

# 地面钻井抽采对采空区自燃危险区域影响研究\*

杨凯<sup>1,2</sup>, 刘健<sup>1,2</sup>

(1.安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南市 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 淮南市 232001)

**摘要:**为研究地面钻井抽采对采空区煤自燃危险区域的影响,以某矿综采工作面为研究背景,现场利用束管监测系统和SF<sub>6</sub>示踪气体,测定了采空区遗煤自燃危险区域和采空区漏风情况,并通过数值模拟研究了有无地面钻井情况下采空区自燃危险区域分布和地面钻井不同抽采量对采空区氧气浓度分布的影响。研究表明,采空区氧化带最大宽度为72.2 m,计算得出每日最小推进度为1.08 m;通过示踪气体测定风巷测点与地面钻井测点SF<sub>6</sub>最大浓度之比为8:1。数值模拟结果显示,地面钻井抽采使得采空区自燃危险区域范围增加,并且随着抽采量的增加,自燃危险区域随之扩大。

**关键词:**地面钻井;瓦斯抽采;自燃危险区域;数值模拟

**中图分类号:**TD75<sup>+</sup>2.2 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)05-0092-06

## 0 引言

煤自燃火灾是威胁煤矿安全生产的五大灾害之一,采空区自燃火灾占煤矿内因火灾的60%以上<sup>[1]</sup>,地面钻井抽采采空区瓦斯会使得采空区漏风增加,使采空区氧气浓度分布发生变化,加大了采空区煤自燃的危险性<sup>[2-4]</sup>。针对抽采瓦斯对采空区自燃“三带”划分的研究及应用,学者们进行了大量研究。罗新荣等<sup>[5]</sup>通过数值模拟分析了地面钻井、埋管抽采、高抽巷抽采等不同抽采方案下采空区的漏风流场与温度场分布情况。王建国等<sup>[6]</sup>研究了有无高抽巷下氧化带分布的变化,结果表明设置高抽巷会使得采空区漏风量增大。温良秀等<sup>[7]</sup>利用数值模拟软件对不同抽采位置和抽采方案下采空区氧化带的宽度和瓦斯浓度进行了模拟。姜亦武等<sup>[8]</sup>通过理论分析和数值模拟相结合的方式,研究了高瓦斯易自燃煤层在有无高位钻孔和不同抽采负压条件下的

采空区漏风规律。文虎等<sup>[9]</sup>通过数值模拟研究不同抽采负压对采空区自燃“三带”的影响,结果表明随着抽采负压的增大,采空区进风侧与回风侧氧化带的宽度增加。宋博等<sup>[10]</sup>利用SF<sub>6</sub>示踪法对浅埋煤层采空区地表漏风通道和风速进行检测,并通过数值模拟软件分析不同漏风源采空区自燃“三带”的分布特征。王月红等<sup>[11]</sup>模拟了不同抽采负压下采空区流场变化规律,并将结果与现场数据进行对比加以验证。范加锋<sup>[12]</sup>采用COMSOL软件分析了低位巷瓦斯抽采条件下采空区遗煤自燃规律。

上述研究针对不同瓦斯抽采方案和不同抽采条件下抽采瓦斯对采空区自燃危险区域的影响做了大量研究,但关于利用地面钻井抽采瓦斯及不同抽采量而引起的采空区自燃危险区域变化研究相对较少。鉴于此,以临涣煤矿1067工作面为背景,通过现场实测和数值模拟相结合的方式,探究地面钻井抽采瓦斯对采空区自燃危险区域的影响,以期对地面钻井瓦斯抽采方案和采空区自燃危险防治提供参考。

## 1 采空区自燃“三带”现场实测

临涣煤矿1067工作面为六采区10煤工作面,煤层赋存稳定,全区大部分可采,煤层结构简单,顶板为粉砂岩、细砂岩、泥岩和细砂岩。煤层厚度为0.40~8.79 m,平均煤厚为3.13 m。工作面沿走向后退式回采,采用走向长壁机械化一次采全高采煤法,工作面倾向长为230 m,采用U形通风系统。六采区10煤为Ⅱ类自燃煤层,最短自然发火期为80 d,回采期间采用地面钻井对采空区瓦斯进行抽采。

\* 收稿日期:2023-07-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC28000900);安徽省高校协同创新项目(GXXT-2020-057)。

作者简介:杨凯(1998—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事矿井火灾防治研究,E-mail:2663347026@qq.com。

通信作者:刘健(1975—),男,江苏泰兴人,教授,主要从事煤矿瓦斯防治理论与技术、矿山通风与安全理论技术研究,E-mail:jianliu@aust.edu.cn。

## 1.1 实测方案

采空区自燃“三带”常用的划分方法有氧气浓度法、温升速率法和漏风风速法<sup>[13]</sup>,其中氧气浓度法应用较多,也是最为有效的方法<sup>[14]</sup>。本研究采用氧气浓度法对临涣煤矿 1067 综采工作面采空区自燃“三带”进行划分。

为使测点布置方式正确合理可靠,通过提前调研矿山资料并结合现场实际,应用束管监测系统 and 矿用本安型负压气体采样器进行取气,通过气相色谱仪对采集到的气体进行分析。通过分析气体成分随工作面距离变化规律进行采空区自燃“三带”划分。

为了确保工作面推进过程中顺利测出采空区煤自燃“三带”范围,测试系统沿走向覆盖 150 m 范围,即观测站布置在工作面前方 150 m 处,与钻孔平行位置的机巷及风巷分别布置 4 个测点,工作面内分别在 64 架和 104 架各布置一个测点。共布置 10 个测点,如图 1 所示。

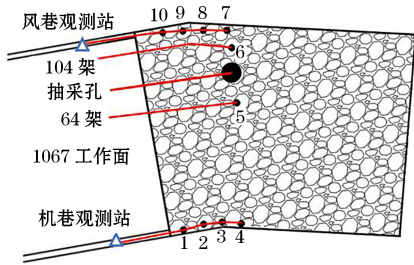


图 1 测点布置

Fig.1 Measuring points layout

气体采集采用的束管布置在采空区内,由于会受到煤层顶板冒落岩石的冲击与挤压,需要加以保护,因此将整个测线布置在保护装置内,如图 2 所示。机巷和风巷的测线穿入钢管进行保护。架间测点取样采用防爆管铺设并用保护套保护,通过防爆管抽取气样,防爆管随工作面推进不断进行铺设。探头及其支管竖直放置,四周采用铁丝固定在巷道外帮,以防止矸石冒落和矿压等原因损坏探头。在测点与主干管道之间要采取炮泥等充填物,以防测点之间相互透气。

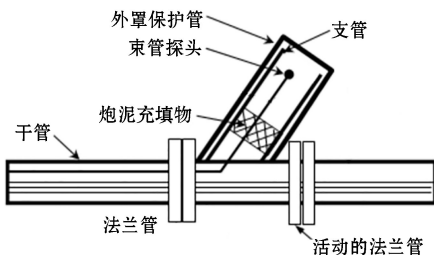


图 2 测点取样保护装置

Fig.2 Sampling protection device for measuring points

## 1.2 实测结果

根据工作面推进情况进行为期 3 个月的跟踪观测,将采集分析的采空区氧气浓度数据绘制成采空区氧浓度分布图,如图 3 所示。

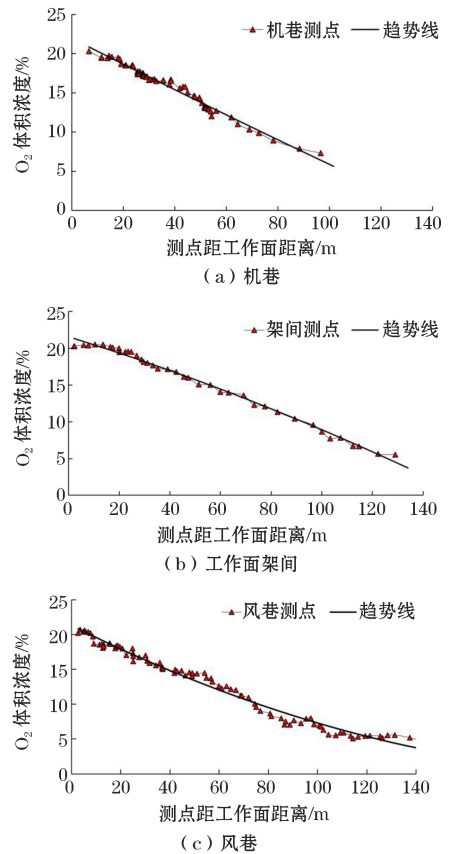


图 3 氧气浓度分布

Fig.3 Oxygen concentration distribution

采空区顶板垮落后,距工作面较近的地方冒落的顶板未压实,采空区漏风较大,氧气浓度较高,随着测点往采空区深部埋入,采空区逐渐被压实,漏风减少,氧气浓度逐渐减低。

(1) 机巷采空区氧气浓度实测结果表明,工作面推进至 25.6 m 后,氧气浓度才降低至 18%,氧气浓度变化趋势为:机巷测点在埋入工作面前 56 m 的氧气浓度减小速率小于 56 m 以后,测点氧气浓度小于 8% 的位置在距离工作面 88.5 m 处。

(2) 工作面架间采空区氧气浓度实测结果表明,工作面推进至 31.2 m 后,氧气浓度才降低至 18%,氧气浓度变化趋势为:测点在埋入工作面前 69.2 m 的氧气浓度减小速率小于 69.2 m 以后,测点氧气浓度小于 8% 的位置在距离工作面 103.4 m 处。

(3) 风巷采空区氧气浓度实测结果表明,工作面推进至 20.8 m 后,氧气浓度才降低至 18%,测点

氧气浓度小于 8% 的位置在距离工作面 85.3 m 处。以上现象表明,地面钻井瓦斯抽采影响采空区自燃危险区域分布,采空区自燃危险区域成“花瓶形”分布,工作面架间测点由于距离地面钻井较近,自燃危险区域(氧化带)明显大于风巷和机巷。

### 1.3 “三带”划分结果

以氧气浓度为主要划分依据,散热带氧气浓度为 18%;氧化带的氧气浓度为 8%~18%;窒息带的氧气浓度小于 8%。根据现场实测结果,对采空区进行“三带”划分,结果见表 1。

表 1 采空区“三带”范围  
Table 1 “Three belts” range of goaf

位置	散热带/m	氧化带/m	窒息带/m
机巷侧	0~25.6	>25.6~88	>88
架间	0~31.2	>31.2~103.4	>103.4
风巷侧	0~20.8	>20.8~85.3	>85.5

### 1.4 工作面最低推进速度

采空区自燃“三带”具有动态性,要使其不发生自燃,自燃氧化带的维持时间必须小于煤层最短自然发火期,即工作面推进速度必须大于最低安全推进速度,考虑到开采时的复杂条件,加入安全系数,可计算出:

$$v > v_{\min} = k \frac{L_{\max}}{T_{\min}} \quad (1)$$

式中, $v$  为工作面推进速度; $v_{\min}$  为工作面最低日推进速度; $L_{\max}$  为氧化带最大宽度; $T_{\min}$  为煤层最短自然发火期; $k$  为安全系数。

临涣 10 煤层最短自然发火期为 80 d,根据前文划分的“三带”范围,1067 工作面氧化带最大宽度为 72.2 m,安全系数取 1.2,可得出最低日推进速度为 1.08 m,最低月推进速度为 32.4 m。

## 2 采空区漏风情况测定

### 2.1 测定方案

$\text{SF}_6$  气体化学性能稳定、灵敏度高,常作为示踪气体应用于采空区漏风检测中<sup>[15]</sup>。本次采用  $\text{SF}_6$  示踪气体测量技术对 1067 工作面采空区流场及漏风通道进行测试。在 1067 工作面机巷煤自燃参数监测束管系统的 3 号测点内通过束管释放  $\text{SF}_6$  气体。释放后,在风巷 10 号束管和地面钻井取样口采样。

采用均匀释放法,以高压大流量的方式释放,在 40 min 内,罐装  $\text{SF}_6$  气体全部释放。在示踪气体释

放前,先取出 3 个本底样,以便进行对比分析,在气体释放后 270 min 之内,以 15 min 1 次的频率连续取样,在释放气体 18 h 后,连续取样 2 h。

### 2.2 测定结果分析

示踪气体释放后 18~20 h,未发现  $\text{SF}_6$  气体,以 0~270 min 为横坐标,以各取样点测试到的  $\text{SF}_6$  气体浓度为纵坐标,绘制测点  $\text{SF}_6$  浓度随时间变化曲线,如图 4 所示。

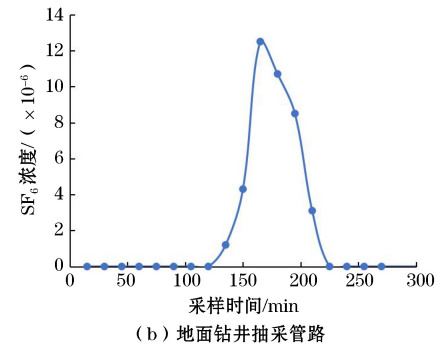
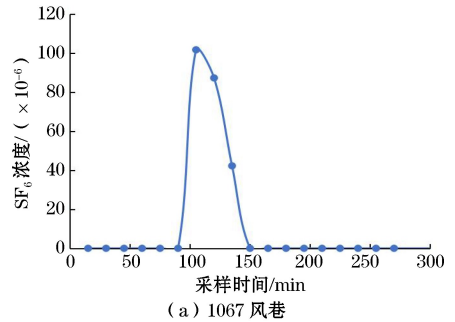


图 4 测点  $\text{SF}_6$  浓度变化

Fig. 4 Variation of  $\text{SF}_6$  concentration at measuring points

由图 4 可知,在地面钻井抽采管路与风巷测点皆监测到示踪气体,说明机巷采空区地面钻井下方的气流通过地面钻井抽采及采空区气体运移分为两路,一部分经采空区从机巷流入风巷,另一部分流入了地面钻井抽采管路。

风巷测点所监测到的  $\text{SF}_6$  气体与地面抽采钻井所检测到的  $\text{SF}_6$  气体的最高浓度之比为 8:1,说明大部分  $\text{SF}_6$  气体从采空区机巷一侧通过采空区流入采空区风巷一侧,少部分气体由地面钻井抽采系统进入抽采管路。

## 3 采空区自燃“三带”数值模拟

基于现场实测数据,建立数值模型,进行数值模拟,研究不同抽采参数下采空区自燃危险区域变化情况。



### 3.1 物理模型

1067综采面采空区的物理模型采用三维稳定渗流模型。为了验证现场试验,采空区走向长为200 m,宽为230 m,高为18 m,平均煤层倾角为 $11^\circ$ ;机巷和风巷均为矩形巷道,断面均为 $4.6\text{ m}\times 3.4\text{ m}$ ;工作面采用U形通风系统,采空区三维模型及网格划分如图5所示。模型计算工作面长度为230 m,高为3.4 m,进风流速为 $1.464\text{ m/s}$ 。

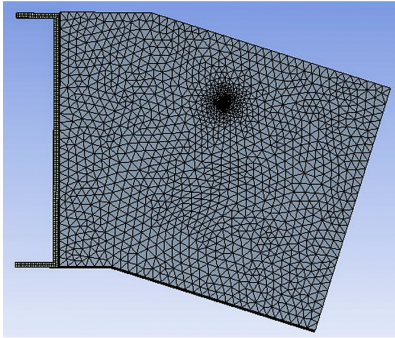


图5 采空区三维模型及网格划分

Fig.5 Goaf 3D model and grid division

### 3.2 边界条件

依据实际情况将采空区设置为多孔介质。对工作面采空区流场流动过程的边界条件进行理想化处理:

- (1) 工作面风流视为恒温环境,风量稳定;
- (2) 采空区视为多孔介质,采空区漏风气流为层流分布;
- (3) 工作面断面尺寸保持一致,无变化。

模拟条件根据工作面实际条件设置。入口边界:进风巷设置为速度入口,平均风速为 $1.464\text{ m/s}$ ,均匀风流垂直于进风巷入口进入;回风巷出口设为自由出流,钻孔为流量出口。壁面边界:所有壁面为无滑移边界条件,即 $u = v = w = 0$ ,壁面以绝热对待;工作面与采空区之间为内部边界。

本文采用 Blake-Kozeny 公式计算煤柱的渗透率  $K$ :

$$K = \frac{D_m^2}{150} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (2)$$

式中, $D_m$ 为煤柱平均粒径; $n$ 为介质孔隙率。

### 3.3 数值模拟结果与分析

(1) 无抽采钻井和有抽采钻井条件下采空区氧气浓度分布情况。对采空区氧气浓度场分布进行模拟分析,图6为有无抽采钻井下1067工作面不同推

进位置采空区氧气浓度分布模拟结果。

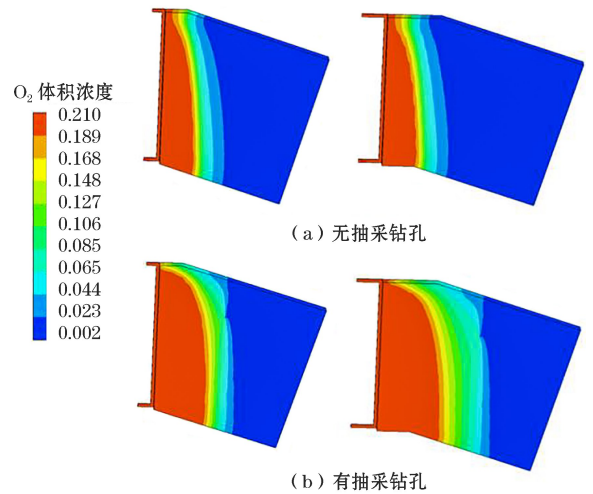


图6 有无抽采钻孔下采空区氧气浓度分布

Fig.6 Oxygen concentration distribution in gob with or without extraction borehole

(2) 不同钻井抽采量对采空区氧气浓度的影响。地面钻井抽采量对采空区漏风有一定的影响,抽采量越大,氧化带越大;抽采量越小,氧化带越小。为研究不同钻井抽采量对采空区氧气浓度的影响,分别模拟了 $5\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $10\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $15\text{ m}^3/\text{min}$ 和 $20\text{ m}^3/\text{min}$ 4种不同的抽采量工况条件下采空区的氧气浓度,图7为不同钻井抽采量工况条件下采空区的氧气浓度分布模拟结果。

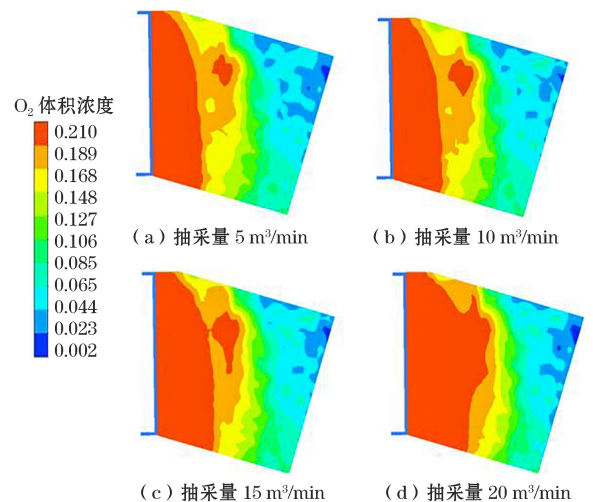


图7 不同抽采量下采空区氧气浓度分布

Fig.7 Oxygen concentration distribution in goaf under different extraction quantities

通过对无抽采钻井和有抽采钻井条件下采空区氧气浓度的模拟可以看出,地面瓦斯钻井抽采瓦斯

使得采空区氧化带范围增加。随着地面抽采钻井抽采量的增加,工作面散热带、氧化带均向远离工作面的方向移动,其宽度也有所增加。模拟抽采量为 $5\text{ m}^3/\text{min}$ 时,采空区风巷侧的氧化带平均宽度为 $50.7\text{ m}$ ,机巷侧的氧化带平均宽度为 $55\text{ m}$ ;抽采量若增加到 $20\text{ m}^3/\text{min}$ 时,采空区的风巷侧氧化带平均宽度为 $63\text{ m}$ ,机巷侧的氧化带平均宽度为 $68.4\text{ m}$ 。当工作面距离抽采钻孔较近时,应减小抽采量以降低对氧化带分布范围的影响。总体而言,随着地面抽采钻井抽采量的增加,氧化带宽度随之增加,工作面防火作业的难度也将增大。

## 4 结论

(1) 利用现场束管监测 1067 工作面的氧气浓度,并对采空区自燃“三带”分布区域进行划分,氧化带最大宽度为 $72.2\text{ m}$ ,工作面最小推进速度为 $1.08\text{ m/d}$ 。

(2) 利用 $\text{SF}_6$ 对采空区漏风情况进行测试,结果显示,在地面钻井条件下,采空区风流主要分为两部分,一部分经采空区从机巷流入风巷,另一部分流入了地面钻井抽采管路。流入机巷与流入钻井抽采管路的 $\text{SF}_6$ 最大浓度之比为 $8:1$ 。

(3) 通过数值模拟对比分析有无抽采钻孔条件下采空区氧气浓度分布情况,结果表明,在地面钻井条件下氧化带宽度增加;通过模拟不同抽采量下采空区氧气浓度分布,结果表明,氧化带范围随抽采量的增加而变大,工作面防火作业的难度也将增大。因此,应合理设置抽采量以降低采空区自燃风险。

### 参考文献(References):

[1] 邓军,李贝,王凯,等.我国煤火灾害防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2016,44(10):1-7+101.  
DENG Jun, LI Bei, WANG Kai, et al. Research status and outlook on prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 1-7+101.

[2] 周西华,曾晓坤,白刚,等.基于响应曲面法的遗煤自燃分析与研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(10):34-39.  
ZHOU Xihua, ZENG Xiaokun, BAI Gang, et al. Analysis and research on spontaneous combustion of residual coal based on response surface method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(10): 34-39.

[3] 安朝峰.高位巷抽采负压对瓦斯及煤自燃协同防治的影响[J].煤矿安全,2020,51(4):152-156.  
AN Zhaofeng. Influence of negative pressure in high level roadway on coupling hazard prevention of gas and coal fire in gob[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 152-156.

[4] 邵国安,邹永洛.大直径钻孔抽采条件下采空区遗煤自燃防治技术[J].煤矿安全,2020,51(11):74-77+82.  
SHAO Guoan, ZOU Yongming. Prevention technology of residual coal spontaneous combustion in goaf under the condition of large diameter borehole extraction[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 74-77+82.

[5] 罗新荣,唐冠楚,李亚伟,等.CFD模型下采空区瓦斯抽采与注氮防火设计[J].中国安全科学学报,2016,26(6):69-74.  
LUO Xinrong, TANG Guanchu, LI Yawei, et al. CFD model based design of both gas drainage and nitrogen injection against fire in goaf[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(6): 69-74.

[6] 王建国,盖金梦,武睿萌.高抽巷抽采下采空区注氮对煤自燃氧化带的影响[J].矿业研究与开发,2021,41(12):135-138.  
WANG Jianguo, GAI Jinmeng, WU Ruimeng. Influence of nitrogen injection in goaf on coal spontaneous combustion oxidation zone under the condition of high drainage roadway extraction[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(12): 135-138.

[7] 温良秀,高科,刘剑.地面钻孔抽采对采空区瓦斯运移及自然发火的影响数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2018,45(3):6-10.  
WEN Liangxiu, GAO Ke, LIU Jian. Numerical simulation for the effect of surface borehole extraction on gas migration and spontaneous combustion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(3): 6-10.

[8] 姜亦武,杨俊生,赵鹏翔,等.倾斜高瓦斯煤层抽采条件下采空区漏风规律数值模拟[J].西安科技大学学报,2021,41(1):46-54.  
JIANG Yiwu, YANG Junsheng, ZHAO Pengxiang, et al. Numerical simulation of air leakage law in goaf under gas extraction of inclined high gas coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(1): 46-54.

[9] 文虎,王文,程小蛟,等.不同抽采条件对采空区煤自燃“三带”的影响研究[J].矿业安全与环保,2020,47(6):1-7.  
WEN Hu, WANG Wen, CHENG Xiaojiao, et al. Study on the effect of different extraction conditions on “three zones” of coal spontaneous combustion in goaf[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(6): 1-7.

[10] 宋博,王大鹏,李雨成,等.基于不同漏风源浅埋煤层采空区自燃“三带”分布规律研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):38-44.  
SONG Bo, WANG Dapeng, LI Yucheng, et al. Study on distribution law of spontaneous combustion “three zones” in goaf of shallow-buried coal seam based on different air leakage sources[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6): 38-44.

[11] 王月红,吴怡,张九零.采空区抽采负压对自燃规律数值模拟研究[J].煤炭工程,2020,52(1):106-110.  
WANG Yuehong, WU Yi, ZHANG Jiuling. Numerical simulation of negative pressure influence on spontaneous combustion in goaf[J]. Coal Engineering, 2020, 52(1): 106-110.

- [12] 范加锋.低位巷瓦斯抽采条件下采空区遗煤自燃规律研究[J].工矿自动化,2023,49(2):102-108+124.  
FAN Jiafeng. Study on spontaneous combustion law of residual coal in goaf under the condition of gas extraction in the low-level roadway[J]. Journal of Mine Automation, 2023,49(2):102-108+124.
- [13] 王毅,周余,高靖博,等.多夹层顶板综放工作面采空区自燃“三带”划分[J].矿业安全与环保,2023,50(1):97-102.  
WANG Yi, ZHOU Yu, GAO Jingbo, et al. Division of “three zones” of spontaneous combustion in goaf in fully mechanized caving face with multi interlayer roof[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023,50(1):97-102.
- [14] 宋万新,杨胜强,徐全.基于氧气体积分数的高瓦斯采空区自燃“三带”的划分[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):271-276.  
SONG Wanxin, YANG Shengqiang, XU Quan. Division of spontaneous combustion “three-zone” in high-gas goaf based on oxygen concentration[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012,29(2):271-276.
- [15] 刘思鑫,李洪先,王国芝,等.基于 SF<sub>6</sub> 示踪试验的孤岛面采空区漏风规律研究[J].煤炭技术,2021,40(12):166-170.  
LIU Sixin, LI Hongxian, WANG Guozhi, et al. Study on leakage law of isolated island surface mining area based on SF<sub>6</sub> tracer test[J]. Coal Technology, 2021,40(12):166-170.

### Study on the Influence of Surface Drilling Extraction on Spontaneous Combustion Dangerous Area in Goaf

YANG Kai<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>

(1.School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;  
2.Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining of Ministry of Education,  
Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** In order to study the influence of surface drilling extraction on the dangerous area of coal spontaneous combustion in goaf, taking the fully mechanized mining face of a mine as the research background, the beam tube monitoring system and SF<sub>6</sub> tracer gas were used to measure the spontaneous combustion dangerous area of residual coal in goaf and the air leakage in goaf. The distribution of spontaneous combustion dangerous area in goaf with or without surface drilling and the influences of different extraction amounts of surface drilling on the distribution of oxygen concentration in goaf were studied by numerical simulation. The results show that the maximum width of the oxidation zone in the goaf is 72.2 m, and the minimum daily propulsion degree is 1.08 m. The ratio of the maximum concentration of SF<sub>6</sub> measured by tracer gas between the wind tunnel measuring point and the ground drilling measuring point is 8 : 1. The numerical simulation results show that the extraction of ground drilling is conducive to increasing the range of spontaneous combustion dangerous area in goaf, and the spontaneous combustion dangerous area expands with the increase of extraction amount.

**Key words:** Surface drilling, Gas extraction, Spontaneous combustion dangerous zone, Numerical simulation