



移动扫码阅读

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. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2020. 01. 021
WEN Hu, WANG Wen, TAO Weiguo, *et al.* Study on coal spontaneous combustion prediction and control technology during with drawal period of super long fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 167-173. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2020. 01. 021

超长综采工作面撤架期间煤自燃预测及防控技术研究

文虎^{1,2},王 文^{1,2},陶维国³,程小蛟^{1,2},姜希印³,程邦楷⁴

(1.西安科技大学 安全科学与工程学院,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;
3.兖州煤业股份有限公司 济宁二号煤矿,山东 济宁 272072;4.淮南矿业(集团)有限责任公司,安徽 淮南 232001)

摘 要:为治理济宁二号井9303超长综采工作面撤架周期长、采空区遗煤量大、存在漏风等问题导致的采空区煤自燃,基于数学建模、程序升温试验、现场原位监测相结合的方式,研究了适合超长工作面撤架期间煤自燃预测与防控一体的综合防治技术。根据已有的对推采期间上隅角CO预测研究与现场条件推演停采撤架期间上隅角CO浓度数学模型;通过程序升温-色谱分析试验获得采空区遗煤氧化升温过程中CO与C₂H₄的生成规律;依据煤自燃危险区域判定理论对采空区自燃“三带”分布进行现场观测,通过上隅角CO浓度预测数学模型、采空区束管监测数据以及工作面参数计算得到上隅角CO预测浓度,判断采空区遗煤自然发火危险性;最后结合预测结果、工作面发火特点以及煤自燃防治工作经验,提出封堵减漏、惰化降温等防控措施。结果表明:遗煤氧化升温的临界温度为60~80℃、干裂温度为110~130℃、采空区遗煤氧化升温标志气体随温度变化呈类指数增长;常温、临界温度、干裂温度三个特征温度对应的上隅角CO体积分数预测范围分别为:≤36.30×10⁻⁶、(410.02~1758.05)×10⁻⁶、(12264.33~38197.95)×10⁻⁶;通过上隅角CO浓度预测与现场监测值对比分析,成功预测了停采撤架期间采空区煤自燃程度,所提出的针对性防控措施成功消除了煤自燃隐患,保证了撤架工作的顺利进行。

关键词:超长工作面;撤架;煤自燃;指标气体

中图分类号:TD75 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)01-0167-07

Study on coal spontaneous combustion prediction and control technology during with drawal period of super long fully-mechanized mining face

WEN Hu^{1,2}, WANG Wen^{1,2}, TAO Weiguo³, CHENG Xiaojiao^{1,2}, JIANG Xiyin³, CHENG Bangkai⁴

(1.School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.Key Laboratory of Mine Exploitation and Disaster Prevention in Western China, Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3.Jining NO.2 Coal Mine of Yanzhou Coal Mine Co., Ltd., Jining 272072, China; 4.Huainan Mining(Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China)

Abstract: In order to control the long-mechanized coal spontaneous combustion in the gob of No.9303 ultra-long fully-mechanized mining face in Jining No.2 coal mine caused by the long shelf-removal cycle, the large amount of residual coal in the gob and the existence of air leakage, etc., the combined monitoring method was used to study the integrated prevention and control technology suitable for coal spontaneous combustion prediction and prevention during the period of super long working face removal based on mathematical modeling, temperature-programming test and in-situ monitoring. According to the existing research on the prediction of CO in upper corner during mining and the on-site conditions, the mathematical model of CO concentration in upper corner during the stoppage and withdrawal of the support was deduced. The generation of CO and C₂H₄ during the oxidation and temperature rise of the gob was obtained by the programmed temperature chromatographic analysis test. According to the theory of coal spontaneous combustion risk area, the distribution of "three zones" in gob was observed on the spot. Through the mathematical model of CO prediction in upper corner, the monitoring data of gob beam tube and the calculation of working face parameters, the predicted concentration of CO in upper corner was obtained, and the risk of spontaneous

收稿日期:2019-07-02;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801802);国家自然科学基金面上资助项目(51574193)

作者简介:文 虎(1972—),男,新疆石河子人,教授,博士生导师。E-mail: wenh@xust.edu.cn

combustion of residual coal in gob was judged. Finally, combined with the prediction results, the characteristics of working face ignition and the experience in coal spontaneous combustion prevention and control, the prevention and control measures such as leakage reduction, inerting and cooling were put forward. The results show that the critical temperature of the residual coal oxidation temperature is 60~80 °C, the drycracking temperature is 110~130 °C, and the index gas of residual coal oxidation temperature in gob increases exponentially with the change of temperature. The predicted concentration ranges of CO in the upper corner corresponding to the three characteristic temperatures of normal temperature, critical temperature and dry crack temperature are respectively: 36.30×10^{-6} , $(410.02 \sim 1\,758.05) \times 10^{-6}$, $(12\,264.33 \sim 38\,197.95) \times 10^{-6}$. By comparing the predicted concentration of CO in the upper corner with the field monitoring value, the degree of spontaneous combustion of coal in the gob during the stoppage and removal of mining was successfully predicted. The corresponding prevention and control measures proposed successfully eliminated the hidden dangers of spontaneous combustion of coal and ensured the smooth progress of removing the support frame.

Key words: super-long working face; removal of support; coal spontaneous combustion; index gas

0 引言

煤层自燃是煤矿主要灾害之一。我国每年因采空区煤层自燃导致的矿井重特大事故时有发生,它容易诱发煤尘与瓦斯爆炸等二次灾害,严重威胁到井下人员生命安全^[1-2]。研究表明^[3-5],煤自燃的实质就是煤的缓慢氧化放热与循环自热的过程。随着矿井机械化水平成熟,采空区遗煤量少、工作面推进速度快等逐步成为趋势,煤自燃危险性也因此大幅降低^[6]。但综采工作面回撤期间,各种实际问题所造成的工作面回撤时间过长依然会造成采空区内遗煤氧化升温进而引起自燃^[7]。因此,做好回撤期间煤自燃早期预测,及早发现火源并采取有效措施对于煤火灾防治具有重大意义。

采空区煤自燃预测研究的关键在于能否准确预判火源位置及火源温度。但采空区煤自燃时的热效应极为复杂,因此要做到准确预判就必须结合矿井特点选择合理的预测方法。目前矿井煤自燃早期预测的主要方法有指标气体法、温度法、同位素测氦法等^[8-10]。温度法虽然已经相对成熟,但易受风流、传感器的数量与布置范围等因素影响。同位素氦分析法比较精准,但在复杂地质条件下地表测氦技术常无法满足探测要求。指标气体法是最早应用于煤自燃早期预测的方法,目前也被最广泛使用。目前国内外常用的预测指标主要有 CO、CH₄、C₂H₄、H₂、链烷比、格氏火灾系数等^[11-13]。由于 CO 在煤自燃初期最为灵敏且容易探测,故在指标气体的优选方案中,常以 CO 为主、其他指标为辅^[14-16]。其中,文献^[17-18]提出了工作面推采过程中采空区 CO 产生量数学模型,为指标气体预测煤自燃提供重要思路。然而,上述研究主要针对常规工作面推采期间的煤火预测,对于工作面停采撤架期间的煤自燃预测方法,仍缺少理论研究。此外,在撤架期间的煤火防治技术方面,国内外学者针对不同采空区环境,从堵漏

风、降温度、重监测等方面着手提出了一系列治理措施^[19-20]。但到目前为止,关于超长综采工作面撤架期间防灭火技术却鲜有研究。

鉴于此,笔者以济宁二号煤矿 9303 工作面为工程背景,建立停采期间上隅角 CO 浓度数学模型,采用指标气体法对采空区自然发火程度进行了预测研究,并根据预测结果与工作面特点提出针对性防控措施且成功消除了煤自燃隐患,对相似工作面的采空区煤自燃早期预报与防治工作具有重要借鉴意义。

1 上隅角 CO 浓度数学模型

在煤层开采过程中,上隅角常出现 CO 积聚现象^[21-22]。根据文献^[17-18],上隅角 CO 主要由 3 个部位产生:①采空区遗煤氧化;②工作面推进过程中破碎煤体氧化;③其他部位煤体氧化。数学表达式如下:

$$[\text{CO}]_t = (W_1 + W_2 + W_3)/Q_L \quad (1)$$

式中: $[\text{CO}]_t$ 为回采期间上隅角 CO 浓度, mol/m³; W_1 为采空区遗煤氧化产生的 CO 量, m³/min; W_2 为回采过程中进入采空区的遗煤氧化所产生的 CO 量, m³/min; W_3 为煤层破碎过程中产生的 CO 量, m³/min; Q_L 为采空区漏风风量, m³/min。

由于本文研究终采期间采空区遗煤氧化时的 CO 产生量,而 W_2 为推采过程中进入采空区的遗煤氧化所产生的 CO 量,停采时已经没有遗煤进入采空区,故 W_2 不应计入停采期间上隅角 CO 总浓度当中; W_3 一般情况下其含量远小于采空区煤体氧化所产生的 CO 量,故 W_3 的含量可忽略。

W_1 表达式如下:

$$W_1 = \alpha SX(1 - \eta)\varphi_{(\text{CO})} \quad (2)$$

故由式(1)、式(2)可得,停采期间工作面上隅角 CO 浓度数学模型:

$$[\text{CO}]_e = \alpha SX(1 - \eta)\varphi_{(\text{CO})}/Q_L \quad (3)$$

式中: $[\text{CO}]_0$ 为停采期间上隅角 CO 浓度, mol/m^3 (将在后面第 3.2 节中预测值为通过 CO 相对分子质量换算得出); α 为氧化带修正系数,通常情况下综采工作面为 0.3~0.5,取 0.5; S 为工作面煤层截面积, m^2 ; X 为氧化带宽度, m ; η 为工作面采出率, %。 $\varphi_{(\text{CO})}$ 为温度为 t 时 CO 的释放速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2 煤升温氧化指标气体生成规律

2.1 煤样采集与制备

为获得该工作面采空区遗煤氧化过程中 CO 、 C_2H_4 的生成规律,从 9303 工作面选取煤样进行程序升温-色谱分析试验。由相似理论^[23],该试验煤样的指标气体生成规律与采空区遗煤自燃点基本一致。将原煤样在空气中破碎并筛分出粒度为:0~0.9、0.9~3.0、3.0~5.0、5.0~7.0、7.0~10.0 mm 的 5 种煤样(记作 1—5 号),并用 5 种粒度煤样各 200 g 组成均匀的混合煤样(记作 mix),共准备质量均为 1 kg 的煤样 6 种,具体参数见表 1。分别对 1—6 号煤样利用程序升温箱进行加热升温试验,采集不同煤温时的气体并进行气相色谱

表 1 煤样参数						
煤样	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
粒度/mm	0~0.9	0.9~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0	7.0~10.0	mix
平均粒径/mm	0.45	1.95	4.00	6.00	8.50	4.18
煤的质量/kg	1	1	1	1	1	1
煤高/cm	15.50	16.50	17.00	17.50	17.30	15.50
体积/ cm^3	689.66	689.66	689.66	689.66	689.66	689.66
空隙率/%	0.43	0.45	0.46	0.48	0.47	0.41

2.2 试验过程

该程序升温试验装置主要由供气装置、温控装置、煤样容器、气相色谱仪 4 个部分组成^[24]。为使进气温度与煤样温度基本相同,在程序升温箱内盘旋 2 m 铜管,气流经旋管预热后进入煤样。试验过程中,保持供风量为 120 mL/min,升温速度控制在 0.3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,当煤温每升高 10 $^{\circ}\text{C}$,用针管采集不同煤温时产生的气体并进行色谱分析。考虑当温度达到要求后停止试验,打开炉门进行自然对流降温。通过对试验数据分析处理得到 CO 、 C_2H_4 生成规律与温度关系如图 1 所示。

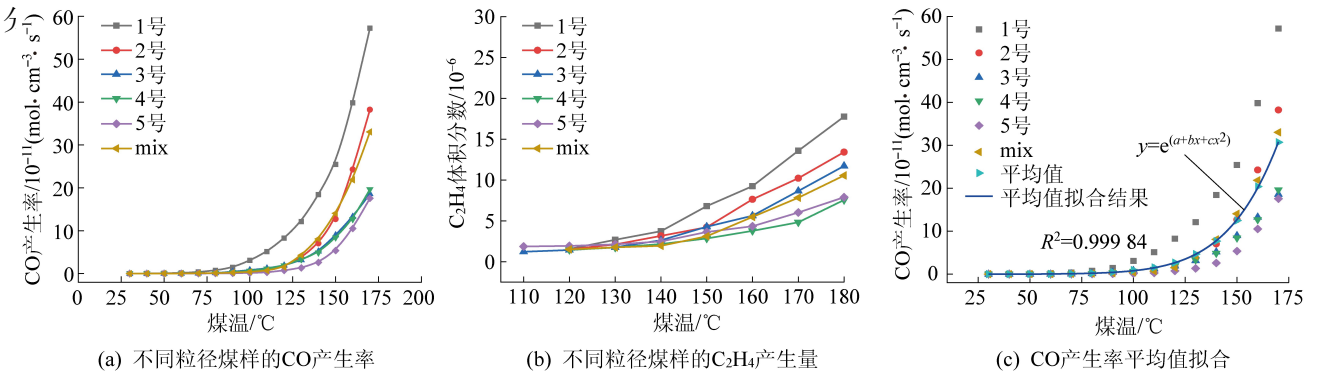


图 1 CO 、 C_2H_4 与对应温度关系曲线

Fig.1 Relation curves between CO 、 C_2H_4 and corresponding temperature

2.3 试验结果分析

由图 1a 可以看出,试验过程中不同粒度煤样 CO 产生率随着煤温的升高整体均呈指数形式增长。在同一温度下,煤样的 CO 产生率会随着粒径的增大而减小。当煤温超过 70 $^{\circ}\text{C}$ 左右,不同粒度煤样的 CO 产生速率均加快,故推断临界温度 60~80 $^{\circ}\text{C}$;当煤温超过 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右时, CO 产生率均急剧增加,故推断干裂温度为 110~130 $^{\circ}\text{C}$ 。由图 1b 可以看出,3、5 号煤样在 110 $^{\circ}\text{C}$ 左右出现 C_2H_4 ,其他煤样在 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右出现,故推断煤样在 100~130 $^{\circ}\text{C}$ 开始裂解。

由于采空区内遗煤蓄热氧化条件复杂且较为隐蔽,遗煤粒度复杂多样,为模拟采空区真实环境下遗

煤自燃,对同一温度下的不同粒度煤样的 CO 产生率取算数平均值,仅对各温度下的 CO 产生率算数平均值进行拟合处理,发现原数据点能较好地服从 Exp3P2 指数拟合模型,拟合结果如图 1c 所示,拟合参数见表 2。

表 2 指数拟合方程参数	
Table 2 Parameters of exponential fitting equation	
拟合模型	Exp3P2
方程	$y = \exp(a + bx + cx^3)$
a	$-8.120\ 28 \pm 0.435\ 96$
b	$0.094\ 81 \pm 0.005\ 67$
c	$-1.509\ 5 \times 10^{-4} \pm 1.838\ 22 \times 10^{-5}$

通过指数拟合可推断出不同特征温度下采空区遗煤氧化升温时的 CO 生成规律,具体数据见表 3。

表 3 不同煤温下 CO 生成规律

Table 3 Generating rule of CO at different coal temperatures		
特征温度	试验煤温/℃	$\varphi_{(\text{CO})}/10^{-11}(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1})$
常温条件	≤30	≤0.004 4
临界温度	60~80	0.049 7~0.213 1
干裂温度	110~130	1.486 6~4.630 1

3 采空区火区监测与预测

3.1 工作面概况

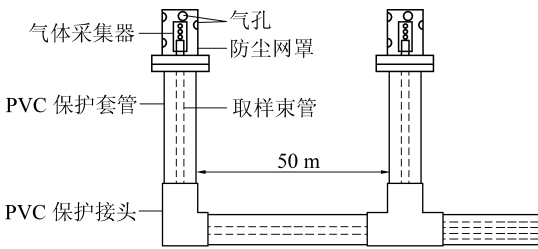
济宁二号矿 9303 工作面属于极易自然发火煤层。工作面推进过程中共揭露正断层 22 条,造成采空区遗煤量大;在停采期间,工作面进风侧存在漏风;此外,由于工作面长、支架数量多等问题造成了撤架周期过长。在这些因素都为采空区遗煤自燃提供了有利条件。9303 工作面具体参数如下:

开采方式	长臂式机械化采煤
通风方式	U 型
开采水平	-740 m 水平
自然发火期/d	90~180(最短 33)
工作面倾斜长/m	327.1
工作面走向长/m	1 624.6
配风量/($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$)	650
煤厚/m	1.5~4.5(平均 2.68)
日均推进速度/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	4.21
采出率/%	80
采空区漏风量/($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$)	36

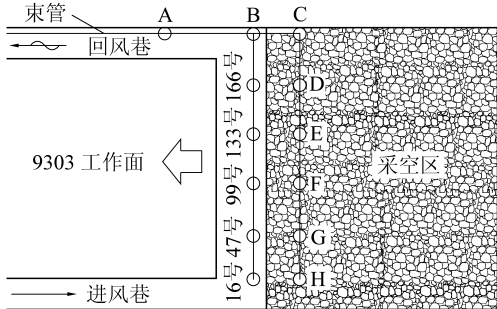
3.2 自燃“三带”观测与预测计算

采空区自燃“三带”的科学准确划分是煤自燃防治研究的重要依据之一^[25]。为准确预测 9303 上隅角 CO 浓度,根据煤自燃危险区域判定理论^[26],划分采空区煤自燃“三带”时取氧气体积分数 C:①散热带 $C\geq 18\%$;②氧化升温带 $18\%>C\geq 8\%$;③窒息带 $C<8\%$ 。通过预埋束管采集到的采空区气体经气相色谱仪分析采空区氧气浓度分布从而得到采空区自燃“三带”分布。

束管样图与测点布置如图 2 所示,将 C—H 测点预埋于工作面,两两间隔 50 m,随着工作面的推进,6 个测点进入采空区。工作面推进过程中每日定时采集气体数据,最后汇总分析如图 3 所示。



(a) 束管样图



A—回风流CO测点; B—回风隅角CO测点;
C—H—采空区O₂测点

(b) 测点布置

图 2 束管样图及测点布置

Fig.2 Beam tube sample and measuring point arrangement

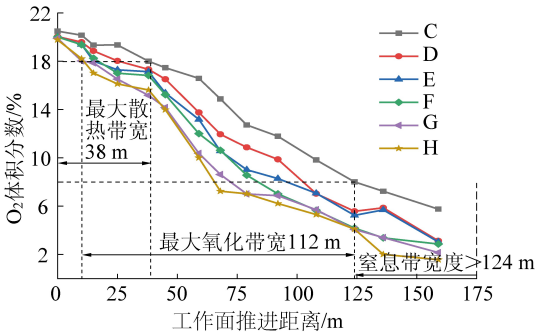


图 3 C—H 测点氧浓度分布

Fig.3 Oxygen concentration distribution of C—H measurement point

根据 9303 工作面采空区氧浓度分析可知,散热带宽度最大 38 m,氧化带宽度最大 112 m,窒息带宽度大于 124 m。则将 $X=112\text{ m}$ 代入式(7),结合不同煤温下 CO 生成规律及工作面参数推导出采空区火区不同特征温度区间与对应范围的上隅角 CO 浓度预测值,见表 4。

表 4 CO 浓度预测值

Table 4 Predictive value of CO concentration	
火区温度/℃	上隅角 CO 浓度预测值/ 10^{-6}
常温(≤30)	≤36.30
临界温度(60~80)	410.02~1 758.05
干裂温度(110~130)	12 264.33~38 197.95

3.3 工作面监测气体分析

2017 年 3 月 31 日,9303 工作面回采完毕进入

终采撤架阶段,工作面采用局部通风方式,风量减小至 $450 \text{ m}^3/\text{min}$ 。为获得采空区自然发火情况,对工作面、上隅角及回风流 CO 、 C_2H_4 浓度进行实时束管监测,测点布置如图 2b 所示。

撤架过程中,2017 年 5 月 28 日至 6 月 4 日工作面隅角及其回风流中束管检测到 CO ,如图 4 所示。根据整体数据波动可以得出,进入五月末, CO 基本保持在正常水平,但到 5 月 30 日,166 号架处气体出现异常,同时 133 号架气体也存在异常但整体水平低于 166 号架处,16—99 号架气体浓度水平基本保持在正常水平,到 5 月 31 日,特征更为明显。此时,可以推断 99—166 号架段后方采空区氧化带附近存在火区,撤架工作也于 5 月 31 日暂停。

到 6 月 3 日上隅角检测到 CO 体积分数最高达到 503×10^{-6} ,已经超过临界温度下限 410.02×10^{-6} ,但未超过上限 $1\,758.05 \times 10^{-6}$,此时,可推断出采空区火区温度到达临界温度 $60 \sim 80^\circ\text{C}$,需立即采取防火措施。乙烯通常在 $110 \sim 130^\circ\text{C}$ 能被检测出来,是煤自然发火进程是否进入加速氧化阶段的标志气体^[27]。但是在整个监测周期内,各测点均未检测到烯炔出现,与推断结果一致。

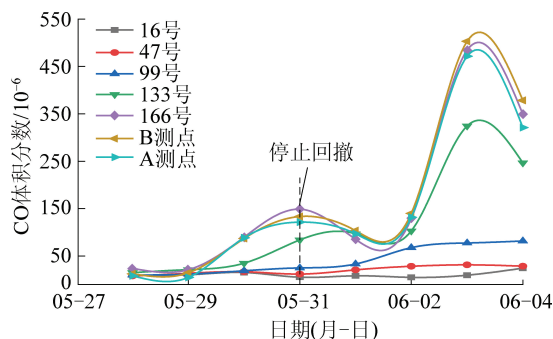


图 4 各测点监测数据

Fig.4 Monitoring data of each measuring point

4 专项防灭火措施

截至 5 月 28 日,9303 工作面回撤时间已经超过 2 个月,工作面共撤出 57 套支架,还有 170 套支架没有回撤,为保障撤架工作顺利进行,5 月 31 日工作面回撤工作暂停,根据束管监测、预测结果,基于“堵漏风、降氧气、消高温”的基本方针对重点危险区域采取专项防控措施。

4.1 监测监控

1) 停采回撤期间,检察员每天对工作面两隅角及回风流内气体进行取样分析 1 次,分析成分有 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 O_2 、 C_2H_6 、 C_2H_4 ,发现有气体异常时及时采取措施进行处理。

2) 通风工区将 9303 工作面采空区束管引入循

环系统,每天循环监测一次,并做好记录形成报表,发现异常立即采取措施进行处理。

4.2 封堵减漏

1) 架后顶板铺设风筒布。在距终采线后方 20 m 处,在顶板铺设钢丝网与风筒布,规格选用 $330 \text{ m} \times 21 \text{ m}$,在工作面回采结束进入停采撤架期间,风筒布可以将采空区顶板与采空区之间隔离,可有效减少向采空区漏风,风筒布铺设如图 5 所示。

2) 两隅角封堵及临时板闭封堵。工作面停采后,工作面在两隅角支架后部施工碎煤墙,厚度不小于 1 m,宽度要充填未冒落的空间,上接顶板。碎煤墙验收合格后,对墙体进行全断面均匀喷涂赛福特,喷涂厚度要求不小于 200 mm,以减少采空区漏风;进风巷施工木板密闭墙 1 道,回风巷 2 道,密闭施工结束对墙体喷涂赛福特,厚度不小于 200 mm,墙内压注 LFM;并在密闭处预留措施孔、观察孔以及取样束管等,两隅角碎煤墙封堵及 1—3 号板闭封堵位置如图 5 所示。

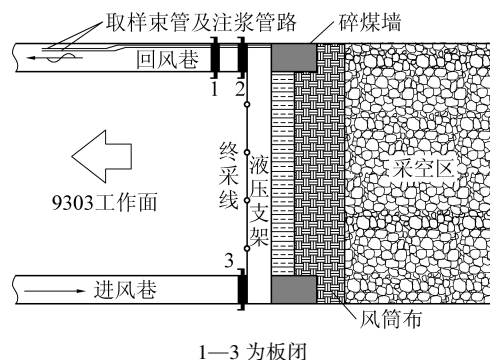


图 5 风筒布及封堵工艺

Fig.5 Air duct cloth and sealing technology

4.3 惰化降温

1) 液态二氧化碳防灭火工艺。液态二氧化碳在向采空区内压注时会产生相变同时能吸收大量热量,有效降低采空区自燃区域温度,体积迅速增大近 560 倍,从而置换出采空区的氧气并最终使采空区形成惰性环境,将火区“窒息”。液态二氧化碳灭火装置主要由气罐(采用 CPW-20 型)、平板车、罐体和控制阀组组成,利用 9303 工作面轨道、运输巷预留措施孔、注浆管工作面及面后 30 m 范围内采空区内压注。

2) 注浆防灭火工艺。MEA 防火剂是由水、MEA-1 煤矿防灭火剂、阻化泡沫按照一定比例搅拌均匀配成的特制胶体,其耐高温性能、保水性能以及成胶后的致密性能优越,可有效提高阻燃效果。将 MEA 防火剂吸入注浆泵加压后,经巷道顶板上高位钻孔注入采空区内,钻孔位置选择在工作面 133—

166号架间顶板,终孔位置要求打至工作面架顶煤丢煤区域顶部,现场根据钻孔施工实际情况,可适当增加钻孔施工数量及钻孔设计参数。

5 应用效果分析

受超长工作面、断层影响,整个治理周期较长。由图6各测点监测孔气体数据可以看出,2017年6月3日至2017年8月10日期间99—166号架间CO数据波动依然较大,最高气体体积分数超过 500×10^{-6} ,最低也在 50×10^{-6} 以上,但整体呈现下跌趋势,表明架后采空区区域采取防火措施之后,遗煤自燃的发展趋势得以抑制;到8月10日之后,各测点CO数据趋势比较稳定,约在 50×10^{-6} 以下,说明架后火区已经进入窒息阶段,煤自燃状况已经基本稳定。

到2017年9月,各测点气体数据已经符合《煤矿安全规程》规定,故开始启封密闭墙,按照既定方案成功撤出剩余支架。

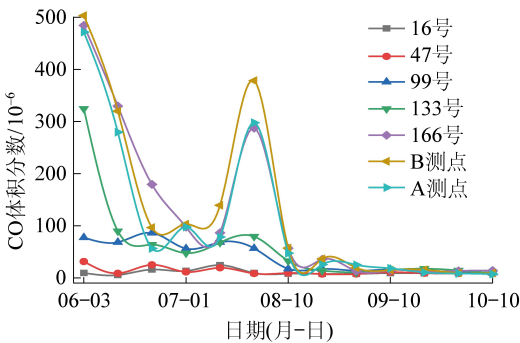


图6 6—10月工作面气体数据监测
Fig.6 Monitoring of working face gas data from June to October

6 结 论

1) 基于前人对推采期间的上隅角CO浓度预测研究推导出停采撤架期间的上隅角CO浓度预测数学模型。

2) 通过程序升温-色谱分析试验得到工作面CO生成规律,推断出煤样的临界温度为 $60\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、干裂温度为 $110\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、采空区遗煤氧化升温标志气体随温度变化呈类指数增长。

3) 根据试验得到的采空区标志气体产生规律,结合停采期间的CO浓度数学模型,计算并归纳出煤样不同特征温度下的CO预测浓度,将现场观测气体数据与预测数据对比分析,推断出99—166号架段后方采空区氧化带附近存在火区,自然发火水平达到临界温度 $60\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4) 通过预测防控为一体的综合治理措施,成功解决了超长工作面停采撤架期间采空区自然发火问题,为同一地区相似工作面的煤火防治工作提供科学依据。

参考文献(References):

[1] AMIR Saffari, FARHANG Sereshki, MOHAMMAD Ataei, *et al.* Presenting an engineering classification system for coal spontaneous combustion potential[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2017, 4(2): 110-128.

[2] 梁运涛,侯贤军,罗海珠,等.我国煤矿火灾防治现状及发展对策[J].煤炭科学技术, 2016, 44(6): 1-6, 13.

LIANG Yuntao, HOU Xianjun, LUO Haizhu, *et al.* Development countermeasures and current situation of coal mine fire prevention & extinguishing in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 1-6, 13.

[3] 徐精彩,文虎,张辛亥,等.综放面采空区遗煤自燃危险区域判定方法的研究[J].中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 672-677.

XU Jingcai, WEN Hu, ZHANG Xinhai, *et al.* Study on determination method of spontaneous combustion hazard of residual coal in goaf in fully mechanized caving face [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2002, 32(6): 672-677.

[4] 杨胜强,徐全,黄金,等.采空区自燃“三带”微循环理论及漏风流场数值模拟[J].中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 769-773, 788.

YANG Shengqiang, XU Quan, HUANG Jin, *et al.* The “Three Zones” microcirculation theory of goaf spontaneous combustion and a numerical simulation of the air leakage flow field [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, 38(6): 769-773, 788.

[5] 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: 2-8.

[6] 张劲松,武腾飞.综采工作面回撤期间防灭火技术[J].煤矿安全, 2016, 47(12): 68-71.

ZHANG Jinsong, WU Tengfei. Fire preventing and extinguishing technology for fully mechanized coal face during withdrawal period [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(12): 68-71.

[7] 邓军,刘文永,王金平,等.大采高综采工作面撤架期间采空区浮煤自燃防治技术研究[J].矿业安全与环保, 2011, 38(3): 29-31, 35.

DENG Jun, LIU Wenyong, WANG Jinping, *et al.* Research on prevention and control technology of floating coal spontaneous combustion in goaf during the withdrawal of fully mechanized coal face with large mining height [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(3): 29-31, 35.

[8] 王俊峰,周斌,安帮,等.黄白茨矿采空区自燃危险区域“三位一体”预测应用[J].煤炭学报, 2018, 43(S1): 178-184.

WANG Junfeng, ZHOU Bin, AN Bang, *et al.* Application of “Trinity” prediction of spontaneous combustion area in goaf of Huangbaici Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 178-184.

- [9] 孙继平,孙雁宇.矿井火灾监测与趋势预测方法研究[J].工矿自动化,2019,45(3):1-4.
SUN Jiping,SUN Yanyu.Research on methods of mine fire monitor in gaseous trend prediction[J].Industry and Mine Automation,2019,45(3):1-4.
- [10] LIANG Yuntao,ZHANG Jian,WANG Liancong, *et al.* Forecasting spontaneous combustion of coal in underground coal mines by index gases: A review[J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2019,57:208-222.
- [11] 刘 晨,谢 军,辛 林.煤自燃预测预报理论及技术研究综述[J].矿业安全与环保,2019,46(3):92-95,99.
LIU Chen,XIE Jun,XIN Lin.Review of theory and technology research on prediction of coal spontaneous combustion [J].Mining Safety & Environmental Protection,2019,46(3):92-95,99.
- [12] 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.* Experimental study on tendency of coal spontaneous combustion based on CO concentration [J]. Journal of University of Science and Technology of China,2018,14(6):45-51.
- [13] XIAO Yang,LI Qingwei,DENG Jun.Experimental study on the corresponding relationship between the index gases and critical temperature for coal spontaneous combustion[J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2017(127):1009-1017.
- [14] 王从陆,伍爱友,蔡康旭.煤炭自燃倾向性试验研究及指标气体优选[J].中国安全科学学报,2006,16(10):131-134.
WANG Conglu,WU Aiyu,CAI Kangxu.Experimental study on tendency of coal spontaneous combustion based on CO concentration[J].China Safety Science Journal,2006,16(10):131-134.
- [15] 徐 俊.中梁山南矿井煤自燃标志气体及指标体系研究[J].煤炭科学技术,2011,39(9):34-36,124.
XU Jun.Study on symbol gas and index system of coal spontaneous combustion in Zhongliangshan South Mine[J].Coal Science and Technology,2011,39(9):34-36,124.
- [16] 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.
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.
- [17] 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.
- [18] WEN Hu,YU Zhijin,FAN Shixing, *et al.* Prediction of spontaneous combustion potential of coal in the gob area using CO extreme concentration;a case study [J].Combustion Science and Technology,2017,189(10):1713-1727.
- [19] 邓 军,刘文永,王金平,等.大采高综采工作面撤架期间采空区浮煤自燃防治技术研究[J].矿业安全与环保,2011,38(3):29-31,35.
DENG Jun,LIU Wenyong,WANG Jinping, *et al.* Research on prevention and control technology for gob float coal spontaneous combustion in a fully-mechanized face with large-mining height during support withdrawal [J].Mining Safety & Environmental Protection,2011,38(3):29-31,35.
- [20] 文金萍,刘 洋,曹 凯,等.不易自燃煤层综采工作面回撤期间防灭火技术[J].煤矿安全,2015,46(10):94-96.
WEN Jinping,LIU Yang,CAO Kai, *et al.* Fire preventing and extinguishing technology for not easy spontaneous combustion seam at fully mechanized caving face during withdrawal period [J].Safety in Coal Mines,2015,46(10):94-96.
- [21] 杨广文,艾 兴.大雁二矿 250 综采工作面 CO 来源的分析及治理[J].煤矿安全,2003,34(10):41-43.
YANG Guangwen,AI Xing.Analysis and treatment of CO sources in 250 fully mechanized faces of dayan No.2 mine [J].Safety in Coal Mines,2003,34(10):41-43.
- [22] 贾海林,余明高,徐永亮.矿井 CO 气体成因类型及机理辨识分析[J].煤炭学报,2013,38(10):1812-1818.
JIA Hailin,YU Minggao,XU Yongliang.Analysis on the genetic type and mechanism identification of carbon monoxide in the coalmine [J]. Journal of China Coal Society,2013,38(10):1812-1818.
- [23] 张 培,王文才,林俊森.露头煤层自燃相似实验研究及热释放速率计算[J].工业安全与环保,2017,43(1):44-46,43.
ZHANG Pei,WANG Wencai,LIN Junsen.Similar experiment research and calculation of heat release rate on outcrop coal seam spontaneous combustion [J].Industrial Safety and Environmental Protection,2017,43(1):44-46,43.
- [24] 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.
DENG Jun,BAI Zujin,XIAO Yang, *et al.* Experimental investigation and examination for the index system of the coal spontaneous combustion [J].Journal of Safety and Environment,2018,18(5):1756-1761.
- [25] 谢 军,薛 生.综放采空区空间自燃“三带”划分指标及方法研究[J].煤炭科学技术,2011,39(1):65-68.
XIE Jun,XUE Sheng.Study on division index and method of three spontaneous combustion zones in goaf of fully mechanized top coal caving mining face [J].Coal Science and Technology,2011,39(1):65-68.
- [26] 余明高,晁江坤,贾海林.综放面采空区自燃“三带”的综合划分方法与实践[J].河南理工大学学报:自然科学版,2013,32(2):131-135,150.
YU Minggao,YAO Jiangkun,JIA Hailin.Comprehensive dividing method and practice of spontaneous combustion “three-zone” in goaf on fully mechanized coal face [J].Journal of Henan Polytechnic University:Science Edition,2013,32(2):131-135,150.
- [27] 沈云鸽,王德明,朱云飞.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.Experimental study on generation laws of index gases for coal with different spontaneous combustion tendency [J].Journal of University of Science and Technology of China,2018,14(4):69-74.