

煤自燃全过程精准预测预报指标体系研究与应用*

叶正亮, 龚选平, 尚博, 胡冕

(中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要:煤层自燃严重影响着矿井的安全生产,为实现对杭来湾煤矿3号煤层自燃全过程的精准预测,利用程序升温试验优选出了煤层自然发火标志气体,结合现场测试确定煤自燃初期适用的标志气体,并通过数学模型得到采空区不同自燃阶段上隅角、回风巷等地点的CO指标临界值。结果表明:CO可作为煤自燃初期的主要标志气体, C_2H_4 和 C_2H_6 可作为煤自燃加速氧化阶段的标志气体, C_2H_2 可作为煤自燃激烈氧化阶段的标志气体;采空区高温区煤温达到 $50^\circ C$ 、 $70^\circ C$ 、 $100^\circ C$ 时,上隅角CO预测浓度分别为 56×10^{-6} 、 756×10^{-6} 、 5000×10^{-6} ,回风巷CO预测浓度分别为 6×10^{-6} 、 76×10^{-6} 、 500×10^{-6} 。据此建立了煤自燃全过程精准预测预报指标体系,并通过现场测试取得了良好的应用效果。

关键词:自然发火;标志气体;临界值;指标体系

中图分类号:TD75⁺3 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2023)09-0141-05

0 引言

《煤矿防灭火细则》规定,矿井防灭火专项设计应当包含煤层自然发火预测预报指标体系,其重点在于确定煤层自然发火标志气体临界值及预兆预警值^[1-3]。目前,已有学者对煤自燃预测预报指标体系有了较为深入的研究^[4-12]。总结分析现有研究成果发现,采用试验测试的方式可优选确定不同煤层适用的自然发火标志气体,而煤矿现场煤自燃预测预报工作适用的自然发火标志气体及临界值,需要结合现场测试数据进行综合分析确定。由于多数矿井在测试期间未出现自然发火现象,因此,难以确定适用于现场的煤层自然发火标志气体及临界值,成为了阻碍煤层自然发火精准预测预报技术发展的关键问题。

本文以杭来湾煤矿3号煤层为研究对象,通过程序升温试验、现场测试和数学模型预测等方法综

合确定煤层自然发火标志气体及临界值,基于此建立适用于3号煤层的自然发火全过程预测预报指标体系,为该矿煤自燃火灾的预测预报工作提供了更为全面精准的指导。

1 自然发火标志气体试验优选

煤氧化升温过程中的气体浓度、类别及气体之间的比值等指标可用于间接推断煤层自然发火的程度,作为煤层自然发火预测预报的标志气体应具备可测性、早期显现性、灵敏性、规律性及独立性^[13-14]。本文通过试验优选出3号煤层煤样的自然发火标志气体,为煤自燃预测预报指标体系的建立提供依据。

1.1 试验过程

利用程序升温试验设备(型号:FHZB-1)模拟自然发火过程,循环分析各温度段气体产物的种类、浓度及煤样温度。制取粒径小于0.15 mm的试验煤样1.0 g置于反应釜中,连接气路管道及温度探头,并通气检查气密性。设置通气流量为100 mL/min,升温过程为室温至 $200^\circ C$,低温阶段(室温至 $100^\circ C$)升温速率为 $0.5^\circ C/min$,高温阶段($100 \sim 200^\circ C$)升温速率为 $1.0^\circ C/min$,隔 $10^\circ C$ 进行一次取样分析。

1.2 试验结果分析

不同种类气体浓度随温度变化趋势如图1、图2所示。由图1、图2可知,CO、 CO_2 、 CH_4 存在于煤氧化升温全过程中;CO在升温初期呈现较好的非线性阶段式变化趋势,煤温超过 $80^\circ C$ 后煤样开始加速氧化,CO生成量明显增加,煤温超过 $140^\circ C$ 后,煤样开始发生激烈氧化,CO呈指数型上升趋势; C_3H_8 、 C_2H_6 、 C_2H_4 分别在 $100^\circ C$ 、 $120^\circ C$ 、 $130^\circ C$ 时出现, $200^\circ C$ 前未出现 C_2H_2 。

* 收稿日期:2023-03-30

作者简介:叶正亮(1981—),男,江苏盐城人,副研究员,主要从事煤矿自燃火灾防治相关的基础理论、工艺技术和装备材料的研究,E-mail:18680846118@163.com。

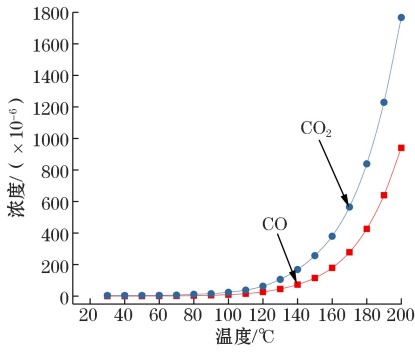


图1 CO和CO₂浓度随煤温变化趋势

由图3、图4和图5分析可知:3种链烷比(C_2H_6/CH_4 、 C_3H_8/CH_4 、 C_3H_8/C_2H_6)曲线均在温度超过100°C以后才出现,且无明显的极值点;烯烷

比(C_2H_4/C_2H_6)曲线在温度超过130°C后出现,极值点温度在140°C左右;CO/CO₂曲线随着煤温增加呈现上升趋势,且增长速率逐渐减小。

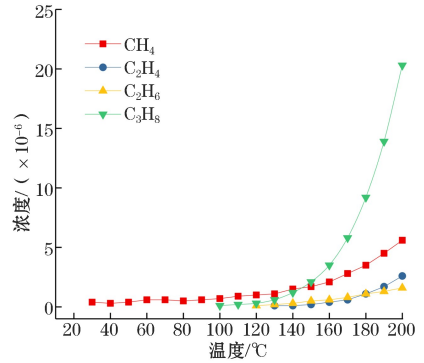
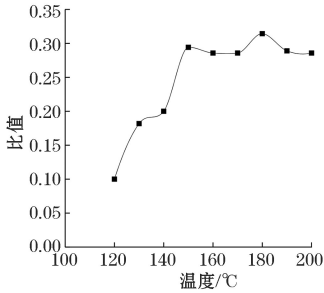
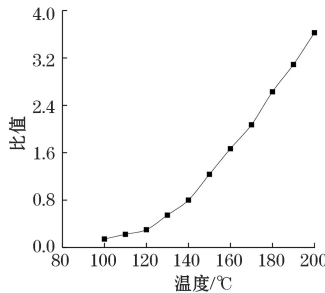


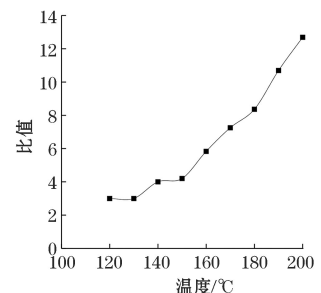
图2 烃类气体浓度随温度变化趋势



(a) C_2H_6/CH_4



(b) C_3H_8/CH_4



(c) C_3H_8/C_2H_6

图3 煤样链烷比随温度变化趋势

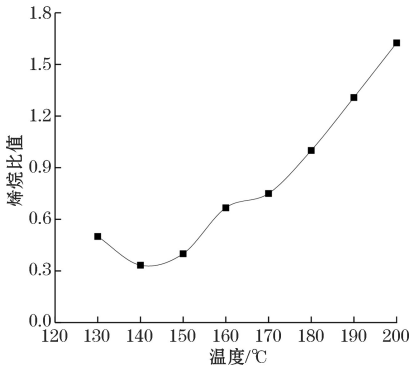


图4 烯烷比随温度变化趋势

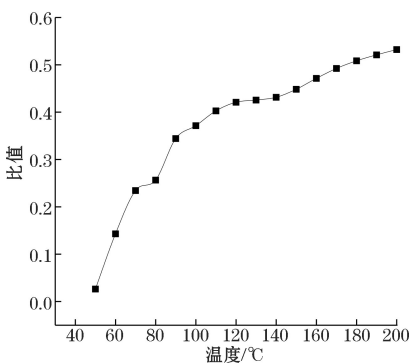


图5 CO/CO₂随温度变化趋势图

1.3 标志气体优选

基于试验数据分析,得出以下标志气体优选结果。

(1) CO可作为煤层自然发火预测预报的主要标志气体。CO出现在煤层自然发火的全过程中,其浓度变化随着煤温呈现较好的阶段性变化规律,可通过浓度推测自然发火程度,并且具有灵敏性强、受环境影响小和易于检测等特点。

(2) CO₂和CH₄不能单独作为煤层自然发火预测预报的标志气体。CO₂和CH₄也存在于煤层自然发火的全过程中,且与煤温呈现一定的规律性变化,但受煤层原生赋存及井下生产环境的影响较大,因此,不能单独作为煤层自然发火预测预报的标志气体。

(3) C₂H₄和C₂H₆可作为煤层局部进入加速氧化阶段的标志气体。根据试验结果,上述两种气体的出现标志着煤温已经超过100°C,在矿井自然发火预测预报过程中,可用于判断煤层是否存在局部高温。

(4) C₂H₂可作为煤层局部进入激烈氧化阶段的标志气体。根据试验结果,该气体的出现标志着煤温超过200°C,可用于判断煤层是否存在激烈氧化甚至燃烧阶段的自然危险区域。

(5) C_3H_8/CH_4 、 C_3H_8/C_2H_6 、 C_2H_4/C_2H_6 和 CO/CO_2 可作为煤层自然发火预测预报的辅助判定指标。复合指标的应用相较于单一指标数据处理更为复杂,且受环境和生产条件的影响较大,通常不作为自然发火预测预报的主要判定指标。

2 自然发火标志气体现场测试

自然发火标志气体现场测试,是对试验优选的标志气体进行现场考察分析,通过统计分析生产期间工作面煤自燃重点监测区域的气体状态,结合试验数据,进一步优选确定适用于3号煤层自然发火预测预报的标志气体,并为标志气体临界值的确定提供参考。

2.1 测试方法

研究人员于2022年8月29日至9月28日期间对3号煤层自然发火标志气体进行现场观测,观测工作主要在3号煤层30201工作面、上隅角、回风巷等地点开展,通过人工采样色谱分析的方法对各地点的气体种类及浓度进行测试记录。

2.2 测试结果

工作面生产期间CO浓度变化趋势如图6所示。由图6可知,现场测试期间未检测到 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等煤自燃高温阶段标志气体,仅检测到标志气体CO,测试期间30201工作面和回风巷中CO浓度均为0,上隅角CO浓度在 $12 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ 之间波动。说明在正常生产条件下,工作面采空区遗煤处于常温氧化阶段,未出现局部高温自燃区域。

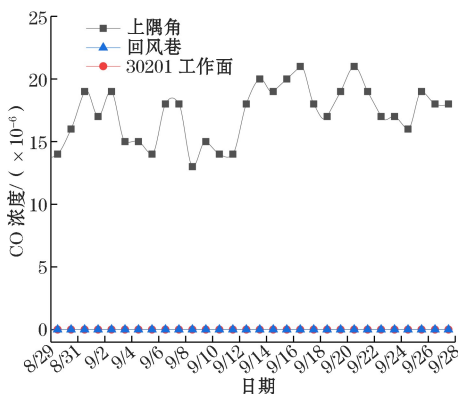


图6 工作面生产期间CO浓度变化趋势

3 工作面CO浓度指标临界值确定

基于试验和现场测试结果,CO可作为3号煤层自然发火初期预测预报的主要标志气体,但未能确定其浓度指标的临界值。建立CO浓度指标临界值预测模型,对工作面上隅角、回风巷等自然发火主要监测地点的CO浓度临界值进行分析预测。

3.1 CO浓度指标临界值预测模型

通过对工作面的现场测试,认为CO气体主要来源为采空区遗煤氧化和井下无轨胶轮车。其中采空区内遗煤氧化产生CO的区域可以分为氧化带和散热带,为工作面CO的主要来源。

根据以上分析,建立工作面上隅角CO浓度指标的现场预测数学模型为:

$$C_{CO} = (V_1 + V_2) / Q_L \quad (1)$$

式中, C_{CO} 为工作面上隅角CO浓度, 10^{-6} ; V_1 为采空区散热带遗煤氧化CO产生量, cm^3/min ; V_2 为采空区氧化带遗煤氧化CO产生量, cm^3/min ; Q_L 为采空区漏风量, m^3/min 。

建立工作面回风巷CO浓度指标的现场预测数学模型为^[15-17]:

$$C_{CO} = \frac{(K_1 L_1 + K_2 L_2) I H (1 - \varphi) V_{CO}}{Q} \quad (2)$$

式中, K_1 为采空区散热带遗煤氧化修正系数,在正常漏风条件下,一般取0.5~0.7; L_1 为采空区散热带的宽度,m; K_2 为采空区氧化带遗煤氧化修正系数,小于1,一般情况下,综采面取0.1~0.3; L_2 为采空区氧化带的宽度,m; I 为综采工作面长度,m; H 为工作面采高,m; φ 为工作面回采率,%; V_{CO} 为媒体在某一温度下的CO产生速率(根据程序升温氧化试验确定), $mL/(min \cdot m^3)$; Q 为工作面供风量, m^3/min 。

3.2 CO浓度指标临界值预测结果

3号煤层主采30201工作面长度为300m左右,采高为7.2m,工作面回采率为93%,工作面采空区散热带范围为14m,氧化带范围为130m,采空区散热带浮煤氧化修正系数取0.5,采空区氧化带遗煤氧化修正系数取0.1,漏风量为320 m^3/min 。计算上隅角和回风巷CO浓度指标临界值,见表1。

表1 30201工作面CO浓度指标临界值

高温区煤温/ $^{\circ}C$	CO产生速率/ $(mL/(min \cdot m^3))$	上隅角CO预测值/ $(\times 10^{-6})$	回风巷CO预测值/ $(\times 10^{-6})$
50	6	56	6
70	80	756	76
100	530	5000	500

4 煤自燃全过程精准预测预报指标体系建立及应用

4.1 指标体系建立

常温状态下工作面上隅角及回风巷CO浓度会受生产条件及季节环境的影响产生一定的浮动,因此,其浓度指标临界值通常采用统计分析的方法确定。通过对工作面历史数据的分析,采空区内未出

现煤自然发火征兆时,上隅角 CO 浓度均处于 35×10^{-6} 以下,结合 CO 指标临界值现场测试结果,认为采空区自然发火处于安全阶段时,工作面上隅角

CO 浓度不超过 35×10^{-6} 。基于标志气体的优选结果和现场 CO 指标临界值的预测结果,建立 3 号煤层自燃全过程精准预测预报指标体系,见表 2。

表 2 煤自燃全过程精准预测预报指标体系

序号	自然发火阶段	高温区煤温/ $^{\circ}\text{C}$	标志气体临界值
1	安全阶段	常温	上隅角 CO 浓度 $< 35 \times 10^{-6}$ 且回风巷 CO 浓度 $< 6 \times 10^{-6}$
2	关注阶段	常温至 50	$35 \times 10^{-6} \leq$ 上隅角 CO 浓度 $< 56 \times 10^{-6}$ 且回风巷 CO 浓度 $< 6 \times 10^{-6}$
3	预警阶段	50~70	$56 \times 10^{-6} \leq$ 上隅角 CO 浓度 $< 756 \times 10^{-6}$ 或 $6 \times 10^{-6} \leq$ 回风巷 CO 浓度 $< 76 \times 10^{-6}$
4	临界阶段	70~100	$756 \times 10^{-6} \leq$ 上隅角 CO 浓度 $< 5000 \times 10^{-6}$ 或 $76 \times 10^{-6} \leq$ 回风巷 CO 浓度 $< 500 \times 10^{-6}$
5	加速氧化阶段	100~200	出现 C_2H_4 和 C_2H_6
6	激烈氧化阶段	200 以上	出现 C_2H_2

4.2 现场应用

在杭来湾煤矿主采 3 号煤层 30201 工作面进行现场应用,根据煤自燃全过程精准预测预报指标体系进行日常的防灭火管理工作。工作面自然发火观测点主要设置在上隅角、回风巷及采空区等地点,采用安全监控系统、束管火灾监测系统及人工巡检等进行煤自燃监测工作。

2022 年 11 月 18 日至 12 月 5 日期间,工作面受设备检修及地质条件的影响导致开采进度减缓,增加了采空区遗煤的氧化时间,导致检测到上隅角 CO 浓度由 18×10^{-6} 缓慢上升,最高达到 38×10^{-6} ,回风巷超前支护段也检测到 3×10^{-6} 左右的 CO。根据煤自燃全过程精准预测预报指标体系,判断采空区自然发火处于关注阶段,局部煤温可能处于常温至 50°C 之间。根据采空区自燃“三带”理论,分析认为高温区可能位于采空区“氧化带”内,因此,于 2022 年 12 月 6 日起向“氧化带”范围内的联巷闭墙内采取连续注氮措施,后续观测到上隅角 CO 浓度开始下降,于 2022 年 12 月 12 日降低至 20×10^{-6} 。说明根据煤自燃全过程精准预测预报指标体系对采空区煤自燃程度的判断准确,及时采取注氮措施后有效抑制了采空区遗煤的进一步氧化升温。工作面生产期间 CO 浓度变化趋势如图 7 所示。

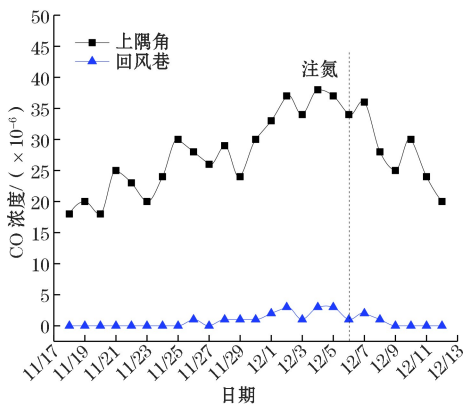


图 7 工作面生产期间 CO 浓度变化趋势

5 结论

以杭来湾煤矿 3 号煤层为研究对象,建立煤自燃全过程精准预测预报指标体系,主要得出以下结论:

(1) 通过程序升温试验优选出煤层不同自燃阶段适用的标志气体,CO 在低温阶段规律性较好,可作为煤层自燃初期的主要标志气体, C_2H_4 和 C_2H_6 出现说明煤温超过 100°C ,可作为煤加速氧化阶段的标志气体, C_2H_2 出现说明煤温超过 200°C ,可作为煤激烈氧化阶段的标志气体。

(2) 通过 CO 浓度指标临界值预测模型得到了采空区煤温到达 50°C 、 70°C 、 100°C 时,上隅角 CO 预测浓度分别为 56×10^{-6} 、 756×10^{-6} 、 5000×10^{-6} ,回风巷 CO 预测浓度分别为 6×10^{-6} 、 76×10^{-6} 、 500×10^{-6} 。

(3) 根据标志气体的优选结果和 CO 浓度指标临界值预测结果,将采空区煤自燃阶段划分为安全(常温)、关注(常温至 50°C)、预警($50 \sim 70^{\circ}\text{C}$)、临界($70 \sim 100^{\circ}\text{C}$)、加速氧化($100 \sim 200^{\circ}\text{C}$)、激烈氧化(200°C 以上)6 个阶段,建立了煤自燃全过程精准预测预报指标体系,并且通过现场测试取得了良好的应用效果。

参考文献(References):

- [1] 梁运涛.煤矿防灭火细则解读[M].北京:应急管理出版社,2021:21-24.
- [2] 易欣,胡震,王伟峰,等.煤自然发火智能监测与早期预警关键技术[J].煤矿安全,2022,53(9):31-37.
- [3] 仲晓星,王建涛,周昆.矿井煤自燃监测预警技术研究现状及智能化发展趋势[J].工矿自动化,2021,47(9):7-17.
- [4] 郝宇,叶正亮.不同甲烷气氛下煤自燃指标气体及活化能研究[J].工矿自动化,2019,45(11):65-69.
- [5] 张伟霞.基于 SEM 的采空区煤自燃危险性预判方法研究与应用[D].西安:西安科技大学,2019.

- [6] 李树伟,朱艳艳.高瓦斯易燃煤层自燃判别指标体系的实验研究[J].煤炭工程,2017,49(11):102-104.
- [7] 王伟.煤层自然发火标志气体及临界值确定[J].煤矿安全,2020,51(12):219-223.
- [8] 疏义国,赵庆伟,郁亚楠.易自燃煤层预测预报气体指标体系研究[J].煤炭科学技术,2019,47(10):229-234.
- [9] 邓军,白祖锦,肖旸,等.煤自燃指标体系试验研究[J].安全与环境学报,2018,18(5):1756-1761.
- [10] 王福生,王建涛,顾亮,等.煤自燃预测预报多参数指标体系研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):45-51.
- [11] 王连聪,梁运涛,罗海珠.我国矿井热动力灾害理论研究进展与展望[J].煤炭科学技术,2018,46(7):1-9.
- [12] 李军,张宇轩,高彬,等.陕北侏罗纪煤田浅埋近距离煤层煤自燃预测预报体系研究[J].煤炭技术,2023,42(1):138-142.
- [13] 石晶泰,任万兴,赵乾坤,等.基于多指标参数的煤自燃进程分析及应用[J].煤炭技术,2017,36(10):175-177.
- [14] 朱传伟.新集二矿近距离煤层开采采空区漏风规律与煤炭自燃防控技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.
- [15] 郭庆.采空区煤自燃预警技术及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [16] 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.
- [17] 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.

Research and Application of Accurate Prediction Index System for the Whole Process of Coal Spontaneous Combustion

YE Zhengliang, GONG Xuanping, SHANG Bo, HU Mian

(China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The spontaneous combustion of coal seam seriously affects the safe production of the mine. In order to realize the accurate prediction of the whole process of spontaneous combustion of No. 3 coal seam in Hanglaiwan Coal Mine, the programmed temperature rise experiment was used to select the spontaneous combustion marker gas of coal seam. Combined with the field test, the suitable marker gas in the initial stage of coal spontaneous combustion was determined, and the critical value of CO index in the upper corner and return airway of different spontaneous combustion stages in goaf was obtained by mathematical model. The results show that CO can be used as the main marker gas in the early stage of coal spontaneous combustion, C_2H_4 and C_2H_6 can be used as the marker gas in the accelerated oxidation stage of coal spontaneous combustion, and C_2H_2 can be used as the marker gas in the intense oxidation stage of coal spontaneous combustion. When the coal temperature in the high temperature zone of the goaf reaches $50^\circ C$, $70^\circ C$ and $100^\circ C$, the predicted concentrations of CO in the upper corner are 56×10^{-6} , 756×10^{-6} and 5000×10^{-6} , respectively, and the predicted concentrations of CO in the return airway are 6×10^{-6} , 76×10^{-6} and 500×10^{-6} , respectively. An accurate prediction index system for the whole process of coal spontaneous combustion was established, and good application results were achieved through field tests.

Key words: Spontaneous combustion, Marker gas, Critical value, Index system