



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

郭军,金彦,文虎,等.矿井煤层自然程度精细划分与预警方法研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):115-121. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.10.016
 GUO Jun,JIN Yan,WEN Hu,*et al*.Study on fine division and early warning methods of spontaneous combustion degree of coal seams in mines [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (10) : 115 - 121. doi: 10.13199/j.cnki.est.2021.10.016

矿井煤层自然程度精细划分与预警方法研究

郭军^{1,2},金彦¹,文虎^{1,2},刘荫^{1,2},蔡国斌^{1,2}

(1.西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;2.西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:煤层自然发火程度的精准判识与预警一直是煤自然防控领域亟须解决的世界性难题,需构建煤自然阶段精细划分和精准预警方法。通过建立煤自然分级预警体系,实现煤层自然发火早期精准预报和主动防控,可有效防控煤层自燃或继发灾害的发生。现场采集工作面新鲜煤样,破碎混合成试验煤样,通过大型自然发火试验台模拟工作面煤层实际氧化升温环境,开展煤自然发火试验测试。进一步分析得到煤层自然氧化升温过程中各反应阶段指标气体产物体积分数和生成速率等数值随煤温的变化规律,确定了煤自然反应各阶段的特征温度点位。通过试验数据比对分析,确定煤层氧化升温过程精细划分的判定指标($\text{CO}, \text{O}_2, \text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_2\text{H}_6$ 体积分数及 $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$ 、Graham值、链烷比)随煤温变化的阈值区间。将煤自然全过程精细划分成6个预警等级,并建立了较为完备的煤层自然发火分级预警体系,定量确定了各阶段的判定指标标准。结合工作面实例应用中分级预警体系的效益表现,验证了所构建预警方法对于矿井煤层自然进程的预测预报,并采取相应防控措施抑制煤层火灾发展的可行性。研究成果可为矿井煤层自然进程预测预报和主动防控工作提供借鉴。

关键词:煤自燃;分级预警体系;特征温度;指标气体

中图分类号:TD75 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)10-0115-07

Study on fine division and early warning methods of spontaneous combustion degree of coal seams in mines

GUO Jun^{1,2}, JIN Yan¹, WEN Hu^{1,2}, LIU Yin^{1,2}, CAI Guobin^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Western Mine and Hazard Prevention, Ministry of Education of China, Xi'an 710054, China)

Abstract: The accurate identification and early warning of coal seam spontaneous combustion has always been a worldwide problem that urgently needs to be solved in the field of coal spontaneous combustion prevention and control. It is necessary to build a fine division of coal spontaneous combustion stage and accurate early warning methods. Through the establishment of a tiered early warning system for coal spontaneous combustion, the early and accurate prediction and active prevention and control of coal spontaneous combustion can be realized, and the occurrence of spontaneous combustion or secondary disasters can be effectively prevented. Fresh coal samples were collected from the working face on site, crushed and mixed into test coal samples, and a large-scale spontaneous combustion test bed was used to simulate the actual oxidation and heating environment of the coal seam in the working face, and the coal spontaneous combustion test was carried out. Through further analysis of the collected data, the change rule of the index gas product volume fraction and generation rate of each reaction stage in the process of natural oxidation and heating of coal seam with coal temperature was obtained, and the characteristic temperature points of each stage of coal spontaneous combustion reaction were determined. By comparing and analyzing the experimental data, the index gases of coal-oxygen reaction process ($\text{CO}, \text{O}_2, \text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$, Graham, chain alkyl ratio) of the fine division of the coal bed oxidation heating process was determined, and the relationship between thresholds and coal characteristic temperature

收稿日期:2021-01-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808201);国家自然科学基金青年基金资助项目(52004209);国家自然科学基金资助项目(51974240)

作者简介:郭军(1987—),男,陕西咸阳人,讲师,硕士生导师,博士。E-mail:guojun@xust.edu.cn

通讯作者:金彦(1996—),男,浙江杭州人,硕士研究生。E-mail:1915266449@qq.com

was obtained. The whole process of coal spontaneous combustion is finely divided into six early warning levels, and a relatively complete warning system for coal spontaneous combustion has been established, and the judgment standards at each stage have been quantitatively determined. Combined with the benefit performance of the hierarchical early warning system in the application of the field working face, it verifies the feasibility of the constructed early warning method for predicting and forecasting the spontaneous combustion process of coal seams in coal mines and adopting corresponding prevention and control measures to suppress the development of coal seam fires. The research results have important theoretical research value and practical guiding significance for the prediction and active prevention and control of coal spontaneous combustion in coal mines, which can further improve the safety of the mines, and guarantee the safety of the personnel working underground and realize the green mining of coal resources.

Key words: coal spontaneous combustion; multi-stages warning system; characteristic temperature; index gases

0 引言

煤自燃隐患所诱发的矿井火灾一直是制约煤炭工业发展的主要灾害之一。就我国煤炭工业而言,绝大部分的开采矿区都由自燃和易自燃煤层占据^[1]。全国多个矿区均在一定程度上受到煤层自然发火隐患的威胁,井下煤炭资源开采和作业人员的生命安全难以得到切实的保障^[2]。虽然科技的发展使得煤自燃事故的发生频率逐渐下降,但是我国煤火灾防治的形势依旧严峻。煤自燃作为一个复杂的煤氧复合反应,不同反应阶段内的煤体活性基团反应主体不同,导致释放的气体种类、体积分数等存在差异,煤火灾防治措施也相应不同^[3]。因此煤层自然发火分级预警技术成为了井下煤火隐患防控的重要一环。目前,煤层自燃预警技术大多是通过气体指标分析、温度探测、高位元素气体示踪等方法进行发火进程预报^[4]。近年来,伴随近距离煤层开采技术应用、小煤柱开采、综采放顶技术推广等因素,使得井下环境愈发复杂,煤层火灾隐患覆盖面广。并且现有的煤层自燃指标体系没有统一标准,甚至部分矿区预警指标体系不完备,难以准确判断煤层自然发火进程,煤层火灾事故时有发生。针对煤层火灾事故发生的特点,众多学者进行了相应研究,西安科技大学首次建立了国内最大的自然发火试验平台,进行了煤自然发火相关参数变化的研究,针对煤自燃发生的特性参数深入研究^[4];为明确指标气体同煤温波动之间的关联性,文献[5]根据易燃煤层工作面氧化自然发火特性参数进行了深入研究,分析了煤自燃指标气体同煤温波动之间的关联性,为不同预警阶段的预警指标气体优选提供了依据;文献[6]提出从能量传动角度来分析煤层火灾发展的趋势,为煤层发火预警体系的建立提供了理论依据;文献[7-8]在煤自然进程指标气体生成规律的研究中发现,低温氧化阶段,微观煤分子中的芳核结构十分稳定,接触氧气时,氧原子主要的攻击对象是支链脂肪族结构,通过氧化物的形式进入煤体,进而生成各类气体,为煤

火灾的初期预测、防控提供了理论支持。笔者采集了工作面新鲜煤样,并采用大型自然发火试验收集煤自燃气体的产生规律参数,确定煤层自然发火进程中的分级特征温度点、判定指标气体及相应的预警指标阈值。建立了完备的煤层自然发火分级预警体系,结合现场工作面发火实例应用,验证了该体系对于矿井煤层火灾进程预测预报的可行性。对于煤层自然隐患辨识、煤火灾害发展进程预测及主动煤火灾害防控具有一定的理论指导意义。

1 煤层自然发火试验

1) 试验装置。试验所采用的是 XK-VII型煤自然发火试验台。炉体的主体结构呈内径为 120 cm 的圆柱体,通过保温层与外部监控层进行炉体内部环境的检测与调控,创造一个接近真实井下环境的蓄热条件,通过内置气体传输设备,保证试验过程中生成气体的流动均匀及气样的提取分析。

2) 试验条件及过程。从某矿工作面内的易自燃煤层进行煤样采集,使用颚式破碎机进行现场煤样粉碎,混合成 1 700 kg 试验煤样装入试验台中,密封卸煤口,随后进行试验设备气密性及运转情况检测,试验时通入空气流量 0.1~1.5 m³/h,进而进行该矿煤样自然发火特性参数试验测试。试验过程煤样自然氧化生成的气体经炉体顶盖空间由出口排出炉体。试验过程中,炉内最高煤温将达到 170 ℃,温度每升高 10 ℃ 采集 1 次气样进行色谱分析,记录不同温度下的气体种类和体积分数数据。具体试验条件如下:

平均粒径 D_{50}/mm	3.05
试验煤高/cm	185
质量/kg	1 700.60
煤样体积/ cm^3	2 091 240
块煤密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.32
孔隙率	0.383 9
供风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.1~1.5

通过收集到的试验数据进行实际井下煤层自然发火进程的宏观特性表征参数推断,为易燃煤层自然发火进程分级预警体系的建立提供数据支持。

2 试验结果与分级预警

传统的煤自然预测预报分级标准是将煤自然隐患孕育的特征过程大致分为潜伏阶段、自热阶段和燃烧阶段3个阶段^[9-10]。通过分析特征数据点位进行特征温度区间划分,进而确定发火进程危险等级、指标气体、各级阈值,从而建立完备的易燃煤层自然发火分级预警体系。

2.1 煤层发火进程区间划分

煤自然进程预测预报时,CO一直是常用的指标气体之一,其存在贯穿整个煤层自然发火过程。因此首先考虑通过CO、CO₂体积分数波动情况进行煤层自然发火初期过程的划分,自然发火试验过程收集的CO、CO₂体积分数如图1所示。

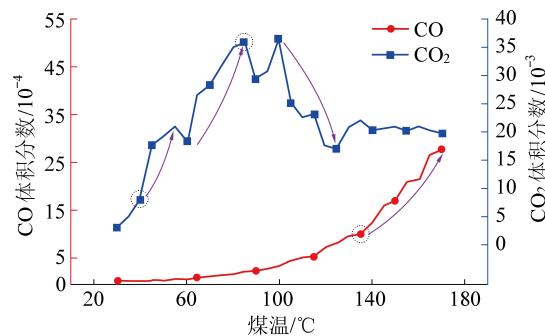


图1 CO、CO₂体积分数与煤温关系

Fig.1 CO and CO₂ generation as function of coal temperature

从图1中可以看出,自40 °C开始,CO体积分数快速上升,符合煤体进入低温氧化阶段的特征^[11];同时可以反推40 °C之前煤体应当处于物理吸附状态,部分水、赋存气解吸,CO₂体积分数在40 °C之前的平滑曲线也可以很好地证明这一点;60~90 °C煤分子表面结构活性基团与氧原子接触反应,自燃进程达到煤氧复合反应自加速温度,图中CO曲线出现了明显的二次激增趋势^[12]。

煤温达到100 °C左右时,虽然CO体积分数快速下降,但是从CO₂曲线可以看出体积分数迅速增加,此时煤分子中的非芳香结构支链和桥键与氧气发生反应生成CO₂;130 °C左右,CO₂体积分数激增的现象表明此时煤体的温度接近热解温度,是即将进入活性反应阶段的标志^[9,13-14]。

在煤自然进程反应高温氧化阶段,煤分子结构中的各类基团吸收能量达到活跃状态,反应加剧,各类结构在不同程度上裂解、裂化,大量活性结构反应

生成CH₄、C₂H₄、C₂H₆等烷烃、烯烃类气体。由此可以选定CO和CO₂作为煤层自然发火反应低温氧化阶段的标志性气体,而CH₄、C₂H₄、C₂H₆等烷烃、烯烃类气体则是煤高温氧化阶段的标志,气体产物的变化能够反映煤体氧化程度,并用以推测煤体内部结构反应序列^[10,15]。具体的烷、烃气体体积分数数据如图2所示。

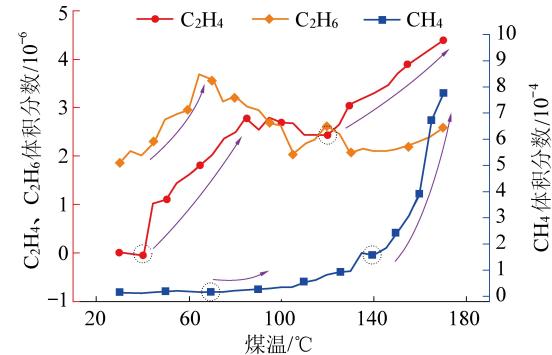


图2 CH₄、C₂H₄、C₂H₆体积分数与煤温关系

Fig.2 CH₄, C₂H₄ and C₂H₆ generation as function of coal temperature

由图2可以看出:当煤温低于80 °C时,CH₄体积分数波动较为平缓。这是由于在煤体低温氧化蓄热阶段,煤分子间的范德华力逐渐减弱,CH₄解除吸附状态进入空气中,相对增量较少。140 °C之后煤氧复合反应加剧,CH₄体积分数骤然升高。因此CH₄体积分数快速激增的突变点可以作为煤层自然反应进入裂变阶段的标志。而试验之初没有检测到C₂H₄存在,在约40 °C时才出现少量的C₂H₄,可以将C₂H₄出现的特征点位作为煤体进入解吸状态的判定。C₂H₆作为一种饱和化合物,可以像甲烷一样较稳定地赋存在煤层中,在未达到裂解温度之前由气体脱附作用而产生。但C₂H₆曲线的波动并不具有良好的规律性,因此C₂H₆并不适合单独作为气体预警指标^[10,16-17]。

2.2 煤层发火特征温度点确定

对比分析试验数据,为了深入划分煤层自然预警等级。考虑利用气体体积分数比值波动情况进行煤层自然发火进程各阶段主体反应特征温度点位的确定,进行煤层自然发火进程精确分级^[4,18]。

据理论研究,煤层耗氧速度应与氧气体积分数成正比,可以通过煤氧复合产生的CO速率及对应的标准氧气体积分数波动,反映煤氧复合三步化学反应的进程,即Graham系数,G计算如下

$$G = \varphi(CO)/\varphi(O_2) \times 100\% \quad (1)$$

式中:G为Graham系数的计算值;φ(CO)、φ(O₂)分别为风流中CO、O₂体积分数的变化量绝对值,‰。

依照算式可得G值变化情况如图3所示。

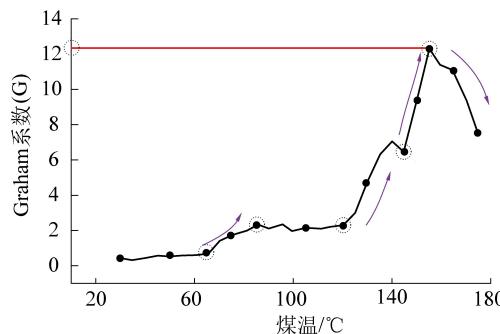


图3 试验G值与煤温对应关系

Fig.3 Relationship between G and coal temperature

由图3可以看出, G 在煤自然发火反应升温过程中整体呈上升趋势。当煤温从常温升至60 °C的过程中, $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{O}_2)$ 的值上升缓慢, 说明在该阶段煤氧复合反应较弱。60 °C后发生突变快速升高, 此时接近临界温度, 化学反应逐渐增强; 煤温在90~140 °C时, G 波动平缓, 此过程中CO和CO₂的体积分数均呈增长趋势且增长的强度相差较小。当 G 大于0.02时, 煤温已达到或高于临界温度, 各类链结构, 断裂生成活性结构接触氧气快速反应; 当 G 大于2时, 煤温超过热解温度, 邻近干裂温度, G 呈现激增趋势, 此时煤层火灾隐患危险性直线上升; 从图中可以推断现场测得 G 约12时, 就可以认为目标煤层即将进入完全燃烧阶段, 应当采取最为极端的煤火灾防控手段^[4,19-22]。

气体复合指标曲线及试验分析如图4所示。当煤温低于40 °C时, $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$ 波动平滑, 此时煤体反应活性低下, 处于稳定状态^[23-24]; 40 °C左右, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 曲线出现起始点, $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$

骤然上升达到峰值, 可以推断此时煤体升温导致范德华力削弱, 物理吸附作用增强; 60 °C后, $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 继续快速下跌, 但是 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 保持相对稳定, 此时煤体物理吸附即将达到饱和, 化学反应启动, 煤体反应活性逐渐加强^[25]; 80 °C后, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 曲线增大, 显然是因为结构断裂速度过快, 各活性基团结构反应不充分; 110 °C后, 煤体自燃反应进入裂解阶段, 煤体芳环支链结构等发生快速断裂, 煤氧复合反应剧烈, 煤自燃隐患危险性达到最大, 并且 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 远高于 $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 和 $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$, 全面燃烧即刻发生^[9,26-29]。

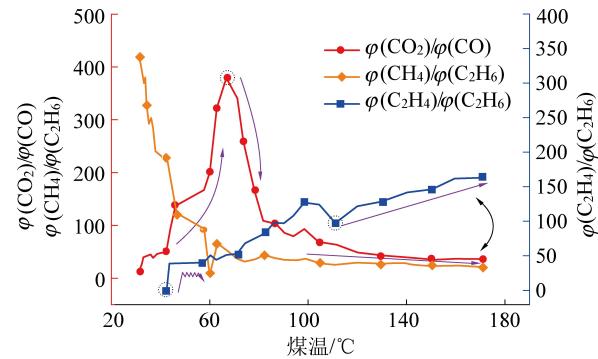


图4 试验复合指标比值与煤温关系

Fig.4 Experimental composite index ratio concentrations to coal temperature

对比 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 、 $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 、 $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$, 确定波动趋势、拐点、峰值点等数据特征, 能够在单因素指标划分煤层自然发火进程温度范围的基础上, 进一步确定预警体系的特征温度点, 具体见表1。

表1 煤自然发火特征温度划分区间

Table 1 Characteristic temperature intervals of coal spontaneous combustion

阶段	温度/°C	判定依据
吸附温度 T_1	$\geq 20\sim 40$	$\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 极大, 并且伴随跳崖式下跌; $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$ 极小; CO_2 快速上升
复合温度 T_2	$\geq 40\sim 60$	$\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$ 极大; $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 开始出现波动; G 值缓慢增加
临界温度 T_3	$\geq 60\sim 90$	$\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$ 极大, 但是逐渐减小; C_2H_4 出现并持续升高; CO 、 CO_2 体积分数增速加快; O_2 体积分数降幅增大; G 快速增加
热解温度 T_4	$\geq 90\sim 130$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 增大; CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 体积分数增速加快; 耗氧速度剧增; $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 达到一次峰值
裂变温度 T_5	$\geq 130\sim 170$	CO 、 C_2H_4 体积分数剧增; C_2H_4 、 CO 、 CH_4 体积分数、 G 及 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 急剧增加
活性温度 T_6	$\geq 170\sim 210$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 值极大; O_2 体积分数剧降
燃烧温度 T_7	≥ 210	CO 、 CH_4 体积分数剧增

2.3 煤层自然发火分级预警体系建立

依据煤自燃阶段精细划分理论与方法, 结合《煤矿安全规程》关于煤自燃监测、标志气体、临界值、发火征兆及火灾的管理规定。基于煤样自然发火试验, 提出了适用于矿井的煤自燃分级预警指标

体系, 该指标体系主要包含可以表征煤自燃温度的气体指标(CO 、 G 值、 O_2 、 C_2H_4 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$), 确定了易自燃煤层分级预警的温度范围和气体指标临界值, 以期实现矿井煤层自然发火精准预警及煤火灾害主动防治, 见表2。

表2 煤层自然发火分级预警体系及指标临界值

Table 2 Multi-stages warning system of coal seam and threshold values

预警等级	特征温度/℃	煤层温度/℃	指标气体特征	判定临界值	备注
预警初值	—	< 30	存在 CO, 但体积分数较平稳	$R_0 = \{\varphi(O_2) > 18\% \cap \varphi(CO) > 50 \times 10^{-6}\} \cup \{\varphi(O_2) \in (15\%, 18\%) \cap \varphi(CO) > 100 \times 10^{-6}\} \cup \{\varphi(O_2) \in (12\%, 15\%) \cap \varphi(CO) > 150 \times 10^{-6}\} \cup \{\varphi(O_2) < 12\% \cap \varphi(CO) > 200 \times 10^{-6}\}$	煤层自燃初期反应以 CO 体积分数波动为主要参照, 考虑到氧气消耗水平影响, 结合 4 个氧气体积分数指标下的 CO 稳定波动阈值可以进行初期预警
灰色预警	35	[30, 50)	CO、CH ₄ 体积分数持续升高	$R_1 = R_0 \cap \{G > 0.2 \sim 0.3\}$	隐患潜伏期结束后, 在第 1 阶段的基础上, 考虑使用 Graham 系数进行辅助判定, 排除风流量的影响
蓝色预警	—	[50, 70)	CO 体积分数持续升高	$R_2 = R_1 \cap \{G > 0.4 \sim 0.5\} \cap \{\varphi(C_2H_4) > 0\}$	在第 2 阶段的基础上, 第 3 阶段引出了煤体自燃反应初期的突变指标气体 C ₂ H ₄ 用以辅助判定自然发火进程
黄色预警	67.2	[70, 100)	CO 体积分数增大; $\varphi(CH_4)/\varphi(C_2H_6)$ 极小;	$R_3 = R_2 \cap \{G > 0.6 \sim 0.7\} \cap \{\varphi(C_2H_4) > 1 \times 10^{-6} \varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)\}$	
橙色预警	119.9	[100, 150)	$\varphi(CO_2)/\varphi(CO)$ 迅速下降; $\varphi(CH_4)/\varphi(C_2H_6)$ 逐渐平稳; $\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$ 逐渐上升,	$R_4 = R_3 \cap \{G > 2\}$	
红色预警	150	[150, 210)	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$ 急剧增大; CO、CH ₄ 体积分数急剧增加	$R_5 = R_4 \cap \{k = [\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)]_{max}\}$	第 6 阶段预警特征极为明显, $\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$ 数据持续增加直到峰值
黑色预警	210	≥ 210		$R_6 = R_5 \cap \{k = \varphi(C_2H_2) > 0\}$	出现明火、烟气

3 现场应用

1) 工作面概况。某矿工作面标高为 +770—+800 m, 走向长度 1 048 m, 倾斜宽度 240 m。煤层倾角 0°~6°, 平均 2°, 煤厚 16.8~21.7 m, 平均厚度 18.7 m。工作面采用“一面两巷”布置, 2 条巷道及开切眼均沿煤层底板布置, 两巷道相互平行。工作面通风配量 1 671 m³/min。

2) 现场煤自燃程度预测。统计数据建立指标气体波动(图 5)发现 CO 体积分数自 2019-04-01 开始出现上升趋势(4 月 1 日前为正常观测值, 低于预警初值), 但是比照煤自燃分级预警方法, 结合 CO、O₂ 体积分数与火灾系数, 发现 4 月 7 日前煤层未达到预警范围, 是否存在煤层自燃隐患情况不明确; 4 月 7 日开始 CO 体积分数超过 200×10⁻⁶, O₂ 体积分数低于 12%, G 为 0.19, 说明此时煤层自燃达到 1 级灰色预警, 进入低温氧化阶段; 随后, CO 体积分数与 G 持续上升, 结合 O₂ 体积分数发现在 4 月 7 日—5 月 12 日, 煤层自燃进程一直处于灰色预警阶

段; 直至 5 月 13 日, CO 体积分数降低至 287×10⁻⁶, G 达到 0.5, 煤自燃进入 2 级蓝色预警阶段, 推测温度在 50~60 °C, 煤层自然发火反应到达自热阶段, 这一阶段持续到 5 月 14 日, 至此确认目标位置存在自然发火隐患; 此后开始采取相应的防控措施, 根据每日监测数据显示, CO 体积分数及火灾系数开始降低, 在 5 月 15 日时由蓝色预警降低至灰色预警。根据分级预警协同防控措施方法, 对采空区按照预警级别实施防灭火方案, 具体要求见表 3。

3) 效果分析。通过分析现场监测数据, 结合煤自燃程度的分级与自燃主动分级协同防控方法, 该矿工作面开展相应的防灭火工作, 整个过程中现场 CO 体积分数与火灾系数呈现先增大后减小的趋势。煤层在 4 月 7 日出现低温氧化, 5 月 13 日进入自热阶段, 随后在动态推进、封闭堵风、注惰降氧的防灭火措施下, 5 月 13 日后由蓝色预警降至灰色预警, 煤层的自燃隐患得到有效缓解, 防灭火工作取得了较好的效果。

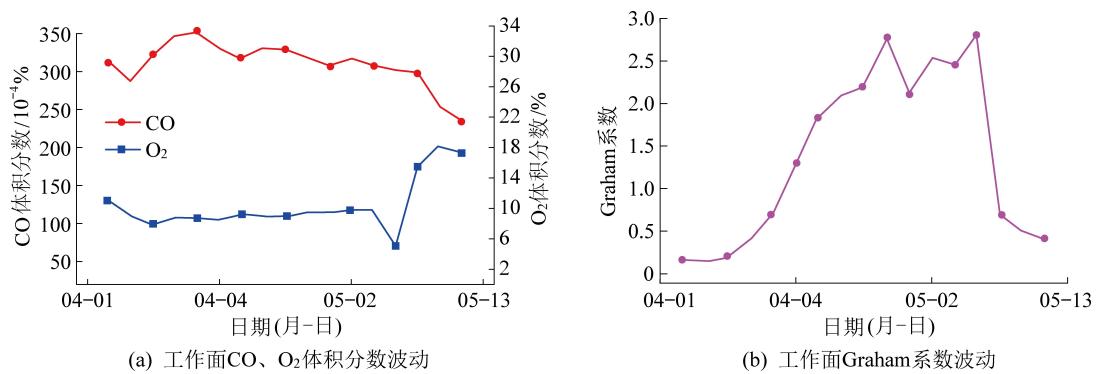


图 5 工作面关键指标参数波动情况

Fig.5 Fluctuation of key index parameters in working face

表 3 分级预警协同防控措施

Table 3 Coordinated prevention and control measures under different warning levels

日期(月-日)	预警状态	温度/℃	协同防控措施
04-01—04-07	正常	<30~40	动态推进
04-07—05-12	灰色预警	>30~40	动态推进 \cap 端头封堵 \cup 注惰降氧
05-13—05-14	蓝色预警	>50~60	动态推进 \cap 端头封堵 \cap 注惰降氧
05-15—05-16	灰色预警	>30~40	动态推进 \cap 端头封堵 \cup 注惰降氧

4 结 论

1) 在原有煤自燃三阶段划分理论基础上,通过试验数据和现场数据的分析确定了煤层自然发火过程当中的特征温度点: T_0 为 20~40 ℃; T_1 为 40~60 ℃; T_2 为 60~90 ℃; T_3 为 80~120 ℃; T_4 为 110~150 ℃; T_5 为 130~160 ℃; T_6 为 150~250 ℃。

2) 分析了众多表征煤自燃反应进程的指标气体及预警指标,通过对大量数据的分析,确定了精准表征煤自燃六级预警的指标: CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆浓度、 $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CO})$ 、Graham 系数、链烷比等。建立了较为完备的煤层自然发火进程分级预警体系,定量确定了各级判定阈值。

3) 实例应用检验了所构建预警体系的可靠性。通过对某矿采空区煤自燃程度及趋势的分析,确定煤自然发火分级预警级别,按照采空区煤自燃主动分级协同防控方法实施防灭火工作,结果表明本文构建的煤层自然发火进程分级预警体系能够有效指导实际工作面开展煤火防治工作。

参考文献(References) :

[1] 金永飞,郭军,文虎,等.煤自燃高温贫氧氧化燃烧特性参数的实验研究[J].煤炭学报,2015,40(3):596~602.

JIN Yongfei, GUO Jun, WEN Hu, et al. Experimental study on the high temperature lean oxygen oxidation combustion characteristic parameters of coal spontaneous combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 596~602.

[2] LIU Yin, WEN Hu, GUO Jun, et al. Coal spontaneous combustion

and N₂ suppression in triple goafs; a numerical simulation and experimental study [J]. Fuel, 2020, 271.

- [3] 王德明,辛海会,戚绪尧,等.煤自燃中的各种基元反应及相互关系:煤氧化动力学理论及应用[J].煤炭学报,2014,39(8):1667~1674.
WANG Deming, XIN Haihui, QI Xuyao, et al. Mechanism and relationships of elementary reactions in spontaneous combustion of coal: the coal oxidation kinetics theory and application [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1667~1674.
- [4] WEN Hu, LIU Yin, JIN Yongfei, et al. Numerical simulation for mine oblique lane fire based on PDF non-premixed combustion [J]. Combustion Science and Technology, 2021, 193: 90~109.
- [5] GUO Jun, WEN Hu, ZHENG Xuezhao, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 126: 223~231.
- [6] MOISES O B R, ALAN J D A, PABLO B B. A study of fire propagation in coal seam with numerical simulation of heat transfer and chemical reaction rate in mining field [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(6): 873~879.
- [7] 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.
SHU Yiguo, ZHAO Qingwei, YU Ya'nan. Research on prediction and forecast indicators system of easy spontaneous combustion coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 229~234.
- [8] YUUKI Mochizuki, YOHEI Ono, NAOTO Tsubouchi. Evolution profile of gases during coal carbonization and relation ship between their amounts and the fluidity or coke strength [J]. Fuel, 2019, 237: 735~744.
- [9] 郭军,程小蛟,武剑,等.易自燃厚煤层工作面自然发火CO预测及防治[J].中国安全生产科学技术,2018,14(4):75~81.
GUO Jun, CHENG Xiaoqiao, WU Jian, et al. CO prediction and control of spontaneous combustion in mining face of thick coal

- seam inclined to spontaneous combustion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(4):75-81.
- [10] 肖旸,马砾,王振平,等.煤自燃指标气体的吸附与浓缩规律[J].*煤炭学报*,2007,32(10):1014-1018.
- XIAO Yang, MA Li, WANG Zhenping, et al. Law of index gases adsorption and condensability of coal spontaneous combustion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(10):1014-1018.
- [11] ZHANG Yutao, ZHANG Yuanbo, LI Yaqing, et al. Study on the characteristics of coal spontaneous combustion during the development and decaying processes [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138:9-17.
- [12] ONIFADE Moshood, GENC Bekir. A review of research on spontaneous combustion of coal [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(3):303-311.
- [13] 文虎,赵向涛,王伟峰,等.不同煤体自燃指标性气体函数模型特征分析[J].*煤炭转化*,2020,43(1):16-25.
- WEN Hu, ZHAO Xiangtao, WANG Weifeng, et al. Analysis on characteristics of indicator gases of spontaneous combustion of different coals [J]. *Coal Conversion*, 2020, 43(1):16-25.
- [14] 邓军,赵婧昱,张嬿妮,等.不同变质程度煤二次氧化自燃的微观特性试验[J].*煤炭学报*,2016,41(5):1164-1172.
- DENG Jun, ZHAO Jingyu, ZHANG Yanni, et al. Micro-characteristics of spontaneous combustion of second oxidation with different rank coals [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41 (5): 1164-1172.
- [15] 贾廷贵,娄和壮,刘剑,等.不同水分含量煤自燃过程热特性实验研究[J].*煤炭学报*,2020,44(4):1-7.
- JIA Tinggui, LOU Hezhuang, LIU Jian, et al. Experimental study on thermal characteristics of spontaneous combustion process of coal with different moisture [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 44(4):1-7.
- [16] SONG Zeyang, HUANG Xinyan, JIANG Juncheng, et al. A laboratory approach to CO₂ and CO emission factors from underground coal fires [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 219.
- [17] 祝捷,张敏,姜耀东,等.煤吸附解吸CO₂变形特征的试验研究[J].*煤炭学报*,2015,40(5):1081-1086.
- ZHU Jie, ZHANG Min, JIANG Yaodong, et al. Experimental study of coal strain induced by carbon dioxide sorption desorption [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5):1081-1086.
- [18] 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.
- [19] 陆新晓,赵鸿儒,朱红青,等.氧化煤复燃过程自燃倾向性特征规律[J].*煤炭学报*,2018,43(10):2809-2816.
- LU Xinxiao, ZHAO Hongru, ZHU Hongqing, et al. Characteristic rule of spontaneous combustion tendency of oxidized coal at rekindle stage [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (10):2809-2816.
- [20] 梁运涛,孙勇,罗海珠,等.基于小样本的煤层自然发火烷烃气体的光谱分析[J].*煤炭学报*,2015,40(2):371-376.
- LIANG Yuntao, SUN Yong, LUO Haizhu, et al. Spectral analysis of alkanes gases of coal spontaneous combustion with a small quantity sample [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2):371-376.
- [21] 罗道成,刘俊峰.不同反应条件对煤中自由基的影响[J].*煤炭学报*,2008,33(7):807-811.
- LUO Daocheng, LIU Junfeng. Effects of different reaction conditions on the free radicals in coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(7):807-811.
- [22] 常绪华,王德明,贾海林.基于热重实验的煤自燃临界氧体积分数分析[J].*中国矿业大学学报*,2012,41(4):526-530,550.
- CHANG Xuhua, WANG Dengming, JIA Hailin. Effects of different reaction conditions on the free radicals in coal [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41 (4): 526-530,550.
- [23] TOSHIMASA Takanohashi, TAKAHIRO Shishido, HIROYUKI Kawashima, et al. Characterization of hyper coals from coals of various ranks [J]. *Fuel*, 2007, 87(4):592-598.
- [24] 王寅,王海晖.基于交叉点温度法煤自燃倾向性评定指标的物理内涵[J].*煤炭学报*,2015,40(2):377-382.
- WANG Yin, WANG Haihui. Physical nature of the indexes for ranking self-heating tendency of coal based on the conventional crossing-point temperature technique [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2):377-382.
- [25] 黎经雷,牛会永,鲁义,等.风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(3):156-162.
- LI Jinglei, NIU Huiyong, LU Yi, et al. Study on effect of wind speed to air leakage and spontaneous combustion in goaf of contiguous seams [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3):156-162.
- [26] 周西华,李昂,聂荣山,等.不同变质程度煤燃烧阶段链烃生成规律[J].*煤炭学报*,2016,41(7):1741-1746.
- ZHOU Xihua, LI Ang, NIE Rongshan, et al. Chain hydrocarbons formation law of different metamorphic grade coals at combustion phase [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41 (7): 1741-1746.
- [27] 王德明.煤矿热动力灾害及特性[J].*煤炭学报*,2018,43(1):137-142.
- WANG Deming. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 137-142.
- [28] 秦波涛,仲晓星,王德明,等.煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J].*煤炭科学技术*,2021,49(1):66-99.
- QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1):66-99.
- [29] 王海燕,方熙扬.煤自热低温阶段“自限制”特征的理论与试验研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(6):231-237.
- WANG Haiyan, FANG Xiyang. Theoretical and experimental study on low temperature stage of coal self-heating [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6):231-237.