Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1481-1493
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146147

Hans汉斯

连通采空区压差波动机制及抑燃阻逸技术研究

朱桂壮[1*]，武纪昊[1]，王振国[2]

[1]山东科技大学安全与环境工程学院，山东 青岛
[2]徐州矿务(集团)新疆天山矿业有限责任公司，新疆 库车

收稿日期：2026年9月23日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月4日

摘　要

针对大面积连通采空区漏风网络复杂、采空区内外压差波动明显导致“呼吸现象”突出，易引发采空区遗煤自燃及有毒有害气体异常涌出等问题，以俄霍布拉克煤矿5号煤层52105和52107工作面连通采空区为研究对象，采用SF_6气体示踪法、压能测定及密闭压差长期监测等方法，分析连通采空区漏风区域及内外压差变化规律，并提出抑燃阻逸综合防控技术。结果表明：52105、52107采空区水平与垂直方向均具有一定连通性，52105和52107采空区密闭区域表现出较明显的漏风趋势；冬季密闭内外压差在−20~40 Pa范围内波动，夏季在−10~15 Pa范围内波动，均呈现明显的日周期变化及正负压交替特征；大气压力与密闭压差变化具有较明显的对应关系，地表温度主要通过影响大气压力间接作用于密闭压差。采取密闭加固、裂隙封堵及压差－注氮动态调控等综合防控措施后，采空区压差波动范围控制在−10~10 Pa以内，正负压大幅交替现象基本消失，“呼吸现象”明显减弱。有效防控采空区遗煤自燃及有毒有害气体逸散风险。

关键词

连通采空区，呼吸现象，压差监测，动态调控，抑燃阻逸

The Mechanism of Pressure Difference Fluctuation in Connected Goaf and the Technology of Fire Prevention and Control Gas Escape

Guizhuang Zhu[1*], Jihao Wu[1], Zhenguo Wang[2]

[1]College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

[*]通讯作者。

文章引用: 朱桂壮, 武纪昊, 王振国. 连通采空区压差波动机制及抑燃阻逸技术研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1481-1493. DOI: 10.12677/me.2026.146147

[2]Xuzhou Mining (Group) Xinjiang Tianshan Mining Co., LTD., Kuche Xinjiang

Received: September 23, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 4, 2026

Abstract

Aiming to address complex air leakage networks, pronounced pressure-difference fluctuations, and the "breathing phenomenon" in large-area connected goafs, which may induce spontaneous combustion of residual coal and abnormal emissions of toxic and hazardous gases, the connected goafs of the No. 52105 and 52107 working faces in the No. 5 coal seam of Okhobrak Coal mine were investigated. The SF_6 tracer-gas method, pressure measurements, and long-term monitoring of sealing pressure differences were employed to characterize air leakage and pressure-difference variations. An integrated control technology combining fire suppression, air-leakage mitigation, and pressure-difference-nitrogen injection regulation was proposed. The results show that the two goafs are partially connected both horizontally and vertically, with pronounced air leakage in the sealed regions. The sealing pressure difference fluctuates between −20 and 40 Pa in winter and −10 and 15 Pa in summer, exhibiting clear daily periodicity and alternating positive and negative pressure. Atmospheric pressure is closely correlated with the sealing pressure difference, while surface temperature mainly affects it indirectly through atmospheric pressure. After implementing sealing reinforcement, fracture sealing, and dynamic pressure-difference-nitrogen injection regulation, the pressure-difference fluctuation was controlled within −10 to 10 Pa, the positive-negative pressure alternation was largely eliminated, and the "breathing phenomenon" was significantly weakened, effectively mitigating the risks of residual-coal spontaneous combustion and toxic and hazardous gas emissions.

Keywords

Connecting Mined-Out Area, Breathing Phenomenon, Pressure Difference Monitoring, Dynamic Regulation, Flame Retardant and Inhibition of Gas Escape

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在全球能源格局中煤炭依旧占据着主导地位，近年来沿空留巷、近距离煤层开采等技术得到广泛应用[1]-[3]，井下多个工作面采空区之间的空间连通程度不断增加，逐渐形成大面积、多区域连通采空区[4][5]。由于大气压、温度等外界因素变化导致采空区内外压差发生波动，促使采空区与外界之间发生气体交换行为，且采空区受采动影响等形成的煤岩体裂隙、密闭墙及地表裂隙等均可能成为漏风通道，导致采空区与外界气体运移规律更加复杂，增加连通采空区遗煤自燃及有害气体异常涌出的风险[6]。

已有研究表明，采空区漏风规律与漏风源、漏风汇等因素密切相关，赵启峰等人[7]利用示踪气体对地表裂隙进行漏风测定，验证了地表裂隙与采空区之间存在复杂的漏风网络。姬举朋等人[8]通过示踪气体方法结合风量测定、色谱分析技术进行采空区漏风测试，结果表明不同煤层采空区之间存在连通漏风通道。吴祖玉等人[9]针对无煤柱开采 Y 型通风工作面采空区与相邻采空区漏风自燃问题，采用能位测定和示踪技术相结合的方法对密闭墙进行漏风检测，表明密闭墙是采空区的主要漏风源。因此合理识别漏

风区域并采取针对性防控措施是降低采空区灾害风险的重要途径。对于长期封闭的采空区而言，其内部气体压力与外部巷道压力并非始终处于稳定状态。可能因内外压差变化导致发生周期性气体交换的“呼吸现象”[10]-[12]。刘忠全等人[13]根据采空区内外压差变化注入氮气，使采空区保持微正压，有效控制了气压力波动引发的采空区“呼吸”效应、减小了向采空区的漏风量。李建华[14]分析了采空区“呼吸现象”出现原因并分析一般规律，提出了通风系统优化、加强井上堵漏等措施。马敬龙等人[15]通过压差采集、现场自动控制注氮调控、建立外置气室等技术降低封闭区内外压差并保持封闭区内状态稳定。

针对目前连通采空区“呼吸现象”的防治措施大多较为单一，本文提出采空区漏风通道控制与内外压差调控相结合的综合方法，以俄霍布拉克煤矿 5 号煤层 52105、52107 连通采空区为研究对象，首先采用地表裂隙 SF_6 示踪、井下压能测定及采空区连通性测试等方法，识别连通采空区主要漏风区域及漏风通道。其次通过冬、夏季典型时段全天候压差监测，分析采空区内外压差的日周期变化规律，并结合地面大气压力和温度变化探讨其影响。最后针对主要漏风区域及压差波动特征，提出密闭加固、裂隙封堵及基于压差变化的动态注氮调控相结合的综合防控技术，为类似条件下连通采空区“呼吸现象”治理提供参考。

2. 煤矿概况

2.1. 采空区概况

目前，俄霍布拉克煤矿主要开采 5 号煤层，上距 4 号煤层约 23.18 m，其中 52105、52107 工作面已停采，52109 工作面正在进行回采，52105、52107 工作面可能已形成连通采空区，煤层工作面分布情况如图 1 所示。根据井田内历次勘探获得的可靠钻孔资料及井下见煤点资料，5 号煤层厚度为 7.63~12.44 m，平均厚度 9.49 m，属大部较稳定可采煤层，不含夹矸，煤层结构较为简单。顶板岩性以炭质泥岩、粉砂岩为主，底板岩性以粉砂岩、细砂岩为主。受构造影响，5 号煤层埋藏深度总体呈由西向东逐渐变浅的趋势。5 号煤层自燃倾向性等级为 II 级，属于自燃煤层。

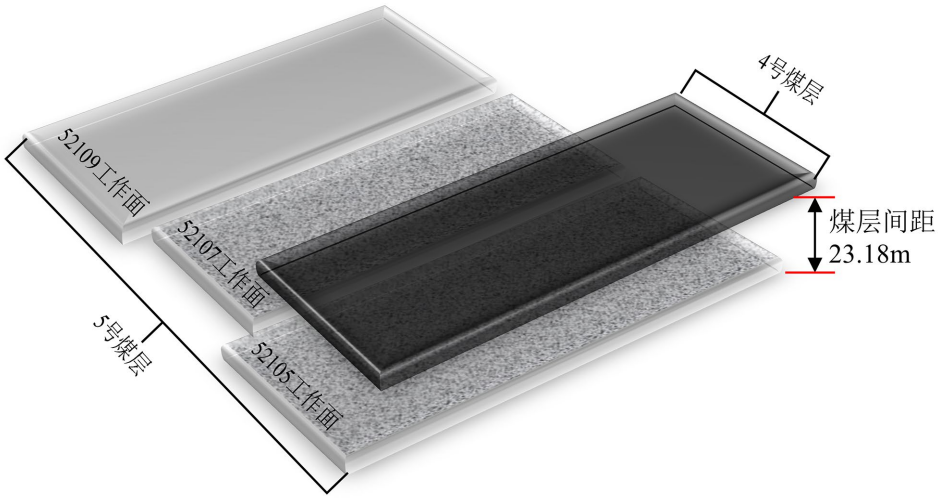


Figure 1. Distribution of coal seam working face
图 1. 煤层工作面分布情况

2.2. 采空区“呼吸现象”成因分析

连通采空区可以看作一个处于相对平衡状态的半封闭空间。当采空区内、外气体状态发生变化时，原有压力平衡受到扰动，在密闭墙、煤壁裂隙及地表裂隙等其他漏风通道存在的条件下，采空区与外部

之间可能发生气体交换。当采空区内部压力高于密闭外侧压力时，采空区内部气体向外部空间运移，表现为“呼气”。当采空区内部压力低于外部压力时，外部空气向采空区内部涌入，表现为“吸气”。随着两侧压力差不断变化甚至发生正负交替，便形成封闭采空区周期性的“呼吸现象”，引起采空区遗煤自燃及有毒有害气体逸出。因此“呼吸现象”有两方面影响因素：一是采空区存在明显的漏风通道，二是采空区内外压差变化波动。

3. 连通采空区漏风分析

3.1. 井下压能测定

为研究俄霍布拉克煤矿 5 煤层 52105、52107 工作面采空区可能存在的漏风区域，对 5 煤层 52105、52107 及周边巷道采用精密气压计逐点测定法进行压能测定，分析连通采空区的主要漏风敏感区域，压能测定点位如下图 2 所示。

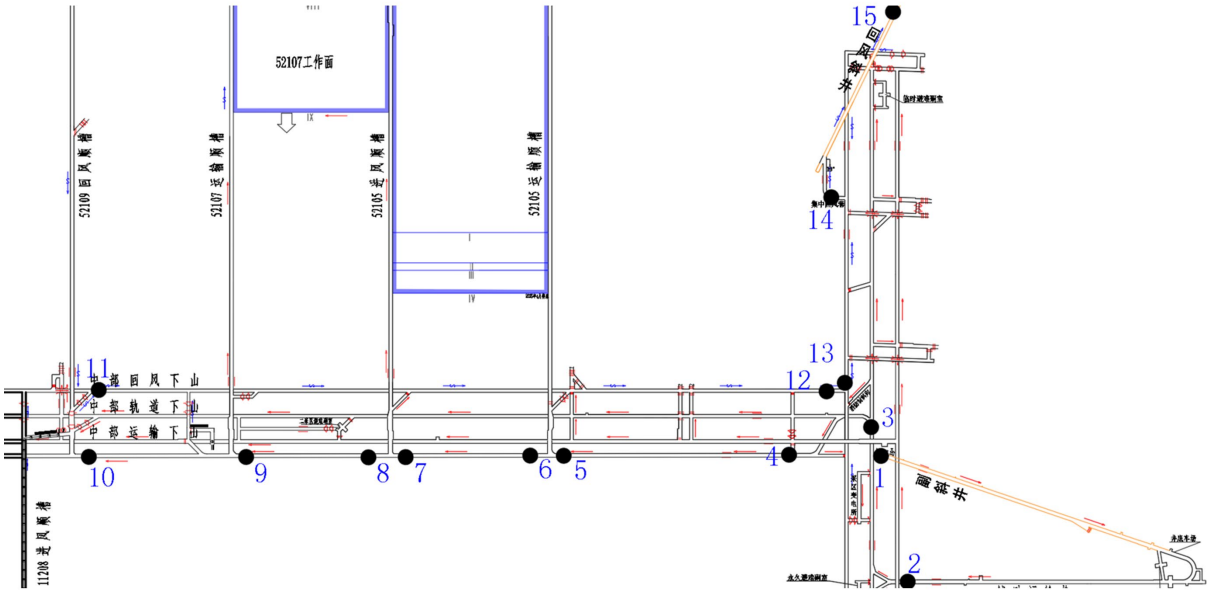


Figure 2. Determination of point position by pressure energy
图 2. 压能测定点位

在矿井正常通风条件下，空气沿巷道流动过程中由于受到巷道摩擦阻力、局部阻力以及其他通风构筑物阻力作用，风流能量会逐渐损失，因此沿风流方向测得的压能总体表现为逐步降低。根据矿井通风阻力理论，巷道风流压降与风量及通风阻力之间存在一定关系，可表示为：

$$\Delta P = RQ^2$$

式中，ΔP 为巷道降压，R 为通风阻力，Q 为巷道风量。在通风系统正常运行条件下，沿主要进、回风路线压能通常随风流方向逐步降低，其变化应与巷道通风阻力及风量相匹配。若相邻测点之间出现明显偏离正常压降规律的局部压能突降，则可能表明该区域存在额外气体泄漏通道。由图 3 压能测定结果可知，副斜井、辅助运输巷、轨道大巷、二采区集中材料巷、回风下山及回风斜井等区域未发现明显异常，属于正常通风损耗。相比之下，52105、52107 工作面相关巷道压能变化较为明显，其中测点 5→6 7→8 压能降低 80.2、93.2 Pa，表现出局部压能异常损耗，表明 52105 和 52107 工作面采空区均具有潜在漏风趋势。

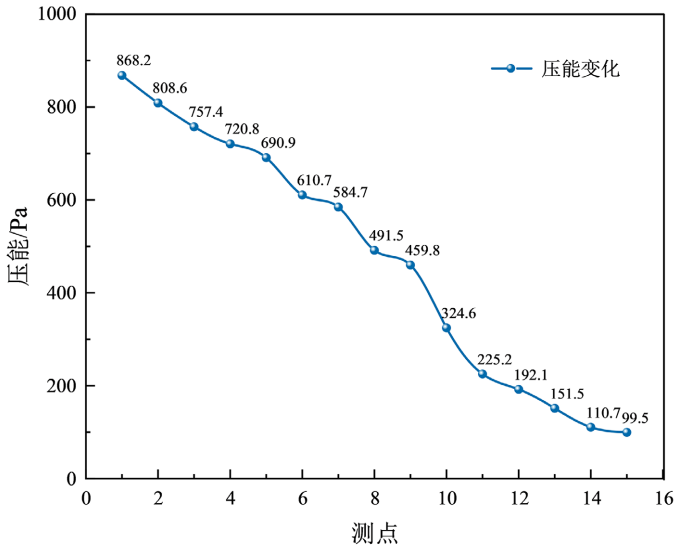


Figure 3. Pressure energy measurement results
图 3. 压能测定结果

3.2. 采空区水平方向连通性测试

为明确 52105 与 52107 工作面采空区之间是否存在水平方向的漏风通道，采用 SF_6 气体示踪方法进行连通性测试。试验过程中，在 52105 运输顺槽密闭处向采空区连续释放 SF_6 气体，通过稳流阀将 SF_6 释放流量稳定控制在 200 mL/min，持续释放 120 min；同时，在 52107 工作面回风隅角设置监测点，以 1 h 为间隔对 SF_6 浓度进行连续监测，监测时间持续 6 h，如图 4 所示。

试验过程中，SF_6 气体首先进入 52105 工作面采空区，若 52105 与 52107 采空区之间存在稳定的气体运移通道，则示踪气体可沿该通道向 52107 采空区迁移，并在相应监测位置被检测到。监测结果表明，SF_6 气体释放约 3 h 后，在 52107 工作面监测点检测到 SF_6 气体，说明示踪气体能够由 52105 采空区迁移至 52107 采空区，由此证明两采空区之间存在水平方向的气体运移通道，具有一定的水平连通性。

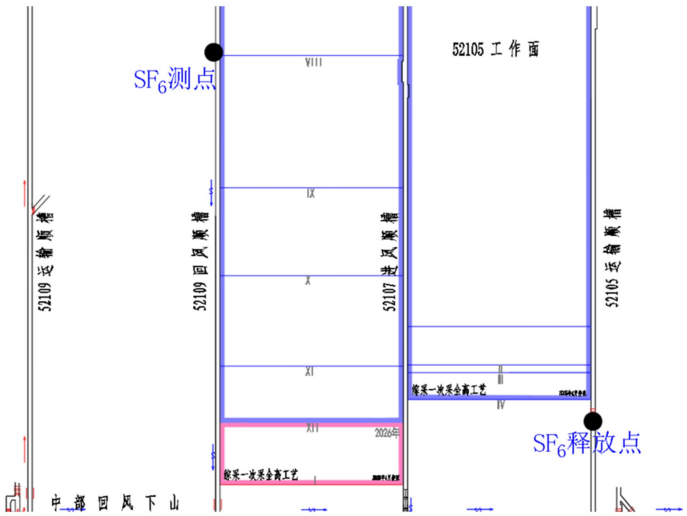


Figure 4. Tracer gas release point
图 4. 示踪气体释放点位

3.3. 地表裂隙与采空区垂直连通性测试

矿井生产过程中地表受采动影响而发育的裂隙与采空区可能会形成漏风通道，导致地表裂隙处为漏风源，井下采空区为漏风汇。煤层在开采过程中往往会引起地表结构的移动和破坏，导致地表发生严重的塌陷和裂缝，为地表向采空区漏风形成了良好的通道。对该煤矿地表进行观测发现存在地表裂隙，如图 5 所示。



Figure 5. Surface fissures
图 5. 地表裂隙

为判断研究区域地表裂隙与采空区之间是否存在气体连通关系，采用 SF_6 气体示踪方法对地表裂隙进行漏风测试。本次地表裂隙漏风测定使用 SF_6 气体示踪法，在观测到的地表裂隙定时连续释放标志性气体 SF_6，如图 6 所示。释放过程中调节稳流阀使 SF_6 气体的释放量稳定为 200 ml/min，并持续向采空区释放 SF_6 气体 120 min。同时在 52107 工作面回风隅角以 1h 为间隔进行连续监测，监测时间持续 6 h。

监测结果表明，在地表裂隙释放 SF_6 气体约 4 h 后，在 52107 工作面回风顺槽密闭处检测到示踪气体，说明 SF_6 能够由地表裂隙向井下采空区迁移，表明研究区域地表裂隙与 52107 采空区之间存在气体运移通道。结合采动裂隙发育特征，可认为研究区域存在由地表裂隙向采空区延伸的垂直方向漏风通道。



Figure 6. SF_6 gas released from surface cracks
图 6. 地表裂隙释放 SF_6 气体

综合井下压能测定及两组 SF_6 气体示踪试验结果，52105 与 52107 采空区之间存在一定的水平方向气体连通关系，同时研究区域地表裂隙与井下采空区之间存在垂直方向气体运移通道，表明研究区域并非单一方向的漏风结构，而是具有一定的三维立体连通特征。其中，井下压能测定结果表明 52105、52107 工作面相关巷道存在较明显的局部压能损耗，说明相应区域具有较高的漏风敏感性；水平示踪试验进一步证明 52105 与 52107 采空区之间存在气体运移通道；地表裂隙示踪试验则表明地表裂隙能够与井下采空区形成气体连通。由此可认为，研究区域采空区漏风网络主要由工作面间采空区连通通道、采动裂隙以及地表裂隙等共同构成。

上述复杂漏风网络为封闭采空区气体交换提供了通道。当外界大气压力发生周期性变化时，采空区内外压差随之发生调整，并可能引起漏风方向发生周期性转换。因此，封闭采空区漏风通道的存在是形成“呼吸现象”的必要条件，而内外压力差的动态变化则为“呼吸现象”提供了驱动力。

4. 连通采空区内外压差波动规律

4.1. 压差监测方法

根据 5 号煤层工作面生产情况及大面积连通采空区实际分布情况，选取 52105 工作面采空区密闭作为压差监测点，以分析 52105、52107 工作面形成的连通采空区密闭压差变化规律。现场采用矿用本安型差压测定器进行监测，测点布置于 52105 运输顺槽密闭处，如图 7 所示。分别监测冬季和夏季并不同月份上旬、下旬的典型日期进行全天候监测，以降低单日偶然波动对分析结果的影响。

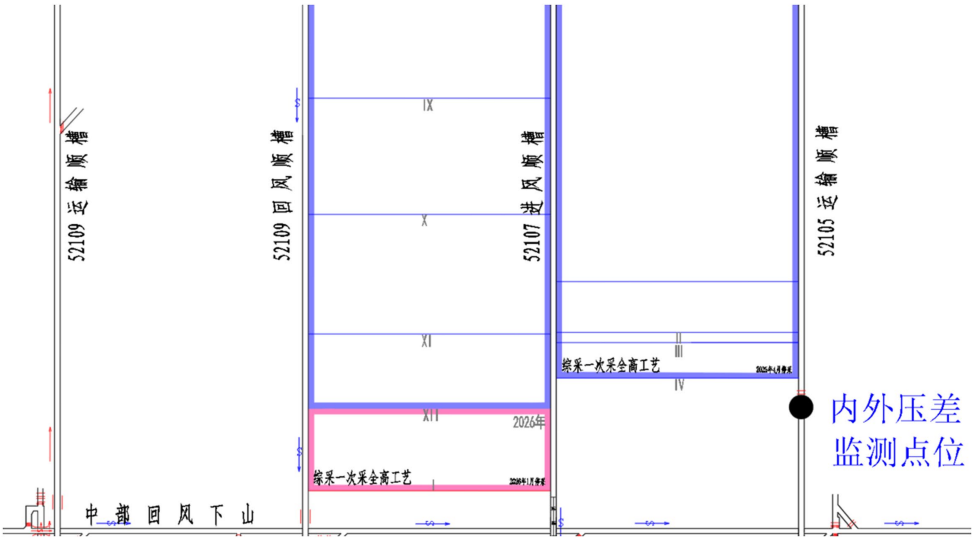
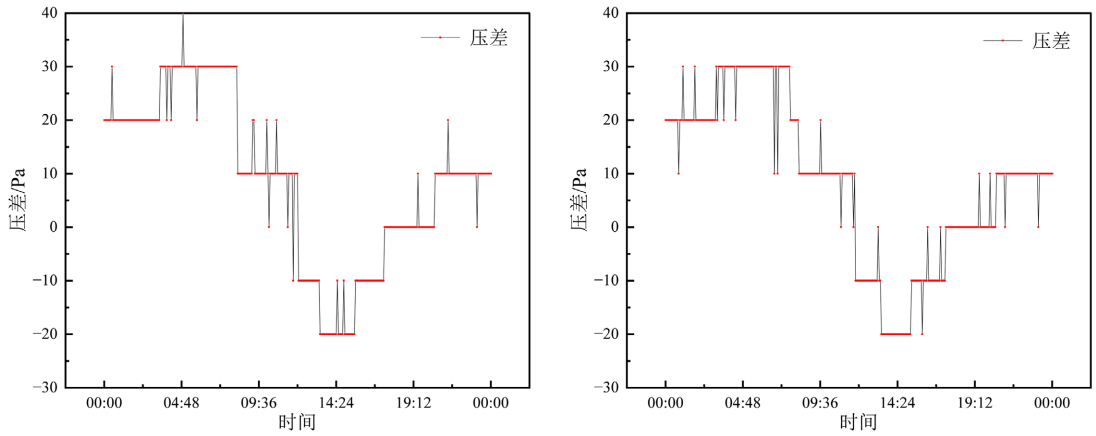


Figure 7. Monitoring points of pressure difference variation law
图 7. 压差变化规律监测点位

4.2. 不同季节采空区内外压差变化规律

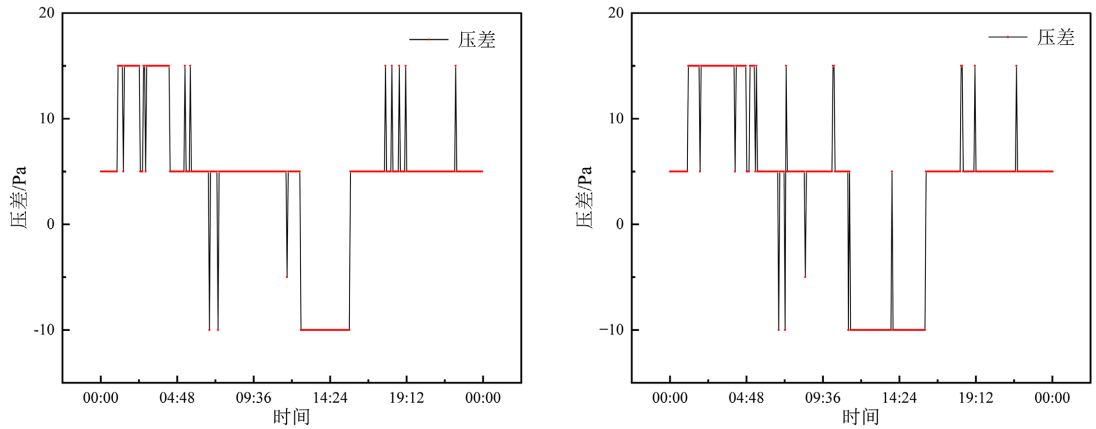
冬季采空区内外压差监测结果如图 8 所示，根据监测结果可知，两组数据变化趋势基本一致，表明密闭压差变化具有较明显的重复性和日周期特征。冬季密闭内外压差总体维持在−20~40 Pa。监测初期压差主要维持在 20~30 Pa，随后逐渐升高至约 30 Pa，局部时段最高达到 40 Pa；约 10 h 后压差持续降低，并在 13~15 h 左右降至约−20 Pa，随后逐渐回升，至 24 h 左右恢复至约 10 Pa。由此可见，冬季密闭压差在一天内经历了由正压向负压、再由负压向正压的变化过程，具有明显的正负交替特征。



(a)冬季上旬压差监测结果　　(b)冬季下旬压差监测结果

Figure 8. Monitoring results of pressure difference inside and outside the goaf in winter
图 8. 冬季采空区内外压差监测结果

夏季监测结果与冬季总体变化趋势较为相似，如图 9 所示。夏季压差整体波动范围较冬季有所缩小，但仍存在明显的正负压转换，监测期间密闭内外压差总体在−10~15 Pa 范围内波动，正常状态下主要维持在约 5 Pa。0~5 h 期间，压差以正压状态为主，并多次短时升高至约 15 Pa；5~10 h 期间，压差总体维持在约 5 Pa，但局部时段出现明显下降，并短时降至−10 Pa；10~16 h 期间，压差进一步降低并在约−10 Pa 附近维持一段时间，表现出较明显的负压状态；16 h 以后，压差重新升高至约 5 Pa，并在部分时段短时升高至约 15 Pa，随后逐渐恢复至约 5 Pa。



(a)夏季上旬压差监测结果　　(b)夏季下旬压差监测结果

Figure 9. Monitoring results of pressure difference inside and outside goaf in summer
图 9. 夏季采空区内外压差监测结果

从两季监测结果可以看出，密闭压差均表现出明显的日周期变化特征，且变化趋势基本一致，说明封闭采空区内外压差并非始终保持绝对稳定状态，而是在外部压力变化影响下发生动态调整。

4.3. 外界因素对采空区内外压差影响

为进一步分析封闭采空区内外压差的外界影响因素，对冬、夏季地表温度和大气压力变化规律进行对比分析，如图 10 所示。监测结果表明，地表温度与大气压力整体呈反向变化关系。冬季监测期间，大

气压力在凌晨至清晨逐渐升高，约 6 h 达到较高值，随后持续降低，并于 15 h 左右降至最低值，之后逐渐回升；同期地表温度则由凌晨的较低水平逐渐升高，于 13 h 左右达到最高值，随后逐渐降低。夏季同样表现出类似变化规律，大气压力在凌晨达到较高水平后逐渐降低，于 14 h 左右达到低值，之后逐步回升，而温度则总体呈先升高后降低的变化趋势，因此温度与大气压总体呈现出负相关趋势。

结合 4.2 节压差监测结果，可以看出大气压力的升高阶段与密闭压差由较高水平向低值变化的过程基本对应，而大气压力降低阶段则对应密闭压差逐渐升高或由负压向正压转变的过程，呈现出负相关趋势。温度则主要通过与大气压力的反向变化间接影响密闭压差。尤其在昼夜温度变化较为明显的条件下，外部大气压力随之发生周期性波动，使封闭采空区内外压差不断调整，甚至出现正负交替。

对于长期封闭的连通采空区而言，其内部气体空间相对封闭，内部压力变化相对于外界大气压力具有一定的滞后性和缓冲特征。因此，当外界大气压力发生变化时，密闭外侧压力首先发生响应，而采空区内部压力不能同步发生等幅变化，从而导致密闭内外压差发生变化。根据伯努利方程及理想气体状态方程等定义封闭采空区内外压差为：

$$\Delta p = p_{内} - p_{外}$$

式中，$p_{内}$ 为采空区内部压力，$p_{外}$ 为密闭外侧压力。当外界大气压力升高而采空区内部压力变化相对滞后时，Δp 减小，甚至可能由正压转变为负压，此时外部空气具有向采空区内部运移的趋势；反之，当外界大气压力降低时，密闭外侧压力下降，而采空区内部压力变化相对滞后，Δp 增大，采空区内部气体则具有向外逸出的趋势。

因此，地表温度并非直接决定采空区内外压差，而是主要通过改变大气热力状态并影响地面大气压力，进一步作用于封闭采空区内外压力平衡。对于存在裂隙、密闭墙漏风及采空区间连通通道的条件，外界压力周期性变化会进一步驱动气体沿漏风通道发生双向迁移。当 Δp 在正、负方向反复变化时，漏风方向随之发生周期性转换，从而形成封闭采空区“呼吸现象”。

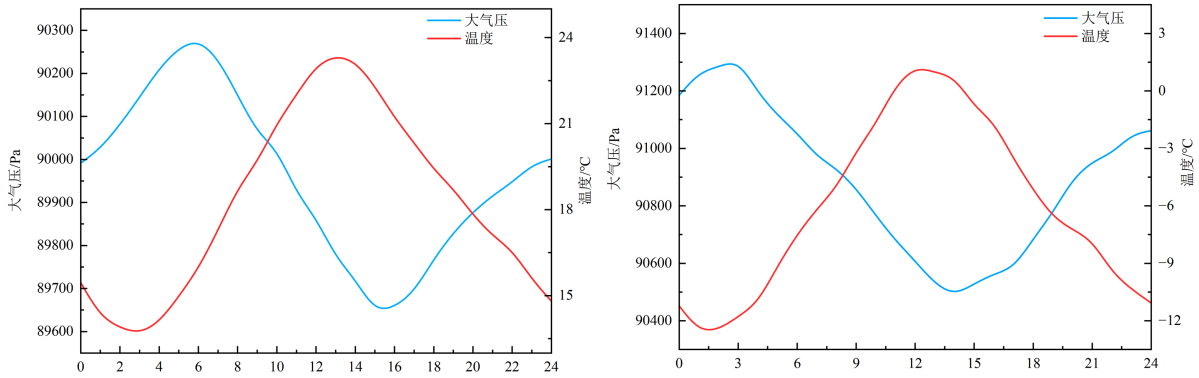


Figure 10. Monitoring results of surface temperature and atmospheric pressure
图 10. 地表温度和大气压力监测结果

综合分析可知，地表温度和大气压力变化是引起封闭采空区密闭压差波动的重要因素。特别是在昼夜温差较大的条件下，外部压力变化更加明显，从而增强封闭采空区内外气体交换的可能性。

5. 采空区抑燃阻逸综合防控技术

结合采空区内外压差监测、压能测定、采空区漏风分析结果，针对封闭采空区频繁出现的“呼吸现

象”，提出抑燃阻逸综合防控技术。一方面，针对 52105、52107 采空区漏风敏感区域及地表裂隙采取封堵措施，减少采空区气体交换通道；另一方面，对连通采空区内外压差进行连续监测，掌握压差变化趋势，在异常压差状态下及时采取相应调控措施，避免因采空区内外压差过大为气体交换提供动力。

5.1. 堵漏风技术

对于 52105、52107 采空区密闭墙漏风问题，采用密闭墙加固方式进行治理。在原封闭采空区老密闭墙外侧增设堵漏风材料，并在其外侧构筑厚度为 1 m 的钢筋混凝土墙，其中堵漏风材料喷射厚度为 0.5 m。施工前首先对原密闭墙表面及周边区域进行检查，清理松散煤岩体和附着物，对明显裂隙及孔洞进行预处理；随后进行钢筋布置及模板支设，并完成堵漏风材料施工和钢筋混凝土墙浇筑。混凝土达到规定养护要求后，对墙体及周边接缝进行气密性检查，发现局部漏风点后进行二次封堵，形成连续密闭结构。

对于顶板及巷帮深部裂隙，采用 FFA 无机泡沫充填及喷涂材料进行封堵。施工过程中首先确定裂隙发育范围和主要漏风位置，对裂隙口及周围松散区域进行清理，然后根据裂隙发育程度采用充填或喷涂方式进行处理，使封堵材料充分填充裂隙空间并与煤岩体表面形成连续密封层。对于较大的裂隙，可采用分段、分层方式进行充填，避免因一次充填量过大造成材料内部缺陷；施工完成后对封堵区域进行复查，确保裂隙及接缝位置不存在明显漏风通道。

对于地表裂隙漏风，采用黏土填充与水泥注浆相结合的方法进行治理。首先对地表裂隙进行现场调查，确定裂隙位置、长度、宽度及发育范围；随后清理裂隙中的松散物和杂物，并采用黏土进行分层填充、压实，以降低裂隙的有效渗透空间。在此基础上，对仍具有明显漏风特征的裂隙进行水泥浆注浆，使浆液进一步进入裂隙内部并形成连续封堵体，从而降低地表与采空区之间的气体交换能力。

5.2. 基于压差变化的动态调控技术

通过设计连通采空区压差监测自动调控系统，如图 11 所示，实现对采空区内外压差进行实时监测，并根据压差监测变化对注氮管路进行实时调控。该系统主要由压差测定器、井下监测分站、地面监测调控平台、PLC 注氮管路等组成，首先在 52105 运输顺槽密闭处安装压差传感器实时监测采空区内外压差变化并将监测数据传输到井下监测分站，监测分站负责将监测数据进行数据汇总，然后传输至监测调控平台，平台对压差监测数据进行实时分析，快速得出相应调控决策并将信号传输至 PLC 注氮控制模块，通过对采空区注氮量进行实时控制。

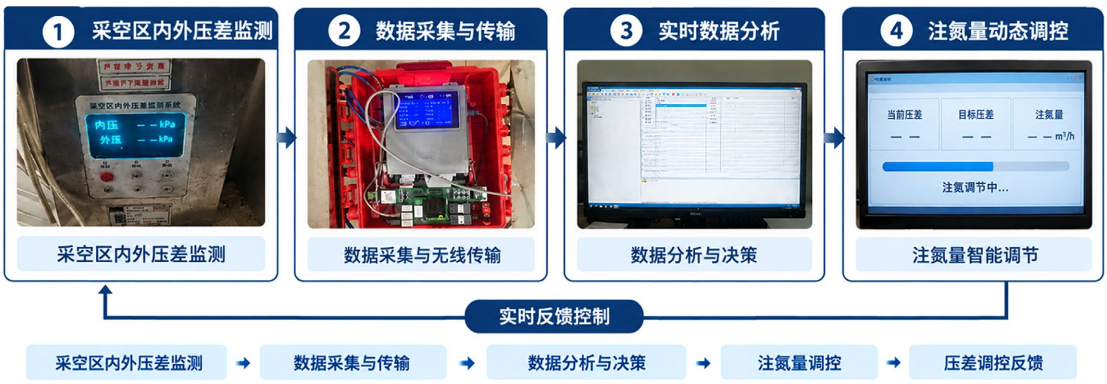


Figure 11. Pressure difference monitoring automatic control system
图 11. 压差监测自动调控系统

根据第三章冬、夏季典型日期压差监测结果，治理前采空区密闭内外压差冬季主要在−20~40 Pa 范围

内波动，夏季主要在−10~15 Pa 范围内波动，且存在明显的正负压交替现象。当压差偏离稳定状态并超过±10 Pa 时，采空区内外压力不平衡程度明显增加。因此，结合现场监测结果、采空区“呼吸现象”变化特征及现场动态调控条件，将±10 Pa 确定为本研究的工程控制阈值。需要注意的是±10 Pa 并非采空区发生漏风、自燃或有害气体逸散的普适临界压力差，而是针对本文研究矿井现场条件确定的工程调控阈值。

动态注氮控制流程如图 12 所示，首先读取采空区内部压力和密闭外侧压力，并计算实时压差；随后对传感器数据进行有效性判断，当数据异常时保持当前注氮状态并发出报警信号，当数据正常时进入压差控制程序。控制程序根据压差所在区间确定增加、保持或减少注氮量的控制指令，并将控制信号发送至 PLC 注氮控制模块。PLC 执行调节后，系统继续采集新的压差数据，根据反馈结果进一步调整注氮量，最终实现采空区压差的动态稳定控制。为避免控制系统出现频繁启停，采用如下控制逻辑：

当 $\Delta P < -10$ Pa，则增加注氮量；当-10 Pa $\le \Delta P < -5$ Pa，则小幅度增加注氮量；当-5 Pa $\le \Delta P \le 5$ Pa，则保持当前注氮量；当 5 Pa $< \Delta P \le 10$ Pa，则小幅度降低注氮量；当 $\Delta P > 10$ Pa，则降低注氮量。

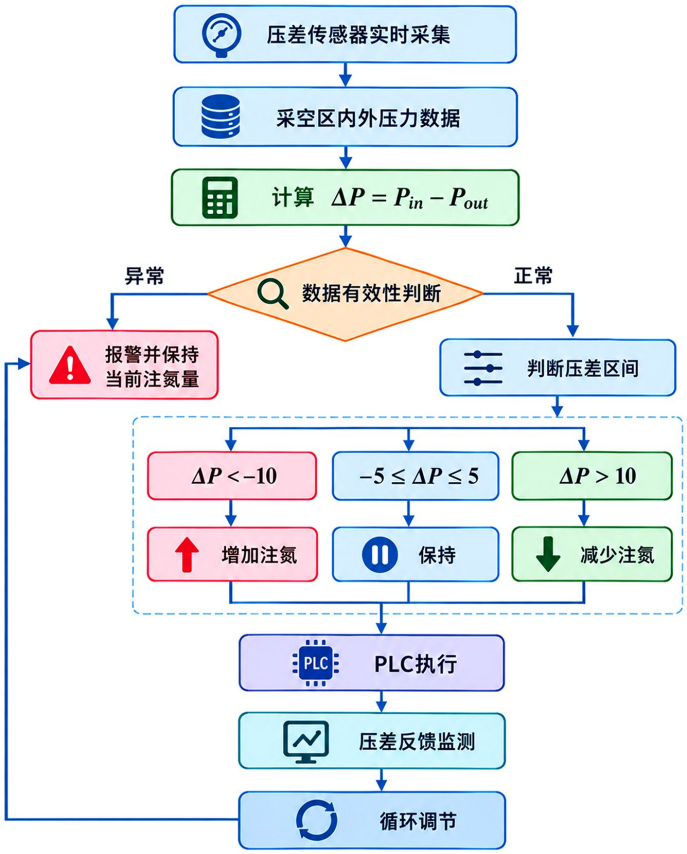
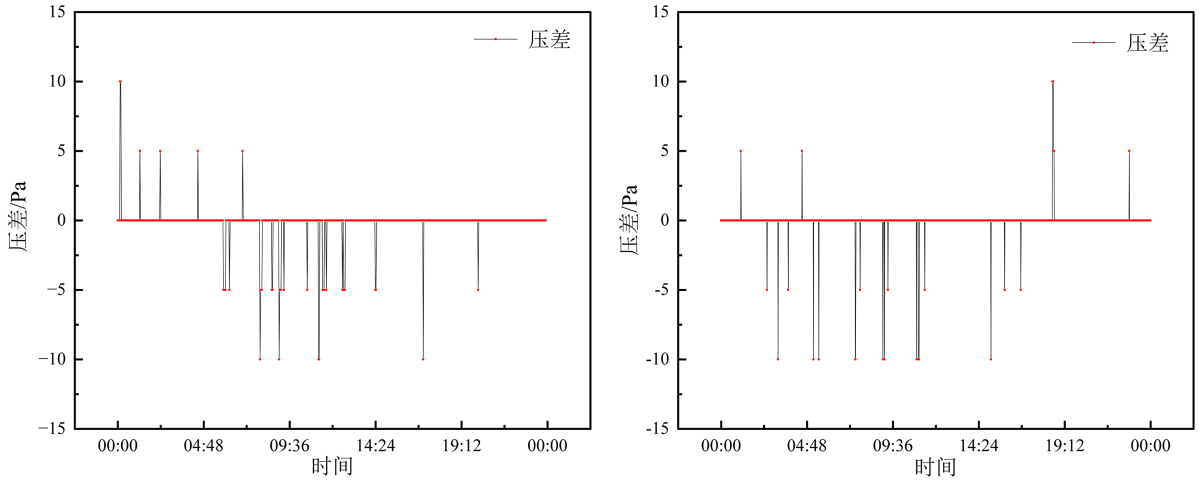


Figure 12. Flow chart of dynamic nitrogen injection control
图 12. 动态注氮控制流程图

5.3. “呼吸现象”综合防控技术应用效果分析

52105、52107 连通采空区应用“呼吸现象”综合防控技术后，对该采空区的内外压差进行第三章冬季与夏季相同月份上旬、下旬的典型日期的全天候监测，监测结果如图 13、图 14 所示。对 52105、52107 连通采空区实施堵漏风与注氮动态调控综合防控技术后，通过冬、夏季典型日期全天候压差监测对比可知，连通采空区压差波动频率和范围明显下降，采取综合防控技术前采空区密闭压差昼夜正负交替明显，

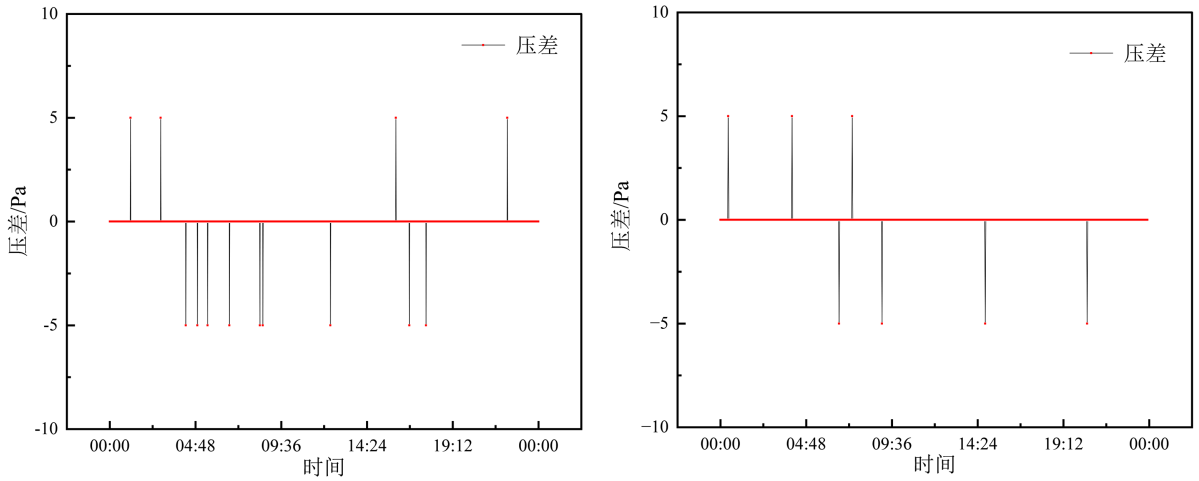
冬季压差波动−20~40 Pa，夏季−10~15 Pa，采空区“呼吸现象”剧烈。采取综合防控技术后，压差波动被控制在−10~10 Pa 阈值范围内，压差大幅正负交替变化现象基本消失，连通采空区“呼吸现象”程度大幅度减弱，大大降低了遗煤自燃风险与有毒有害气体异常涌出风险。



(a)冬季上旬压差监测结果　　(b)冬季下旬压差监测结果

Figure 13. The monitoring results of pressure difference in winter after the application of comprehensive prevention and control technology

图 13. 应用综合防控技术后冬季压差监测结果



(a)夏季上旬压差监测结果　　(b)夏季下旬压差监测结果

Figure 14. Monitoring results of summer pressure difference after the application of comprehensive prevention and control technology

图 14. 应用综合防控技术后夏季压差监测结果

6. 主要结论

(1) 通过 SF_6示踪气体法及井下压能测定，确定 5 号煤层 52105、52107 采空区之间存在水平及垂直方向均存在漏风现象，形成较为复杂的立体漏风网络。其中，52105、52107 采空区密闭区域压能变化较为明显，是连通采空区主要漏风区域。

(2) 连通采空区内外压差具有明显的日周期变化特征，并存在正负压交替现象。冬季密闭压差主要在

−20~40 Pa 范围内波动，夏季主要在−10~15 Pa 范围内波动，“呼吸现象”显著且强弱程度与地表温度呈现负相关、与地表大气压呈现正相关的变化关系。

(3) 针对连通采空区“呼吸现象”，提出采空区抑燃阻逸综合防治技术，通过采用密闭墙加固、FFA 无机泡沫封堵、地表裂隙封堵以及注氮动态调控相结合方法进行综合防控。方法应用后，采空区密闭压差由治理前冬季−20~40 Pa、夏季−10~15 Pa 的较大范围波动，降低并控制在−10~10 Pa 范围内，正负压大幅交替现象基本消失，表明综合防控措施能够有效减弱采空区“呼吸”程度，降低“呼吸”频率，有效降低封闭采空区遗煤自燃及有毒有害气体逸散风险。

(4) 本文以俄霍布拉克煤矿 5 号煤层 52105、52107 工作面连通采空区为研究对象。由于研究对象具有特定的煤层赋存条件、采空区空间结构、采动裂隙发育特征及矿井通风条件，本文所得压差变化规律及防控参数具有一定的矿井条件依赖性，其结论的普适性仍需进一步验证。后续研究应进一步收集不同煤层埋深、不同采空区连通结构及不同通风条件下的现场监测数据，与公开发表的类似矿井研究结果进行对比，分析不同条件下采空区压力响应及漏风特征的共性与差异法，从而提高研究成果的适用范围和工程推广价值。

参考文献

[1] 张农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1635-1641.

[2] 黄艳利, 张吉雄, 巨峰. 巷旁充填沿空留巷技术及矿压显现规律[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(5): 515-520.

[3] 王伟. 沿空留巷巷旁充填支护技术应用研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(5): 129-131.

[4] 张德生, 祝琨, 张赛, 等. 综采工作面快速采煤技术现状及发展趋势[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 1-5.

[5] 秦波涛, 马东. 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究进展及挑战[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 392-408.

[6] 汪浩, 唐明云, 高世强, 等. “呼吸”现象下浅埋极近距离煤层采空区群漏风规律及防控研究[J]. 工矿自动化, 2026, 52(3): 23-33.

[7] 赵启峰, 何洪瑞, 张建伟, 等. 浅埋综放开采地表漏风对遗煤自燃的影响及治理[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 65-69.

[8] 姬举朋, 韩合飞, 母鹏, 等. 近距离煤层群开采大范围连通采空区漏风规律研究[J]. 煤炭技术, 2026, 45(2): 66-70.

[9] 吴祖玉, 唐明云, 高世强, 等. 新集一矿无煤柱开采采空区群漏风检测及防治技术[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 160-168.

[10] 郭明明, 王鑫. 基于多场耦合的采空区“呼吸作用”形成机理与主控因素分析[J]. 中国煤炭, 2025, 51(S1): 205-212.

[11] 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.

[12] 郭翔. 采空区呼吸现象原因分析及瓦斯治理技术研究[J]. 能源技术与管理, 2016, 41(4): 24-26+70.

[13] 刘忠全, 王伟. 联络巷注氮微正压密闭漏风控制技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(9): 81-84+88.

[14] 李建华. 采空区的呼吸现象及防治技术研究[J]. 陕西煤炭, 2012, 31(6): 32-34.

[15] 马敬龙, 袁辉明, 孟凡伦, 等. 大面积采空区密闭压差波动机制与均压自动调控措施研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(5): 100-102.