

# 煤自然燃多参数预报指标试验研究

金永飞<sup>1,2</sup> 赵瑞元<sup>1,2</sup> 邓军<sup>1,2</sup> 刘文永<sup>1,2</sup> 费金彪<sup>1,2</sup> 郭军<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对采用 CO 单一指标不能有效预测大佛寺煤层自燃的现状,通过模拟现场真实的漏风、蓄热条件,研究了大佛寺煤矿煤自然燃多参数预报指标气体随煤温升高的变化规律。根据试验结果,确立了以  $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 、Graham 指数、 $\Delta\varphi(\text{CO})/\Delta\varphi(\text{O}_2)$  为主的多参数预报指标体系。结果表明:当  $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$  指数分别在 <0.1、0.1~0.2、>0.2 范围时,Graham 指数在 <3、3~6、>6 时,分别对应大佛寺煤样的自燃氧化阶段、自燃氧化加速阶段和剧烈自燃氧化阶段。

**关键词:** 煤自然燃; Graham 指数; 蓄热条件; 氧化加速

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)09-0112-03

## Experiment Study on Multi Parameters Prediction Indexes of Coal Spontaneous Combustion

JIN Yong-fei<sup>1,2</sup> ZHAO Rui-yuan<sup>1,2</sup> DENG Jun<sup>1,2</sup> LIU Wen-yong<sup>1,2</sup> FEI Jin-biao<sup>1,2</sup> GUO Jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. MOE Key Lab of Mining and Disaster Prevention in China Western Mine, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Due to the single index of CO could not effectively predict the seam spontaneous combustion in Dafosi Mine, with the simulation on a site real air leakage and thermal storage condition, the paper studied the variation law of the multi parameters prediction indexes gas from the coal spontaneous combustion in Dafosi Mine with the coal temperature rising. According to the experiment results, a multi parameters prediction indexes system was determined mainly with  $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ , Graham index and  $\Delta\varphi(\text{CO})/\Delta\varphi(\text{O}_2)$ . The results showed that when  $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$  index below 0.1, 0.1~0.2, over 0.2 and when the Graham index was below 3, 3~6, over 6, were individually corresponded to an oxidization stage of the spontaneous combustion, an oxidization acceleration stage of the spontaneous combustion and a serious oxidization stage of the spontaneous combustion for Dafosi Mine coal sample.

**Key words:** coal spontaneous combustion; Graham index; thermal storage condition; oxidization acceleration

## 0 引言

煤自然燃是一个缓慢并且隐蔽的过程,煤层自然火灾防治的重点在于预防。目前主要采用指标气体进行煤自然燃预报判定,但对于煤层实际温度的预报及判定技术还不成熟,无法直接获得煤层温度的信息。如果能够通过指标气体反演煤层温度,将对煤层自然火灾的防治工作具有重要意义。目前,国内外煤矿因为采煤工作面 CO 生成量大、灵敏度高,随着煤温的增加而增加,常将其作为预测预报煤层自然发火的主要指标气体<sup>[1-3]</sup>。但是 CO 相对单一,易受到风流大小、巷道、地质条件的影响,并且自燃全过程均有 CO 产生,难以直接判定煤层自然温度

及程度<sup>[4-5]</sup>,因此笔者建立了多参数预报指标体系,对大佛寺煤层采空区多指标气体进行分析研究,根据不同指标气体的表征范围,准确反演了煤层自然温度,并判别自燃程度。

## 1 大佛寺煤矿煤自然发火特性试验

原煤采自大佛寺 40110 煤层工作面,将其装入 XK-VI 型自然发火试验台,实际装入煤样约 1 950 kg,试验台由炉体、供气系统、控温系统、气体分析系统等 4 个部分组成,模拟真实煤层中的散热条件和供风风量,炉体内布置有测温探头和气体采集通道,实现温度实时监测及试验过程中气体产物的采集分析。

收稿日期: 2014-03-15; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.09.0025

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51134019); 国家自然科学基金资助项目(51004081)

作者简介: 金永飞(1975—),男,新疆米泉人,副教授,博士。通信作者: 赵瑞元, Tel: 15259149721, E-mail: 363780916@qq.com

引用格式: 金永飞,赵瑞元,邓军等. 煤自然燃多参数预报指标试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 112-114, 76.

JIN Yong-fei, ZHAO Rui-yuan, DENG Jun, et al. Experiment Study on Multi Parameters Prediction Indexes of Coal Spontaneous Combustion [J].

Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 112-114, 76.

大佛寺煤样为不黏煤, 容易自燃。煤样工业分析及元素分析见表1。大佛寺煤样自然发火试验时煤样粒度及试验条件见表2、表3。

表1 大佛寺煤样工业分析与元素分析

工业分析/%			元素分析/%		发热量 $Q_{net\ ad}$ /
$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$w(H)_{ad}$	$w(S)_{ad}$ (kJ·g <sup>-1</sup> )
6.26	7.01	29.33	67.74	5.11	0.94
					32.44

表3 大佛寺煤样试验条件

平均粒径 $d_{50}$ /mm	煤样的堆积 高度/cm	煤质 量/kg	体积/ cm <sup>3</sup>	块煤密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	容重/ (N·cm <sup>-3</sup> )	空隙率/%	供风量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	起始温 度/℃
2.71	190	1 608.46	2 147 760	1.40	0.7489	0.4651	0.1~0.8	26.2

## 2 试验结果分析

大佛寺煤样从试验开始到试验结束, 起始煤温为26.2℃, 共历时30 d。在实际中, 自燃一般发生在至媒体表面一定距离的深部, 而指标气体的抽取和分析在媒体表面进行, 因此在大佛寺煤炭自然发火试验数据的选取上, 选用试验台顶部出口气体产物进行分析, 分析仪器为SP-3430气相色谱仪。

### 2.1 CO 体积分数

根据试验结果, 绘制出大佛寺煤样的煤温随时间变化曲线及试验炉体出口CO浓度随煤温的变化曲线, 分别如图1、图2a所示。

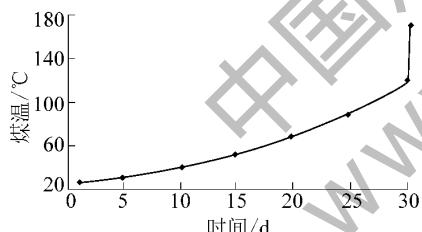


图1 大佛寺煤样煤温随时间的变化曲线

从图1、图2a可以看出, 煤样破碎初期便有大量CO出现, 并且体积分数在 $500 \times 10^{-6}$ 以上。根据试验结果, CO浓度在65~75℃出现第1次大的突变, 可以推断大佛寺煤样的临界温度在65~75℃, 干裂温度在115~125℃, 这与以往的 $24 \times 10^{-6}$ 的

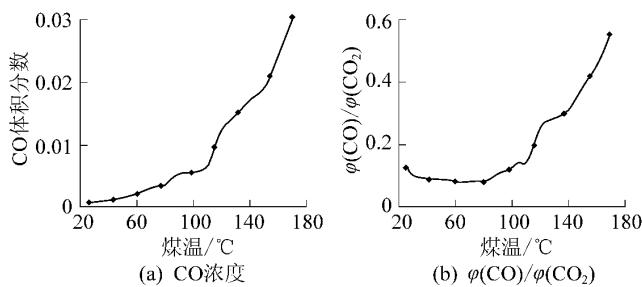
图2 大佛寺煤样CO浓度、 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 、Graham指数、 $\Delta\phi(CO)/\Delta\phi(O_2)$ 随煤温的变化曲线

表2 大佛寺煤样粒度筛分结果

粒度/mm	>10	10~7	7~5	5~3	3~0.9	<0.9
质量/g	3.7	20.9	89.2	178.4	239.6	217.1
比例/%	0.5	2.8	11.9	23.8	32.0	29.0

预警标准相差太大, 因此不能直接使用CO作为煤自燃标志气体判断早期自燃情况, 需要选取多种指标气体来预测大佛寺煤样自燃情况。

### 2.2 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 比值

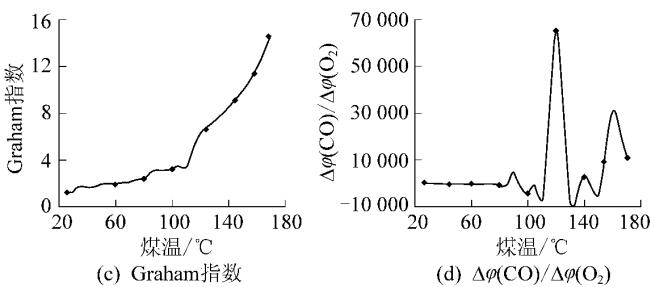
采用CO与CO<sub>2</sub>的体积比进行分析,  $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 同时适用于封闭区域和新鲜风流中的高温判断<sup>[6]</sup>。大佛寺煤样 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 与煤温的变化关系如图2b所示。

1) 大佛寺煤样自燃初期 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 基本维持在0.1以下, 由于大佛寺煤样自燃初期就有大量CO产生, 而此时CO<sub>2</sub>产生率低于CO产生率, 因此 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 在初期会略微高于0.1, 但随着煤样温度不断升高, CO<sub>2</sub>产生率逐渐增大,  $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 逐渐趋于平稳并低于0.1。

2) 当煤温超过90℃时,  $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 超过0.1并迅速增加, 说明此时煤温已经超过临界温度, CO产生率达到第1个突变点, 因此 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 开始急剧变大。

3) 当煤温达到120℃时,  $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 开始超过0.2,  $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 增长速率突变。表明此时大佛寺煤样已接近干裂温度, CO产生率已经超过CO<sub>2</sub>产生率, 并随着煤温升高大量产生。

因此可得到 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 监测煤早期自燃情况的划定范围, 分别是当 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 处于



0~0.1、0.1~0.2、0.2以上时,可判断大佛寺煤样处于氧化初级阶段、加速阶段、剧烈自燃氧化阶段,并在各个范围内采取相应的预防应对措施。

### 2.3 Graham 指数

Graham 指数在不考虑风流影响时作为自然发火预测标准是非常有效的<sup>[7]</sup> 既可用于氧浓度较低的密闭区域如采空区、密闭墙内,也可用于巷道内 Graham 指数  $G = \varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{O}_2) = 100 \times \varphi(\text{CO}) / [0.265 \times \varphi(\text{N}_2) - \varphi(\text{O}_2)]$ <sup>[8-9]</sup> 其中: 0.265 表示正常空气中的 O<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 浓度比值; 100 为放大系数,以便于计算<sup>[10]</sup>。Graham 指数计算的是风流中氧气消耗的比例,利用 N<sub>2</sub> 对 O<sub>2</sub> 消耗量进行校对<sup>[11]</sup>。

大佛寺煤样 Graham 指数随煤温的变化如图 2c 所示。从图 2c 可以看出: 当煤温低于 60 ℃ 时, Graham 指数小于 2, 此时处于煤低温氧化早期; 当煤温为 60~90 ℃ 时, Graham 指数为 2~3, 此时煤温已超过临界温度, 自燃氧化开始加速; 当煤温高于 120 ℃ 时, Graham 指数大于 6, 并出现突变趋势, 随着煤温的不断升高, Graham 指数突变趋势愈加明显, 此时已超过干裂温度, 大佛寺煤样处于剧烈自燃氧化

阶段。

### 2.4 $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$ 比值

在煤自燃过程中, O<sub>2</sub> 不断消耗, CO 不断产生, 因为大佛寺煤样在常温下, 试验开始时便有大量 CO 产生, 从而分析 CO 产生率与 O<sub>2</sub> 的消耗速率的比值规律。以此作为多参数指标来辅助分析判断大佛寺煤样自燃发展过程。

大佛寺煤样  $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  随煤温的变化如图 2d 所示。从图 2d 可以看出, 在整个试验过程中  $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  曲线出现多个峰值, 第 1 个峰值出现在煤温为 90 ℃ 时, 此时大佛寺煤样刚过临界温度, 氧化自燃速度开始加快; 当煤温达到 120 ℃ 时, 出现第 2 个峰值, 并且峰值最大, 此时大佛寺煤样处于氧化升温快速发展阶段; 随着煤温的不断升高, 超过干裂温度之后, 出现多个峰值, 自燃规律明显。

### 2.5 多参数预报指标体系

综上所述, 通过对大佛寺煤样进行自然发火试验, 建立适合于大佛寺煤矿的多参数预报指标体系, 结果见表 4。

表 4 大佛寺煤矿多参数预报指标体系

煤温 / ℃	$\varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{CO}_2)$	Graham 指数	$\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$	煤自燃发展阶段
< 60	基本稳定在 0.1 以下	< 2	趋势平稳	自然氧化初期
60~90	< 0.1	2~3	约 90 ℃ 出现峰值	临界温度附近, 自燃氧化开始加速
90~120	0.1~0.2	3~6	约 120 ℃ 出现极大峰值	自燃氧化不断加速, 逐渐达到干裂温度
> 120	> 0.2	> 6	不断出现峰值, < 120 ℃	超过干裂温度, 剧烈自燃氧化阶段

## 3 结 论

1)  $\varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{CO}_2)$ 、Graham 指数、 $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  可作为大佛寺煤矿自燃早期预报的多参数预报指标体系。在煤样自燃初期  $\varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{CO}_2)$  和  $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  变化趋势总体稳定, 此时重点观测 Graham 指数变化情况, 当 Graham 指数高于 2 时, 说明大佛寺煤矿煤样氧化升温即将达到临界温度, 此时是煤自燃早期预报的关键时期, 需要采取有效的防灭火措施进行早期处理。

2) 当  $\varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{CO}_2)$  超过 0.1 并稳定上升接近 0.2、Graham 指数高于 3 并快速增长接近 6、 $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  出现第 1 个较大峰值时, 大佛寺煤

样温度已达到 120 ℃, 自燃氧化速率较快, 此时应立即采取治理措施, 防止煤样进入激烈氧化阶段。

3) 当  $\varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{CO}_2)$  大于 0.2、Graham 指数大于 6、 $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  稳定出现多个峰值, 说明此时大佛寺煤样已经超过干裂温度, 处于激烈氧化自燃阶段, 此时必须全面采取有效的防灭火措施, 防止出现自燃明火。

4)  $\varphi(\text{CO}) / \varphi(\text{CO}_2)$ 、Graham 指数、 $\Delta\varphi(\text{CO}) / \Delta\varphi(\text{O}_2)$  作为大佛寺煤矿煤自燃多参数预报指标体系, 需要综合在一起判断, 互相对照, 才能准确有效地对大佛寺煤矿自燃做出早期预报, 并及时采取防治措施。

(下转第 76 页)

## 5 结语

以EBZ-260型掘进机为对象进行危险区域报警系统研究和设计,在构建危险区域坐标模型的基础上,提出了包括低频电磁波强度检测、分时依次循环发射、三边定位计算等技术在内的人员进入危险区域检测方法,并以ARM嵌入式控制器为核心,搭建了实际系统。经模拟巷道环境测试,验证了所提方法的可行性和正确性。后续可进一步采用在不同环境中实时标定等方法,实时修正电磁波强度和距离之间的计算公式,以得到更高的定位精度。该报警系统实现了在掘进机工作现场,近距离范围内工作人员的实时检测与定位、危险区域判断、报警与停机功能,提升了生产作业过程中工作人员和设备的安全性,保障了生产安全,具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王虹.我国煤矿巷道掘进技术和装备的现状与发展[J].煤炭科学技术,2010,38(1):57-62.
- [2] 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.
- [3] 佚名.煤矿掘进机司机操作规程(2010汇编)[EB/OL].[2014-04-24].<http://www.mkaq.cn/jishu/czge/2010/1127/65070.html>.

(上接第114页)

### 参考文献:

- [1] 罗海珠,钱国胤.各煤种自然发火标志气体指标研究[J].煤矿安全,1992,23(5):5-10.
- [2] 邓军,徐精彩,徐通模等.煤自燃性参数的测试与应用[J].燃料化学学报,2001(6):553-556.
- [3] 邓军,徐精彩,阮国强等.国内外煤炭自然发火预测预报技术综述[J].西安矿业学院学报,1999,19(4):293-297.
- [4] 王永湘.利用指标气体预测预报煤矿自燃火灾[J].煤矿安全,2001,32(6):15-58.
- [5] 肖旸,王振平,马砾等.煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J].煤炭科学技术,2008,36(6):47-51.
- [6] 徐精彩.煤自燃危险区域判定理论[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [7] 刘艳红,姚建.煤样标志性气体选择的实验研究[J].煤矿开采,2009,14(4):93-95.

- [4] David Chirdon. MSHA Proximity Detection [EB/OL].[2014-04-24].<http://www.msha.gov/>.
- [5] Anon. Strata Safety Products LLC [EB/OL].[2014-04-24].<http://www.strataworldwide.com/europe/index.php>.
- [6] 美国矩阵(MATRIX)公司.Engineering Safety Advancing Automation [EB/OL].[2014-04-24].<http://www.matrixteam.com/index.php>.
- [7] 南非Booyco电子公司.Providing Innovative Mine Safety Related Products Which Will Both Add Value and Increase Productivity Within the Southern African Mining Sector [EB/OL].[2014-04-24].<http://www.booyco-electronics.co.za/>.
- [8] 张纯,杨立君,徐新宇.S100掘进机安全预警系统研制[J].煤炭技术,1999,18(2):1-5.
- [9] 谢处方,饶克勤.电磁场与电磁波[M].4版.北京:高等教育出版社,2006:70-75.
- [10] 程守洙,江之永.普通物理学(下册)[M].6版.北京:高等教育出版社,2006:83-86.
- [11] Denis Kent,Bill Schiffbauer. Proximity Detection Systems in Underground Mines [EB/OL].[2014-04-05].[http://www.qrc.org.au/conference/\\_dbase\\_upl/kent%20%20Proximity%20Detection.pdf](http://www.qrc.org.au/conference/_dbase_upl/kent%20%20Proximity%20Detection.pdf).
- [12] 贾妍妍.基于超长波的管内移动机器人示踪定位系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:15-28.
- [13] 潘涛,李艳东.煤矿巷道中粉尘对电磁波传播特性的影响[J].煤炭科学技术,2007,35(7):97-99.
- [8] 李曼,李增华,杨永良等.运用多指标气体体系分析煤层自燃氧化性[J].煤矿安全,2012,43(1):19-22.
- [9] 杨永斌,王德明,时国庆等.典型气体指标在矿井火灾状态分析中的应用[J].煤炭工程,2010(4):70-72.
- [10] 肖旸,李树刚,李明等.煤自燃预测预报技术研究进展[J].陕西煤炭,2010(6):4-7.
- [12] 杨宏民,罗海珠.利用气味检测法预测预报煤矿火灾[J].煤炭科学技术,2002,30(12):6-9.
- [12] 梁运涛.煤炭自然发火预测预报的气体指标法[J].煤炭科学技术,2008,36(6):5-8.
- [13] 杨永斌,王德明,时国庆等.典型气体指标在矿井火灾状态分析中的应用[J].煤炭工程,2010(4):70-72.
- [14] 陈汝豪,王德明,曹凯.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.
- [15] 胡新成,杨胜强,周秀红.煤层自然发火指标气体研究[J].煤炭技术,2012,31(5):94-96.