

文章编号: 1671-251X(2023)10-0104-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023010035

不同季节条件下浅埋煤层采空区 地表垂直漏风规律研究

朱兴攀^{1,2}, 王洋³, 任晓伟³, 晏立^{1,4}, 张林江⁴, 刘文永^{1,4}, 金永飞^{1,4}, 陈玉良⁴

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西陕煤榆北煤业有限公司, 陕西 榆林 719000; 3. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719000; 4. 西安天河矿业科技有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 在采动影响下浅埋煤层综放工作面上覆岩层垮落形成与地表贯通的裂隙, 这些裂隙导致的地表垂直漏风对采空区煤自燃有重要影响。为研究不同季节条件下浅埋煤层采空区地表垂直漏风规律, 分别在冬、春、夏、秋4个季节利用SF₆气体示踪法对陕西陕煤曹家滩矿业有限公司122108工作面进行地表垂直漏风测定, 分析了不同季节地表和井下采空区的温度、大气压强及漏风速率变化规律。结果表明: ①冬季工作面地表和井下采空区之间的温差相对较大, 最大温差可达37.7℃, 夏季工作面地表和井下采空区之间的温差相对较小, 最小温差仅为0.9℃; 冬季工作面地表和井下采空区之间的最大气压差达40.37 hPa, 夏季工作面地表和井下采空区之间的最大气压差为22.47 hPa; 春季和秋季工作面地表和井下采空区之间的温差、气压差则相差不大。②冬季漏风速率相对较大, 平均最大漏风速率达8.364 m/min; 夏季漏风速率相对较小, 平均最大漏风速率为6.918 m/min; 春季与秋季的漏风速率相差不大。③距工作面较近时, 漏风速率较大。根据地表垂直漏风规律, 可采取井下均压、进回风隅角封堵及地表裂隙覆盖等措施, 以保证122108工作面安全开采。

关键词: 浅埋煤层采空区; 地表垂直漏风; 煤自燃; SF₆气体示踪法; 漏风速率

中图分类号: TD728

文献标志码: A

Research on vertical air leakage law of surface in goaf of shallow coal seams under different seasonal conditions

ZHU Xingpan^{1,2}, WANG Yang³, REN Xiaowei³, YAN Li^{1,4}, ZHANG Linjiang⁴, LIU Wenyong^{1,4}, JIN Yongfei^{1,4}, CHEN Yuliang⁴

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. SHCCIG Yubei Coal Industry Co., Ltd., Yulin 719000, China; 3. SHCCIG Caojiatan Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China; 4. Xi'an Tianhe Mining Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Under the influence of mining, the overlying strata of shallow coal seam fully mechanized top coal caving face collapses and forms cracks that connect with the surface. The vertical air leakage caused by these cracks has a significant impact on the spontaneous combustion of coal in the goaf. In order to study the vertical air leakage law of surface in goaf of shallow coal seam under different seasonal conditions, SF₆ gas tracing method is used to measure the vertical air leakage on the 122108 working face of Shaanxi Coal Caojiatan Mining Co., Ltd. in four seasons: winter, spring, summer, and autumn. The temperature, atmospheric pressure, and air leakage rate changes on the surface and underground goaf during different seasons are analyzed. The results show the

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-10-19; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-408)。

作者简介: 朱兴攀(1987—), 男, 甘肃张掖人, 高级工程师, 博士, 主要从事矿井煤自燃机理、煤自燃预测预报、煤自燃监测监控、火灾防治、瓦斯防治、防尘等方面的研究工作, E-mail: zhuxingpan126@163.com。

引用格式: 朱兴攀, 王洋, 任晓伟, 等. 不同季节条件下浅埋煤层采空区地表垂直漏风规律研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(10): 104-109.

ZHU Xingpan, WANG Yang, REN Xiaowei, et al. Research on vertical air leakage law of surface in goaf of shallow coal seams under different seasonal conditions[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(10): 104-109.



扫码移动阅读

following points. ① In winter, the temperature difference between the surface of the working face and the underground goaf is relatively large, with a maximum temperature difference of 37.7 °C. In summer, the temperature difference between the surface of the working face and the underground goaf is relatively small, with a minimum temperature difference of only 0.9 °C. The maximum pressure difference between the surface of the working face and the underground goaf in winter is 40.37 hPa. The maximum pressure difference between the surface of the working face and the underground goaf in summer is 22.47 hPa. The temperature difference and pressure difference between the surface and underground goaf of the working face in spring and autumn are not significantly different. ② The winter air leakage rate is relatively high, with an average maximum air leakage rate of 8.364 m/min. The air leakage rate in summer is relatively small, with an average maximum air leakage rate of 6.918 m/min. The air leakage rates in spring and autumn are not significantly different. ③ When close to the working face, the air leakage rate is relatively high. According to the vertical air leakage law on the surface, measures such as underground pressure equalization, sealing of inlet and outlet air corners, and surface crack coverage can be taken to ensure the safe mining of 122108 working face.

Key words: shallow coal seam goaf; vertical air leakage on the surface; coal spontaneous combustion; SF₆ gas tracing method; air leakage rate

0 引言

在采动影响下,浅埋煤层综放工作面上覆岩层遭到破坏,容易产生裂隙,这些裂隙将地表与井下采空区和工作面连通,使地表空气通过裂隙进入工作面 and 采空区,从而产生地表垂直漏风^[1-3]。由于综放采空区遗煤多,若地表垂直漏风情况严重,会使得采空区漏风规律紊乱、供氧充分^[4-5],导致采空区氧浓度增大、热量积聚,最终可能发生遗煤自燃现象,对安全回采造成严重威胁^[6]。掌握地表垂直漏风规律,减小井下采空区漏风,对矿井安全生产具有重要意义^[7-8]。

通常采用数值模拟方法和 SF₆ 气体示踪法对地表垂直漏风规律进行研究^[9]。数值模拟方法能够较为准确地对地表漏风情况进行模拟^[10]。李建伟^[11]利用数值模拟方法,确定了煤矿不同埋深时地表漏风条件下采空区漏风流场分布规律。邢震^[12]将数值模拟与现场实测相结合,对浅埋厚煤层地表漏风进行分析,以减小采空区漏风对煤自然发火的影响。张杰等^[13]通过物理相似模拟实验揭示了工作面煤层开采过程中上覆岩层垮落形成的裂隙对采空区漏风的影响,同时采取数值模拟的方法进行验证,提出了封堵防治措施以解决工作面漏风问题。SF₆ 气体示踪法适用于大范围采空区,对于漏风位置的检测较为准确^[14-15]。赵启峰等^[16]通过采用“地表与井下采空区气压差、工作面进风巷与回风巷风量差、示踪气体地面瞬时释放法”确定地表漏风各参数。饶孜^[17]利用 SF₆ 气体示踪法查找煤矿漏风通道并分析漏风规律,为采取有效措施预防工作面层间漏风提供支

持。王超群等^[18]通过 SF₆ 气体示踪法及重点区域指标气体数据分析法,对煤矿采空区漏风规律及其治理措施进行了研究。

但大多数学者只研究了一个时间维度的漏风规律。由于季节更替,引起气候、温度、大气压强等环境因子改变,造成采空区出现“呼吸效应”^[19],发生漏风现象。因此,本文分析了不同季节的温度、大气压强变化及释放点随工作面推进的距离与地表垂直漏风之间的关系,并针对地表垂直漏风情况提出合理的治理措施,为矿井防治因漏风引起的煤自燃提供理论指导和依据。

1 工作面概况

陕西陕煤曹家滩矿业有限公司 122108 工作面为 2⁻² 煤层 12 盘区东翼第 2 个回采工作面,为 I 类容易自燃煤层,煤层绝对瓦斯涌出量为 2.90 m³/min,相对瓦斯涌出量为 0.10 m³/t,煤尘具有爆炸性。矿区属于地温正常区,无地热危害,地压为大地静力场型,在构造发育区应力集中。工作面布置如图 1 所示。

由于煤层埋藏较浅,采煤引起煤层上部岩层塌陷,岩石破裂形成的裂隙穿透地层直达地表,形成漏风通道。通过地表塌陷区实地观测考察发现,地表松散堆积物主要为砂土,地表可见多条有规律的裂隙,分别沿工作面走向分布(图 2(a))、工作面倾向分布(图 2(b))及十字交叉分布(图 2(c))。

2 不同季节的地表垂直漏风测定

2.1 测试方法

在不同季节对 122108 工作面采空区地表进行现

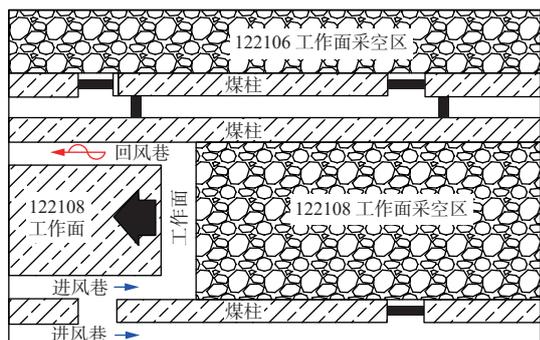


图 1 工作面布置

Fig. 1 Working face layout



(a) 沿工作面走向分布



(b) 沿工作面倾向分布



(c) 十字交叉分布

图 2 地表塌陷区裂隙分布

Fig. 2 Distribution of cracks in surface subsidence area

场漏风测试。由于矿井采用负压抽出式通风,地表处于相对正压状态,所以漏风方向是从地表裂隙进入井下采空区^[20]。本次测试采用 SF₆ 气体示踪法对地表垂直漏风规律进行研究。测试所需仪器主要有便携式 SF₆ 气体检测仪和漏风阻力测定仪。测试时需在地表释放 SF₆ 气体,在井下工作面回风隅角进行检测。地表人员到达指定 SF₆ 气体释放点后,记录地表温度、大气压强数据;待井下人员就位后,从选定的气体释放点处按照一定的量释放 SF₆ 气体,记录 SF₆ 气体释放时间及终止时间;地表释放 SF₆ 气

体后,立即在井下接收点采用便携式 SF₆ 气体检测仪检测,分别记录地表和井下的温度、大气压强数据。

2.2 SF₆ 气体示踪原理

SF₆ 在天然石中不存在,且具有良好的稳定性和可测性,是一种常见的气体示踪剂^[21]。利用 SF₆ 气体测试地表垂直漏风时,如果存在漏风情况,SF₆ 气体能够通过通道且在回风隅角处检测到;如果不存在漏风情况,则在整个回风巷道中不会检测出 SF₆ 气体。

根据地表 SF₆ 气体的释放时间、井下 SF₆ 气体的出现时间、释放点与工作面回风隅角的相对距离,定量计算地表向采空区的漏风速率。由于风流在裂隙中向地层的流动不规则,可通过释放点与工作面回风隅角之间的最长和最短距离来确定最大和最小漏风速率。

$$V_{\max} = \frac{L + (H_d - H_j)}{t} \quad (1)$$

$$V_{\min} = \frac{\sqrt{L^2 + (H_d - H_j)^2}}{t} \quad (2)$$

式中: V_{\max} , V_{\min} 分别为最大、最小漏风速率, m/min; L 为 SF₆ 气体释放点距工作面的水平距离, m; H_d 为地表 SF₆ 气体释放点的标高, m; H_j 为井下 SF₆ 气体监测点的标高, m; t 为 SF₆ 气体释放至终止的时间间隔, min。

2.3 SF₆ 气体释放点布置

在不同季节对工作面地表塌陷区进行现场观察及调研,并在地表选取漏风量相对较大、与工作面连通较好的主运输巷道和回风巷道,以及由于工作面周期来压导致裂隙较大的位置作为 SF₆ 气体释放点, SF₆ 气体释放量为 32 L。由于 122108 工作面北邻 122106 工作面采空区,122106 工作面采动塌陷产生的地表裂隙可能会与 122108 工作面贯通,所以在选择地表 SF₆ 气体释放点时应考虑 122106 工作面及 122108 工作面地表裂隙的漏风情况。在选定的释放点做好标记,并记录每个季节各释放点位置坐标。地表 SF₆ 气体释放点布置如图 3 所示,其中 A₁—A₆, B₁—B₆, C₁—C₆, D₁—D₅ 分别对应冬季、春季、夏季、秋季的 SF₆ 气体释放点。

3 结果分析

3.1 SF₆ 气体示踪结果分析

不同季节地表和井下采空区温度变化如图 4 所示。可看出冬季地表和井下采空区的温差最大,地表温度为零度以下,井下采空区温度均在 20 ℃ 以

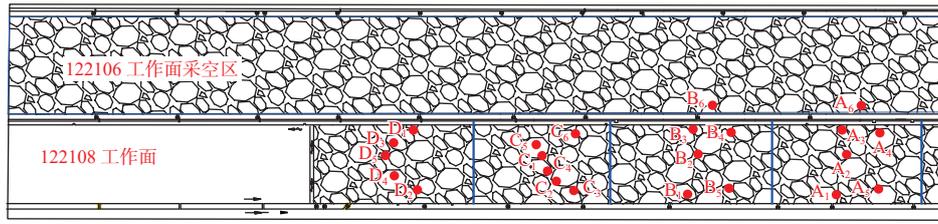


图3 SF₆气体释放点布置

Fig. 3 SF₆ gas release point arrangement

上,最大温差达37.7℃;夏季地表和井下采空区的温差不大,最小温差只有0.9℃。

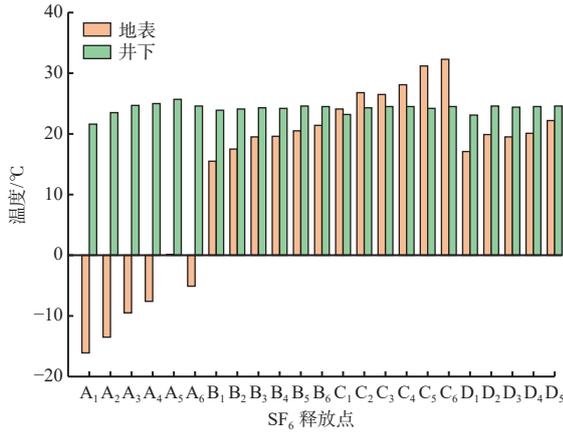


图4 不同季节地表和井下采空区温度

Fig. 4 Temperature of surface and underground goaf in different seasons

不同季节地表和井下采空区大气压强变化如图5所示。可看出冬季地表和井下采空区之间的气压差相较于其他3个季节较大,6个SF₆气体释放点中的最大气压差为40.37 hPa;夏季地表和井下采空区之间的气压差相较于其他3个季节较小,6个SF₆气体释放点中的最大气压差为22.47 hPa;春季和秋季的地表和井下采空区气压差则相差不大。

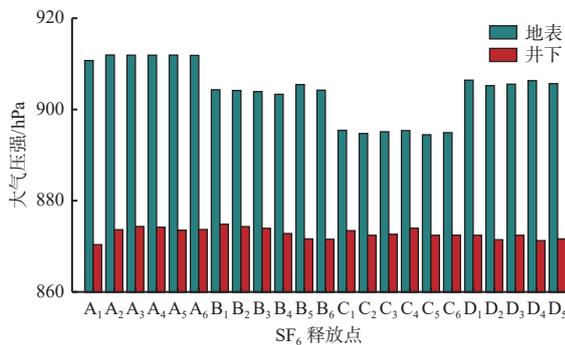


图5 不同季节地表和井下采空区大气压强

Fig. 5 Pressure of surface and underground goaf in different seasons

由图4和图5可知,冬季地表和井下采空区之间的温差、气压差均比夏季大。这是由于季节更替,地表受自然环境的影响,温度和大气压强变化较大,而井下采空区属于半密闭环境,温度和大气压强变化

相对较小,所以导致在不同季节地表和井下采空区的温差和气压差均存在明显差异。

通过式(1)和式(2)计算得到不同季节漏风速率,如图6所示。可看出23个SF₆气体释放点中有21个SF₆气体释放点检测出有漏风情况,漏风比例(存在漏风情况的释放点数量与总释放点数量的比值)高达91.3%。由于季节更替造成地表和井下采空区温差、气压差变化较大,导致漏风速率有明显不同。冬季时漏风速率普遍大于其他3个季节,最大漏风速率范围为6.017~9.683 m/min,平均最大漏风速率为8.364 m/min,最小漏风速率范围为4.301~6.871 m/min,平均最小漏风速率为5.948 m/min;夏季时漏风速率相对较小,最大漏风速率范围为5.825~8.124 m/min,平均最大漏风速率为6.918 m/min,最小漏风速率范围为4.175~5.895 m/min,平均最小漏风速率为4.966 m/min;春季与秋季时漏风速率相差不大。

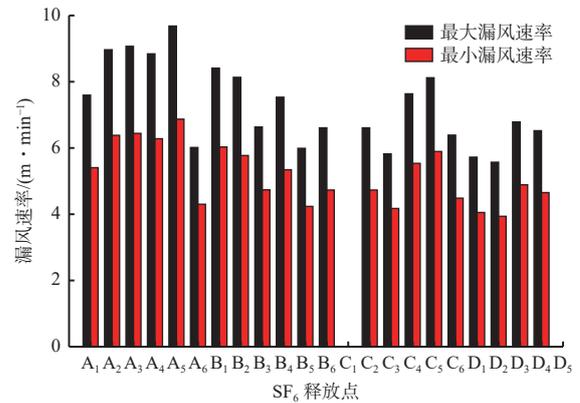


图6 不同季节漏风速率

Fig. 6 Air leakage rate in different seasons

不同季节平均漏风速率随SF₆气体释放点距工作面距离变化如图7所示。可看出SF₆气体释放点距工作面较远时,漏风速率相对较小;SF₆气体释放点距工作面距离较近时,漏风速率相对较大。这是由于距工作面较远的地表裂隙由于塌陷时间较长,可能被地表砂土填埋,裂隙相对较窄,所以漏风速率相对较小;距工作面较近的地表裂隙由于塌陷区初步形成,裂隙发育条件较好,数量相对较多,所以漏

风速率相对较大。

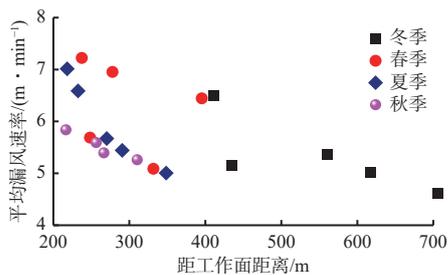


图 7 不同季节平均漏风速率随工作面距离变化

Fig. 7 Variation of average air leakage rate with distance from working face in different season

3.2 防治措施

根据现场情况和测试结果综合分析, 122108 工作面地表垂直漏风情况严重, 可能影响煤矿安全开采, 因此有必要采取一定的防治措施。

1) 针对季节变化, 在井下采空区采取均压措施, 实时调整地表和井下采空区之间的气压差, 尽可能使井下采空区与地表大气压强相等, 以防采空区出现“呼吸效应”, 减小地表漏风。

2) 根据季节不同对工作面进回风隅角处采取不同的封堵措施。冬季地表和井下采空区之间气压差较大, 漏风情况严重, 可采用黄土袋作为封堵材料, 在进回风隅角处设置封堵墙; 春秋季节漏风相对较小, 可采用风筒布进行封堵; 夏季地表和井下采空区之间气压差最小, 漏风情况不严重, 可不采取封堵措施。

3) 根据季节不同对地表裂隙采取不同的覆盖措施。夏季地表和井下采空区之间气压差最小, 对裂隙进行填平处理; 春秋季应覆盖裂隙高出地面 0.5 m 厚度; 冬季气压差最大, 应覆盖裂隙高出地面 1 m 厚度。安排巡检人员对地表进行定期检查, 发现裂隙应及时填埋。

4 结论

1) 122108 工作面在不同季节条件下地表和井下采空区温差、气压差存在明显差异: 冬季地表和井下采空区之间的温差、气压差相对较大; 夏季地表和井下采空区之间的温差、气压差相对较小; 春季和秋季地表和井下采空区之间的温差、气压差则相差不大。

2) 采空区冬季漏风情况最严重, 平均最大漏风速率达 8.364 m/min; 夏季漏风相对较小, 平均最大漏风速率为 6.918 m/min; 春季与秋季的漏风速率相差不大。距工作面较近的地表漏风速率相对较大。

3) 针对季节变化提出漏风治理措施: 在井下采空区采取均压措施; 在工作面进回风隅角处采取封堵措施; 对地表近工作面的裂隙进行覆盖。

参考文献(References):

[1] 王炯, 刘鹏, 姜健, 等. 切顶卸压沿空留巷回采工作面 Y 型通风漏风规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 625-633.
WANG Jiong, LIU Peng, JIANG Jian, et al. Y-shaped ventilation air leakage law of working face of gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 625-633.

[2] 赵志超, 郭春雨. 阻隔采空区漏风通道方法研究[J]. 中国煤炭, 2022, 48(增刊 1): 142-147.
ZHAO Zhichao, GUO Chunyu. Study on a method for air leakage channel blocking in goaf[J]. China Coal, 2022, 48(S1): 142-147.

[3] LI Jianwei, LI Xintian, LIU Changyou, et al. Study on the air leakage characteristics of a goaf in a shallow coal seam and spontaneous combustion prevention and control strategies for residual coal[J]. PLOS ONE, 2022, 17(6). DOI: 10.1371/journal.pone.0269822.

[4] 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 Daiyue, AI Zibo, LI Peng. Analysis and governance of air leakage law in goaf of shallow coal seam mining[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 1-6, 33.

[5] 王建文, 张辛亥, 李龙清, 等. 塌陷裂隙漏风规律现场测定与分析[J]. 煤矿安全, 2010, 41(11): 89-91.
WANG Jianwen, ZHANG Xinhai, LI Longqing, et al. Field measurement and analysis of air leakage law of collapse fracture[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(11): 89-91.

[6] 秦波涛, 高远, 史全林, 等. 近距离煤层复合采空区煤自燃综合防治技术[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 1-6, 17.
QIN Botao, GAO Yuan, SHI Quanlin, et al. Comprehensive prevention and control technology of coal spontaneous combustion in compound goaf of close distance coal seam[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 1-6, 17.

[7] 刘昆轮, 常博, 马祖杰, 等. 自然风压作用下工作面采空区漏风特征研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 38-43.
LIU Kunlun, CHANG Bo, MA Zujie, et al. Research on air leakage characteristics in goaf of working face under natural wind pressure[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 38-43.

[8] TANG Mingyun, YAO Guanlin, QIN Ruxiang, et al. Numerical analysis of the influence of ventilation at working face on air leakage in gob[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2018,

- 11(6):54-61.
- [9] 管隆刚,马会云,罗肖,等.小保当一号煤矿采空区垂直漏风规律研究[J].*陕西煤炭*,2023,42(2):91-94,119.
GUAN Longgang, MA Huiyun, LUO Xiao, et al. Study on vertical air leakage law in goaf of Xiaobaodang No. 1 Coal Mine[J]. *Shaanxi Coal*, 2023, 42(2): 91-94, 119.
- [10] 文虎,赵阳,肖旸,等.深井综放采空区漏风流场数值模拟及自燃危险区域划分[J].*煤矿安全*,2011,42(9):12-15.
WEN Hu, ZHAO Yang, XIAO Yang, et al. Modeling of flow field and partition of spontaneous combustion danger zone in gob of fully mechanized caving face in deep coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(9): 12-15.
- [11] 李建伟.西部浅埋厚煤层高强度开采覆岩导气裂缝的时空演化机理及控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
LI Jianwei. Spatial-temporal evolution mechanism and control technology of air leakage fissures in high-intensity mining of shallow thick coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [12] 邢震.浅埋厚煤层地表漏风对采空区煤自燃影响数值模拟研究[J].*工矿自动化*,2021,47(2):80-87,103.
XING Zhen. Numerical simulation study on the influence of surface air leakage in shallow thick coal seam on coal spontaneous combustion in goaf[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(2): 80-87, 103.
- [13] 张杰,张建辰,刘清洲,等.浅埋综采工作面覆岩裂隙发育及漏风规律研究[J].*煤炭工程*,2021,53(3):118-123.
ZHANG Jie, ZHANG Jianchen, LIU Qingzhou, et al. Crack development and air leakage law of overburden rock in shallow fully mechanized face[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(3): 118-123.
- [14] 刘思鑫,李洪先,王国芝,等.基于SF₆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 SF₆ tracer test[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(12): 166-170.
- [15] 徐庶泽,王法凯.SF₆示踪气体在新集二矿1上煤采空区漏风检测中的应用[J].*煤矿机械*,2018,39(2):116-119.
XU Shuze, WANG Fakai. Application of SF₆ in air leakage detection of goaf-a case in Xinji No. 2 Mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2018, 39(2): 116-119.
- [16] 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.
ZHAO Qifeng, HE Hongrui, ZHANG Jianwei, et al. Surface air leakage of fully-mechanized top coal caving mining in shallow depth seam affected to abandoned coal spontaneous combustion and control[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 65-69.
- [17] 饶孜.SF₆示踪气体漏风测试技术在白皎煤矿的应用[J].*煤矿安全*,2018,49(6):122-125.
RAO Zi. Application of SF₆ tracer gas leakage test technology in Baijiao Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(6): 122-125.
- [18] 王超群,周明,郭英,等.近距离煤层群采空区漏风规律及防控措施研究[J].*矿业安全与环保*,2020,47(2):81-84.
WANG Chaoqun, ZHOU Ming, GUO Ying, et al. Study on the air leakage law and prevention and control measures in goaf of close-distance coal seam group[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2020, 47(2): 81-84.
- [19] 郁亚楠,赵庆伟,程明,等.特厚煤层孤岛面“呼吸效应”影响下煤自燃防控技术[J].*西安科技大学学报*,2022,42(1):76-82.
YU Yanan, ZHAO Qingwei, CHENG Ming, et al. Prevention and control techniques against coal spontaneous combustion under the influence of "breathing effect" in isolated island working face of extra-thick coal seam[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(1): 76-82.
- [20] 徐会军,刘江,徐金海.浅埋薄基岩厚煤层综放工作面采空区漏风数值模拟[J].*煤炭学报*,2011,36(3):435-441.
XU Huijun, LIU Jiang, XU Jinhai. Numerical simulation research on gob air leakage of shallow-buried thin bedrock thick coal seam with fully-mechanized top coal caving technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 435-441.
- [21] 郑力文,敖科,袁琴,等.六氟化硫(SF₆)标准物质的研制及其在油气田示踪剂定量分析中的应用[J].*中国测试*,2022,48(3):66-71.
ZHENG Liwen, AO Ke, YUAN Qin, et al. Study on the reference material of sulfur hexafluoride (SF₆) and application on quantitative analysis of oil-gas field tracer[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(3): 66-71.