

地表山地矿井瓦斯动力灾害危险分级指标研究

刘 杰, 王昱璞

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为揭示地表地形对矿井瓦斯动力灾害分级与分级指标的影响, 以安顺煤矿 M9 煤层为背景, 研究地表不同地形条件下采场采动应力变化规律、煤层瓦斯含量分布和煤厚变化与矿井瓦斯动力灾害的关系。研究结果表明: 地表地形对回采工作面的应力大小及分布规律具有显著影响, 位于山地下方的煤层应力显著升高, 山体的存在使得工作面前方主应力影响范围显著提高, 主应力峰值位置向山体位置偏移, 得到矿井应力危险等级区域; 结合煤厚变化梯度得出煤厚变化危险等级, 确定矿井瓦斯动力灾害事故危险等级与分级指标。

关键词: 分级指标; 数值模拟; 地表地形; 瓦斯含量预测; 应力分布

中图分类号: TD72; TD712 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2026)01-0029-07

DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-4602. 2026. 01. 004

Research on the risk classification indicators for gas dynamic hazards in surface mountainous mines

LIU Jie, WANG Yupu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: To reveal the impact of surface topography on the classification and grading indicators of gas dynamic hazards in mines, this study takes the M9 coal seam of Anshun Coal Mine as the background and investigates the variation patterns of mining-induced stress in stopes under different surface topographical conditions, the distribution of gas content in coal seams, and the relationship between coal thickness variation and mine gas dynamic hazards. The results show that surface topography significantly influences the magnitude and distribution patterns of stress in mining faces. The stress in coal seams beneath mountains increases significantly, the presence of mountains substantially extends the influence range of principal stresses ahead of the working face, and the peak stress position shifts towards the mountain location, thereby identifying hazard level zones of mine stress. The hazard levels of coal thickness variation are derived from coal thickness gradients, and the hazard levels and classification indicators of mine gas dynamic hazards accidents are determined.

Key words: classification indicators; numerical simulation; surface topography; gas content prediction; stress distribution

收稿日期: 2024-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51974169)

作者简介: 刘 杰(1986—), 男, 山东邹平人。博士, 教授, 主要从事工程事故预警与防治、工业生产安全风险评价管理等方面的研究。E-mail: liujie0505@qut.edu.cn.

能源安全是一个国家经济繁荣和可持续发展的重要前提与支撑,经济的可持续发展离不开稳定可靠的能源供给,所有能源中煤炭在我国能源结构中占有绝对的支柱地位^[1-3]。贵州省作为我国南方煤炭基地支撑了南方能源供应,但这一区域成煤过程受地质活动频繁、喀斯特地貌面积占比较大等限制,矿区地表地形不平整、构造多、瓦斯压力大等地质特征明显,煤炭开采时瓦斯灾害极为严重^[4]。

瓦斯灾害的发生是煤层应力、赋存瓦斯及煤层条件相互作用、共同演化的作用过程^[5],掌握矿井瓦斯赋存情况以及煤层条件特征,研究应力分布规律,科学预测瓦斯含量,是控制矿井瓦斯灾害发生的重要举措^[6]。诸多学者在影响瓦斯灾害危险性因素方面做了大量研究,刘鹏等^[7]采用层次(AHP-FCA)分析预测了与实际情况符合度较高的各煤层瓦斯突出危险性,并针对性提出了地震诱发煤矿次生灾害影响因子综合评估方法;LI等^[8]采用自组织数据挖掘方法建立了瓦斯涌出量的高阶预测方程。在工作面围岩稳定性和应力分布研究方面,王家臣等^[9]从采动应力旋转角度分析得到围岩稳定性的影响因素;朱斯陶等^[10]研究了分层开采高应力区掘进工作面冲击地压事故,得出事故的主要发生机制;杨敬轩等^[11]提出了双向应力转移的方法,同时采用改变形式的三参数威布尔函数对工作面端头三角区双向支承压力进行了理论分析并得出了其大小及区域分布特征;任艳芳^[12]分析了围岩应力结构的形成和失稳,得到承压拱结构的力学特征;林建成等^[13]用COMSOL研究得到工作面应力分布规律和“上覆岩层”三带演化规律。综上,前人针对矿井煤层瓦斯灾害的风险性评价、瓦斯含量预测及工作面采场周围应力分布特征做出了大量研究,但关于未采区域地表地形变化、矿井瓦斯含量以及煤层条件等因素对瓦斯动力危险性的影响研究鲜有涉及。

基于此,本文以安顺煤矿M9煤层四采区为背景,综合考虑煤岩层条件,分析地表地形对回采工作面采场周围应力分布规律,预测不同区域矿井瓦斯含量,据此对瓦斯灾害危险区域进行等级划分并阐明不同瓦斯动力灾害危险区域的主控因素。

1 工程地质背景及模拟方案

1.1 地质背景

贵州安顺煤矿设计生产能力90万t/a,是煤与瓦斯突出矿井,目前主要开采M9煤层。煤质为无烟煤,在大多数区域内基本顶为石灰岩,直接顶为粉砂质黏土岩,直接底为黏土质粉砂岩。M9煤层结构稳定,地质构造较少,煤层厚度变化小,平均煤厚1.43m,坚固性系数为0.45。M9煤层埋深260~520m,四采区埋深360~520m,所对应地表存在2个山体,山体高度分别为140、160m。

1.2 FLAC3D软件模型建立及参数选择

安顺煤矿四采区回采工作面采用长壁式综合采煤方法,全部垮落法治理顶板,工作面设计倾向长为150m,走向长介于800~1600m,煤层最大倾角15.64°,属于缓倾斜煤层,对山体与工作面不同位置的围岩应力分布和位移规律影响较小,因此模型中忽略煤岩层倾角。本文利用FLAC3D5.0数值模拟软件,选定高度160m山体开展模拟研究,建立大小450m×500m×80m的模型,岩层单元格大小5m×5m×2m,煤层单元格大小5m×5m×0.5m,共387000个网格,对工作面内巷道及煤体进行网格密化处理。工作面倾向长度150m,走向长度360m,高度2m,埋深360m;模型四面及底部为固定支撑,垂直方向上施加7.5MPa自重应力;煤体破坏准则选用Mohr-Coulomb准则,模拟模型如图1所示。

模型涉及的煤岩层按照性质从上到下分别为:砂岩、细砂岩、泥岩、煤、砂泥岩、粉砂岩、细砂岩,煤岩层的物理力学参数如表1所示。

根据四采区地表山地与回采工作面相对位置,设计山地与回采工作面垂直投影完全重叠、一半重叠、完全不重叠3种模拟方案,即工作面完全位于山地下方、一半位于山地下方以及地表无山地,如图2所示。

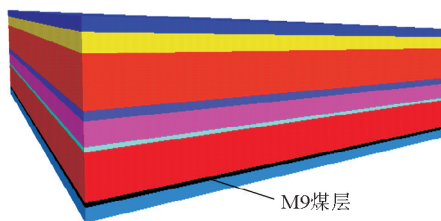


图1 数值模拟模型

表 1 岩层物理参数

岩性类别	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
砂岩	2540	8.1	7.4	10.0	26	11.50
细砂岩	2500	3.1	6.5	6.5	36	1.65
泥岩	2490	5.2	6.7	5.7	35	3.90
煤	1500	1.5	2.3	3.0	29	0.75
砂泥岩	2490	5.1	5.9	4.9	33	4.70
粉砂岩	2500	2.4	4.5	5.1	34	1.30
细砂岩	2500	3.1	6.5	6.5	36	1.65

2 应力分布规律分析

2.1 走向应力分布规律

工作面回采过程中前方应力分布变化如图 3 所示。当山地与工作面完全重叠,走向最大垂直应力由 24.3 MPa 增加至 44.9 MPa,采动影响范围 90 m;山地与工作面一半重叠时,走向最大垂直应力由 26.5 MPa 增加至 37.5 MPa,采动影响范围 80 m;山地与工作面完全不重叠时,走向最大垂直应力由 10 MPa 增加至中后期的 22 MPa,采动影响范围 75 m。随着工作面推进,前方采动应力峰值逐渐升高,由于煤体采出,顶板悬顶变长,煤层受到的各向载荷增大,工作面前方应力峰值不断升高。

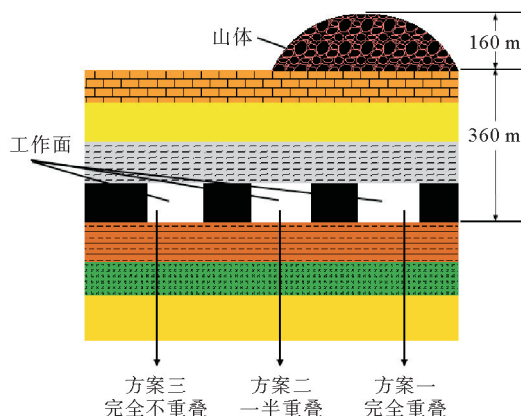


图 2 地形与工作面相对位置

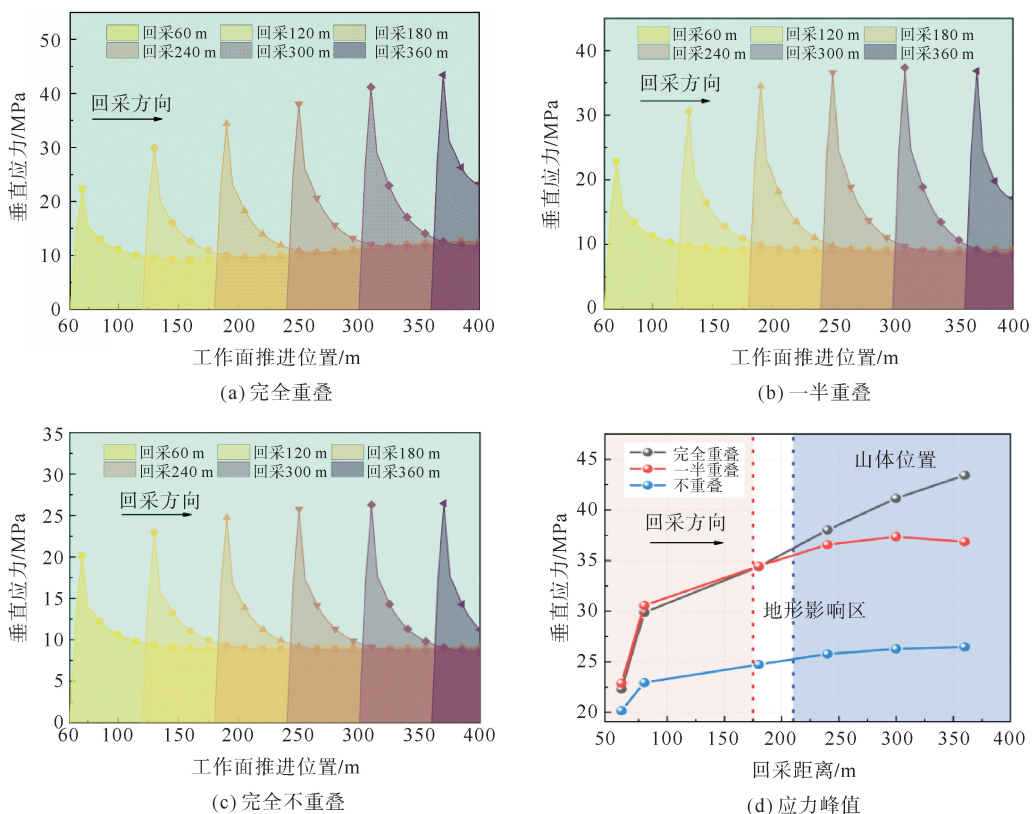


图 3 走向采动应力变化

2.2 倾向应力分布规律

图4为工作面推进不同距离倾向方向垂直应力分布,地表山地使得工作面及巷道周围应力集中系数 λ 升高。回采初期工作面应力集中系数相差不大,在2.1~2.2;随着工作面推进,应力集中系数逐渐升高,其中完全重叠、一半重叠和完全不重叠时工作面应力集中系数 λ 依次升高至4.5、4.1、2.7。

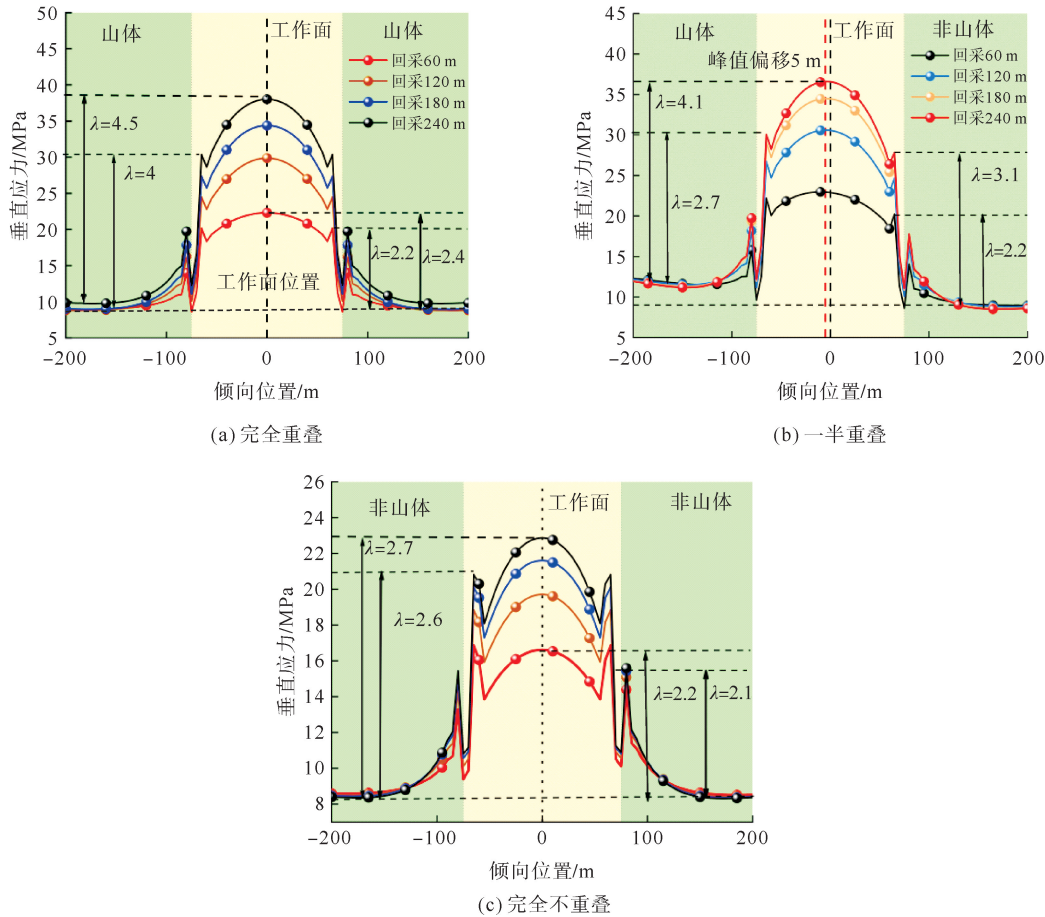


图4 倾向垂直应力分布

分析不同地形条件下沿工作面走向和倾向的应力分布,与山体完全重叠工作面煤层应力显著升高,最高达到37.85 MPa,一半重叠是完全不重叠工作面的2倍;随工作面推进周围应力集中系数逐渐升高,其中完全重叠、一半重叠2种情况应力集中系数均超过4.0。

2.3 应力危险等级划分

如图5所示,当山体与工作面重叠时,工作面回采应力峰值显著升高,形成了较大的应力梯度,需要根据工作面回采时的应力峰值大小划分应力危险等级。现场实测煤层单轴抗压强度为3.5 MPa,当应力峰值达到煤体单轴抗压强度10倍时,将在煤体内储存大量的弹性能,在此前提下围压突然降低极易发生动力灾害,应力梯度对于瓦斯动力灾害的发生也较为显著,因此将35 MPa及以上的区域划分为高危险区域,30~34 MPa的区域划分为中危险区,低于30 MPa的区域划分为低危险区。

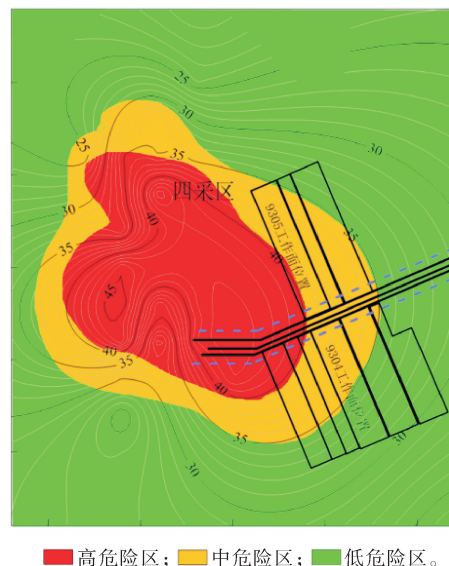


图5 应力危险等级

3 煤层瓦斯含量分布及预测

对已采区域煤层瓦斯含量进行超前测试,得到矿井瓦斯含量和测点埋深数据,据此分析得出已采区域瓦斯含量分布情况。根据瓦斯含量和埋深的关系,预测四采区煤层瓦斯含量数值与分布情况,并据此确定四采区不同区域瓦斯含量危险等级。

3.1 瓦斯含量分布与预测

掘进期间钻孔测得的瓦斯含量数据较勘探数据更接近原始瓦斯含量,掘进期间的煤层瓦斯含量更具可靠性。图 6(a)为掘进期间根据测量数据得到的 M9 煤层瓦斯含量分布,在南翼工作面初采阶段测得瓦斯含量最高为 $13.5 \text{ m}^3/\text{t}$;在北翼工作面初采位置测量得到的瓦斯含量最低为 $3.5 \text{ m}^3/\text{t}$;其余区域在掘进期间的瓦斯含量为 $8.5 \text{ m}^3/\text{t}$ 左右,瓦斯含量数值较为稳定,可以看出一采区北翼工作面的瓦斯含量低于南翼工作面。

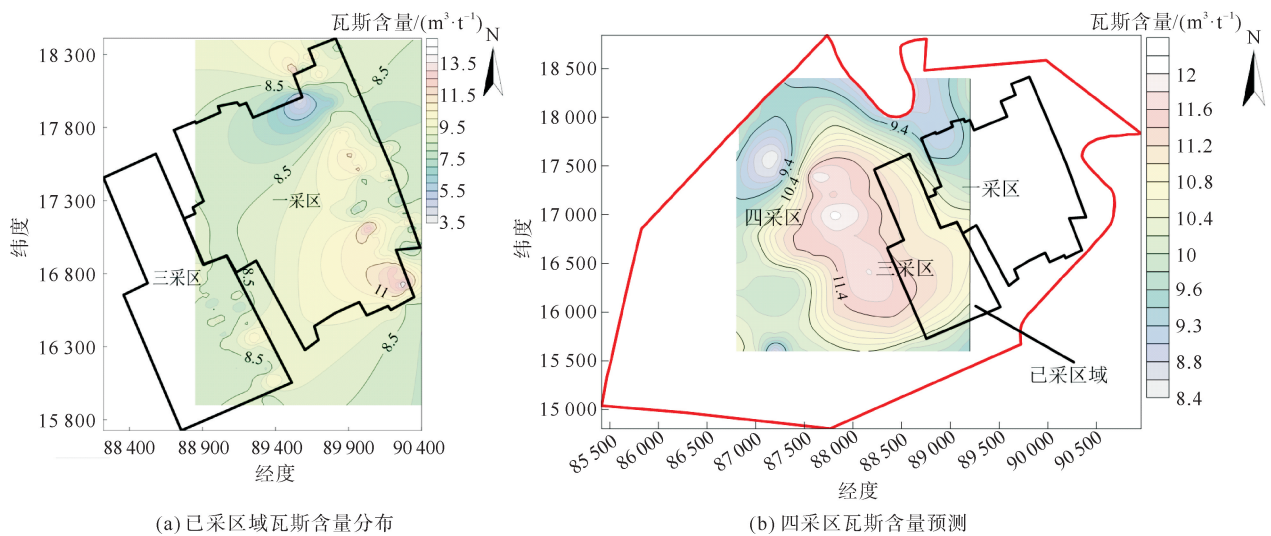


图 6 四采区瓦斯含量分布预测

已采区域得到的掘进工作面瓦斯含量(W)与煤层埋深(h)具有线性关系,拟合出瓦斯含量线性公式: $W=0.013h+5.19$ 。四采区煤层埋深在 $250\sim 530 \text{ m}$,标高为 $980\sim 1200 \text{ m}$,预测得到四采区掘进期间的瓦斯含量分布在 $8.5\sim 12.06 \text{ m}^3/\text{t}$ 。由公式结合四采区的埋深情况,可得四采区的瓦斯含量预测分布图 6(b),如图随着开采工作进入四采区,采场埋深显著增大,四采区的瓦斯含量明显增加。受煤层埋深影响,四采区中部工作面瓦斯含量明显高于一、三采区,四采区不同区域,瓦斯含量也具有明显区别,瓦斯含量的增大使得四采区工作面瓦斯动力灾害危险性明显提高,根据瓦斯含量的分布规律,划分四采区瓦斯动力灾害危险等级。

3.2 瓦斯含量危险等级划分

图 7 为四采区瓦斯含量的预测结果,由图可知瓦斯含量集中在 $8.5\sim 12.06 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯赋存受应力影响,应力大的区域易于封闭,从而积聚较大的瓦斯潜能。根据《防治煤与瓦斯突出细则》,由煤层瓦斯压力和瓦斯含量进行区域预测的临界值为 $8 \text{ m}^3/\text{t}$,可以认为瓦斯含量超过 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 是危险区。大量的现场实例证明了在瓦斯含



图 7 瓦斯含量危险等级

量小于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的煤层中存在的局部高瓦斯是瓦斯突出的诱因,因此将瓦斯含量大于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 的区域划为高危险区域,瓦斯含量在 $8\sim 10 \text{ m}^3/\text{t}$ 为中危险区,低于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 为低危险区。

4 煤层赋存规律及瓦斯动力灾害危险性分析

4.1 煤层赋存规律研究

在煤厚梯度变化剧烈区域,煤层内储存的瓦斯潜能和弹性能存在明显的能量梯度,推动瓦斯动力灾害发生,因此煤层厚度变化区域是瓦斯动力灾害发生潜在危险性较高的区域^[14]。如图8所示,根据前期地质勘探结果得到井田煤层厚度变化,经过统计分析,四采区范围内,煤厚整体变化较小,厚度变化系数为16%,煤厚变化最大的区域为 $0.3 \text{ m}/500 \text{ m}$,其对于瓦斯动力灾害的影响较小,故将相对煤厚变化较大的区域划分为中风险地区,即煤厚变化大于 $0.25 \text{ m}/500 \text{ m}$ 的区域为中危险区,小于 $0.25 \text{ m}/500 \text{ m}$ 的区域为低危险区。

4.2 瓦斯动力灾害危险区域主控因素划分

如图9所示,新老采区交接位置地表存在山体,应力和瓦斯含量升高,煤层内储存的弹性能和瓦斯潜能升高,使瓦斯动力灾害发生的危险性显著增加,区域瓦斯动力灾害的主控因素为应力和瓦斯含量;应力瓦斯复合影响区北侧和东南侧区域,瓦斯含量高、变化梯度大,煤层揭露时,发生瓦斯动力事故的可能性大,采掘空间易产生瓦斯局部积聚,引发瓦斯爆炸灾害及次生灾害,该区域瓦斯动力灾害的主控因素为瓦斯含量;应力瓦斯复合影响区西侧,在工作面回采过程中,围岩应力集中系数大,应力集中峰值变化大,增加了工作面支护的难度,该区域内瓦斯动力灾害的主控因素为应力集中;四采区南侧,煤厚变化相对较大,造成瓦斯积聚以及煤体积聚大量弹性能,这个区域的瓦斯动力灾害主控因素为煤层厚度梯度变化强度。

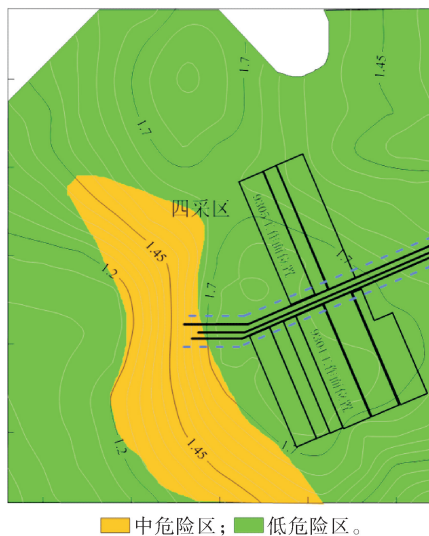


图8 煤厚变化危险等级

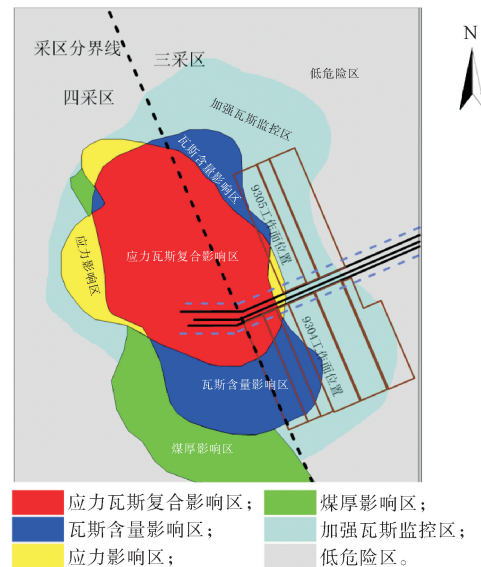


图9 瓦斯动力灾害危险等级分布

5 结论

本文研究了影响矿井瓦斯灾害危险性的主要影响因素,综合分析煤层厚度、地应力分布与瓦斯含量的分布变化规律,得出矿井瓦斯动力灾害危险等级和分级指标,主要结论如下:

1) 山地与工作面完全重叠时,采动应力峰值最大,一半重叠时次之,完全重叠时最小。山地和工作面一半重叠时,位于山地下方的煤层应力显著升高,山体的存在使得工作面前方主应力影响范围显著提高,主应力峰值位置向山体位置偏移。与山体完全重叠的工作面中部、工作面端头以及一半重叠工作面中部动力灾害危险性较高,得出矿井应力危险等级区域。

2) 得到采掘空间的瓦斯含量与埋深的关系为: $W=0.013h+5.19$,根据瓦斯含量的分布特征规律,得

出矿井瓦斯含量危险区域等级。

3) 根据煤厚变化梯度得出煤厚变化危险等级,结合矿井应力危险等级分布和瓦斯含量危险区域等级分布确定矿井瓦斯动力灾害事故危险等级,并得到矿井瓦斯动力灾害危险等级分布图。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2024-03-01(10).
National Bureau of Statistics. Statistical communique of the People's Republic of China on the 2023 national economic and social development[N]. People's Daily, 2024-03-01(10).
- [2] 王国法,任世华,庞义辉,等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan Period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [3] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [4] 李希建,薛海腾,陈刘瑜,等. 贵州地区突出煤层微孔结构及对瓦斯流动特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 67-74.
LI Xijian, XUE Haiteng, CHEN Liuyu, et al. Micropore structure of outburst coal seam in Guizhou area and its effect on gas flow[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 67-74.
- [5] 郭怀广. 深部煤层瓦斯动力灾害诱发机制研究与探讨[J]. 中国煤炭, 2023, 49(5): 43-49.
GUO Huaiguang. Research and discussion on the induced mechanism of gas dynamic disaster in deep coal seam[J]. China Coal, 2023, 49(5): 43-49.
- [6] 张志勇. 茂通煤业煤层瓦斯分布规律及涌出量预测[J]. 江西煤炭科技, 2022(4): 166-168.
ZHANG Zhiyong. Prediction of seam gas distribution law and emission in Maotong Coal Industry Co., Ltd. [J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2022(4): 166-168.
- [7] 刘鹏,王英虎,薛涛. 基于 AHP-FCA 的矿井煤层瓦斯灾害风险性评价[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(6): 1-6.
LIU Peng, WANG Yinghu, XUE Tao. Disaster risk assessment of coal seam gas in mine based on AHP-FCA[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(6): 1-6.
- [8] LI R Q, SHI S L, WU A Y, et al. Research on prediction of gas emission based on self-organizing data mining in coal mines[J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 779-785.
- [9] 王家臣,王兆会,杨杰,等. 千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 876-888.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, YANG Jie, et al. Mining-induced stress rotation and its application in longwall face with large length in kilometer deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 876-888.
- [10] 朱斯陶,姜福兴,朱海洲,等. 高应力区掘进工作面冲击地压事故发生机制研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 337-343.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, ZHU Haizhou, et al. Study of mechanism of rockburst accident in heading face in high stress area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 337-343.
- [11] 杨敬轩,刘长友,于斌,等. 工作面端头三角区沿空巷道强矿压显现与应力转移分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 88-95.
YANG Jingxuan, LIU Changyou, YU Bin, et al. An analysis on strong strata behaviors and stress transfer of the roadway approaching gob in triangle area of the face end[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 88-95.
- [12] 任艳芳. 浅埋煤层长壁工作面围岩动态结构及应力特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 50-56.
REN Yanfang. Analysis of dynamic stress characteristics and surrounding rock structure in shallow-buried longwall mining face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 50-56.
- [13] 林建成,郭林生,李可,等. 小庄矿 40309 工作面应力分布及覆岩“三带”演化规律研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(11): 71-74.
LIN Jiancheng, GUO Linsheng, LI Ke, et al. Research on stress distribution and evolution law of overburden "three zones" of 40309 face in Xiaozhuang Coal Mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(11): 71-74.
- [14] 陈浩. 高瓦斯矿井掘进工作面遇煤厚变化带瓦斯防治技术[J]. 能源与节能, 2024(1): 87-90.
CHEN Hao. Gas prevention and control technology in coal thickness variation zones during excavation of high gas mines[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(1): 87-90.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)