

马亮,任慧贤,高亮,等. 浅埋近距离煤层群工作面低氧致灾多参量影响机制[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2208–2217.

MA L, REN H X, GAO L, et al. Multi-parametric influencing mechanism of hypoxia disaster in shallow buried near-distance coal seam group working face[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2208–2217.

浅埋近距离煤层群工作面低氧致灾多参量影响机制*

马亮¹,任慧贤²,高亮¹,冯广亮¹,谢鹏杰¹,吴聪聪²,夏同强²,侯鹏³, Mukhammedrakhym RABATULY⁴

(1 陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司,陕西神木 719300;2 中国矿业大学碳中和研究院,江苏徐州 221116;

3 武汉大学土木建筑工程学院,武汉 430072;

4 Mining Faculty, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda 100027, Kazakhstan)

摘要:调研晋陕蒙地区30座煤矿,分析了该地区浅埋煤层群地质特征与低氧原因,以陕北矿区柠条塔煤矿为研究背景,建立了基于裂隙尺寸与压力周期变化的“三区”喘吸多元气体体积分数变化模型,揭示了采动多参变量对工作面低氧气体涌出量与采空区氧气体积分数整体趋势变化的影响机制。结果表明,采空区内氧气体积分数下降速度与正压差、漏风裂隙尺寸、漏风系数呈负相关,与负压差绝对值、温度、推进速度、临近采空区漏风量呈正相关,工作面低氧气体涌出流量上升速度与正压差、温度呈负相关,与负压差绝对值、漏风系数、推进速度、临近采空区漏风量呈正相关。研究结果对浅埋煤层群工作面低氧防治具有理论指导意义。

关键词:安全工程;浅埋煤层群;“三区”喘吸;低氧特征;多参量

中图分类号:X936;TD7

文献标志码:A

文章编号:1009-6094(2026)06-2208-10

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0997

0 引言

随着我国中东部煤炭资源的逐渐枯竭,晋陕蒙地区的作用和战略地位越发凸显^[1]。近年来,该地区相继建成了一批大型、特大型矿井,如神东矿区、榆神矿区、大同矿区等,这些矿区目前大部分属于浅埋近距离煤层群开采,重复扰动引起地表-采空区-工作面“三区”连通,形成漏气通道,昼夜季节交替和重复采动等外界扰动打破“三区”气压平衡,导致工作面产生大范围低氧区域。根据GB 8959—2006《缺氧危险作业安全规程》,矿井为缺氧危险作业场所中的地下有限空间,缺氧危险作业氧气报警体积分数为19.5%。当氧气体积分数为17%时,现场人员从事一般劳动强度工作会出现呼吸困难等情况,氧气体积分数低于12%时,工作人员会休克甚至死亡^[2]。因此,开展浅埋近距离煤层群工作面低氧致灾的多参变量影响机制研究对于保障煤炭安全生产具有重要意义。

近年来,国内外学者在近距离煤层群低氧致因方面展开了大量研究。其中,郭凯^[3]、王伟^[4]、安小

磊等^[5]、方保明^[6]认为矿井的 N_2 - CO_2 带、采空区遗煤氧化和高浓度 N_2 涌出是造成低氧环境的主要根源。王文才等^[7]探究了浅埋近距离煤层上覆采空区基于裂隙动态发育的氧气场和风流场的分布规律。赵罗飞^[8]通过试验研究了 CO_2 、 N_2 和 O_2 多元气体的竞争吸附和氧化消耗特性,认为煤对 O_2 吸附和氧化消耗是造成工作面低氧的主要原因。2018年,鹿文勇等^[9]采用 SF_6 气体示踪方法,成功发现上覆采空区中气体通过采动裂隙运移到本煤层的采空区内,造成其低氧气体含量增高,异常涌出后引起工作面低氧,为不同煤层多元气体越流提供了试验依据。迟国铭等^[10]研究认为,影响综采工作面低氧的因素很多,包括地表裂隙、煤层地质条件、通风方式、超大采空区面积和大气压力等。刘虎生等^[11]通过对实际数据的监测与分析,认为回风隅角 O_2 浓度与大气压强密切相关,表现出强烈的“喘吸”效应,引起工作面 O_2 和其他气体浓度的变化。2023年,李子龙^[12]基于流体力学、传热传质学等基础理论,建立了浅埋煤层多元气体“三区”越流多场耦合数学模型,为浅埋煤层多因素影响下气体越流研究提供了

* 收稿日期: 2025-06-27

作者简介: 马亮,高级工程师,从事煤矿安全方向研究,3220988211@qq.com;夏同强(通信作者),教授,博士,博士生导师,从事矿井安全智能化研究,xtq09cumt@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52074284);陕西煤业股份有限公司科技研发投资项目(2023SMHKJ-B-J-75)

理论基础。2017 年, Lolon 等^[13]通过理论建模与数值模拟, 创新性指出采空区处于“膨胀-收缩”的“喘吸”效应导致气体涌出到工作面。Gulawani 等^[14]利用 CFD 数值模拟手段, 模拟了 CH₄ 等气体在工作面采空区内的分布及运移情况, 发现漏风是导致工作面上隅角气体积聚超限的主要原因。但针对压差、温度、裂隙尺寸、推进速度、邻近采空区漏风等多参变量对工作面低氧的影响机制研究少有涉及。

基于此, 本文调研晋陕蒙地区 30 座煤矿, 分析低氧煤矿典型地质特征与低氧原因, 以陕煤柠条塔煤矿 S1233 工作面为工程背景, 构建“三区”喘吸多元气体体积分数变化模型, 揭示多参变量对工作面低氧的影响机制, 以期为进一步防控煤矿低氧事故、提高工作面低氧风险管控隐患治理水平奠定理论基础。

1 晋陕蒙浅埋煤层群低氧特征调研分析

对晋陕蒙地区大型浅埋煤矿进行调研, 整理了其开采特征、主要低氧工作面影响区域与氧气体积分数, 并对低氧气体主要来源与致灾因素进行了分析, 为后续煤层群低氧多变量影响机制分析提供导向。其中, 陕西省含煤面积约占总面积的 1/4, 主要分布在榆林、安康与汉中等地^[15], 调研陕西典型低氧煤矿 9 座。内蒙古地域辽阔, 含煤地系复杂, 内蒙古主要成煤期是古生代晚期至中生代早期^[16], 调研内蒙古典型低氧煤矿 4 座。山西省面积为 15.7 万 km², 含煤面积约为 5.7 万 km², 约占总面积的 40%, 调研山西典型低氧煤矿 7 座。

通过调研分析可知, 该地区低氧煤矿集中分布于陕西省北部榆林市、内蒙古鄂尔多斯市和山西西北部地区。该地区主采煤层埋深较浅, 埋藏深度多数处于 150 ~ 200 m 区间, 基岩厚度在 0 ~ 150 m 区间, 松散层厚度在 10 ~ 50 m 区间, 符合浅埋煤层定义^[17]。如图 1 所示, 调研煤矿各生产工作面低氧气体来源与主要影响因素表明, 低氧煤矿多数处于 N₂-CO₂ 带, 属于低瓦斯矿井, 低氧气体主要成分为 CO₂、N₂。采空区低氧气体主要来源有三个方面: N₂-CO₂ 带(占比 30%)、采空区遗煤氧化(占比 33%)与采空区注氮(占比 37%)。而低氧气体涌出的主要影响因素如下。(1) 裂隙通道(占比 44%): 采动裂隙的存在为有毒有害气体提供了通道, 使采空区、地表、工作面三者形成一个系统;(2) 大气压力(占比 33%): 外界大气压与采空区和工作面的压力直接关联, 大气压的周期变化使得采空区与工作面形成压

强差;(3) 通风方式(占比 17%): 通风系统是否合理直接决定工作面的通风量, 不同的通风形式也决定着是否会发生低氧现象;(4) 周期来压(占比 6%): 周期来压导致顶板下沉, 导致采空区内空间减小、压力增大。各因素之间相互影响, 最终促使低氧问题的出现。

2 多元气体体积分数变化模型

2.1 气压变化规律

由于采动影响, 地面、采空区、工作面之间相互贯通, 采空区-工作面-地表形成一个弱平衡的状态, 可视为一个处于弱平衡状态的半封闭容器^[18]。在通风机功率不变的情况下, 工作面压力随地表压力变化而迅速变化, 而采空区压力总是滞后于地表压力变化, 且弛豫时间较长, 这种平衡就会打破^[19]。

(1) 地表-工作面压力变化。

对于整体通风量来说, 矿井整体漏风量可忽略不计, 且在用风段阻力变化影响微弱, 因此对于进风口与工作面上隅角可依据伯努利方程进行分析。

$$p_0 + \frac{\rho_{m0} v_0^2}{2} + \rho_{m0} g Z_0 = \left(p_s + \frac{\rho_{ms} v_s^2}{2} + \rho_{ms} g Z_s \right) + \sum_{j=1}^k R_j Q_j^2 \quad (1)$$

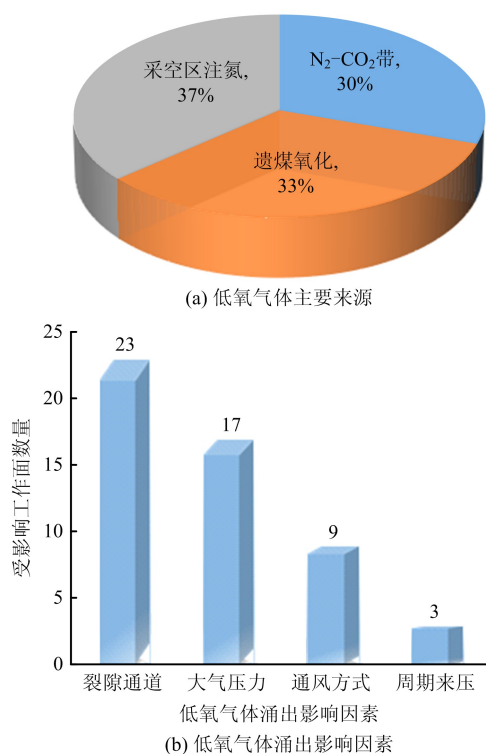


图 1 不同工作面低氧气体来源与主要影响因素占比

Fig. 1 Source of low oxygen gas and proportion of main influencing factors in different working faces

式中 p_0 为地表大气压, Pa; v_0 为地表风速, m/s; p_s 为工作面上隅角气压, Pa; ρ_{m0} 为地表空气密度, kg/m³; ρ_{ms} 为工作面上隅角气体密度, kg/m³; Z_0 为井口标高, m; Z_s 为工作面上隅角标高, m; v_s 为工作面上隅角风速, m/s; j 为井口至工作面上隅角各段风路编号; R_j 为井口至工作面上隅角各段风路风阻, N · s/m⁸; Q_j 为井口至工作面上隅角各段风路风量, m³/s; g 为重力加速度, m/s²。

(2) 采空区内气压变化。

该空间内的气体状态参数符合理想气体状态方程, 即

$$p_c V_c = nRT_c \quad (2)$$

式中 p_c 为采空区内气体全压, Pa; V_c 为采空区空间体积, m³; T_c 为采空区温度, K; R 为理想气体常数, 取 8.314 J/(mol · K); n 为物质的量, mol。

(3) 垂直压差。

任意高度的大气压服从玻尔兹曼分布规律, 可以表示为

$$p = p_1 e^{-\frac{\mu g Z}{RT}} \quad (3)$$

式中 p 为任意高度的大气压, Pa; p_1 为海平面处的大气压, Pa; Z 为海拔, m; T 为空气绝对温度, K; μ 为空气摩尔质量, 28.79 kg/kmol。

2.2 喘吸物质交换

(1) 采空区-地表气体交换。

当采空区压力高于地表大气压力时, 工作面内氧气体积分数必然保证正常生产需求, 因此只考虑采空区压力低于地表大气压的情况^[20]。地表漏风速度较小, 可将裂隙中的空气视为不可压缩流体; 一般煤岩体的渗透率为 0.02 ~ 0.05, 只考虑轴向流动与重力影响; 将地表裂隙漏风简化为宽为 a 、长为 b 的矩形管模型^[21], 如图 2 所示。

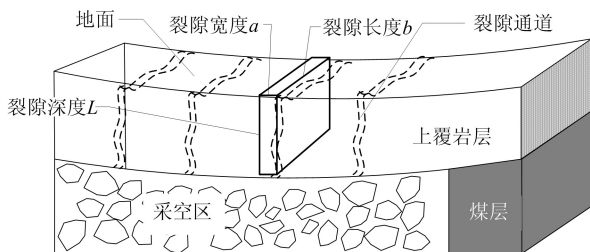


图2 采空区-地表气体交换示意图

Fig.2 Schematic diagram of goaf-surface gas exchange

由于气体在采空区内和地表的流动速度为 0, 且为不可压缩流体, 气体在裂隙中的流动方程可简化为

$$(p_0 - p_c) + \rho_{m0}g(Z_0 - Z_c) = R_a Q_a^2 \quad (4)$$

摩擦阻力计算公式为

$$R_a = \frac{\alpha UL}{S^3} = \frac{2\alpha(a+b)(Z_0 - Z_c)}{(ab)^3} \quad (5)$$

式中 Z_c 为采空区标高, m; α 为摩擦阻力系数, 与裂隙表面粗糙度有关, N · s/m⁴; U 为裂隙周长, m; L 为裂隙深度, m; S 为裂隙截面积, m²; a 为裂隙宽度, m; b 为裂隙长度, m。

联立式(4)和(5)可得未充填介质后不平行裂隙的流量计算公式为

$$Q_a = \sqrt{\frac{(p_0 - p_c) + \rho_{m0}g(Z_0 - Z_c)}{2\alpha(a+b)(Z_0 - Z_c)}} (ab)^3 \quad (6)$$

(2) 工作面-采空区气体交换。

矿井采用负压通风方式时, 地表大气通过重力势能克服裂隙摩擦阻力流入采空区, 通过通风机制造负压克服巷道阻力进入工作面^[22]。负压通风导致工作面压力 p_s 突然降低, 此时工作面压力 p_s 与采空区压力 p_c 差值增大, 如图 3 所示。

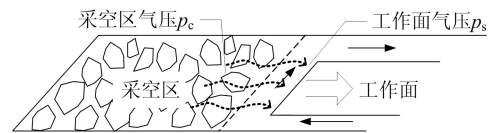


图3 工作面-采空区气体交换示意图

Fig.3 Schematic diagram of gas exchange between the working face and goaf

假定工作面采空区漏风量系数 l_b , 采空区漏入工作面的风量为

$$Q_b(t) = l_b(t) \sqrt{|p_c(t) - p_s(t)|} \quad (7)$$

式中 $Q_b(t)$ 为 t 时刻采空区漏入工作面的风量, m³/min; $l_b(t)$ 为采空区的漏风量系数, m³/(min · Pa^{0.5}); $p_c(t)$ 为 t 时刻采空区气体全压, Pa; $p_s(t)$ 为 t 时刻工作面气体全压, Pa。

(3) 邻近采空区-采空区气体交换。

相邻采空区之间的煤岩体视为多孔介质, 孔隙度较小, 假设其渗透率为 k , 采空区内气体流速低, 是层流流动, 且均匀分布^[23], 如图 4 所示, 依据达西定律可得邻近采空区漏风量 Q_c (m³/min)。

$$Q_c(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t) F_0 = \sum_{i=1}^n \frac{k[p_i(t) - p_c(t)] F_0}{\mu_i \Delta x} \quad (8)$$

式中 $p_i(t)$ 为 t 时刻老采空区气体全压, Pa; v_i 为单位时间内单位面积低氧气体 i 的流出量, m³/(min · m²); μ_i 为低氧气体 i 的动黏系数, N · s/m²; Δx 为相邻采

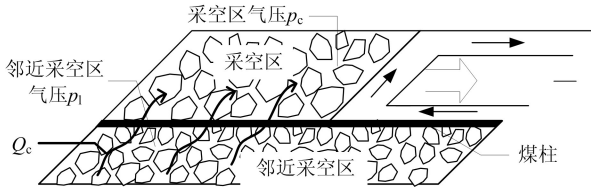


图 4 邻近采空区-采空区气体交换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of gas exchange between adjacent goaf and goaf

空区间距厚度, m; k 为渗透系数, m/s; F_0 为截面积, m^2 。

2.3 喘吸多元气体体积分数变化模型

假定采空区内的压力为 p_c , p_0 表示地面大气压力。当 $p_c < p_0$ 时,采空区处于“吸气”状态,当 $p_c > p_0$ 时,采空区处于“呼气”状态^[24]。低氧问题主要出现在负压通风煤矿,因此采空区压力总大于工作面压力,由于惯性部分进风巷风流进入采空区,假设流入采空区的风量为 Q_1 ,则影响采空区气体组分的主要有地表漏风 Q_a 、采空区漏风 Q_b 、邻近采空区漏风 Q_c 、进风巷漏风 Q_1 ,如图 5 所示。

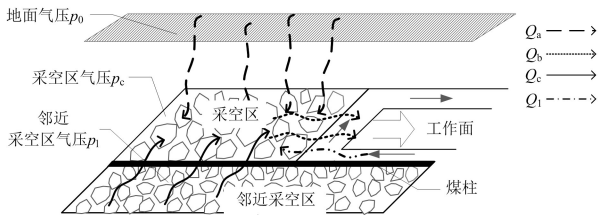


图 5 采空区气体组分主要来源示意图

Fig. 5 Schematic diagram delineating the major sources of gas components in goaf

将“三区”贯通条件下的采空区视为一个系统,做出以下假设:

- (1) 采空区内气体成分均匀分布、温度与空腔体积不变;
- (2) 采空区内全压随着物质的量的变化而变化;
- (3) 地表与邻近采空区组分浓度不变,邻近采空区压力恒定;
- (4) 流出采空区的气体成分与采空区内气体成分相同;
- (5) 地表与工作面通风阻力保持不变。

当采空区上覆岩层裂隙与地表贯通后,其全压为该海拔高度的大气压,两区物质交换依靠空

气重力势能克服裂隙通风阻力,即位压,当地表大气压降低平衡被打破^[25]时,根据道尔顿分压定律,以氧气为例,对采空区内氧气运用质量守恒方程,即

$$\int_0^t \left[\frac{\varphi_A(O_2)(Q_a + Q_1)}{V_a} + \frac{\varphi_C(O_2)Q_c}{V_1} \right] dt = \int_0^t \frac{\varphi_B(O_2)Q_b + q(O_2)}{V_b} dt + n(O_2) \quad (9)$$

式中 $\varphi_A(O_2)$ 为在大气中 O_2 的体积分数,%; $\varphi_B(O_2)$ 为在采空区中 O_2 的体积分数,%; $\varphi_C(O_2)$ 为邻近采空区中 O_2 的体积分数,%; $q(O_2)$ 遗煤氧化消耗氧气量, $m^3/\min$; V_a 为地表 1 mol 氧气的体积, m^3 ; V_b 为采空区 1 mol 氧气的体积, m^3 ; V_1 为邻近采空区 1 mol 氧气的体积, m^3 ; $n(O_2)$ 为 t 时间内采空区内氧气的物质的量, mol。

对式(9)两边同时求导可得

$$\frac{dn(O_2)}{dt} = \frac{\varphi_A(O_2)(Q_a + Q_1)}{V_a} - \frac{\varphi_B(O_2)Q_b + q(O_2)}{V_b} + \frac{\varphi_C(O_2)Q_c}{V_1} \quad (10)$$

式中 $dn(O_2)/dt$ 为 t 时刻封闭空间内 O_2 的物质的量变化率, $mol/\min$ 。

依据理想气体状态方程可得

$$\frac{dp(O_2)}{dt} = p_0(t) \frac{\varphi_A(O_2)(Q_a + Q_1) T_c}{T_a(t) V_s} - p_c(t) \frac{\varphi_B(O_2)Q_b + q(O_2)}{V_s} + p_1(t) \frac{\varphi_C(O_2)Q_c T_c}{T_1 V_s} \quad (11)$$

式中 $dp(O_2)$ 为 t 时刻采空区氧气分压, Pa; $p_0(t)$ 为 t 时刻地表气体全压, Pa; $p_c(t)$ 为 t 时刻采空区气体全压, Pa; $p_1(t)$ 为 t 时刻邻近采空区气体全压, Pa; $T_a(t)$ 为 t 时刻地表气体温度, K; T_c 为采空区气体温度, K; T_1 为邻近采空区气体温度, K; V_s 为封闭空间的总体积, m^3 。结合理想气体状态方程和道尔顿分压定律,则 t 时刻各种组分气体的体积分数为

$$\varphi_i(t) = \frac{n_i(t)}{n_R} = \frac{p_i(t)}{p_R} \quad (12)$$

式中 $\varphi_i(t)$ 为 t 时刻第 i 种组分气体的体积分分数, %; $n_i(t)$ 为 t 时刻第 i 种组分气体的物质的量, mol; $p_i(t)$ 为 t 时刻第 i 种组分气体的分压力, Pa; n_R 为所有气体总的物质的量, mol; p_R 为所有气体总压, Pa。同理可得出 CO_2 、 N_2 、 CH_4 、 CO 气体组分的体积分分数,联立可得式(13)“三区”喘吸多元气体体积分分数变化模型。

$$\begin{cases}
 p_0 + \frac{\rho_{m0} v_0^2}{2} + \rho_{m0} g Z_0 = \left(p_s + \frac{\rho_s v_s^2}{2} + \rho_{ms} g Z_s \right) + \sum_{j=1}^k R_j Q_j^2 \\
 Q_a = \sqrt{\frac{(p_0 - p_c) + \rho_{m0} g (Z_0 - Z_c)}{2\alpha(a+b)(Z_0 - Z_c)}} (ab)^3 \\
 Q_b(t) = l_b(t) \sqrt{[p_c(t) - p_s(t)]} \\
 Q_c(t) = \sum_{i=1}^n \frac{k[p(t) - p_c(t)] F_0}{\mu_i \Delta x} \\
 \frac{dp(O_2)}{dt} = p_0(t) \frac{\varphi_A(O_2)(Q_a + Q_1) T_c}{T_a(t) V_s} - p_c(t) \frac{\varphi_B(O_2) Q_b + q(O_2)}{V_s} + p_1(t) \frac{\varphi_C(O_2) Q_c T_c}{T_1 V_s} \\
 \frac{dp(CO_2)}{dt} = p_0(t) \frac{\varphi_A(CO_2)(Q_a + Q_1) T_c}{T_a(t) V_s} - p_c(t) \frac{\varphi_B(CO_2) Q_b - q(CO_2)}{V_s} + p_1(t) \frac{\varphi_C(CO_2) Q_c T_c}{T_1 V_s} \quad (13) \\
 \frac{dp(N_2)}{dt} = p_0(t) \frac{\varphi_A(N_2)(Q_a + Q_1) T_c}{T_a(t) V_s} - p_c(t) \frac{\varphi_B(N_2) Q_b}{V_s} + p_1(t) \frac{\varphi_C(N_2) Q_c T_c}{T_1 V_s} \\
 \frac{dp(CH_4)}{dt} = -p_c(t) \frac{\varphi_B(CH_4) Q_b}{V_s} + p_1(t) \frac{\varphi_C(CH_4) Q_c T_c}{T_1 V_s} \\
 \frac{dp(CO)}{dt} = p_0(t) \frac{\varphi_A(CO)(Q_a + Q_1) T_c}{T_a(t) V_s} - p_c(t) \frac{\varphi_B(CO) Q_b - q(CO)}{V_s} + p_1(t) \frac{\varphi_C(CO) Q_c T_c}{T_1 V_s} \\
 \varphi_i(t) = \frac{n_i(t)}{n_R} = \frac{p_i(t)}{p_R}
 \end{cases}$$

式中 $\varphi_A(N_2)$ 、 $\varphi_A(O_2)$ 、 $\varphi_A(CO_2)$ 、 $\varphi_A(CO)$ 分别为大气中 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 的体积分数； $\varphi_B(N_2)$ 、 $\varphi_B(O_2)$ 、 $\varphi_B(CO_2)$ 、 $\varphi_B(CO)$ 、 $\varphi_B(CH_4)$ 分别为在采空区中 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 的体积分数； $\varphi_C(N_2)$ 、 $\varphi_C(O_2)$ 、 $\varphi_C(CO_2)$ 、 $\varphi_C(CO)$ 、 $\varphi_C(CH_4)$ 分别为邻近采空区中 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 的体积分数； $q(O_2)$ 为遗煤氧化消耗氧气量， m^3/min ； $q(CO_2)$ 为遗煤氧化生成二氧化碳量， m^3/min ； $q(CO)$ 为遗煤氧化生成一氧化碳量， m^3/min ；以上变量均可由试验或现场测试得到，地表漏风 Q_a 、采空区漏风 Q_b 、邻近采空区漏风 Q_c 由式(6)~(8)得出， Q_1 可通过测量进、回风巷的风量得出，通过 MATLAB 求解可以得出不同气体体积分数变化规律。

3 多参变量对工作面低氧影响规律分析

柠条塔煤矿坐落于陕西省神木市，最高海拔 1 364.40 m。根据观测信息，地表压力取 89 174.59 Pa，工作面与地表阻力为 1 302.53 Pa，采空区与地表压差为 31.8 Pa。采空区地表相对高差为 170 m，将地表裂隙等效为宽 0.3 m、长 100 m 的矩形板，摩擦阻力系数取 $0.028 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ ，地表裂隙初始漏风 $30 \text{ m}^3/\text{min}$ 。采空区工作面漏风系数为 $0.6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{Pa}^{0.5})$ ，漏风量为 $40 \text{ m}^3/\text{min}$ ，临近采空区漏风系数为 $0.1 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{Pa}^{0.5})$ 。重力加速度取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ ，采空区温度取 300 K。采空区空腔体积取 $4 000 \text{ m}^3$ ，吸氧量为 $0.73 \text{ m}^3/\text{t}$ ，推进速度为 $10 \text{ m}/\text{d}$ 。柠条塔煤矿“三区”贯通系统如图 6 所示。柠条塔煤矿采空区实测数据见表 1，将相关参数代入建立的数学模型，求解可得到多元气体各组分的体积分数

随时间变化的函数关系。如图 7 所示，随着时间推移，采空区内多元气体中氧气体积分数逐渐下降，氮气体积分数逐渐增加，两者体积分数差有逐渐增大

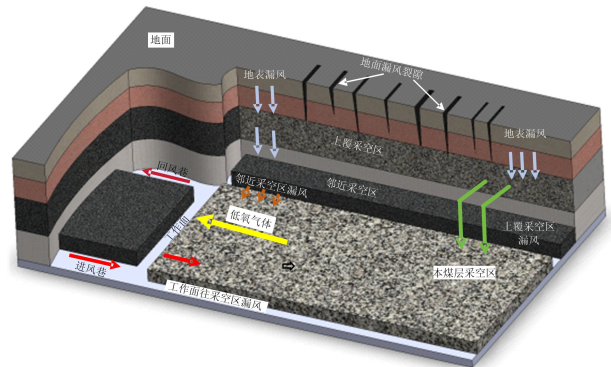


图 6 柠条塔煤矿“三区”贯通系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram delineating the “three zones” connection system of Ningtiaota Coal Mine

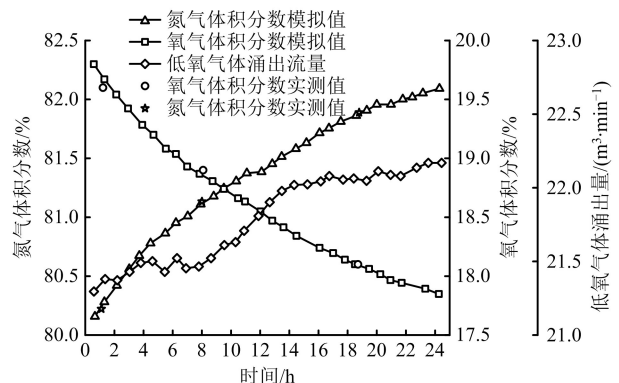


图 7 “喘吸”状态下采空区内氧气体积分数模拟值与实测值

Fig. 7 Simulated and measured oxygen volume fraction in the goaf under “breathing” condition

表 1 柠条塔矿井气体的物理参数

Table 1 Physical parameters of the mine atmosphere at Ningtiaota Mine

主要气体组分	地表、工作面气体 体积分数/%	采空区气体 体积分数/%	邻近采空区气体 体积分数/%	气体摩尔质量/ ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	地表压力下的密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
O_2	20.96	20	8	32	1.25
N_2	79	80	82	28	1.09

至趋于稳定的趋势。模拟氧气体积分数整体呈对数减小趋势,对比现场监测数据与模拟数据可以得出所建立数学模型与现场实际情况匹配度较高,可以很好地模拟“三区”多元气体体积分数变化情况。

以“三区”喘吸多元气体体积分数变化模型计

算分析压差、温度、漏风裂隙尺寸、漏风系数、推进速度、邻近采空区漏风量六个因素对采空区内部氧气体积分数(图 8)与工作面低氧气体涌出流量变化趋势(图 9)的影响,由图 8 和 9 分析得出以下结论。

(1)在压差、温度、漏风裂隙尺寸、漏风系数、推

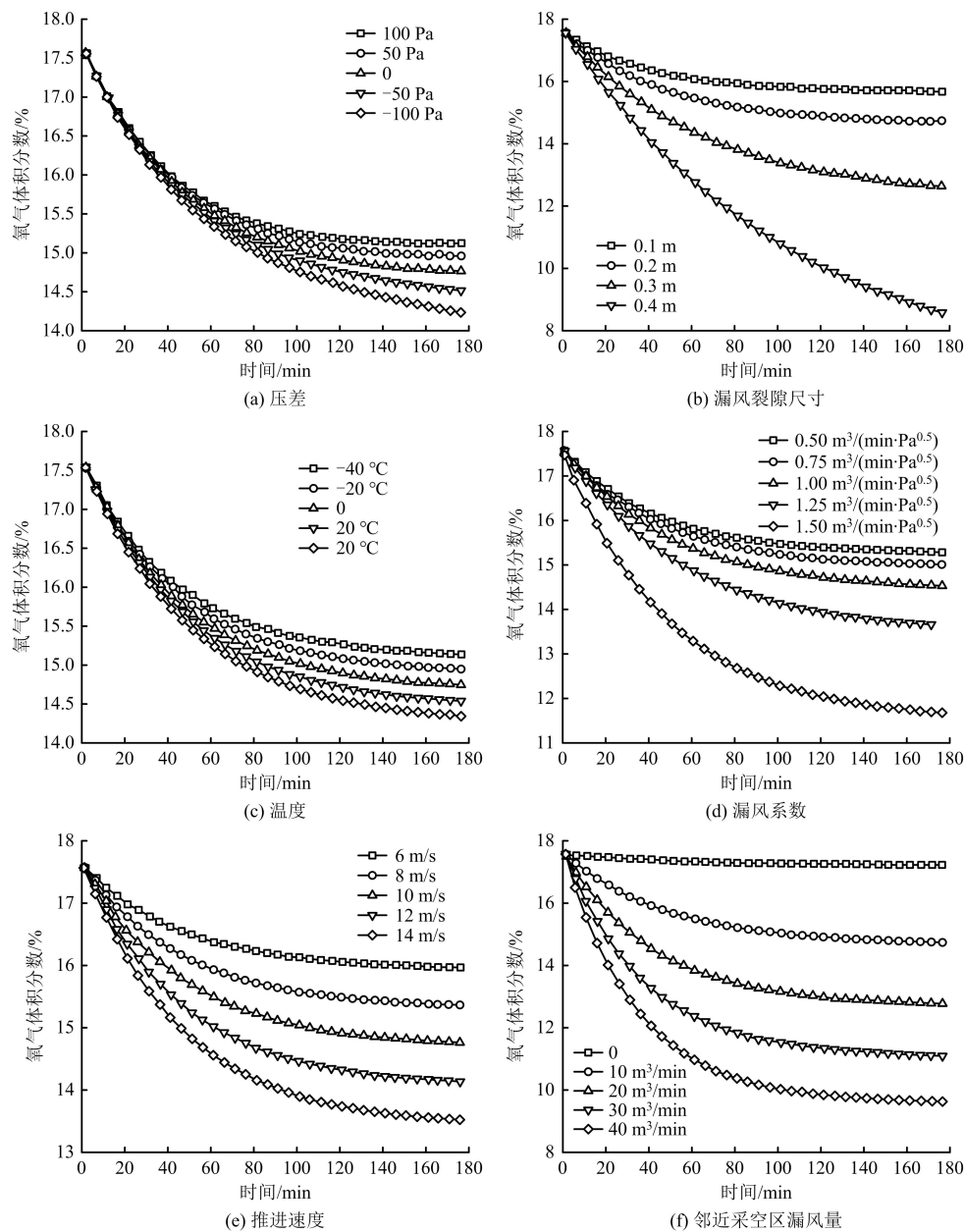


图 8 采空区内氧气体积分数变化趋势

Fig. 8 Variation trend of oxygen volume fraction in the goaf

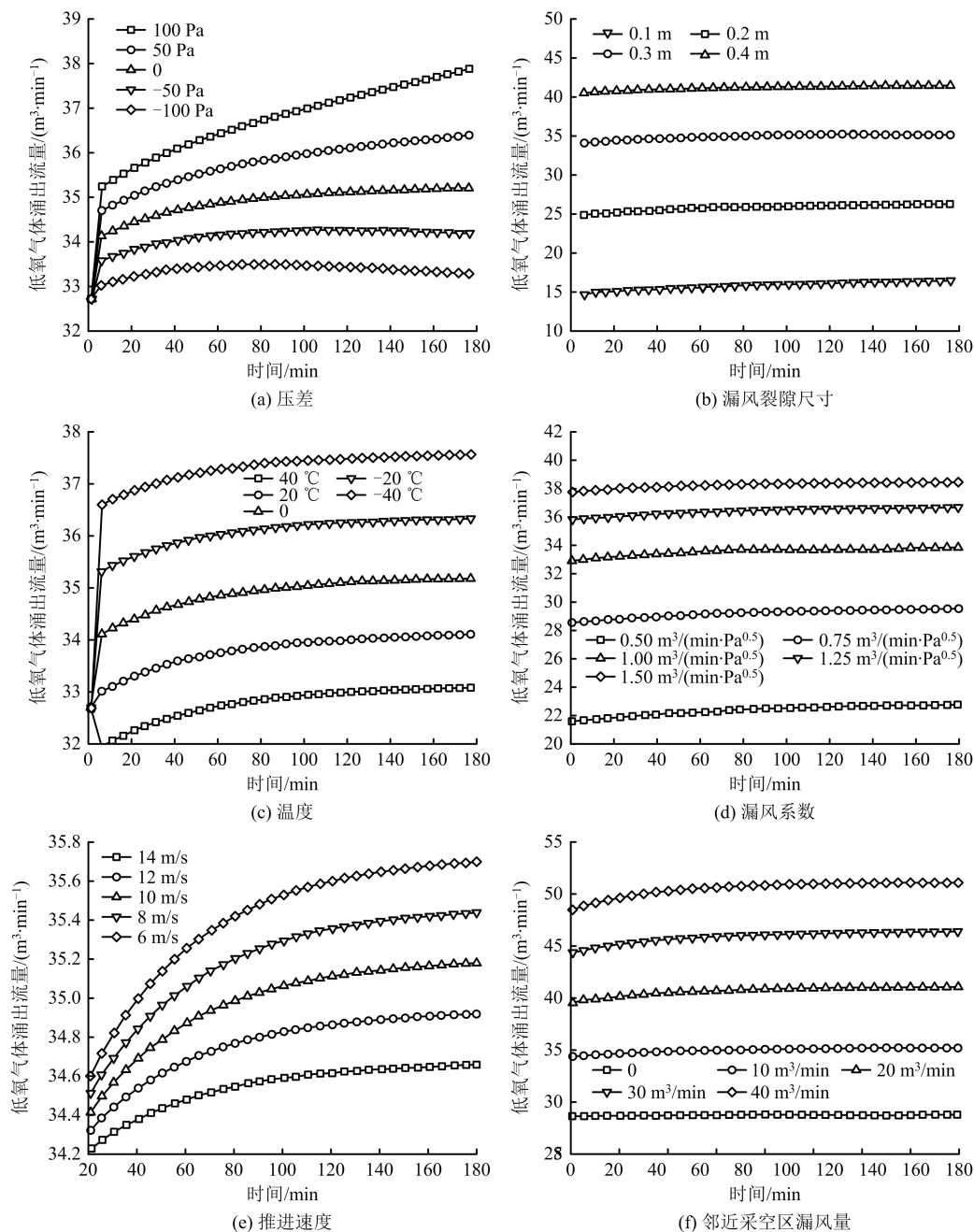


图9 低氧气体涌出流量变化趋势

Fig. 9 Variation trend of low oxygen gas outflow rate

进速度、邻近采空区漏风量多参数影响下,采空区内氧气体积分数整体呈现随时间延长下降的趋势,采空区内氧气体积分数下降速度与正压差、漏风裂隙尺寸、漏风系数呈负相关,与负压差绝对值、温度、推进速度、邻近采空区漏风量呈正相关。

(2)在压差、温度、漏风裂隙尺寸、漏风系数、推进速度、邻近采空区漏风量多参数影响下,低氧气体涌出流量呈现随时间延长上升的趋势。工作面低氧气体涌出流量上升速度与正压差、温度呈负相关,与负压

差绝对值、漏风系数、漏风裂隙尺寸、推进速度、邻近采空区漏风量呈正相关。

(3)在压差不变的条件下,漏风系数、漏风裂隙尺寸,邻近采空区漏风量对采空区氧气体积分数与低氧气体流量变化影响较大。漏风系数与漏风裂隙尺寸相互影响,漏风系数与漏风裂隙尺寸的增大,导致采空区内的氧气体积分数整体降低,低氧涌出流量增加,既增加工作面低氧危险程度,也增加遗煤自燃危险。邻近采空区漏风量增加,导致采空区内氧

气体积分分数降低,低氧气体涌出量增大,增加工作面低氧危险程度,若邻近采空区自然发火,会向新采空区漏入大量的热风流,诱发采空区遗煤自燃。

4 结 论

(1)通过对晋陕蒙地区不同煤矿工作面低氧现状进行调研,明确了低氧气体来源主要为 N_2 - CO_2 带(占比 30%)、采空区遗煤氧化(占比 33%)、采空区注氮(占比 37%),主要影响因素为通风方式变化(占比 17%)、采动裂隙通道贯通(占比 44%)、地表大气压力变化(占比 33%)与周期来压(占比 6%)。

(2)基于质量守恒方程、伯努利方程、道尔顿分压定律,构建了“三区”喘吸多元气体体积分数变化模型,分析得出采空区内氧气体积分数降低速度与正压差、漏风裂隙尺寸、漏风系数呈负相关,与负压差绝对值、温度、推进速度、临近采空区漏风量呈正相关;低氧气体流量上升速度与正压差、温度呈负相关,与负压差绝对值、漏风系数、推进速度、临近采空区漏风量呈正相关。

参考文献(References):

- [1] 郭建利,宋梅,赵鑫鑫,等.新形势下晋陕蒙新煤炭地位的再分析[J].煤炭经济研究,2022,42(12):4-11.
GUO J L, SONG M, ZHAO X X, et al. Re-analysis of the status of coal in Shanxi, Shaanxi, Inner Mongolia and Xinjiang under the new situation[J]. Coal Economic Research, 2022, 42(12): 4-11.
- [2] 苗涛,宋元喜.补连塔煤矿22409综采工作面低氧呈现规律、原因分析及防治措施[J].煤炭科学技术,2021,49(增刊2):147-151.
MIAO T, SONG Y X. Regularity of low oxygen in 22409 fully-mechanized mining face of Bulianta Coal Mine, analysis of causes and preventive measures[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(Suppl. 2): 147-151.
- [3] 郭凯.大柳塔矿综采工作面采空区氮气涌出原因分析及控制技术研究[D].太原:太原理工大学,2010:9-11.
GUO K. Study on analysis and control of nitrogen emission from gob in Daliuta Mine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010: 9-11.
- [4] 王伟.大柳塔煤矿22613工作面回风隅角低氧原因分析及防治技术[J].煤矿安全,2016,47(7):160-162,165.
WANG W. Reason analysis and prevention technology of low oxygen concentration in return airway corner of 22613 working face in Daliuta Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(7): 160-162, 165.
- [5] 安小磊,张云峰,张豫鹏,等.上榆泉煤矿综放工作面回风隅角低氧原因分析及预测[J].煤炭科技,2024,45(3):131-135,141.
AN X L, ZHANG Y F, ZHANG Y P, et al. Analysis and prediction of low oxygen in the return air corner of fully-mechanized caving face in Shangyuquan Coal Mine[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2024, 45(3): 131-135, 141.
- [6] 方保明.综采工作面回风隅角低氧原因分析及防治[J].煤矿安全,2018,49(10):187-190.
FANG B M. Analysis and prevention of low oxygen in return air corner of fully mechanized mining face[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(10): 187-190.
- [7] 王文才,赵婧雯,李建伟,等.浅埋近距离煤层群开采过程中上覆采空区自然危险区预测研究[J].安全与环境学报,2024,24(3):914-922.
WANG W C, ZHAO J W, LI J W, et al. Prediction of the spontaneous combustion risk zones in overlying gobs during the mining of shallow and contiguous coal seams[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 914-922.
- [8] 赵罗飞.补连塔煤矿工作面低氧原因及防控方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2020:18-19.
ZHAO L F. Causes and prevention of low oxygen in the working face of Bulianta Coal Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020: 18-19.
- [9] 鹿文勇,王伟,陈洋.工作面低氧原因分析及防治技术[J].煤矿安全,2018,49(1):89-92.
LU W Y, WANG W, CHEN Y. Reason analysis and prevention technology of low oxygen concentration at working face[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(1): 89-92.
- [10] 迟国铭,张立辉,李斌.浅埋深近距离煤层群大采高综采工作面隅角低氧防治技术[J].煤矿安全,2018,49(增刊1):22-26.
CHI G M, ZHANG L H, LI B. Technique of low oxygen control in corner of fully mechanized mining face of shallow buried depth close coal seams[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(Suppl. 1): 22-26.
- [11] 刘虎生,张运增.大气压变化影响回风隅角氧气体积分数异常变化的原因分析及防治技术[J].煤炭技

- 术, 2014, 33(9): 38-41.
- LIU H S, ZHANG Y Z. Reasons brief analysis of effect of change in atmospheric pressure on change in abnormal oxygen concentration in return air corner and preventing techniques [J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 38-41.
- [12] 李子龙. 浅埋采空区热-流耦合演化规律及低氧特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023: 12-14.
- LI Z L. Study on the heat-flow coupling evolution laws and low-oxygen characteristics in shallow goaf [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023: 12-14.
- [13] LOLON S A, BRUNE J F, BOGIN G E, et al. Computational fluid dynamics simulation on the longwall gob breathing [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(2): 185-189.
- [14] GULAWANI S S, DAHIKAR S K, JOSHI J B, et al. CFD simulation of flow pattern and plume dimensions in submerged condensation and reactive gas jets into a liquid bath [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(9): 2420-2435.
- [15] 申小龙, 蒯亚兵, 贾志鑫. 陕北三叠纪煤田蟠龙至高家屯勘查区煤层气赋存规律研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(5): 16-19, 33.
- SHEN X L, LIN Y B, JIA Z X. Study on CBM hosting pattern in Panlong-Gaojiatun exploration area, northern Shaanxi triassic coalfield [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(5): 16-19, 33.
- [16] 吉宏泰, 孙建国, 孟令伟, 等. 内蒙古地区聚煤规律、赋煤构造格局的基本特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊2): 965-975.
- JI H T, SUN J G, MENG L W, et al. Basic characteristics of coal accumulation law and occurrence tectonic pattern in Inner Mongolia [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Suppl. 2): 965-975.
- [17] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(8): 1174-1177.
- HUANG Q X. Ground pressure behavior and the definition of shallow coal seam [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(8): 1174-1177.
- [18] 张岱岳, 艾子博, 李鹏. 浅埋煤层开采采空区漏风规律分析及治理研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 1-6, 33.
- ZHANG D Y, AI Z B, LI P. Analysis and governance of air leakage law in goaf of shallow coal seam mining [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2022, 49(6): 1-6, 33.
- [19] 赵文彬, 芦继宇, 李振武, 等. 工作面掘采时期邻近采空区动态漏风规律研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(9): 136-141.
- ZHAO W B, LU J Y, LI Z W, et al. Study on dynamic air leakage law of adjacent goaf in excavation period and mining period [J]. Coal Engineering, 2019, 51(9): 136-141.
- [20] 彭斌, 聂百胜, 申杰升, 等. 低瓦斯矿井封闭采空区“呼吸”现象特征及防控技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 490-501.
- PENG B, NIE B S, SHEN J S, et al. Characteristics and control technology of “respiration” phenomenon of sealed goaf in low-gas mine [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 490-501.
- [21] 谢和平, 张泽天, 高峰, 等. 不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2405-2417.
- XIE H P, ZHANG Z T, GAO F, et al. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2405-2417.
- [22] 孙维丽, 张立魁. 低负压矿井自然风压变化规律研究[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(4): 120-122, 131.
- SUN W L, ZHANG L K. Study on the variation law of natural wind pressure in low negative pressure mine [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2023, 41(4): 120-122, 131.
- [23] 任伟, 赵耀江, 冯子芳. 基于 FLUENT 的采空区流场数值模拟[J]. 煤矿安全, 2013, 44(6): 26-29.
- REN W, ZHAO Y J, FENG Z F. Numerical simulation of flow field in goaf based on FLUENT [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(6): 26-29.
- [24] 关万里, 程健维. 矿井密闭空间内气体浓度变化模型及其模拟分析[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(5): 91-95.
- GUAN W L, CHENG J W. Variation model and simulation analysis of gas compositions in a sealed space of mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(5): 91-95.
- [25] 霍忠锋, 刘波, 王玉怀, 等. 察哈素煤矿 3101 工作面及地表漏风联合测试及其防治[J]. 煤矿安全, 2015, 46(3): 130-132.
- HUO Z F, LIU B, WANG Y H, et al. Joint test for air leakage of 3101 working face and surface in Chahasu Coal Mine and its control [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(3): 130-132.

Multi-parametric influencing mechanism of hypoxia disaster in shallow buried near-distance coal seam group working face

MA Liang¹, REN Huixian², GAO Liang¹, FENG Guangliang¹, XIE Pengjie¹,
WU Congcong², XIA Tongqiang², HOU Peng³, Mukhammedrakhym RABATULY⁴

(1 Shenmu Caragana Mining Co, Ltd. , Shaanxi Coal Group, Shenmu 719300, Shaanxi, China;

2 Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

3 School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

4 Mining Faculty, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda 100027, Kazakhstan)

Abstract: This study investigates the causes and influencing mechanisms of hypoxia in working faces within shallow-buried, closely spaced coal seam groups. Based on field surveys conducted across 30 coal mines in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region, we analyzed the geological characteristics and primary contributors to low-oxygen environments in this area. The findings indicate that the main sources of low-oxygen gas include the $N_2 - CO_2$ zone (30%), oxidation of residual coal in the goaf (33%), and nitrogen injection into the goaf (37%). The key influencing factors identified are variations in the ventilation system (17%), mining-induced fracture connectivity (44%), changes in surface atmospheric pressure (33%), and periodic roof weighting (6%). To quantitatively analyze the gas exchange dynamics, we established a multi-gas volume fraction variation model for the “three zones” (surface, goaf, and working face) under “breathing” conditions. This model incorporates the mass conservation equation, Bernoulli’s equation, and Dalton’s law of partial pressures, while specifically accounting for the effects of fracture dimensions and periodic pressure fluctuations. Simulations of the model, validated against field sensor data from the Ningtiaota Coal Mine S1233 working face, demonstrate a high degree of consistency with actual measurements, confirming its reliability. The results indicate that the rate of decrease in oxygen volume fraction within the goaf is negatively correlated with positive pressure difference, air leakage crack size, and air leakage coefficient. Conversely, it is positively correlated with the absolute value of the negative pressure difference, temperature, advance rate, and air leakage volume from adjacent goafs. Conversely, the rate of increase in low-oxygen gas outflow at the working face exhibits a negative correlation with positive pressure difference and temperature, while showing a positive correlation with the absolute value of the negative pressure difference, air leakage coefficient, advance rate, and air leakage from adjacent goafs. Furthermore, sensitivity analysis reveals that the air leakage coefficient, crack size, and leakage from adjacent goafs significantly impact both oxygen depletion in the goaf and the hazardous gas outflow to the working face.

Key words: safety engineering; shallow buried coal seam group; “three-zone” wheezing; hypoxic characteristics; multi-parameter