



推荐阅读：

- [综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)
- [高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)
- [超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)
- [风速对近距离煤层采空区漏风及煤自然影响研究](#)
- [深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)
- [水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)
- [巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)
- [高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)
- [高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)
- [寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)
- [我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)
- [基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)
- [松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)
- [综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)
- [我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)
- [高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)
- [原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)
- [不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)
- [顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)
- [煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

朱建国,戴广龙,唐明云,等.水浸长焰煤自燃预测预报指标气体试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(5):89-94. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.05.012
 ZHU Jianguo, DAI Guanglong, TANG Mingyun, et al. Experimental study on spontaneous combustion prediction index gas of water immersed long flame coal [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (5) : 89 - 94. doi: 10.13199/j.cnki.est.2020.05.012

水浸长焰煤自燃预测预报指标气体试验研究

朱建国¹,戴广龙^{1,2},唐明云^{1,2},叶庆树³,李鹏³

(1.安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南 232001;2.安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001;3.神东煤炭集团有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:为解决补连塔矿22煤采空区长期浸水的遗煤自燃预测预报问题,针对含水煤样自燃预测预报研究较少的问题,通过对5种不同含水率的长焰煤进行程序升温试验研究,分析温度升高过程中的遗煤自热氧化气体产物及其浓度变化规律,对煤自燃预测预报指标气体进行优选。研究结果表明:浸水的遗煤低温氧化具有分阶段特性,在煤样浸水程度不同的复杂情况下,提出以 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})$ 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 以及 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_3H_8 作为煤自燃预测预报指标,并且当 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)\leqslant 0.1$ 或 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})\geqslant 0.02$ 时,则煤处于吸氧蓄热阶段($30\sim 100^\circ\text{C}$),当 $0.8\leqslant\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)\leqslant 1.10$ 时,则煤处于自热氧化阶段($100\sim 140^\circ\text{C}$),当 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)\geqslant 0.5$ 或 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})\leqslant 0.005$ 时,则煤处于加速氧化阶段($140\sim 230^\circ\text{C}$)。研究结果对采空区遗煤的自燃防控具有一定的指导作用,结合现场实际情况,及时对参数指标进行修正,完善煤自燃预测预报指标,可有效预防煤自燃灾害事故的发生。

关键词:煤自燃;含水率;指标气体;长焰煤

中图分类号:TD75 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)05-0089-06

Experimental study on spontaneous combustion prediction index gas of water immersed long flame coal

ZHU Jianguo¹, DAI Guanglong^{1,2}, TANG Mingyun^{1,2}, YE Qingshu³, LI Peng³

(1.School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2.Key Laboratory of Coal Mine Safety and High Efficient Mining Jointly Built by Province and the Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;3.Shendong Coal Group Co., Ltd., Erdos 017000, China)

Abstract:Prediction of spontaneous combustion of long-term water immersed coal is still a problem for coal mines, the research on which is limited. This paper presents an experimental study on predicting the spontaneous combustion of long-term water immersed coal in 22 gob of Bulianta Mine. A temperature programmed experiment on long flame coal with five different water cuts was conducted to analyze the changes of auto thermal oxidation gas products and their concentrations in the process of temperature increase. Then the index gas for coal spontaneous combustion prediction was optimized. The results show that the low-temperature oxidation of the water immersed coal has phased characteristics. It is proposed that $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$, $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})$, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$, and C_2H_6 , C_2H_4 and C_3H_8 are used as prediction indexes for coal spontaneous combustion. When $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)\leqslant 0.1$ or $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})\geqslant 0.02$, the coal is in the oxygen absorption and heat storage stage ($30\sim 100^\circ\text{C}$), when $0.8\leqslant\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)\leqslant 1.10$, the coal is in the auto thermal oxidation stage ($100\sim 140^\circ\text{C}$), and when $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)\geqslant 0.5$ or $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})\leqslant 0.005$, the coal is in the accelerated oxidation stage ($140\sim 230^\circ\text{C}$). The experimental results have the guiding role for the prevention and control of spontaneous combustion of coal in gob. In combination with the actual situation on the site, the parameter indicators should be corrected in time to improve the coal spontaneous combustion prediction index, which can effectively prevent coal spontaneous combustion disasters.

Key words: coal spontaneous combustion; moisture content; index gas;long flame coal

收稿日期:2020-02-09;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574009)

作者简介:朱建国(1995—),男,安徽淮北人,硕士研究生。Tel:17355489126,E-mail:1431542646@qq.com

0 引言

神东矿区22煤层为浅埋煤层,煤层开采时,上覆基岩垮落后形成裂隙通道与上覆采空区连通,且裂隙直达地表^[1],造成地表水源及上覆采空区积水通过岩层裂隙流入采空区,使采空区内遗煤中含有不同水分,而不同含水率煤样在煤自然发火的不同阶段,其指标气体生成规律也有所不同,对煤自燃预测指标气体的选取造成很大影响^[2-3]。因此,研究不同含水率煤自燃标志性气体对采空区遗煤自燃预报具有重要作用。沈云鸽等^[4]研究了4种不同自燃倾向性煤的自燃预报指标体系;疏义国等^[5]优选了CO、O₂、Δφ(CO)/Δφ(O₂)、C₂H₆、C₂H₄作为煤自然发火的气体指标;文虎等^[6]选取CO作为指标气体,对济宁二号井9303超长综采工作面的采空区煤自燃进行预测;但针对采空区遗煤的复杂情况,以上研究以无影响因素的原煤样指标气体用于划分采空区遗煤自燃预报指标体系具有较大误差。

学者们对原煤样的自燃标志气体的产生规律及预测指标体系划分研究较多^[4-7],但对不同水分含量煤样各阶段的自燃标志气体发生规律研究和预测指标体系研究较少,笔者针对补连塔矿22310工作面采空区积水较多的复杂情况,通过对该工作面不同含水率煤样的升温氧化试验,研究了煤自燃各阶段标志气体的产生规律,并提出煤自燃预测指标体系,为采空区遗煤自然发火预报提供理论指导。

1 试验

1.1 试验仪器与试验煤样

本次试验装置为GC-4175型煤自燃测定仪,该装置^[8-11]主要由程序升温炉、煤样罐、温度传感装置、显示和控制系统、流量传感器和稳压稳流等装置组成。测定仪与GC-4085型矿井自动色谱仪连接,煤样产生的气体可直接通入色谱仪进行分析,减少人工误差,整个试验系统误差小,精确性较高。

试验煤样为神东补连塔矿22煤层22310工作面煤样,煤种为长焰煤。试验前先剥去煤块表面的氧化层,研磨粒径为0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8 mm的煤样各20 g,共60 g混合煤样,在真空干燥箱内干燥24 h后进行工业分析如下:

发热量 $Q_{net,d}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	23.37
水分 $M_{ad}/\%$	5.53
灰分 $A_{ad}/\%$	10.62
硫分 $S_{t,d}/\%$	0.42
挥发分 $V_{daf}/\%$	40.62

通过对煤样的浸泡后,过滤多余水分,可知煤样的最大含水率约38%,本次试验在煤样浸水7 d后,以8%为梯度,在真空干燥箱内干燥制作成含水率分别为5.53%、13.45%、21.55%、29.50%和37.56%的5种煤样。

1.2 试验过程

将制备好的煤样装入煤样罐中,把温度探头插入罐中煤样内并密封接口。罐内通入流量为100 mL/min的干空气,在30~100 °C内升温速率为0.5 °C/min,100~230 °C内升温速率为1 °C/min,把煤样持续加热到230 °C,从30 °C开始,每升温10 °C便恒温稳定5 min,对氧化产生的气样进行色谱分析。

2 试验结果分析

对5种不同含水率煤样进行程序升温试验,绘制出O₂、CO、CO₂、C₂H₆、C₂H₄、C₃H₈和C₄H₁₀气体浓度φ随温度升高变化曲线(图1,图2),对比不同含水率煤样随温度的变化规律。

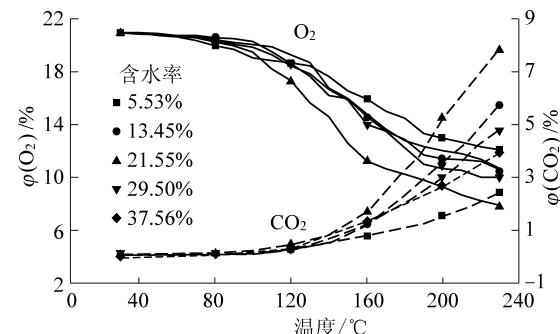


图1 O₂和CO₂浓度变化规律

Fig.1 Variation of the concentration of O₂ and CO₂

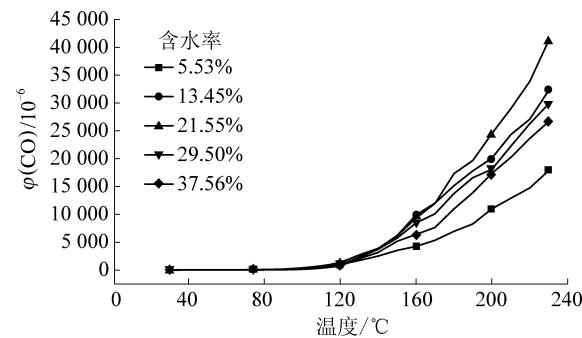


图2 CO浓度变化规律

Fig.2 Variation of the concentration of CO

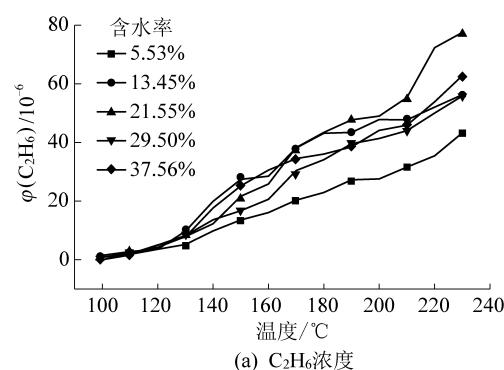
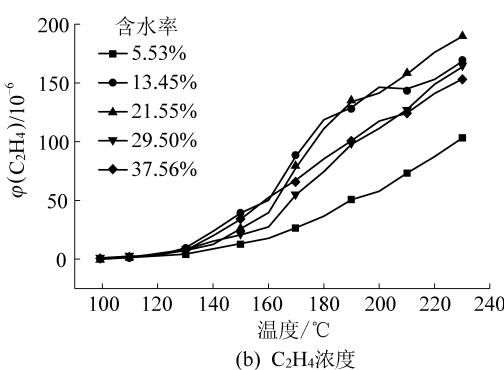
2.1 CO和CO₂体积分数

从图1和图2可以看出,在固定供风量下,O₂浓度均随温度升高逐渐减小,其中不同含水率煤样均比干燥原煤的O₂浓度低,煤在低温氧化过程中首先

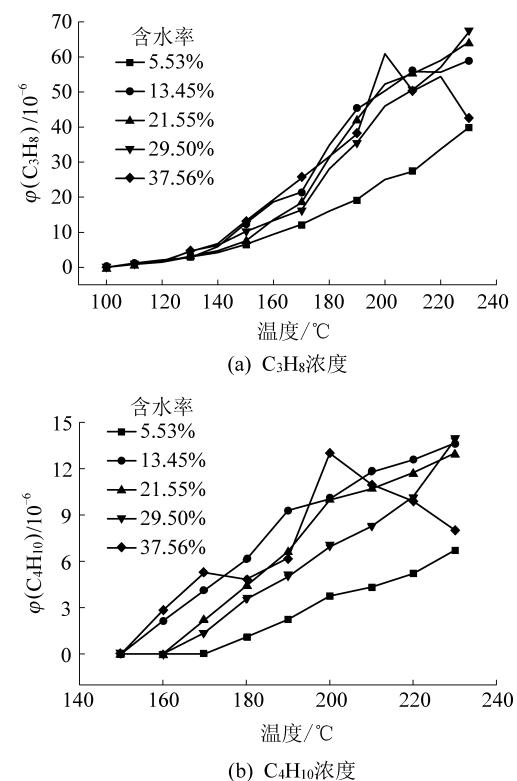
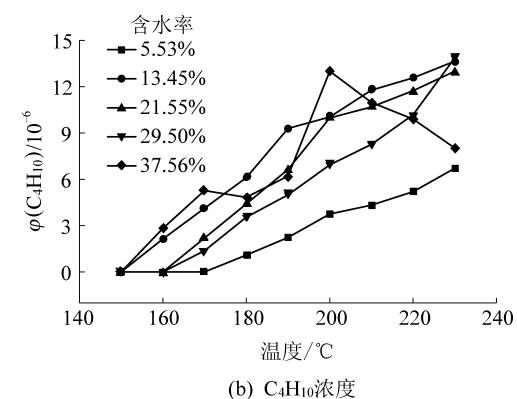
与氧发生物理吸附,随着温度升高,后发生化学吸附与化学反应。水分含量的不同对长焰煤升温氧化具有一定影响,在低温氧化阶段,煤的表面与氧气接触形成碳氧络合物,随着温度继续升高,煤化程度增加,侧链脱落分解出 CO 和 CO₂。不同含水率煤样 CO 和 CO₂产生量随温度升高逐渐增加,在 100 ℃左右开始呈现指数型增长,CO 和 CO₂产生量随含水率的变化排序为 21.55%>13.45%>29.50%>37.56%>5.53%。

2.2 烷烃气体浓度

C₂H₆和C₂H₄浓度变化规律如图3所示,5种含水率煤样在温度低于100 ℃时,均未出现C₂H₆和C₂H₄。当温度高于100 ℃时,煤的氧化速度加快,脂肪侧链氧化,发生裂解反应,生成C₂H₆和C₂H₄气体。在100~140 ℃时,2种气体浓度较小,且增长缓慢,但在140 ℃之后浓度逐渐增大,不同高含水率煤样2种气体产生量均高于干燥原煤。

(a) C₂H₆浓度(b) C₂H₄浓度Fig.3 Variation of the concentration of C₂H₆ and C₂H₄

C₃H₈和C₄H₁₀浓度变化规律如图4所示,在温度低于100 ℃时,5种含水率煤样均未产生C₃H₈和C₄H₁₀,C₃H₈在温度达到100 ℃时才出现,100~140 ℃时5种煤样的C₃H₈增长较为缓慢,但在140 ℃之后开始呈指数增长。含水率13.45%和37.56%煤样在150 ℃后开始产生C₄H₁₀,21.55%和29.50%煤样则在160 ℃后产生C₄H₁₀,干燥原煤最

(a) C₃H₈浓度(b) C₄H₁₀浓度Fig.4 Variation of the concentration of C₃H₈ and C₄H₁₀

晚,为170 ℃。另外,37.56%煤样在200 ℃时,C₃H₈和C₄H₁₀浓度达到峰值并逐步减小,其他含水率煤样呈逐步增大趋势。因此,对于煤样含有不同水分的情况下,可以C₃H₈单一气体作为预测指标,但用C₄H₁₀作为预测指标时具有较大误差。

3 煤自燃气体指标优选

根据煤低温氧化过程中气体的产生浓度及变化规律,将煤低温氧化分成3个阶段进行煤自燃标志气体的划分,分别为吸氧蓄热阶段(30~100 ℃)、自热氧化阶段(100~140 ℃)和加速氧化阶段(140~230 ℃)^[12]。

3.1 单一气体指标

1) $\varphi(\text{CO})$ 和 $\varphi(\text{CO}_2)$ 。从图1和图2可以看出,不同含水率的煤样在第1阶段(30~100 ℃)均已产生CO和CO₂,在100 ℃之后开始呈现指数增长,且不同高水分含量煤样的CO和CO₂产生量均比干燥原煤高。众多学者通常把CO作为快速识别煤体氧化程度的重要指标气体,但是5种含水率煤样CO在常温30 ℃和第1阶段(30~100 ℃)时均已产生,虽含量较小,但若将此作为单一气体指标时依然存在较大误差。因此,根据标志气体优选中的唯一性原则,在煤吸氧蓄热阶段、自热氧化阶段或加速氧化阶段,都无法采用CO或CO₂单一气体作为预

测指标。

2) 烷烃类气体浓度。由图3和图4可知,不同含水率煤样在吸氧蓄热阶段(30~100℃)都未产生C₂H₆、C₂H₄、C₃H₈和C₄H₁₀气体,因此在此阶段无法使用烷烃类单一气体作为煤自燃预测指标。不同含水率煤样吸附的原生气体中均无C₂H₆、C₂H₄和C₃H₈,在温度大于100℃时才逐步出现这3种气体,因此,当温度大于100℃时,可采用C₂H₆、C₂H₄和C₃H₈气体作为指标气体。即若检测出C₂H₆、C₂H₄或C₃H₈,则可以判定温度已高于100℃,但是对于自热氧化阶段(100~140℃)和加速氧化阶段(140~230℃)2种不同温度区间,无法使用单一指标气体进行划分。因此,C₂H₆、C₂H₄和C₃H₈可做这2个阶段的辅助指标气体。对于C₄H₁₀,不同含水率煤样出现此气体时的温度段具有较大差异性,因此C₄H₁₀不适合作为预测指标气体。

3.2 复合气体指标

由分析可以得出,水浸煤样在低温氧化第1阶段就含有CO和CO₂,对于唯一性原则,无法采用这2种气体作为煤低温氧化的单一气体指标,且CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₃H₈和C₄H₁₀在100℃之前均未出现,所以对于煤低温氧化第1阶段,无法采用单一气体及其浓度作为预测指标,为解决这一问题,选取φ(CO)/φ(CO₂)、φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)和φ(C₂H₄)/φ(C₂H₆)作为判定指标,对5种不同含水率煤样分阶段考虑复合气体指标的变化情况。

1) φ(CO)/φ(CO₂)和φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)。由于含水率不同,煤样发生拐点的温度也不同,则在采空区的复杂情况下,应以统一指标作为预测指标。对于具有不同含水率的煤样,φ(CO)/φ(CO₂)具有一定的规律性,先是缓慢增加,后指型增长,最后趋于平缓,如图5所示。不同含水率煤样在100℃之后均产出C₂H₄和C₂H₆,可知温度为30~100℃可作为煤的吸氧蓄热阶段,此阶段从物理吸附过渡到化学吸附和局部化学反应,生成CO和CO₂^[7]。当温度为30~100℃时,不同含水率煤样的φ(CO)/φ(CO₂)值均小于0.2,含水率37.56%煤样最低,为0.1。以φ(CO)/φ(CO₂)作为预测指标时,应以最低值作为上限值,即当φ(CO)/φ(CO₂)≤0.1时,可知煤样处于吸氧蓄热阶段,温度为30~100℃。

不同含水率煤样φ(CO)/φ(CO₂)在140℃之后开始趋于平缓,当温度为140℃时,煤样含水率29.50%煤样最高,为0.5。尽管含水率5.53%、21.55%和37.56%煤样在温度为140~150℃时的φ(CO)/φ(CO₂)略小于0.5,但作为煤样在加速氧化

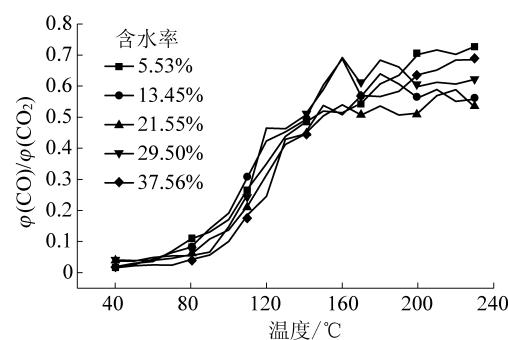


图5 φ(CO)/φ(CO₂)随温度变化曲线

Fig.5 Curves of φ(CO)/φ(CO₂) change with temperature

阶段(140~230℃)的标志气体时,以最高值作为下限值依然可行,即当φ(CO)/φ(CO₂)≥0.5时,可知煤样温度已大于140℃。

对于自热氧化阶段(100~140℃),当温度为100℃和140℃时,不同含水率煤样的φ(CO)/φ(CO₂)相差较大,以温度为100℃时的φ(CO)/φ(CO₂)作为指标气体的下限值和以140℃的值作为上限值具有误差性,但φ(CO)/φ(CO₂)在温度为100~140℃时依然呈现上升规律,可作为此温度段的辅助标志性气体。

φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)的变化也呈一定规律性,先是急剧减小,后呈平缓趋势,如图6所示。在温度为30~100℃时,含水率13.45%和37.56%的φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)为最大,含水率21.55%为最小,且不同含水率φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)在该温度段均大于0.016。与φ(CO)/φ(CO₂)不同,φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)随温度升高呈下降趋势,以此作为预测指标,应以最高值作为下限值。在100℃时,含水率13.45%较其他含水率的煤样φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)大,为0.02,则当φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)≥0.02时,煤样处于吸氧蓄热阶段,温度为30~100℃。

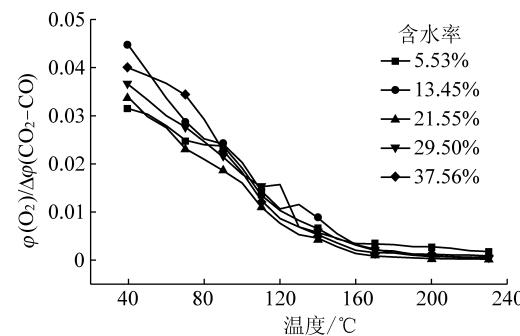


图6 φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)随温度变化曲线

Fig.6 Curves of φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO) change with temperature

不同含水率煤样在温度大于140℃时φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)减小速率变慢,并逐渐趋于平缓。在140℃时,含水率21.55%煤样φ(O₂)/Δφ(CO₂-CO)

CO)最低,为0.005。以最低值作为上限值的原则,当 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO}) \leq 0.005$ 时,则煤样温度已高于140℃,处于加速氧化阶段(140~230℃)。

对于自热氧化阶段(100~140℃),当温度为100℃和140℃时,不同含水率煤样的 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})$ 相差较大,以温度为100℃时的 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})$ 作为指标气体值的上限值和以140℃的值作为下限值具有误差性,但此在温度为100~140℃时呈现下降规律,可作为此温度段的辅助标志性气体。

2) $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 。5种不同含水率煤样在100℃之后逐步产生 C_2H_4 与 C_2H_6 ,使用单一气体指标无法准确预测自热氧化阶段(100~140℃),故采用 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 的比值作为该温度段的预测指标。不同含水率煤样 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 均随温度升高而增大,先是缓慢增长,后呈指数增长,最后趋于平缓并有下降趋势如图7所示。在100~140℃, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 增长平缓,在100℃时,煤样 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 均大于0.8,在140℃时,5.53%煤样 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 最低,为1.10。作为该温度段的预测指标,应以最低值作为上限值,即当 $0.8 \leq \varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) \leq 1.10$ 时,则温度处于自热氧化阶段(100~140℃)。且 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 在140℃之后继续呈上升趋势,则 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) > 1.10$ 可作为煤加速氧化阶段(140~230℃)的预测指标。

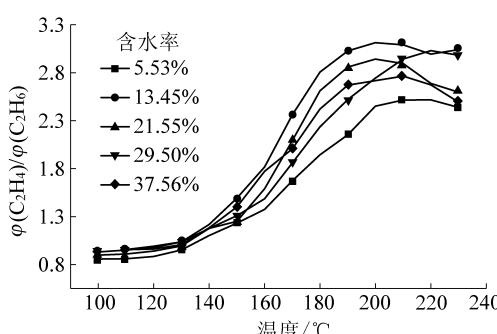


图7 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 随温度变化曲线

Fig.7 Curves of $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ change with temperature

4 结 论

1)通过对22煤不同含水率的煤样进行低温氧化试验,最后研究得出,以 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO})$ 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 的区域值以及 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_3H_8 浓度作为煤自燃预测预报指标。

2)在采空区复杂情况下,以不同含水率煤样综合划分3个阶段对应的指标具有较大实际意义。浸水遗煤低温氧化具有分阶段特性,当 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2) \leq 0.1$ 或 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO}) \geq 0.02$ 时,则煤处于吸氧蓄热阶段(30~100℃),当 $0.8 \leq \varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) \leq 1.10$ 时,则煤处于自热氧化阶段(100~140℃),当 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2) \geq 0.5$ 或 $\varphi(\text{O}_2)/\Delta\varphi(\text{CO}_2-\text{CO}) \leq 0.005$ 时,则煤温度已高于140℃,处于加速氧化阶段(140~230℃)。

3)应根据试验研究结果,结合现场实际情况,及时对参数指标进行修正,完善煤自燃预测预报指标,有效预防煤自燃灾害事故的发生。

参考文献(References):

- [1] 李建伟,刘长友,赵杰,等.沟谷区域浅埋煤层采动矿压发生机理及控制研究[J].煤炭科学技术,2018,46(9):104~110.
LI Jianwei, LIU Changyou, ZHAO Jie, et al. Study on occurrence mechanism and control technology of mining-induced strata pressure in shallow depth coal seams of valley region [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 104~110.
- [2] 翟小伟,葛晖,王凯,等.水浸干燥作用对煤自燃特性及预测指标影响研究[J].中国安全科学学报,2018,28(5):68~73.
ZHAI Xiaowei, GE Hui, WANG Kai, et al. Research on influences of water soaking-drying on coal spontaneous combustion characteristics and predictive index [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 68~73.
- [3] 王鑫阳,LUO Yi,张勋,等.基于绝热氧化试验结果的煤自燃预测模型研究[J].中国安全科学学报,2017,27(6):67~72.
WANG Xinyang, LUO Yi, ZHANG Xun, et al. A study on predicting model for self-heating behavior of coal based on adiabatic oxidation experiment [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6): 67~72.
- [4] 沈云鸽,王德明,朱云飞,等.不同自燃倾向性煤的指标气体产生规律实验研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(4):69~74.
SHEN Yunge, WANG Deming, ZHU Yunfei, et al. Experimental study on generation laws of index gases for coal with different spontaneous combustion tendency [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(4): 69~74.
- [5] 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 Yanan. Research on prediction and forecast indicators system of easy spontaneous combustion coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 229~234.
- [6] 文虎,王文,陶维国,等.超长综采工作面撤架期间煤自燃预测及防控技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):167~173.
WEN Hu, WANG Wen, TAO Weigu, et al. Study on coal spontaneous combustion prediction and control technology during withdrawal period of super long fully-mechanized mining face [J].

- Coal Science and Technology, 2020, 48(1):167–173.
- [7] 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.
WANG Fusheng, WANG Jiantao, GU Liang, *et al.* Study on multi-parameter index system for prediction and forecast of coal spontaneous combustion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6):45–51.
- [8] 唐明云,张国枢,戴广龙,等.空气流量对煤升温氧化影响的实验研究[J].煤矿安全,2008,39(5):12–13.
TANG Mingyun, ZHANG Guoshu, DAI Guanglong, *et al.* Investigation on influence between quantity of air stream and coal heating oxidation [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(5):12–13.
- [9] 徐永亮,王兰云,宋志鹏,等.基于交叉点法的煤自燃低温氧化阶段特性和关键参数[J].煤炭学报,2017,42(4):935–941.
XU Yongliang, WANG Lanyun, SONG Zhipeng, *et al.* Characteristics and critical parameters of coal spontaneous combustion at low temperature stage based on CPT method [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4):935–941.
- [10] 仲晓星,王德明,尹晓丹.基于程序升温的煤自燃临界温度测试方法[J].煤炭学报,2010,35(S1):128–131.
ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, YIN Xiaodan. Test method of critical temperature of coal spontaneous combustion based on the temperature programmed experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1):128–131.
- [11] 王德明,亓冠圣,戚绪尧,等.煤实验最短自然发火期的快速测试[J].煤炭学报,2014,39(11):2239–2243.
WANG Deming, QI Guansheng, QI Xuyao, *et al.* Quick test method for the experimental period minimum of coal to spontaneous combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11):2239–2243.
- [12] 戴广龙.煤低温氧化过程气体产物变化规律研究[J].煤矿安全,2007,38(1):1–4.
DAI Guanglong. Study on change law of gas product of coal oxidation in low temperature [J]. Safety in Coal Mines, 2007, 38(1):1–4.