

综放工作面回撤阶段自燃立体小“三带” 动态演化规律

赵文彬¹,王金铭¹,李振武²,郭传清³,葛俊岭²,张厚晴⁴

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 济宁矿业集团有限公司, 山东 济宁 272000;

3. 兖矿能源集团股份有限公司 东滩煤矿, 山东 济宁 273512; 4. 枣庄矿业集团田陈煤矿, 山东 枣庄 277523)

摘要:为解决传统自燃“三带”理论难以表征综采工作面回撤阶段危险区域的问题,本研究以山东田陈煤矿某工作面为工程背景,采用PFC与FLUENT软件耦合模拟方法,探究正常推进、停采准备、回撤三阶段采空区自燃区域动态演化规律。结果表明:受矿压显现影响,回撤阶段采空区后部整体压实使空隙率收缩至0.01~0.33,遗煤呈“两端高、中间低”分布并富集于综采支架附近;漏风流场转为非对称涡旋,自燃带从初期“W”形、“U”形演变为“镰刀状”,O₂浓度划分的自燃带收缩前移呈“砍刀状”。受通风方式改变、矿压裂隙发育影响,最终形成围绕支架的立体小“三带”,其范围随正压通风梯度与顶煤裂隙协同演化。研究结论对识别工作面回撤阶段自燃危险区域和预防煤层火灾有参考意义。

关键词:综采放顶煤;工作面回撤阶段;空隙率;数值模拟;立体小“三带”

中图分类号:TD72

文献标志码:A

Dynamic evolution laws of three-dimensional small “three zones” of spontaneous combustion of fully mechanized top-coal caving faces during withdrawal stage

ZHAO Wenbin¹, WANG Jinming¹, LI Zhenwu², GUO Chuanqing³, GE Junling², ZHANG Houqing⁴

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590, China; 2. Jining Mining Group Co., Ltd., Jining 272000, China;

3. Dongtan Coal Mine, Yankuang Energy Group Company Limited, Jining 273512, China;

4. Tianchen Coal Mine, Zaozhuang Mining Group Co., Ltd., Zaozhuang 277523, China)

Abstract: To address the limitation that the conventional “three zones” theory of spontaneous combustion is inadequate to characterize the hazardous zones of fully mechanized mining faces during the withdrawal stage, this study takes a working face of Tianchen Coal Mine in Shandong Province as the engineering background and employs a coupled simulation approach of PFC software and FLUENT software to investigate the dynamic evolution laws of spontaneous combustion zones in the goaf during the three stages of normal advancement, stopping preparation, and support withdrawal. The results show that during the withdrawal stage, due to strata behaviors, the overall compaction of the rear goaf reduces the porosity to a range of 0.01~0.33, and the residual coal exhibits a distribution pattern of “high at both ends and low in the middle”, accumulating near the fully mechanized supports. The air leakage flow field transforms into an asymmetric vortex, and the spontaneous combustion zone evolves from an initial “W” and “U” shapes into the “sickle shape”, while the spontaneous

收稿日期:2025-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52174193)

作者简介:赵文彬(1976—),男,山东泰安人,教授,博士,主要从事矿井智能通风及热害治理、矿井火灾预防与控制等方面的研究。E-mail:zhwb1976@163.com

李振武(1973—),男,山东聊城人,总工程师,博士,主要从事矿井安全生产方面的管理工作,本文通信作者。

E-mail:jining5678@126.com

combustion zone demarcated by oxygen concentration contracts and advances forward, presenting a “chopper shape”. Affected by the variation in ventilation modes and the development of mining-induced fractures, the three-dimensional small “three zones” surrounding the supports are ultimately formed, whose range evolves synergistically with the positive-pressure ventilation gradient and top coal fractures. The findings of this study provide a valuable reference for the identification of spontaneous combustion hazardous zones and prevention of coal seam fires during the withdrawal stage of mining faces.

Key words: fully mechanized top-coal caving technique; working face withdrawal stage; porosity; numerical simulation; three-dimensional small “three zones”

煤矿开采过程中,煤自燃问题一直影响矿井的安全生产^[1-3]。煤炭回采过程中,工作面后部采空区冒落堆积结构复杂,观测难度较大,制约了采空区自燃区域的科学准确预测,特别是工作面停采回撤阶段易发生煤自然发火,故采空区自燃“三带”(简称“三带”)的确定对煤自燃防治具有重要意义。但传统三带的观测方法存在平面化、系统性不足等局限,难以耦合煤层赋存条件、回采工艺与煤层冒落特征、遗煤分布等特点,无法明晰工作面回撤阶段综采支架附近自燃区域的范围及动态演化规律。

随着科技的发展,数值模拟技术逐渐成熟,越来越多的学者开始借助该技术研究 and 预测采空区煤自燃问题^[4-6]。褚廷湘等^[7]运用 FLUENT 软件模拟耿村矿 13210 工作面流场,解析供风量与漏风“三带”演化的关联机制,发现空隙率分布不均会加剧漏风的区域差异;张遵国等^[8]借助 FLUENT 软件模拟分析无煤柱开采条件下的漏风特性,表明沿采空区巷道煤壁漏风速率随护巷煤柱宽度增加呈指数衰减;Zhang 等^[9]开发了“孔隙-裂隙”双重介质模型,发现覆岩裂隙闭合度每增加 10%,漏风阻力因空隙率降低而增大 18%。Liu 等^[10]通过计算机断层扫描(computed tomography, CT)与模型重构技术,构建“孔隙率-渗透率”耦合模型发现,孔隙结构越复杂,渗透率受孔隙率变化的影响越显著。空隙率对采空区热交换、渗透率、流场分布影响显著^[11-13]。Zhang 等^[14]模拟煤层倾角证实,采矿诱发的水平裂隙空隙率与埋深呈负相关;韩丹丹等^[15]通过压实试验表明,垮落岩体空隙率自下而上先急剧降低、后缓慢下降;文虎等^[16]以 O_2 浓度划分工作面“三带”,发现进风侧空隙率高、漏风充足,并提出最小安全推进速度,进一步印证了空隙率通过调控漏风和 O_2 浓度分布,对自燃区域的形成具有关键作用。

工作面回撤阶段,通风条件对采空区自燃风险产生直接影响。该阶段采空区物理结构及环境条件改变,原有支护结构拆除使顶板煤岩失稳垮落变形,增大遗煤与空气的接触面积,进而加快氧化反应,增加自燃风险。对此,许多学者通过数值模拟开展针对性研究。如 Zhao 等^[17]通过数值模拟发现,回撤阶段通风方式由负压转为正压时,自燃危险区域面积显著缩减;风速增大时,自燃危险区域面积随之扩大,且立体空间呈下部范围大、中上部小的“梨形”分布特征。然而,已有研究很少考虑空隙率对采空区的影响,划分的自燃带偏近工作面,导致结果不准确。此外,针对工作面回撤阶段采空区遗煤自燃的研究较少。本研究以山东田陈煤矿 713_F 05 工作面为研究对象,结合回撤阶段采煤工艺特点,通过颗粒流程序(particle flow code, PFC)模拟煤层赋存条件下的煤岩冒落堆积过程及特点,提取空隙率及遗煤分布函数代入 FLUENT 软件的用户自定义函数进行计算,借助传统自燃“三带”理论,分析采空区流场 O_2 浓度耦合规律,探讨自燃区域分布特点及动态演化过程,揭示回撤阶段自燃高危区域产生机理及特征。

1 工程背景及离散元模型

1.1 工程背景

山东田陈煤矿 713_F 05 工作面位于 3_F 煤层—547 m 水平七一东翼采区。煤层顶板以泥岩、细砂岩及粉砂岩为主,煤层底板由细砂岩和粉砂岩组成,煤层厚度为 2.5~9.2 m,平均 7 m,煤层倾角平均 7°,自然倾向性为Ⅱ级,自然发火期为 62 天。工作面走向长度 600 m,倾斜长度 248 m,采用 U 型通风、走向长壁后退式综采放顶煤工艺,全部垮落法处理采空区顶板。

1.2 PFC 模型建立

为探究综放工作面回采过程中顶板垮落及采空区的冒落压实状况及遗煤分布,利用 PFC 软件建立煤层物理模型,如图 1 所示。结合矿井煤层赋存条件,选取煤岩层作为上部覆岩,模型长×高为

250 m×110 m,两侧各留设 40 m 的开采边界,围岩物理几何参数根据工程矿井实际参数设置。模拟采用线性模型,模型两侧和底部的边界条件为刚性墙体。颗粒初始速度、墙体速度与加速度均为 0;模型上部和左右两侧以 wall 为固定边界。岩层以载荷形式加到模型上方,载荷取 2.57 MPa。

1.3 PFC 模型力学参数选择

借助 PFC 模拟软件研究煤层

综放开采顶煤放出规律是当下常用的方法^[18-20],能够直观地模拟综放开采工作面的放煤过程。为模拟综放工作面上部岩层运动并明确覆岩对顶煤放出的影响,本研究采用平行黏结模型。该模型基于散体颗粒,通过黏结参数赋予颗粒黏结性,形成层块状整体结构,可模拟岩体抗压、拉、剪、扭等特性,结果贴合实际且能反映岩层破断及结构特征。结合综放工作面地质条件及模型经验公式,确定各岩层与煤层的力学参数,如表 1 所示。

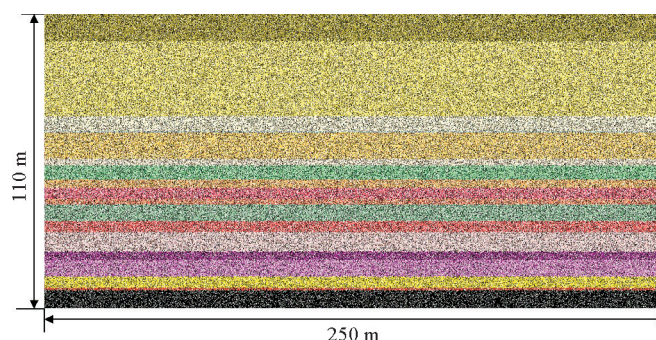


图 1 PFC 模型

Fig. 1 PFC model

表 1 PFC 模型中岩石和煤层的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock and coal seam in PFC model

层序	岩性	宏观参数				微观参数					
		泊松比	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	平行黏结刚度比	弹性模量/GPa	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	平行黏结法向刚度/GPa	平行黏结切向刚度/GPa
G1	煤	0.27	0.32	—	—	1.00	—	8.00	8.000	—	—
G2	砂质泥岩	0.24	3.20	8.63	28.4	1.92	2.5	1.43	0.745	8.00	4.16
G3	细砂岩	0.19	4.21	7.52	32.84	1.94	5.1	8.20	0.737	6.87	3.54
G4	泥岩	0.31	1.80	4.52	26.4	1.94	1.1	1.43	0.721	3.87	1.54
G5	细砂岩	0.19	4.21	7.52	32.84	1.94	5.1	8.20	0.737	6.87	3.54
G6	砂质泥岩	0.24	3.2	8.63	28.4	1.92	2.5	1.43	0.745	8.00	4.16
G7	中砂岩	0.18	4.37	7.52	38.34	1.39	10.0	12.00	5.180	10.00	7.19
G8	砂质泥岩	0.24	3.20	8.63	28.40	1.92	2.5	1.43	0.745	8.00	4.16
G9	泥岩	0.31	1.80	4.52	26.40	1.94	1.1	1.43	0.721	3.87	1.54
G10	细砂岩	0.19	4.21	7.52	32.84	1.94	5.1	8.20	0.737	6.87	3.54
G11	砂质泥岩	0.24	3.20	8.63	28.40	1.92	2.5	1.43	0.745	8.00	4.16
G12	泥岩	0.31	1.80	4.52	26.40	1.94	1.1	1.43	0.721	3.87	1.54
G13	砂质泥岩	0.24	3.20	8.63	28.40	1.92	2.5	1.43	0.745	8.00	4.16
G14	泥岩	0.31	1.80	4.52	26.40	1.94	1.1	1.43	0.721	3.87	1.54
G15	细砂岩	0.19	4.21	7.52	32.84	1.94	5.1	8.20	0.737	6.87	3.54
G16	砂质泥岩	0.24	3.20	8.63	28.40	1.92	2.5	1.43	0.745	8.00	4.16
G17	泥岩	0.31	1.80	4.52	26.40	1.94	1.1	1.43	0.721	3.87	1.54
G18	细砂岩	0.19	4.21	7.52	32.84	1.94	5.1	8.20	0.737	6.87	3.54

利用 PFC 软件,通过测量圆追踪模型内部空隙率的变化情况。测量圆的直径为 1 m,布置 20 行×130 列,共计 2 600 个测量圆^[21]。测量圆一直处于稳定状态,位于 4 个边界处的测量圆不可移动。本研究

对工作面正常推进、停采准备及回撤三个阶段的采空区空隙率及遗煤分布参数进行提取,依据颗粒移动数据确定采空区空隙率的变化规律。

1.4 PFC 采空区空隙率提取

工作面采空区空隙率分布如图 2 所示,受遗煤冒落垮塌滞后影响,工作面正常推进、停采准备及回撤三个阶段的综采支架后部空间空隙率整体偏大。正常推进阶段,随推进距离增加,上覆岩层垮落使后部空间空隙率显著下降,空隙率由支架附近 0.9 降至后部压实区域 0.05,遗煤受放煤工艺影响呈规律性三角煤分布于煤层底板;停采准备阶段因后部采用不放顶煤工艺,支架附近煤岩支撑压力减小,空隙率为 0.05~0.60,较正常推进阶段明显下降,且采空区遗煤量增加、空隙发育;工作面回撤阶段,煤层暴露时间延长伴随矿压显现,采空区后部堆积结构被持续压实,空隙率降至 0.01~0.33,分布更均匀,支架后部高冒空间结构消失。

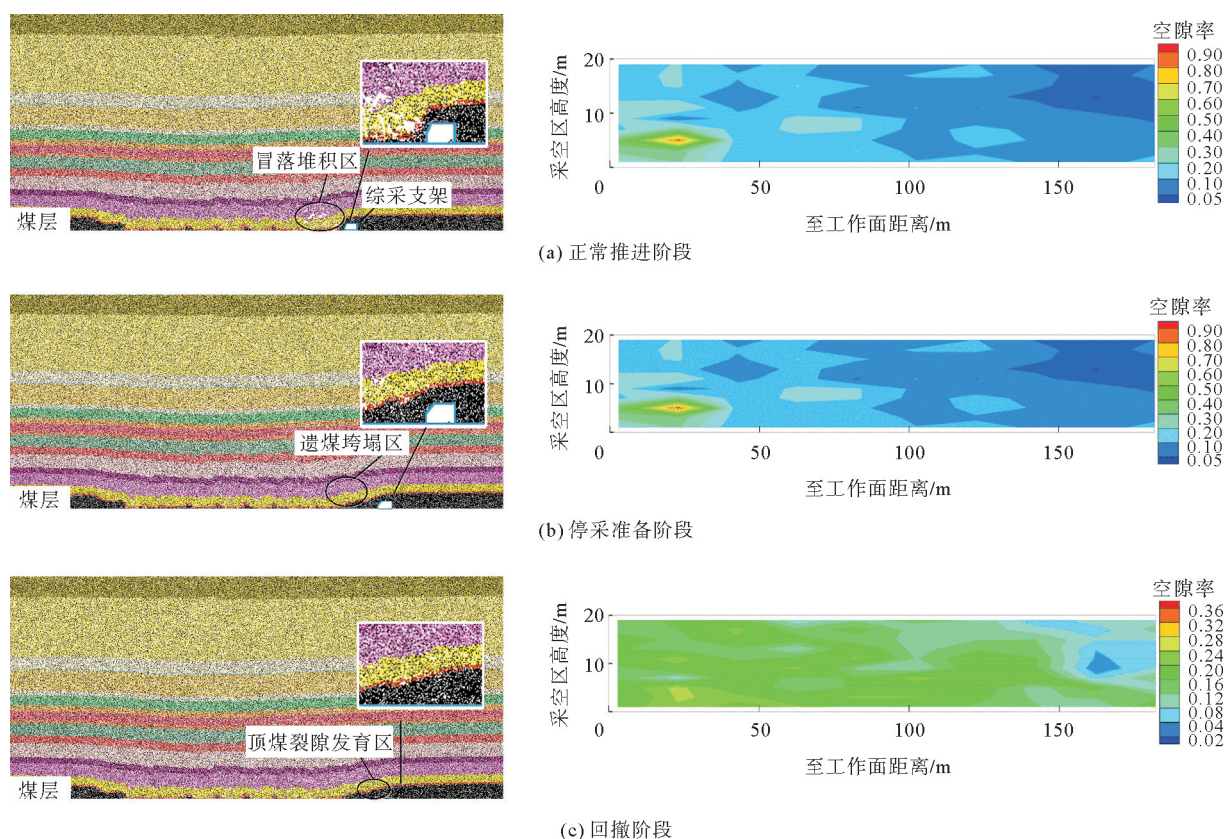


图 2 工作面采空区空隙率分布

Fig. 2 Distribution of porosity in working face goaf

本研究基于 PFC^{2D} 数值模拟,采用测量圆对采空区二维平面内的空隙分布进行量化提取:以测量圆法统计各网格单元的空隙率,获得包含推进距离、工作面位置及对应空隙率的三维数据集 (x, y, n) (x 为推进方向坐标、 y 为工作面长度方向坐标、 n 为空隙率),定量刻画工作面正常推进、停采准备及回撤三个阶段的空隙结构演化特征。

结果表明,支架后部遗煤高度呈“工作面两端高、中部低”的分布特点,这与支架端部支撑压力集中、中部卸压充分的矿压规律密切相关。同时,支架附近矿压显现导致支撑压力升高,顶煤裂隙持续发育并向深部扩展,进一步加剧了空隙与遗煤分布的非均质性。与传统研究主要关注正常推进阶段不同,本研究通过 PFC 模拟将采空区后部划分为冒落堆积区、遗煤垮塌区和顶煤裂隙发育区。

基于 PFC^{2D} 提取的 (x, y, n) 数据集,采用多变量非线性拟合方法,构建考虑推进方向、工作面长度及垂向高度的空隙率三维预测模型:

$$n = 1 - \frac{1}{1.15 + (0.05 + 0.2876e^{-0.14z})e^{-0.036x[1 - e^{-0.06291(y+10)}]}} \quad (1)$$

式中: x 取值为 $0 \sim 150$ m; y 取值为 $0 \sim 248$ m; z 为采空区垂向高度坐标, 取值为 $0 \sim 20$ m。式(1)实现了对三个阶段空隙结构参数的精准表征, 为后续计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟采空区漏风与自燃风险提供了可靠的孔隙场输入依据。

2 CFD 采空区建模及边界条件

2.1 几何模型

根据物理模型, 建立如图 3 所示的数值模型, 该模型在两个阶段的模拟中均包含工作面、采空区、进风侧(进风巷)及回风侧(回风巷)。其中, 工作面长 248 m、宽 7 m、高 4 m; 进风巷与回风巷参数一致, 尺寸均为长 4 m、宽 4 m、高 4 m; 回撤阶段模拟增设局部通风机与风筒, 局部通风机布置于回撤距离 90 m 位置处。

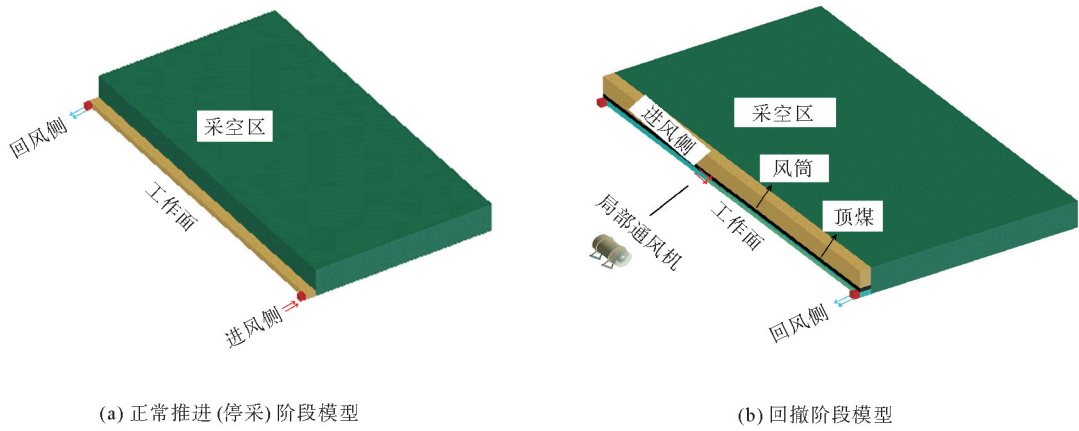


图 3 采空区数值模型

Fig. 3 Numerical model of the goaf

2.2 数学模型

考虑到采空区以破碎煤岩体为主, 利用数值模拟将采空区作为多孔介质模型, 流入模型内部气体为不可压缩流体, 气体在模型中的流动始终遵循质量、动量、组分、能量守恒定律。

1) 质量守恒

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (2)$$

式中: ϕ 为通用变量, $1.9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; ρ 为流体密度, $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; t 为时间, 20 d; div 为散度算子, 表示空间微分运算; U 为速度矢量; grad 为梯度算子, 表示标量场的空间变化率, 对应扩散项中的浓度; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数, $1.9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; S_{ϕ} 为广义源项。

2) 黏性阻力系数和惯性阻力系数

在 FLUENT 中多孔介质模型通过在动量方程中增加源项, 来模拟计算域中多孔性材料对流体的流动阻力。该源项由两部分组成, 即 Darcy 黏性阻力项和惯性损失项, 在 FLUENT 中对应为黏性阻力系数 C_1 和惯性阻力系数 C_2 :

$$C_1 = \frac{150}{D_p^2} \cdot \frac{[1 - n(x, y, z)]^2}{n(x, y, z)^3} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p} \cdot \frac{[1 - n(x, y, z)]}{n(x, y, z)^3} \quad (4)$$

式中: D_p 为采空区垮落煤岩颗粒的等效粒径, 本研究取值 0.5 m。

3) 氧气消耗源项

考虑遗煤自燃氧化耗氧,耗氧项可用式(5)表示^[22]:

$$S_{O_2} = AC_{O_2}^m \times \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

式中: S_{O_2} 为煤氧化耗氧率; A 为指前因子,本研究取值 $1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$; C_{O_2} 为采空区 O_2 浓度,取值 8.9 mol/m^3 ; E 为活化能, $4 \times 10^4 \text{ J/mol}$; m 为表观反应级数,取值 1; R 是气体常数, $8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; T 为绝对温度,取值 298 K。

3 采空区自燃区域动态规律

3.1 漏风自燃区域特点分析

3.1.1 采空区流场对自燃危险区域的影响

煤自燃中,煤氧结合与氧化蓄热能力是衡量采空区煤自燃的关键指标。传统自燃“三带”划分因空隙结构、漏风参数难以获取,往往仅关注 O_2 浓度变化。回撤阶段初期,受工作面壁面及顶部挂网支护影响,回撤区域煤层冒落较慢、空隙较大,基本满足回撤风量。随着回撤距离增加,撤架顶板垮塌,回风侧阻力增大、漏风量减少,需引入局部风机采用正压通风,供风由负压转为正压。为便于模拟,选取工作面回撤至距回风巷外壁 90 m 处为关键阶段进行研究。

根据上述 PFC 获得的不同阶段空隙率拟合函数,代入 FLUENT 软件后可较准确得到采空区的漏风分布。采用传统漏风风速划分标准选取自燃带漏风速率范围 $0.24 \sim 0.10 \text{ m/min}$,获得三个阶段氧化蓄热叠加的高风险自燃区域动态演化规律,如图 4 所示。

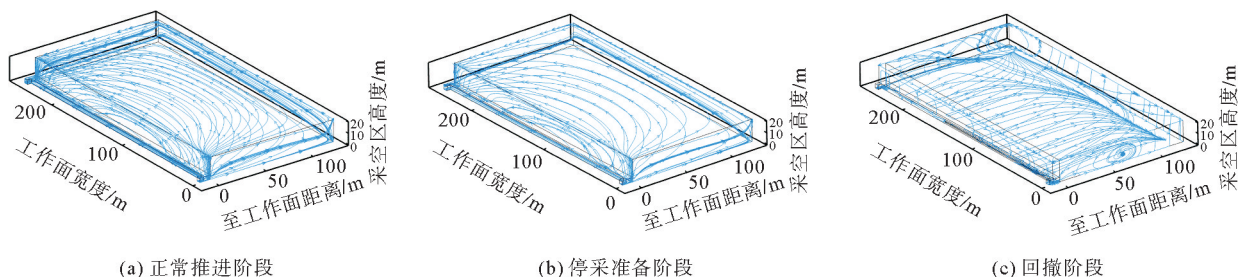


图 4 不同推进阶段采空区三维流线图

Fig. 4 Three-dimensional streamline diagrams of the goaf during different advancement stages

正常推进阶段(图 4(a)),采空区空间流场流线呈对称连续涡旋,进风巷气流均匀渗入并经采空区中上部循环后从回风巷对称排出,漏风三维流线均匀渗透无聚集衰减,平面为对称双涡旋结构,流场均匀连贯无局部富集。停采准备阶段(图 4(b)),因不放顶煤,遗煤量增大、冒落空隙变小,漏风速率下降,空间涡旋范围略收缩,近工作面流线密度提升但整体仍对称,平面流流向工作面贴靠聚集,疏密差异集中于近面区域,呈对称约束下局部高流速聚集特征。回撤阶段(图 4(c)),端头垮落后通风方式由负压改为局部风机正压通风,风流沿裂隙向工作面上部及后部扩散,呈中上部向下的立体三维扩散循环,进、回风侧端头漏风明显且存在涡流区,采空区中后部易自燃三角区有明显漏风通道,流场呈现双侧聚涡、中部收束及下密上疏的非对称特征。

3.1.2 不同推进阶段采空区漏风速率对自燃危险区域的影响

本研究采用距底板高 1.5 m 处采空区漏风速率表征遗煤的漏风供氧和蓄热条件,模拟结果如图 5 所示。正常推进阶段(图 5(a)),采空区进、回风侧空隙率较高、遗煤多,漏风速率大,利于散热,自燃区域后移变窄,采空区中部漏风少、蓄热好,自燃带较宽,呈扁“W”形分布;距工作面后方 15 m 形成涡旋区,回风侧漏风速率最高,进风侧自燃带范围为距工作面 22~65 m、采空区中部为距工作面 14~50 m、回风巷侧为距工作面 35~76 m。停采准备阶段(图 5(b)),进、回风侧漏风范围较正常阶段收缩前移,自燃带整体前移呈下宽上窄“U”形,分界线前移且范围缩小,具体为进风巷侧距工作面 16~55 m、采空区中部为距工

作面 10~40 m、回风巷处为距工作面 23~60 m。回撤阶段(图 5(c)),端头综采支架回撤后,回风通道冒落,通风方式由全负压改为局部风机正压通风,风量减少。此时自燃带范围显著变窄且向工作面附近靠近,回风侧自燃带向后部扩散,呈“镰刀”形分布。三者漏风速率差异显著,中部最低,进风侧明显增大,回风侧异常增高,虽局部供风量下降,但通风方式改变对自燃区域分布影响显著。

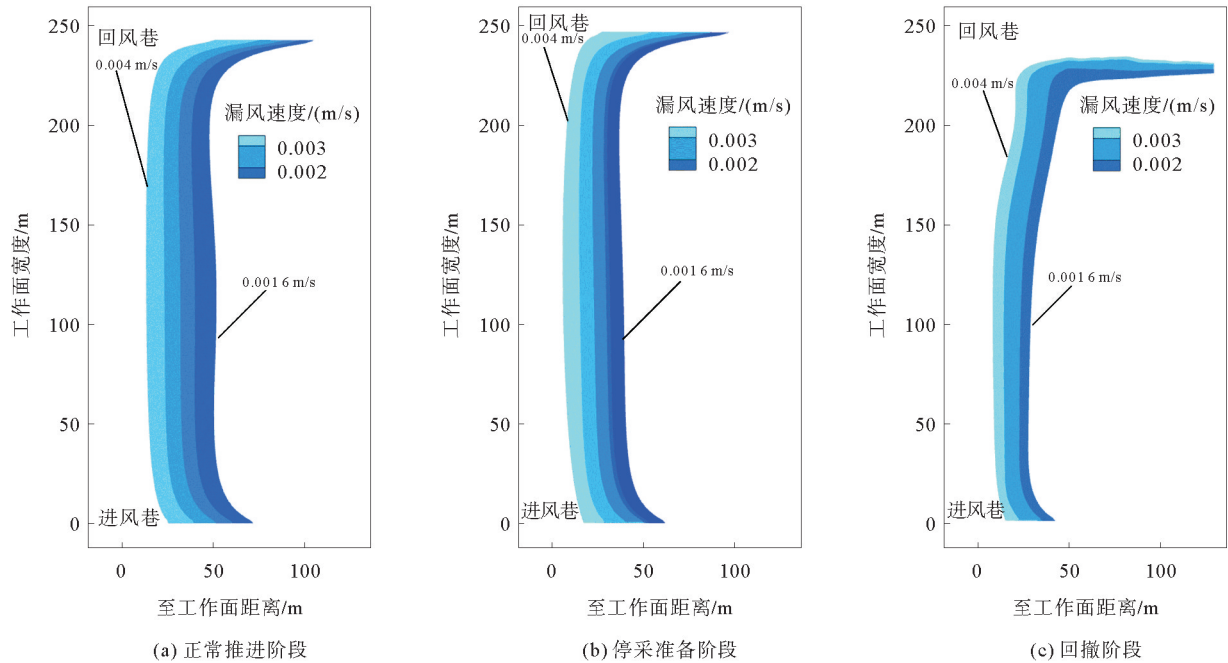


图 5 不同推进阶段漏风速率自燃带分布结果($z=1.5$ m)

Fig. 5 Distribution results of spontaneous combustion zones based on air leakage rate during different advancement stages($z=1.5$ m)

3.2 采空区自燃带分析

3.2.1 不同推进阶段水平方向采空区 O_2 浓度对自燃带的影响

按 O_2 浓度范围 5%~15% 划分自燃带,三个阶段分布特征如图 6 所示。正常推进阶段(图 6(a)),自燃带范围为进风巷侧距工作面 30~75 m、采空区中部距工作面 23~70 m、回风巷侧距工作面 18~57 m,呈现采空区中部>进风巷>回风巷的特征。停采准备阶段(图 6(b)),与正常推进阶段自燃带结构相似,因不放顶煤致遗煤增多、空隙结构变小、耗氧量增大,自燃带范围明显缩小且整体前移,具体范围为进风巷侧距工作面 19~56 m、采空区中部距工作面 22~57 m、回风巷侧距工作面 15~40 m,此时进风侧因散热导致的自燃带后移现象消失,回风侧自燃带宽度缩减且前移,采空区中部自燃带明显滞后于进回风侧。回撤阶段(图 6(c)),回风侧端头综采支架撤除后顶板垮落、风路受阻,采用局部正压通风后,自燃带分布差异显著,其范围明显变窄且整体前移,具体范围为进风巷侧距工作面 18~49 m、采空区中部距工作面 8~33 m、回风巷侧距工作面 0~10 m,形成进风至撤架冒落处宽、垮落堵塞回风段窄而长的“砍刀”形分布,且自燃带明显向综采支架附近靠近。回撤过程中,自燃带范围持续缩小,且不断向工作面靠近,综采支架附近“小自燃带”现象愈发明显。

3.2.2 回撤阶段综采支架附近 O_2 浓度对自燃带的影响

为表征回撤阶段综采支架附近遗煤多、易自燃发火的问题,按 5%~15% 的 O_2 浓度范围划定自燃带,分析工作面进风侧、采空区中部、风筒出风口及回风侧的 O_2 浓度,如图 7 所示。采用局部风机供风后,进风侧为主要回风通道,自燃带范围较宽,且向综采支架上部及后部扩展(图 7(a))。采空区中部为压入式通风回风侧,综采支架顶部自燃带范围明显收缩,裂隙漏风通道清晰可见(图 7(b));风筒出风口位置距离进风巷 150 m,风流扩散范围增大,自燃带在顶板处高度增加、架后变宽,但肩部因冒落空隙大、遗煤薄,自

燃带范围变窄(图 7(c))。回风侧自燃带主要分布在撤架后垮塌巷道周围,宽度较均匀。该模拟结果结合传统自燃“三带”理论,较好地表现出回撤阶段工作面周围易自燃发火区域的分布特征,即分布在综采支架附近的立体自燃小“三带”(图 7(d))。

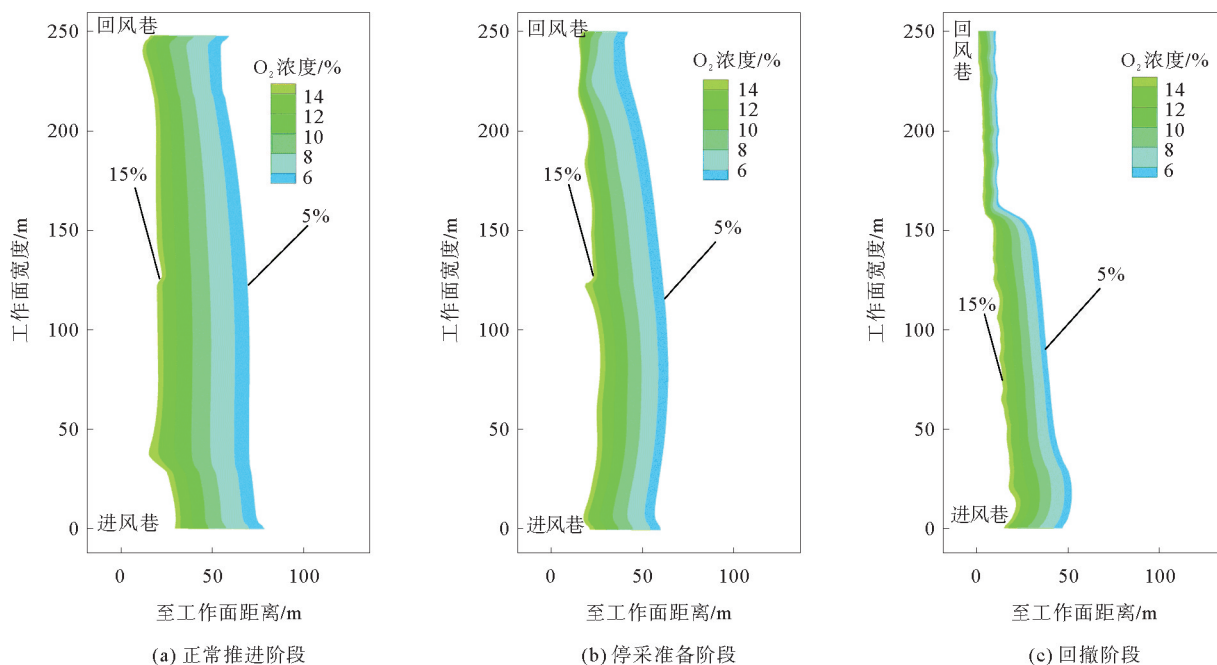


图 6 采空区中 O_2 浓度自燃带的分布 ($z=1.5$ m)

Fig. 6 Distribution of spontaneous combustion zones based on oxygen concentration in the goaf ($z=1.5$ m)

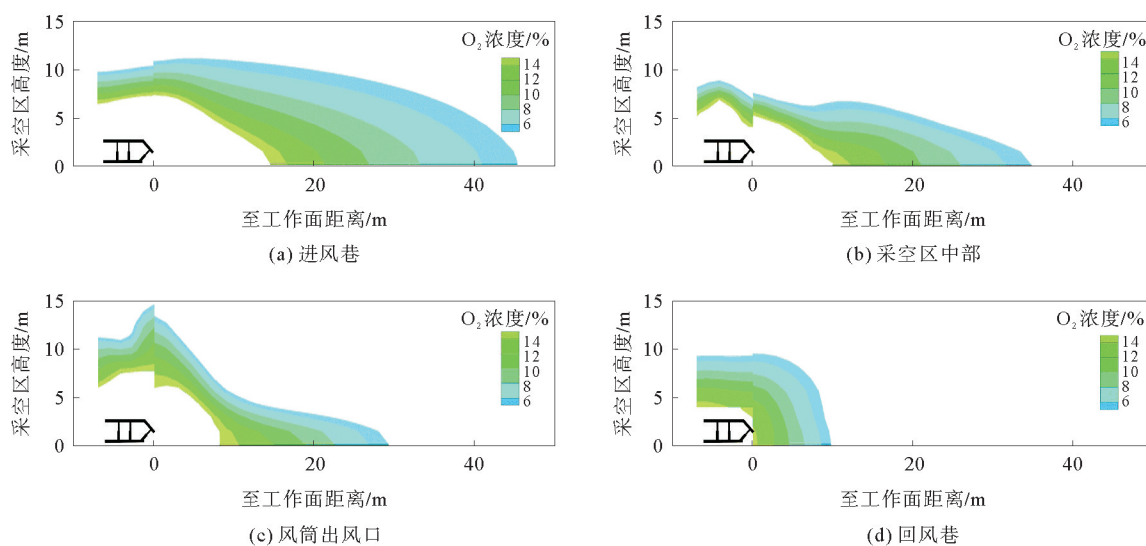


图 7 回撤阶段不同位置 O_2 浓度及自燃带分布

Fig. 7 Oxygen concentration and distribution of spontaneous combustion zones at different positions during the withdrawal stage

3.3 双参数复合自燃带影响分析

自燃带划分时,常以易于观测的 O_2 等指标气体浓度变化为依据,但以 O_2 浓度为代表的指标参数主要反映煤的阶段氧化特征,易造成划分的自燃危险带出现“有氧但不蓄热”或“有氧但供氧不足”的问题。考虑停采线区域特点,结合煤氧反应的 O_2 浓度分布及漏风供氧蓄热的环境参数,本部分探讨二者叠加

后,复合危险区域的分布特征,如图8所示。图8中,绿色区域为按 O_2 浓度划分的自燃“三带”,青色区域为按漏风速度划分的自燃“三带”,红色区域为二者叠加后的复合危险区域。

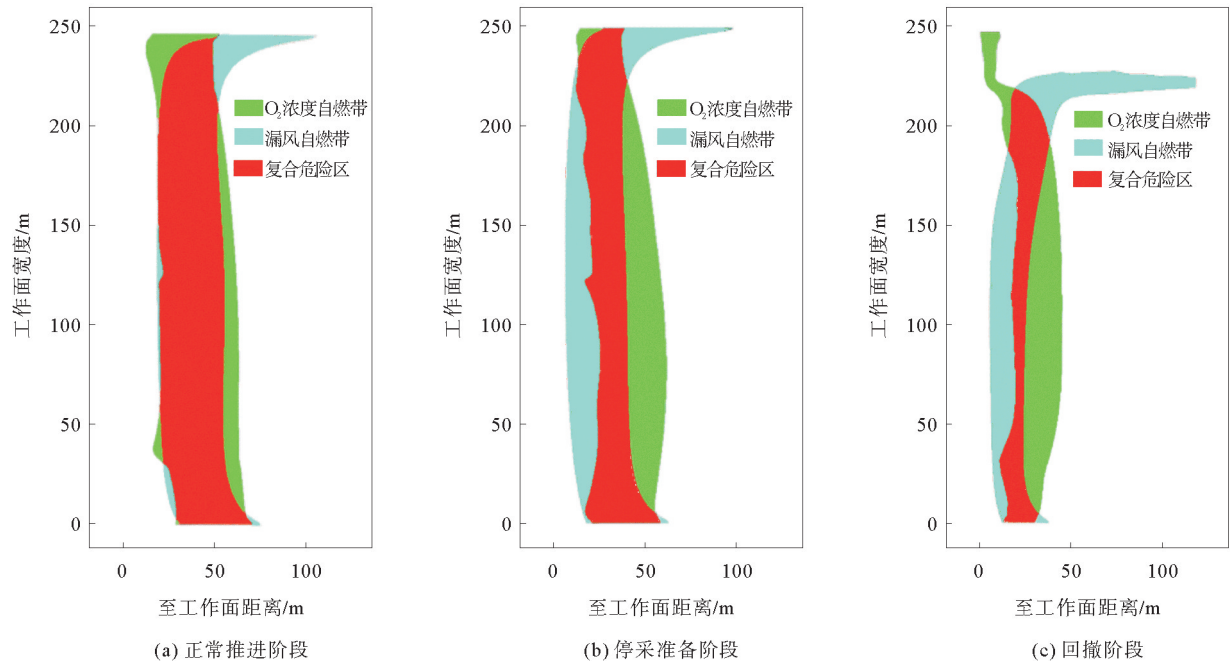


图8 不同推进阶段采空区复合危险区域

Fig. 8 Composite hazardous zones in the goaf during different advancement stages

工作面正常推进阶段叠加区域范围较大且贯穿采空区,进风侧两种划分“三带”方法得到的自燃带均后移,重合度较高、范围较宽。回风侧按 O_2 浓度划分的自燃“三带”前移,按漏风速率划分的自燃“三带”范围后退,二者重叠部分较少,范围变窄。前者中间部分分布与后者重叠较好,但后者范围稍宽且后移,表明漏风对采空区中部自燃带具有主导作用(图8(a))。

与正常阶段相比,停采准备阶段叠加区范围抵达进回风侧两端,但范围宽度明显收缩,表明不放煤工艺的低空隙结构对防治煤自燃具有积极作用。进回风侧“三带”分布规律与正常阶段相似,但工作面中部因不放煤,采空区空隙率下降,导致两种划分“三带”方法获得的自燃带差异增大,叠加高危自燃带范围明显缩小且向工作面方向前移(图8(b))。

工作面回撤阶段,回风端头支架撤除后,回风巷垮落,采用缩风后正压通风,其叠加自燃带如图8(c)所示,此时自燃带极限前移且变窄。回风侧漏风减少,叠加自燃带消失。该叠加区域范围较宽的位置为正压通风出风口附近和扩散回风集中的进风巷端头附近。由于采用正压通风,正压漏风形成的自燃带围绕在综采支架附近。

3.4 回撤阶段综采支架附近自燃带分析

回撤阶段不同位置复合自燃带如图9所示。进风巷附近复合自燃区域在综采支架附近呈“扇翅形”由上向下延展,耗氧自燃带偏上,漏风自燃带偏下(图9(a));采空区中部复合自燃带范围缩小,上部收窄、下部增厚(图9(b));正压风筒出风口处顶部漏风大,散热大于蓄热,自燃带消失,复合自燃带集中在采空区中下部,较中部高度下降、厚度增加且后延(图9(c));撤架后回风巷漏风量骤降,按漏风速率划分的自燃带向立体空间发展,按 O_2 浓度划分的自燃带围绕综采支架,二者叠加区小,主要位于支架斜上方(图9(d))。停采阶段,综采支架附近遗煤集中,复合自燃带随通风强度梯度与顶煤裂隙响应协同演化,从立体延展到集中聚合,再到近场聚合与分层错动,反映了回撤阶段“通风-结构-灾害”耦合作用,为支架附近区域风险防控提供依据。

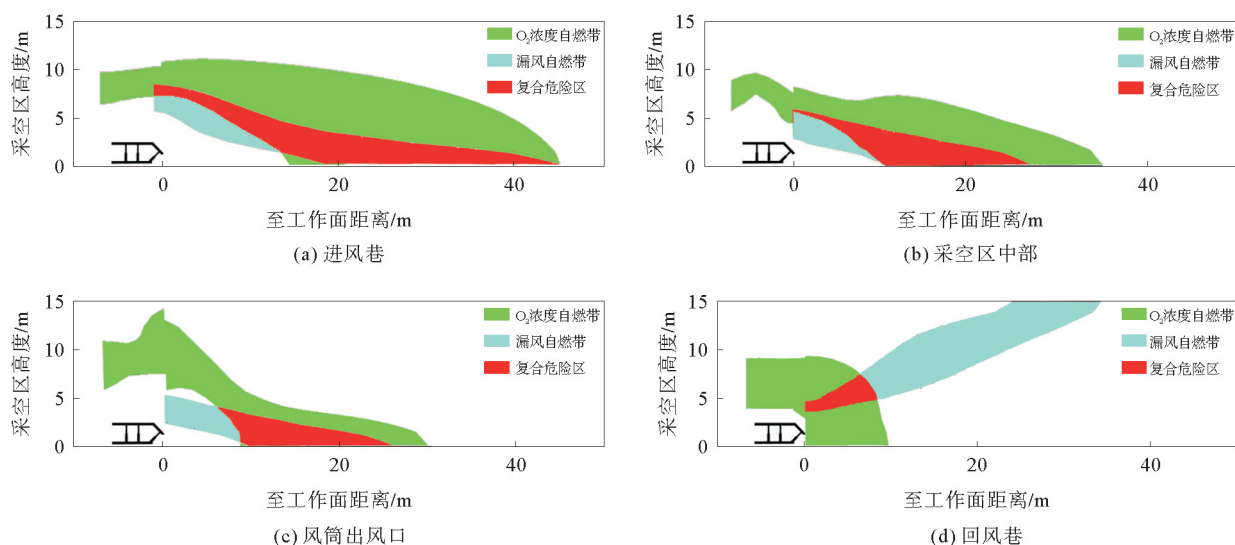


图 9 回撤阶段综采支架附近采空区复合危险区域

Fig. 9 Composite hazardous area in the goaf near the fully-mechanized support during the withdrawal stage

4 工程实测试验

4.1 测点布置

为了验证模拟方法的可行性,结合田陈煤矿实际条件与开采工艺,制定了以束管色谱监测系统为主、安全监测系统与人工气体检测为辅的综合监测方案。结合现场实际情况,在两顺槽及工作面中部设置 1[#]、2[#]、3[#] 测线,其中 1[#] 测线距下顺槽外壁 5 m,2[#] 测线距下顺槽外壁 124 m,3[#] 测线距下顺槽外壁 243 m。此外,回撤阶段分别在距离下顺槽 215 m 和 225 m 处设 4[#]、5[#] 两个监测点。测点布置如图 10 所示。

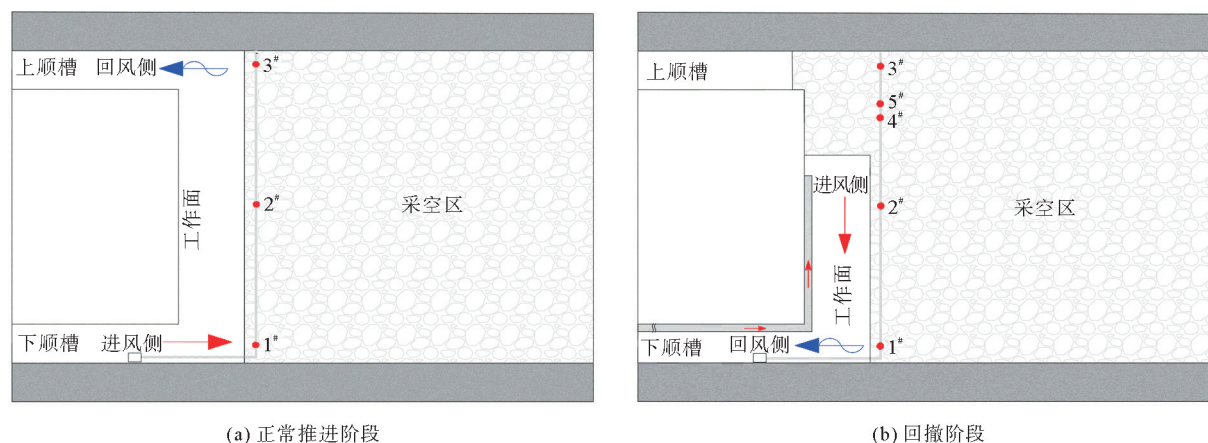


图 10 现场测点位置图

Fig. 10 Layout of field measurement points

4.2 气体浓度变化规律

结合模拟矿井现场实测与数值模拟结果,对采空区 O_2 浓度分布及自燃“三带”演化规律进行对比分析,如图 11 与表 2 所示。现场实测结果表明,准备阶段现场实测自燃带范围为进风侧距工作面 20~55 m、采空区中部距工作面 22~55 m、回风侧距工作面 15~40 m,数值模拟结果为进风侧 19~56 m、采

空区中部 22~57 m、回风侧 15~40 m;回撤阶段现场实测自燃带范围为进风侧 20~50 m、采空区中部 8~35 m、回风侧 0~11 m,模拟结果为进风侧 18~49 m、采空区中部 8~33 m、回风侧 0~10 m。现场实测与模拟结果高度接近,模拟误差小于 5%,验证了不同阶段采空区 O_2 浓度分布及自燃带演化规律的可靠性。

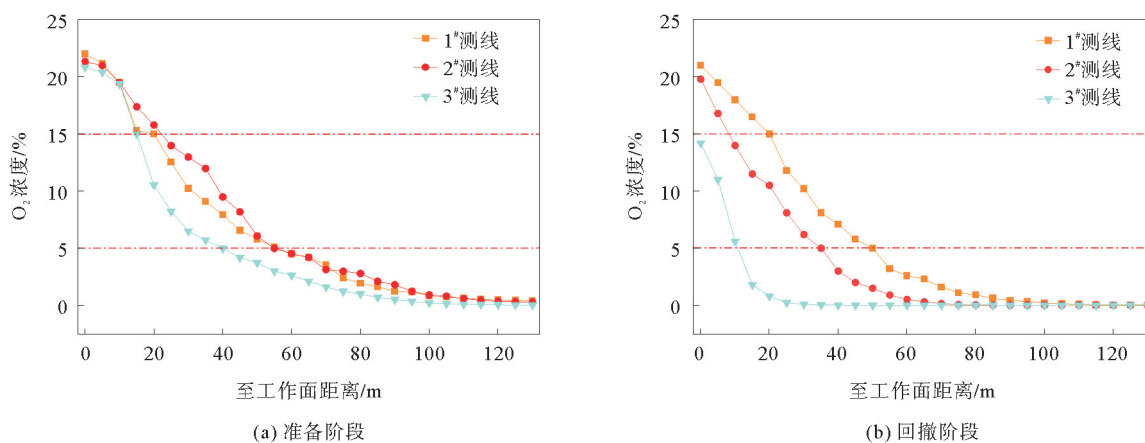


图 11 现场实测 O_2 浓度分布结果

Fig. 11 Field-measured oxygen concentration distribution results

表 2 采空区自燃“三带”分布对比

Table 2 Distribution comparison of spontaneous combustion “three zones” in goafs m

阶段	进风侧		采空区中部		回风侧	
	模拟结果	实测结果	模拟结果	实测结果	模拟结果	实测结果
准备阶段	19~56	20~55	22~57	22~55	15~40	15~40
回撤阶段	18~49	20~50	8~33	8~35	0~10	0~11

进一步分析表明,准备阶段,采空区覆岩压实程度较高,空隙分布均匀, O_2 浓度衰减较快,进风侧自燃带范围明显收窄,回风侧范围变化较小;回撤阶段,受支架回撤扰动、遗煤垮塌及空隙结构非均质性加剧等影响,漏风渗透能力显著增强, O_2 浓度衰减速度放缓,高氧区域向采空区深部延伸,进风侧自燃带范围虽略有收缩但整体仍偏宽,采空区中部区域因空隙与遗煤分布不均导致自燃带范围大幅收窄,上顺槽供氧不足,致使回风侧自燃带仅分布在采空区浅部狭小范围。

同时,现场对 CO 浓度监测发现,工作面回撤阶段,由于煤层暴露时间过长,随着撤架工作完成至 52 m 时,采空区内 4[#]、5[#] 观测点的 CO 最高,如图 12 所示。由于 5[#] 观测点出现时间早于 4[#] 观测点,且浓度稍高,可推测高温区域为两观测点中间位置(15~25 m)。结合前述综采支架附近煤自然发火模拟结果,该区域应为正常煤自燃危险区域,且指标气体多沿综采支架架隙持续弥散,应为立体自燃小“三带”范围。现场对该区域支架间及顶部采用高位注浆治理后, CO 气体浓度快速下降甚至消失,验证了小“三带”理论在回撤阶段自燃“三带”判定中的适用性。

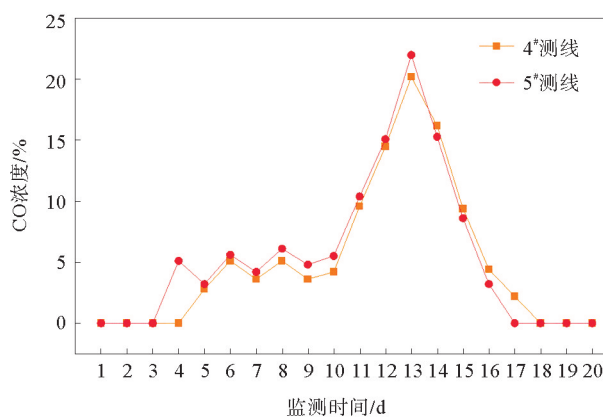


图 12 CO 浓度分布

Fig. 12 CO Concentration Distribution

5 结论

1) 采空区空隙结构与遗煤分布随开采工艺变化呈现显著差异:正常推进阶段支架后部空隙率沿推进方向从 0.90 衰减至 0.05,遗煤呈底板三角煤分布;停采准备阶段支架附近空隙率降至 0.05~0.60,遗煤量剧增且三角煤规模扩大;回撤阶段支架后部采空区被压实使空隙率均匀收缩至 0.01~0.33,采空区遗煤呈“两端高、中间低”分布。

2) 耦合煤自燃氧化、漏风供氧及蓄热效应的复合自燃带演化规律表明:三个阶段整体范围持续收缩并向支架迁移,受流场破缺与 O_2 运移失衡驱动,正常推进阶段呈连续条带,停采准备阶段收缩聚拢,回撤阶段扭曲离散,最终形成围绕综采支架的立体自燃小“三带”。

3) 回撤阶段综采支架附近自燃区域空间分异显著:进风巷侧呈扇状向支架上部及后部延展;架顶因应力释放产生压裂裂隙,形成规律性自燃区域;风筒出风口附近自燃带集中于支架后方中下部;回风巷侧围绕垮塌区均匀分布,呈立体小“三带”分布特征,可为精准防灭火提供直接理论依据。

4) 数值模拟与现场实测的耦合验证表明,三个阶段自燃带模拟结果与现场气体监测数据误差小于 5%,回撤阶段支架附近 CO 异常区域与立体小“三带”预测范围高度吻合,验证了模拟方法的可靠性及立体小“三带”理论的工程实用性,可为现场精准防灭火提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 翟小伟,李心田,侯钦元,等.漏风条件下采空区煤自燃分级预警方法研究及应用[J].煤炭科学技术,2025,53(1):161-169.
ZHAI Xiaowei,LI Xintian,HOU Qinyuan,et al. Research and application of classification warning method for coal spontaneous combustion in goaf under air leakage[J]. Coal Science and Technology,2025,53(1):161-169.
- [2] 蒋宇静,王亚华,颜鹏,等.矿山房式开采煤柱非稳定性破坏数值模拟[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(5):27-33.
JIANG Yujing,WANG Yahua,YAN Peng,et al. Numerical simulation analysis of instability failure of coal pillar in mine room mining[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2018,37(5):27-33.
- [3] 高登彦,陈建华,欧阳一博.近距离复合采空区煤自燃灾害防控技术[J].煤炭科学技术,2021,49(增2):159-167.
GAO Dengyan,CHEN Jianhua,OUYANG Yibo. Prevention and control technology of coal spontaneous combustion disaster in close compound goaf[J]. Coal Science and Technology,2021,49(S2):159-167.
- [4] 许延辉,程小蛟,文虎,等.多分层错距开采特厚遗煤自燃规律及精准防控技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(增2):101-113.
XU Yanhui,CHENG Xiaojiao,WEN Hu,et al. Research on spontaneous combustion law and precise prevention and control technology of extra thick residual coal in multi layered staggered mining[J]. Coal Science and Technology,2024,52(S2):101-113.
- [5] 曹东京,夏鸣泽,解树亮,等.基于 PFC-CFD 的采空区自燃“三带”预测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(4):33-44.
CAO Dongjing,XIA Mingze,XIE Shuliang,et al. Prediction of spontaneous combustion “three zones” in goaf based on PFC-CFD[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2024,43(4):33-44.
- [6] 赵文彬,赵娟,李振武,等.厚煤层窄工作面采空区立体自燃带分布规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):123-130.
ZHAO Wenbin,ZHAO Juan,LI Zhenwu,et al. Study on regularity of three-dimensional spontaneous combustion zone in gob of narrow face with thick coal seam[J]. Coal Science and Technology,2020,48(12):123-130.
- [7] 褚廷湘,李品,余明高.工作面推进下采空区煤自燃进程的动态模拟研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(3):529-537.
CHU Tingxiang,LI Pin,YU Minggao. Dynamic simulation of coal spontaneous combustion in gob under working face advancing[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2019,48(3):529-537.
- [8] 张遵国,张宏虎,唐朝,等.无煤柱开采工作面采空区漏风及瓦斯运移特征[J].中国安全科学学报,2024,34(11):119-130.
ZHANG Zunguo,ZHANG Honghu,TANG Chao,et al. Characteristics of air leakage and gas migration in goaf of pillar-less coal mining face[J]. China Safety Science Journal,2024,34(11):119-130.

- [9] ZHANG X Q,ZOU J X. Research on collaborative control technology of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster in goaf based on dynamic isolation[J/OL]. Fuel,2022,321. DOI:10.1016/j.fuel.2022.124123.
- [10] LIU Y,WEN H,GUO J,et al. Coal spontaneous combustion and N_2 suppression in triple goafs:A numerical simulation and experimental study[J/OL]. Fuel,2020,271. DOI:10.1016/j.fuel.2020.117625.
- [11] 刘红威,赵阳升,REN Tingxiang,等. 切顶成巷条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征[J]. 中国矿业大学学报,2022,51(1):77-89.
- LIU Hongwei,ZHAO Yangsheng,REN Tingxiang,et al. Characteristics of overburden failure and fracture development in gob of mining with gob-side entry[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2022,51(1):77-89.
- [12] 汪北方,吕元昊,张晶. 浅埋复合采空区覆岩采动裂隙分区特征及其治理技术[J]. 煤炭科学技术,2025,53(2):41-52.
- WANG Beifang,LYU Yuanhao,ZHANG Jing. Zone feature and control technology of overlying strata mining-induced fracture in shallow buried compound goaf[J]. Coal Science and Technology,2025,53(2):41-52.
- [13] 武猛猛,王刚,王锐,等. 浅埋采场上覆岩层孔隙率的时空分布特征[J]. 煤炭学报,2017,42(增1):112-121.
- WU Mengmeng,WANG Gang,WANG Rui,et al. Space-time porosity distribution on overlying strata above a shallow seam[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(S1):112-121.
- [14] ZHANG Y S,NIU K,DU W Z,et al. A method to identify coal spontaneous combustion-prone regions based on goaf flow field under dynamic porosity[J/OL]. Fuel,2021,288. DOI:10.1016/j.fuel.2020.119690.
- [15] 韩丹丹,胡胜勇,张晔,等. 采空区垮落岩体空隙率分布规律及其形成机理研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(11):113-120.
- HAN Dandan,HU Shengyong,ZHANG Ao,et al. Study on distribution regulation and formation mechanism of crushed rock mass in gob[J]. Coal Science and Technology,2020,48(11):113-120.
- [16] 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 Weiguo,et al. Study on coal spontaneous combustion prediction and control technology during the withdrawal period of super long fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology,2020,48(1):167-173.
- [17] ZHAO W,MA T C,CHEN X,et al. Study on the influence of the dynamic evolution law of the void ratio in the withdrawal stage of the working surface on the self-ignition hazard area in the gob[J/OL]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2025,166. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109173.
- [18] LU A L,SONG D Z,LI Z L,et al. Numerical simulation study on pressure-relief effect of protective layer mining in coal seams prone to rockburst hazard[J/OL]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2024,57(8). DOI:10.1007/s00603-024-03826-5.
- [19] ZHANG J W,ZHANG Y,HAN Y B,et al. Study on stress distribution law of surrounding rock of roadway under the goaf and mechanism of pressure relief and impact reduction[J/OL]. Engineering Failure Analysis,2024,160. DOI:10.1016/j.engfailanal.2024.108210.
- [20] SUN Q,GAO J L,YANG F,et al. Cooperative mining technology and strata control of close coal seams and overlying coal pillars[J]. Alexandria Engineering Journal,2023,73:473-485.
- [21] ZHAO W B,MA T C,WANG J F,et al. Research on the spontaneous combustion of the goaf at different advancing distances based on the dynamic evolution of porosity[J/OL]. Case Studies in Thermal Engineering,2024,60. DOI:10.1016/j.csite.2024.104649.
- [22] ZHAO X G,DAI G L,QIN R X,et al. Spontaneous combustion characteristics of coal based on the oxygen consumption rate integral[J/OL]. Energy,2024,288. DOI:10.1016/j.energy.2023.129626.

(责任编辑:齐敏华)