

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.04.012.

兴隆庄煤矿采空区自燃“三带”分布规律研究

田向红¹, 梁远建¹, 朱玉健², 上官良良¹, 范立宇¹

(1. 兖矿能源集团股份有限公司兴隆庄煤矿, 山东 济宁 272100; 2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为给兴隆庄煤矿采空区遗煤自燃防控工作提供理论和技术支持, 以该矿 10310 工作面为研究对象, 利用束管监测系统对采空区氧气浓度及温度进行监测, 并用 FLUEN 进行数值模拟工作, 得到了工作面采空区自燃“三带”分布规律以及进回风两巷道隔离墙对自燃“三带”分布的影响规律。结果表明: 工作面采空区布置间隔 20 m 隔离墙时氧化带范围为进风侧 12.95~37.2 m, 回风侧 2.15~19.45 m; 无隔离墙时氧化带范围为进风侧 35~71 m, 回风侧 13~38 m; 在进回风巷两侧设置隔离墙可有效减少采空区漏风, 自然发火危险性降低。准确划分自燃“三带”的范围对于工作面采空区遗煤自燃防控工作具有重要意义。

关键词:煤自燃; 自燃“三带”; 数值模拟; 隔离墙

中图分类号: TD75⁺2.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0797(2025)04-0054-06

Study on the distribution of spontaneous combustion "three zones" in goaf of Xinglongzhuang Coal Mine

TIAN Xianghong¹, LIANG Yuanjian¹, ZHU Yujian², SHANGGUAN Liangliang¹, FAN Liyu¹

(1. Yankuang Energy Group Co., Ltd. Xinglong Zhuang Coal Mine, Jining 272100, China;

2. School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to provide theoretical and technical support for the prevention and control of spontaneous combustion of abandoned coal in the goaf of Xinglongzhuang Coal Mine, taking 10310 working face of the mine as the research object, the oxygen concentration and temperature in the goaf were monitored by the beam tube monitoring system, and numerical simulation work was carried out with FLUEN. The distribution law of the "three zones" of spontaneous combustion in the goaf of working face and the influence law of the separation wall of the inlet and return air on the distribution of the "three zones" of spontaneous combustion are obtained. The results show that the oxidation zone ranges from 12.95~37.2 m on the air inlet side and 2.15~19.45 m on the air return side when the separation wall is arranged with an interval of 20 m in the goaf of working face. When there is no separation wall, the oxidation zone range is 35~71 m on the intake side and 13~38 m on the return side. Setting isolation walls on both sides of air inlet and return roadway can effectively reduce air leakage in goaf and reduce the risk of spontaneous ignition.

Key words: spontaneous combustion of coal; spontaneous combustion "three zones"; numerical simulation; gel partition wall

0 引 言

我国作为世界产煤大国, 煤炭资源储量丰富, 但在煤炭开采过程中会伴随着安全问题。其中, 采空区遗煤自燃是煤炭开采中常见的一种安全隐患, 为了预防采空区发生遗煤自燃, 利用先进的探测技术, 根据探测结果和实际情况, 对采空区遗煤自燃“三带”范围进行有科学依据的准确划分。

我国相关专家和学者对采空区遗煤自燃“三带”范围的科学划分开展了研究, 取得了大量成果。李璐璐、刘保成等人^[1-4]针对厚煤层综放工作面采空区煤自燃问题, 采用现场测定或现场测定与数值模拟

相结合的手段对采空区自燃“三带”分布特征及其防治方法进行了研究。杨根发、延建鹏等人^[5-7]针对 Y 型通风条件下工作面自燃“三带”划分与防治措施进行了研究。王忠桥等人^[8]以柴里煤矿 3606 综采工作面为研究背景, 利用束管监测系统对采空区气体进行实时监测与分析, 确定了 3606 综采作业面采空区二维平面氧化带范围。肖正江、冯志刚等人^[9-13]针对浅埋煤层采空区自燃“三带”分布及划分进行了研究。文虎、王正帅等人^[14-18]针对不同通风情况下采空区自燃“三带”的划分进行了研究。

基于以上分析, 根据兴隆庄煤矿 10310 工作面的开采情况, 通过预埋束管对采空区进、回风侧的

收稿日期: 2024-11-01

作者简介: 田向红 (1980-), 男, 陕西宝鸡人, 副高级工程师, 本科, 从事煤炭生产技术管理工作。E-mail: 13953740804@163.com

氧气浓度、温度进行了监测。利用 FLUENT 对工作面采空区进行模拟,将现场实测数据与数值模拟结果互相佐证,验证了模型准确度,并模拟了不同间隔的隔离墙以及无隔离墙对采空区自燃“三带”的影响。这些数据将提供采空区内氧气浓度分布的详细信息,对于判断自燃“三带”的范围具有重要的参考价值,为工作面采空区遗煤自燃“三带”范围划分提供了指导。

1 工作面概况

10310 工作面位于十采区中部,轨顺与 10306 采空区相邻,切眼与 10309 运顺相邻,西部为实体煤,停采线北面为十采一横皮带巷。开采水平为 -350 水平,工作面标高 -332.6 ~ -428.5 m。

工作面长 301.6 m,推进长度 949.7 ~ 1012.0 m,工作面面积: 297 155.77 m²。煤层平均厚度为 9.1 m,视密度为 1.35 t/m³,基础储量为 365.06 万 t。根据《山东省煤矿绿色矿山建设规范》,回采率为 85%,可采储量为 310.29 万 t。经鉴定 3 煤为 II 类自燃,有自然发火倾向,最短自然发火期 44 d。工作面采用隔离墙作为主要防漏风措施,施工过程中每隔 20 m 在进回风两侧设置一道隔离墙,每道隔离墙长 4 m,高 3.5 m,厚 1 m。

2 采空区自燃“三带”现场观测

2.1 自燃“三带”划分标准

煤矿采空区自燃“三带”划分标准主要包括三类:采空区氧气浓度、采空区内部升温速率和采空区内部漏风速率。利用束管采气系统采集采空区深部测点的空气,测定得到氧气浓度,根据氧气浓度进行“三带”划分。现场观测的标准一般为氧气浓度 $\geq 18\%$ 为散热带; $8\% \leq$ 氧气浓度 $< 18\%$ 为氧化带; 氧气浓度 $< 8\%$ 为窒息带^[19]。利用测温探头可观测采空区深部测点的升温速率,但由于采空区遗煤和矸石导热系数较小,致使采空区内部空气的热对流、热传导和热辐射作用都受到一定程度的限制,难以保证热量能够快速高效地传输到测点位置^[20],限制了该技术在工作现场的实际应用。利用微风传感器可进行采空区深部测点的风速测量,但由于采空区深部风流及其微弱,现有微风测量技术难以精准测量,因此实际工作中也限制了该技术的应用。

本试验综合考虑观测技术成熟度、测量现场实际工况等因素,选择对采空区氧浓度观测作为自燃“三带”划分的主要依据,以温度作为参考,具体划

分标准如前所述。

2.2 测试方案及测点布置

测试方案采用铺设保护管路的方法来保护采气束管和温度传感器。通过管路末端的抽气泵抽取采空区气体并送至地面分析,得出采空区各测点在不同埋深下氧气的浓度、温度变化规律,据此确定 10310 工作面采空区自燃“三带”范围。测点布置如图 1 所示,在工作面轨顺、运顺靠近工作面的位置各布置 2 个测点,相邻两测点间距为 30 m。

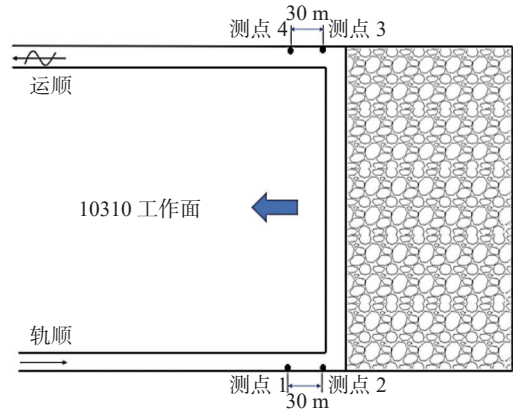


图 1 采空区“三带”观测测点布置示意

2.3 数据采集

每隔 1 ~ 2 日采样一次,通过管路用抽气泵抽取采空区气样,由取样球胆承载送至地面,用气相色谱仪进行分析,使用万用表 2MA 的量程连接测温导线,将记录的电流大小换算为对应的采空区温度,并随时记录工作面推进相关的束管检测点的位置。

3 数据分析

通过每个测点的观测数据,得出进、回风侧采空区内部各点的氧气浓度、温度变化规律,为直观揭示采空区氧气浓度及温度变化规律,将所测数据作成折线图并进行拟合分析,如图 2—图 5 所示。

对进风巷 1 号测点拟合得出的回归方程:

$$y = 19.36401 + 0.31892x - 0.04717x^2 + 0.00121x^3 - 0.0000124014x^4 + 0.0000000448226x^5;$$

将 $y_1=18$, $y_2=8$ 分别代入,得出 $x_1 \approx 12.7$ m, $x_2 \approx 36.9$ m。

对进风巷 2 号测点拟合得出的回归方程:

$$y = 18.24217 + 0.4828x - 0.05338x^2 + 0.00129x^3 - 0.0000126135x^4 + 0.000000043981x^5;$$

将 $y_1=18$, $y_2=8$ 分别代入,得出 $x_1 \approx 13.2$ m, $x_2 \approx 37.5$ m。

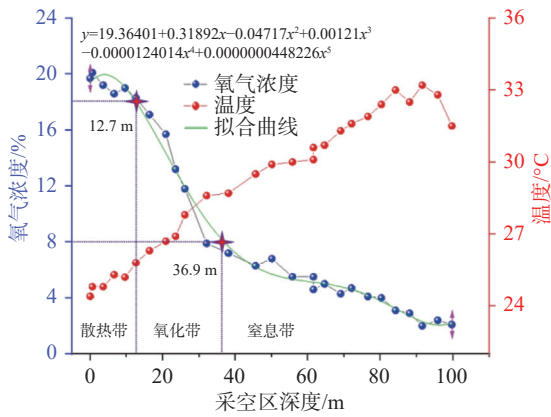


图2 进风巷1号测点氧气浓度及温度变化规律

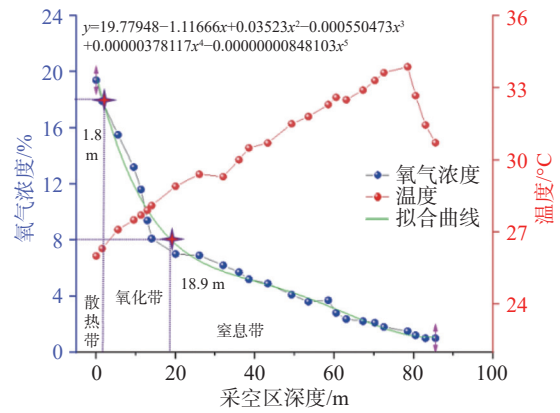


图5 回风巷4号测点氧气浓度及温度变化规律

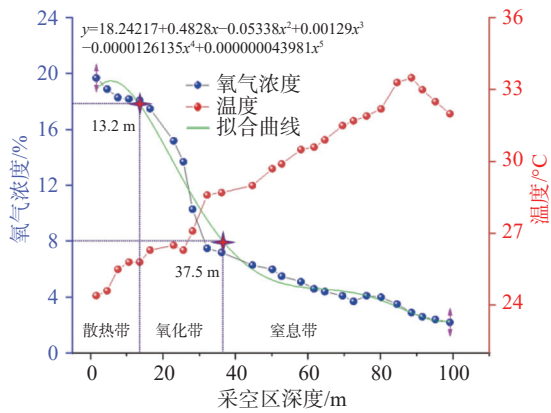


图3 进风巷2号测点氧气浓度及温度变化规律

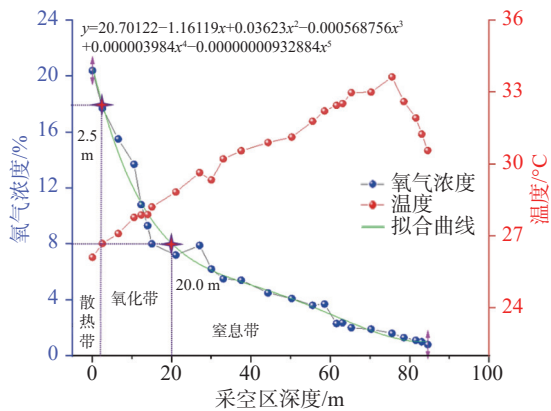


图4 回风巷3号测点氧气浓度及温度变化规律

对二者求平均值最终得出工作面进风一侧自燃“三带”宽度为：散热带0~12.95 m，氧化带12.95~37.2 m。

对回风巷3号测点拟合得出的回归方程：

$$y=20.70122-1.16119x+0.03623x^2-0.000568756x^3+0.000003994x^4-0.00000009329x^5;$$

将 $y_1=18$, $y_2=8$ 分别代入，得出 $x_1 \approx 2.5\text{m}$, $x_2 \approx 20\text{m}$ 。

对回风巷4号测点拟合得出的回归方程：

$$y=19.77948-1.11666x+0.03523x^2-0.000550473x^3+0.000003781x^4-0.00000008481x^5;$$

将 $y_1=18$, $y_2=8$ 分别代入，得 $x_1 \approx 1.8\text{m}$, $x_2 \approx 18.9\text{m}$ 。

对二者求平均值最终得出10310工作面回风一侧自燃“三带”宽度为：散热带0~2.15 m，氧化带2.15~19.45 m。

由上述拟合分析可看出，当进风巷2个测点距工作面超过12.95 m时，氧气浓度降至18%以下，但是下降幅度较小，这是因为这个距离刚进入采空区不深，上覆岩层垮落但并未压实，孔隙率高漏风强度大，故氧气浓度虽呈下降趋势但下降幅度不大。随着工作面继续推进，采空区里测点距工作面超过37.2 m时，氧气浓度降至8%以下。结合折线图可清楚看出，氧气浓度在测点距工作面10~30 m呈现明显下降趋势，由18%降至8%左右。这是因为随着测点不断深入采空区，上覆岩层逐渐开始冒落，导致碎石不断压实，孔隙率大幅降低，漏风强度随之减少，漏风量减小，氧气浓度也急剧减小；当工作面继续推进，测点距工作面超37.2 m时，氧气浓度继续降低，已经低于8%，进入窒息带。这是因为，测点进入压实区，压实程度较大，孔隙率极低，漏风量极小，缺少氧气供应。

回风侧的氧气体积分数变化规律与进风侧相似，但是氧气体积分数的变化比进风侧的氧气体积分数变化超前。从图中可看出，氧气体积分数整体呈下降趋势，工作面15 m范围内氧气体积分数下降幅度较大。随着工作面的不断推进，测点距工作面不断远离，回风侧的氧气浓度达到18%、8%以下时测点与工作面的距离分别位于2.15、19.45 m处。这是

因为回风巷一侧的采空区的风主要来自于进风侧，由进风侧进入的风沿着采空区倾向运移至回风侧采空区，在这个过程中已经受到沿途遗煤氧化耗氧并释放产物气体的影响，导致氧气浓度降低。进风巷隅角处为漏风源，进风巷一侧的采空区较回风巷采空区漏风量大，且风流较为新鲜，氧气含量高。因此，回风巷一侧采空区较之进风巷一侧采空区氧气浓度下降速度快。采空区“三带”划分表见表1。

表1 采空区“三带”划分表

位置	散热带 (m)	氧化带 (m)	窒息带 (m)
进风侧	0 ~ 12.95	12.95 ~ 37.2	>37.2
回风侧	0 ~ 2.15	2.15 ~ 19.45	>19.45

4 数值模拟分析

4.1 几何模型

为更深入地研究采空区遗煤自燃“三带”分布规律，采用流体动力学软件 ANSYS FLUENT 构建采空区模型。根据 10310 工作面的实际情况，将采空区的深度设置为 120 m，工作面长度设置为 306 m，使用 ANSYS Meshing 组件将模型划分为网格。为保证计算精度的同时降低计算复杂度，将模型网格单元尺寸设置为 2 m，共有 248 536 个网格，网格质量达到了 0.98。

在模型进、回风侧采空区设置多道隔离墙，每道隔离墙长 4 m，高 3.5 m，厚 1 m，网格尺寸设为 0.5 m，隔离墙的间距分别设置为 10、20、30 m，所有隔离墙类型都设为固体，几何模型见图 6。

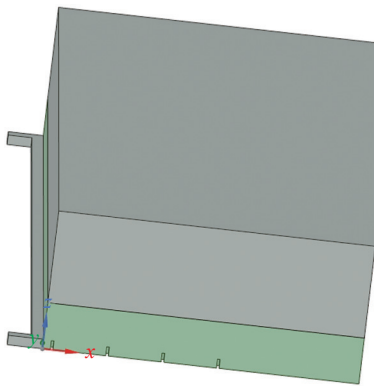


图6 隔离墙间隔 20 m 时数值模拟几何模型

4.2 边界条件及控制方程

将区域内的进风巷、回风巷和工作面作为边界，假设区域内的其他表面具有壁面特性，无气体穿透。

计算模型为稳态模型，采用开组份输运模型和能量方程，进风巷和回风巷分别设置为速度入口和自由出口。根据现场数据，工作面的配风量为 $1300 \text{ m}^3/\text{min}$ ，相当于 1.15 m/s 的风速。考虑到采空区冒落带和裂隙带的特征，将 UDF 函数根据孔隙率和渗透率分布进行编写，并导入求解器。

4.3 隔离墙堵漏模型结果分析

通过模拟，得到了采空区设置隔离墙的氧气浓度分布平面图。隔离墙间隔为 20 m 时采空区内氧气浓度分布如图 7 所示，图中红色部分代表了氧气浓度大于 18% 的范围，即散热带；蓝色部分则代表了氧气浓度小于 8% 的范围，即窒息带；这两者之间是氧气浓度在 8% ~ 18% 的范围，即氧化带；根据数值模拟的结果，隔离墙间隔为 20 m 时的采空区氧气浓度在进风侧采深 13 m 左右为 18%，在 35 m 左右为 8%。在回风侧，采深 1 m 左右为 18%，而在 18 m 左右为 8%。数值模拟在进、回风两侧的结果与实测结果基本相符。

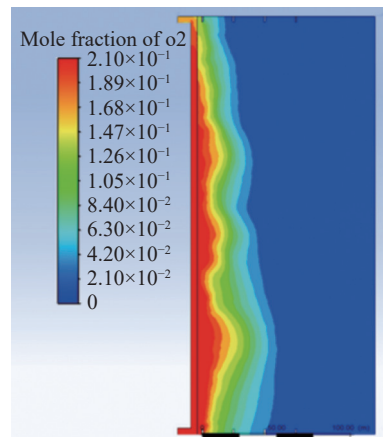


图7 隔离墙间隔为 20 m 时采空区内氧气浓度分布

隔离墙间隔为 30 m 时采空区内氧气浓度分布如图 8 所示，采空区氧气浓度在进风侧采深 10 m 左右为 18%，在 40 m 左右为 8%。在回风侧，采深 20 m 左右处为 18%，而在 40 m 处为 8%。散热带和氧化带范围都比间隔 20 m 时范围更大，两者宽度和在 50 m 左右。

隔离墙间隔为 10 m 时采空区内氧气浓度分布如图 9 所示，采空区氧气浓度在进风侧采深 10 m 左右为 18%，在 25 m 左右为 8%。在回风侧，采深 2 m 左右为 18%，而在 18 m 左右为 8%。

通过模拟，在实测测点氧气浓度基础上完整的反映出采空区二维平面的氧气浓度变化，总体来看，

随着离工作面的距离增加,采空区越来越深,氧气浓度呈现出一个下降的趋势。这一趋势不仅与岩层冒落导致漏风量减小有关,还与煤在采空区内的氧化程度有关,采空区深度增加意味着遗煤暴露在空气中的时间更久,氧化程度更高,从而消耗更多的氧气。而随着隔离墙间距的缩小,散热带和氧化带不断变窄并且越来越靠近工作面,隔离墙间隔 20 m 时氧化带范围在进风侧 13~35 m,回风侧 1~18 m,间隔 10 m 时氧化带范围在进风侧 10~25 m,回风侧 2~18 m,两者范围差别不大,但每道隔离墙都要占用大量的施工成本,综合考虑下每道隔离墙间隔 20 m 是合理的距离。

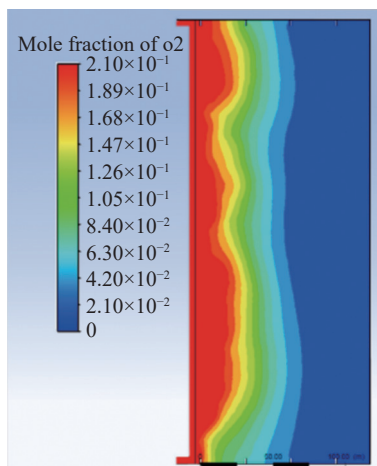


图8 隔离墙间隔为 30 m 时采空区内氧气浓度分布

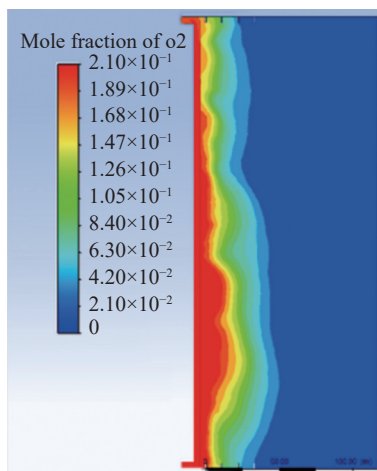


图9 隔离墙间隔为 10 m 时采空区内氧气浓度分布

4.4 无隔离墙数值模拟结果分析

因工作面在实际开采过程中就在采空区中不断布置隔离墙,为探究隔离墙对采空区遗煤自燃“三带”分布规律的影响,采用 Fluent 数值模拟软件将模型

中凝胶隔离墙去除后,其他设置均相同,计算综采工作面采空区的氧气分布,绘制出氧气体积分数云图,如图 10 所示。

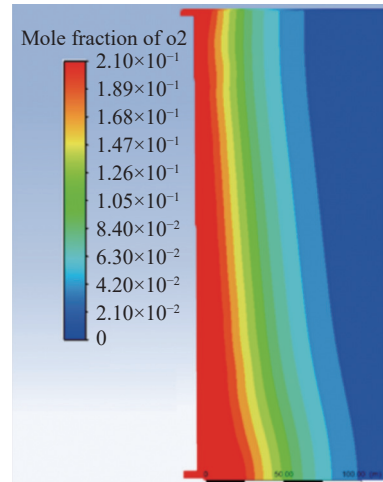


图10 无隔离墙时氧气浓度分布

从图中可看出,根据数值模拟的结果,工作面的采空区若没有设置凝胶隔离墙时氧气浓度在进风侧采深 35 m 左右为 18%,在 71 m 左右为 8%。在回风侧,采深 13 m 左右为 18%,而在 38 m 左右为 8%。即无隔离墙时氧化带范围在进风侧 35~71 m,回风侧 13~38 m,而布置间隔 20 m 隔离墙时氧化带范围在进风侧 13~35 m,回风侧 1~18 m。

由模拟结果可知,设置隔离墙能有效降低采空区漏风,阻挡空气通过。设置隔离墙后,与未设隔离墙相比采空区散热带与氧化带范围均变窄,散热带、氧化带和窒息带都向工作面靠近,隔离墙的间距越小对采空区“三带”影响更明显。可见,加入隔离墙后,风流经进风巷直接吹向采空区被隔离墙阻挡,顺着工作面向回风巷流动,大大减少了采空区漏风,氧化带范围更小,遗煤自燃危险性降低。

5 结论

1) 通过实测数据确定了 10310 工作面实际布置间隔 20 m 隔离墙的采空区自燃“三带”范围分别为:进风侧 0~12.95 m,回风侧 0~2.15 m 为散热带;进风侧 12.95~37.2 m,回风侧 2.15~19.45 m 为氧化带;进风侧 >37.2 m,回风侧 >19.45 m 为窒息带。

2) 工作面采空区煤自燃“三带”数值模拟结果与现场实测范围结果相吻合,验证了模型准确性,并且得到了采空区完整二维平面的氧气浓度变化。

3) 得到隔离墙对采空区遗煤自燃“三带”分布规

律的影响,结果表明:在进回风巷侧采空区设置隔离墙可有效减少采空区漏风,自然发火危险性降低,采空区散热带与氧化带范围均变窄并向工作面靠近,隔离墙的间距越小对采空区“三带”影响越明显。

参考文献:

- [1] 李璐璐.厚煤层综放工作面采空区自燃“三带”分布特征及其防治方法.煤矿现代化 2023,32(6): 35-38.
- [2] 刘保成.中厚煤层综采工作面采空区自燃“三带”研究.山西冶金 2023,46(9): 98-102.
- [3] 郑立永,田中华,朱红金,等.浅埋特厚煤层采空区煤自燃危险区域立体分布特性研究[J].煤炭工程,2023,55(9): 79-84.
- [4] 张子军,李正.浅埋深煤层采空区自燃危险区判定及防治技术[J].煤矿安全,2023,54(8): 52-57.
- [5] 杨根发,史东瑞,吕永强.Y型通风条件下工作面自燃“三带”划分与防治措施研究[J].采矿技术,2024,24(1): 41-44.
- [6] 廷建鹏.“Y”型通风采空区自燃“三带”分布特征研究[J].内蒙古煤炭经济,2023(9): 15-17.
- [7] 张清清.Y型通风抽采条件下采空区自燃“三带”研究.煤炭 2023,32(1): 57-60.
- [8] 王忠桥,代杰,等.柴里煤矿综采工作面采空区遗煤自燃“三带”分布规律研究[J].煤炭科技,2023,44(5): 110-114,120.
- [9] 肖正江.浅埋煤层采空区自燃“三带”分布及划分研究[J].化工管理,2022,36: 78-81.
- [10] 冯志刚.浅埋深中厚煤层综采工作面采空区自燃“三带”划分及自燃防治技术研究[J].同煤科技,2019(4): 9-12.
- [11] 陈明河.浅埋深大采高工作面采空区煤自燃危险区域划分[J].煤炭技术,2018,37(9): 166-168.
- [12] 王君.浅埋深孤岛综采工作面采空区自燃“三带”划分研究[J].煤炭科学技术,2017,45(S1): 110-113.
- [13] 姚海飞,王珏,陈雄山,等.浅埋薄基岩厚煤层采空区自燃“三带”的划分[J].中州煤炭,2013(1): 85-89.
- [14] 文虎,孟尧,樊世星,等.不同通风方式下“110工法”采空区自燃“三带”数值模拟研究[J].煤矿安全,2024,55(4): 88-97.
- [15] 王正帅.复杂通风综采面采空区“三带”分布及防灭火参数研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8): 73-77.
- [16] 侯家琛,张兴华,郭明超,等.寨崖底矿W型通风条件下采空区三带划分以及漏风规律研究[J].煤炭技术,2023,42(8): 162-166.
- [17] 冀凯,戴子栋.U型通风采空区自燃“三带”划分研究[J].山东煤炭科技,2023,41(7): 123-125.
- [18] 仲照海,尚文杰.不同配风量影响下采空区自燃“三带”分析[J].陕西煤炭,2023,42(4): 79-84,94.
- [19] 汪瑞,石必明.朱集西煤矿指标气体确定及自燃“三带”划分研究[J].煤炭技术,2022,41(9): 99-102.
- [20] 郭伟强.大采高综放工作面采空区自然发火“三带”分析研究.山西焦煤科技 2018,42(9): 4-7.

(上接第53页)

- [3] 苏军德.AHP-模糊综合评判法在金属矿机电系统安全评价中的应用[J].甘肃科技,2019,35(17): 62-65.
- [4] 李军,张波.基于IFAHP-改进熵权法的煤矿综合防尘体系安全评价[J].煤炭技术,2023,42(9): 195-199.
- [5] 吴腾.基于IFAHP-GRA的煤矿机电系统安全评价研究[J].机电信息,2023(16): 32-36.
- [6] 单梦瑶,王勇,耿达,等.基于熵权-模糊层次分析法的煤层底板突水危险性评价[J].地下水,2024,46(5): 1-3,45.
- [7] 申梁,陈立强,黄勇.基于模糊层次分析法和熵权法的岩溶发育强度评价方法探讨[J].勘察科学技术,2024(2): 30-35.
- [8] 张禹,蒋仲安,孙佳.矿井综合防治系统的模糊评价[J].中国矿业,2005(12): 43-45.
- [9] 曹有助,史卫平,刘志钧,等.基于层次分析-模糊综合评判的煤矿企业风险评估研究[J].中国矿业,2024,33(7): 16-25.
- [10] 陈志莱.基于G1法-改进熵权法的煤矿机电安全评价及应用[J].机电信息,2024(7): 60-65.
- [11] 刘鹏.安全评价在煤矿机电管理中的应用分析[J].技术与市场,2014,21(6): 277,279.
- [12] 董伯舒.基于熵权模糊层次分析法的煤矿安全风险评价[J].山西能源学院学报,2019,32(2): 25-28.
- [13] 赵志庭.煤矿机电安全状况熵权物元可拓评价研究[J].当代化工研究,2024(15): 142-144.
- [14] 宣强磊.基于层次分析-模糊综合评价法的煤矿顶板安全评价[J].化工装备技术,2023,44(6): 11-15.