃早期预报指标能够准确反应采空区煤的自燃程度。可将上隅角监测的数据与该指标进行比较后指导工作面相关防灭火工作的实施,从而大幅降低煤自然发火的概率。

4 结 论

1) 通过自然发火试验得到鸳鸯湖矿区各煤样自然升温过程中CO的产生率与煤温具有良好的对应关系,并于50~60℃内CO产生率首次发生明显增加,80℃以上出现C₂H₄。因此,将CO选作煤低温阶段的主要预测指标气体,出现C₂H₄则表示煤氧化进入高温阶段。

2) 结合现场工作面上隅角CO的产生来源及浓度的影响因素,给出了上隅角CO浓度极限值的理论计算公式,从而能够准确地预测采空区煤自燃隐患。

3) 以鸳鸯湖矿区4个生产工作面为例,计算得出了常温状态下上隅角CO极限值为0.01%,临界温度下CO的极限值为0.04%。并结合监测数据,验证了提出的计算方法具有较高的现场应用可靠性,为煤自燃早期准确预报提出了新的方法。

参考文献(References):

- [1] 陈文,刘自俭.宁东能源化工基地煤炭资源保障能力分析[J].中国煤炭地质,2009,21(11):24-27.
Chen Wen, Liu Zijian. Ningdong energy and chemical industrial base coal resource support analysis [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(11): 24-27.
- [2] 丁永禄,董伟,郝军.工作面回撤期间封闭和注液氮防灭火技术[J].煤炭科学技术,2013,41(2):49-51.

- Ding Yonglu, Dong Wei, Hao Jun. Fire prevention and control technology with sealing and liquid nitrogen injection during withdrawing period of coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(2): 49-51.
- [3] 钱钧,周光华,刘洪刚,等.地面钻孔液氮直注式防灭火技术在灵新煤矿的应用[J].煤矿安全,2015,46(9):137-140.
Qian Jun, Zhou Guanghua, Liu Honggang, et al. Application of surface drilling liquid nitrogen immediate injection fire preventing and extinguishing technique in Lingxin Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(9): 137-140.
- [4] 翟小伟,何勇军,王凯,等.王洼二矿综放工作面煤自燃灾害防治技术[J].煤矿安全,2016,47(7):66-68,72.
Zhai Xiaowei, He Yongjun, Wang Kai, et al. Comprehensive fire prevention and control technology for fully mechanized caving face in Wangwa No.2 Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(7): 66-68, 72.
- [5] 罗海珠,梁运涛.煤自然发火预测预报技术的现状与展望[J].中国安全科学学报,2003,13(3):79-81.
Luo Haizhu, Liang Yuntao. Current status and perspective of forecast and prediction techniques for spontaneous combustion of coal [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(3): 79-81.
- [6] 秦红星,戴广龙,张树川,等.基于煤低温氧化试验下的标志气体优选及应用[J].煤炭科学技术,2015,43(6):65-70.
Qin Hongxing, Dai Guanglong, Zhang Shuchuan, et al. Optimal selection and application of mark gas based on coal low temperature oxidation test [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 65-70.
- [7] 彭伟,何启林,葛新玉.煤炭自燃指标性气体确定的试验研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(6):140-144.
Peng Wei, He Qilin, Ge Xinyu. Experimental studies on the index gases of spontaneous of coal [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(6): 140-144.
- [8] 国家安全生产监督管理总局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2011.
- [9] 朱令起,周心权,谢建国,等.自然发火标志气体试验分析及优化选择[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.
- [10] 吴玉国.神东矿区综采工作面采空区常温条件下CO产生与运移规律研究及应用[D].太原:太原理工大学,2015.
- [11] 翟小伟,马灵军,邓军.工作面上隅角CO浓度预测模型的研究与应用[J].煤炭科学技术,2011,39(11):59-62.
Zhai Xiaowei, Ma Lingjun, Deng Jun. Study and application of CO content prediction model to upper corner of coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 59-62.
- [12] 文虎.煤自燃全过程试验模拟及高温区域动态变化规律的研究[J].煤炭学报,2004,29(6):689-693.
Wen Hu. Experiment simulation of whole process on coal self-ignition and study of dynamical change rule in high-temperature

(下转第111页)

- in thin seam with hard roof and hard coal [J]. Coal Science and Technology 2014 42(7) : 22-25.
- [10] 宋德军. “两硬”条件大采高压支架工作阻力计算[J]. 太原理工大学学报 2012 37(7) : 1094-1098.
Song Dejun. Calculations of high seam mining shield working resistance under “hard roof and coal” conditions [J]. Journal of Taiyuan University of Technology 2012 37(7) : 1094-1098.
- [11] 黄庆国. 大同“两硬”条件国产设备双高工作面矿压显现探讨[J]. 华北科技学院学报 2004 1(3) : 28-31.
Huang Qingguo. Discuss strate behaviors of the ming face with high-production and high-efficiency China equipments under the condition hard roof and hard coal in Datong [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology ,2004 ,1 (3) : 28-31.
- [12] 孙 强, 巨 峰, 张吉雄 等. 顶底板双软型薄煤层工作面矿压显现规律分析[J]. 煤炭科学技术 2014 42(11) : 29-32.
Sun Qiang, Ju Feng, Zhang Jixiong *et al.* Analysis on mine strata pressure behavior law of coal mining face in thin seam with soft roof and floor [J]. Coal Science and Technology 2014 42(11) : 29-32.
- [13] 张小涛, 龚林名. 煤层硬度与厚度对冲击矿压影响的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报 2006 23 (3) : 277-280.
Zhang Xiaotao, Dou Linming. Study of roadway support parameters subjected to rock burst based on energy balance theory [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2006 23 (3) : 277-280.
- [14] 靳钟铭, 徐林生. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 22-28.
- [15] 刘长友, 杨敬轩, 于 斌. 覆岩多层坚硬顶板条件下特厚煤层综放工作面支架阻力确定[J]. 采矿与安全工程学报 2015 32 (1) : 7-13.
Liu Changyou, Yang Jingxuan, Yu Bin. Support resistance determination of fully mechanized top-coal caving face in extra thick seam under multi-layered hard strata [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2015 32(1) : 7-13.
- [16] 王进学, 王家臣, 陈忠辉. “两硬”浅埋深厚煤层顶煤顶板运移规律研究[J]. 采矿与安全工程学报 2006 23(2) : 228-231.
Wang Jinxue, Wang Jiachen, Chen Zhonghui. Movement rule of shallowly-buried thick coal seams with hard top coal and roof [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2006 23(2) : 228-231.
- [17] 赵玉翔, 雷延智, 杨晓龙. “两硬”薄煤层采空区煤柱下沿空留巷技术[J]. 煤矿安全 2015 46(12) : 88-91.
Zhao Yuxiang, Lei Yanzhi, Yang Xiaolong. Gob-side entry retaining technology under coal pillar of goaf in “two hard” and thin coal seam [J]. Safety in Coal Mines 2015 46(12) : 88-91.
- [18] 单晓云, 王永申, 赵毅鑫. 近距离薄煤层综采覆岩移动及其与支架相互作用关系研究[J]. 煤炭工程 2008(1) : 67-69.
Shan Xiaoyun, Wang Yongshen, Zhao Yixin. Research on mutual function relationship between strata movement and hydraulic powered supports of fully mechanized longwall mining face in thin seam with close distance to each seam [J]. Coal Engineering , 2008(1) : 67-69.
- Xu Jingcai, Wen Hu, Ge Lingmei *et al.* Determination and calculation of oxidation heat liberation intensity of loose coal at low temperature stage [J]. Journal of China Coal Society ,2000 ,25 (4) : 387-390.
- [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) : 253-258.
Xu Jingcai, Zhang Xinhai, Wen Hu *et al.* Procedure of reaction between coal and oxygen at vow temperature and calculation of its heat emitting intensity [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2000 29(3) : 253-258.

(上接第 17 页)

- zone [J]. Journal of China Coal Society 2004 29(6) : 689-693.
- [13] 谭 波, 胡瑞丽, 高 鹏 等. 煤自燃灾害气体指标的阶段特征试验研究[J]. 中国安全科学学报 2013 23(2) : 51-57.
Tan Bo, Hu Ruili, Gao Peng *et al.* Temperature-programmed experimental study on stage characteristics of coalspontaneous combustion disaster gas indicators [J]. China Safety Science Journal , 2013 23(2) : 51-57.
- [14] 徐精彩, 文 虎, 葛岭梅 等. 松散煤体低温氧化放热强度的测定和计算[J]. 煤炭学报 2000 25(4) : 387-390.