

绿色矿山建设

基于蝶形理论的工作面超前钻孔解危机理与技术应用

李 臣^{1,2,3} 鱼琪伟^{3,4} 连小勇^{3,5} 吴 桐^{2,3}

1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430064;
3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083;
4. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710000;
5. 尤洛卡精准信息工程股份有限公司, 山东 泰安 271000

[摘要] 针对采动工作面超前应力集中导致冲击动力灾害问题,通过数值模拟研究了具有普适性的采动空间应力分布规律,分析了非均匀应力场作用下孔洞围岩塑性损伤机制,获得了孔洞围岩塑性区 RPP 扩展特性,解释了应力场演化期间孔洞围岩塑性区蝶化-劣化趋势效用下工作面超前大直径卸压钻孔的作用机理。研究结果表明,当推进长度大于两个见方时,采空区周边应力趋于稳态,沿采空区最小主应力 P_3 受应力卸载影响,在采空区边界处出现拐点;垂直采空区 30 m 内最大主应力 P_1 急剧增加,显著影响距离可达 90 m,围压比在采空区 10 m 内变化明显,轴向侧压系数变化较稳定,垂向侧向系数在近采空区出现较大波动;孔洞围岩在非等压应力场呈现 RPP 扩展特性,即在围压比持续增大时孔洞围岩塑性区将出现圆形-椭圆形-蝶形的演化规律,其敏感性越发强烈并最终表现为塑性劣化,围岩失稳,能量释放,解释了工作面前方大直径钻孔卸压机理。基于此,在某矿沿工作面倾向布置孔径 600 mm、间距 7.5 m、贯穿工作面的大直径卸压钻孔,现场应用后电磁监测结果显示工作面前方整个压力显现较弱,卸压作用明显。

[关键词] 应力分布;蝶形塑性区;RPP 扩展;大直径钻孔;卸压解危

[中图分类号] TD35 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0061-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/lf.2024.05.009

0 前言

工作面开挖后覆岩不规则垮落,直接顶以散体形式无序充满采空区,基本顶断裂、回转、垮落后将采空区进一步压实,采空区周边形成支撑压力^[1-2],小范围内高支撑压力是导致采动区域范围内围岩大变形破坏、煤岩动力灾害的根源^[3-4]。

关于采动应力分布,众多学者进行了大量的研究。汪北方等^[5]采用相似材料模型实验模拟浅埋煤层采空区覆岩运动规律,结合岩石压实变形特性,建立了浅埋煤层采空区岩体应力空间分布数学模型;吴祥业等^[6-7]研究双巷间距对重复采动下留巷围岩塑性区空间分布特征及偏应力的影响规律,揭示了二次采动对留巷塑性区的诱导扩展机制;康红

[收稿日期] 2024-03-27

[基金项目] 中煤科工集团武汉设计研究院创新项目(ZZYF202319)。

[作者简介] 李臣(1992—),男,山东泰安人,博士(后),采矿工程专业,主要研究方向为矿山压力与岩层控制、矿山安全与规划设计。

[引用格式] 李臣,鱼琪伟,连小勇,等.基于蝶形理论的工作面超前钻孔解危机理与技术应用[J].绿色矿冶,2024,40(5):61-66,74.

LI Chen, YU Qiwei, LIAN Xiaoyong, et al. Mechanism and technical application of danger elimination in advance drilling of working face based on butterfly theory [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 61-66, 74.

普等^[8]从多个维度综合研究掘进工作面与巷道围岩应力的演变过程,分析采煤工作面周围的采动应力演化特征及主要影响因素。笔者所在团队^[9-11]就采动高偏应力场系统研究了侧方留巷围岩塑性区的形态尺寸发育特征,获得了蝶形塑性区理论,并进一步利用该理论解释包括动压巷道大变形、冲击动力灾害、非对称破坏、共轭地震等发生机理。在矿山压力与岩层控制领域,改善井下作业区一定范围内的应力分布,使其与围岩强度匹配,是工程治理的根本^[12-13]。一般而言,井下工程灾害治理的逻辑思路为采掘布局调整、区域防治、局部解危、围岩支护与加固^[14-16],其中局部解危是应力调控的末端,是最基础的手段,也是在布局既定而区域防治代价较大时最合理的基础保障,主要包括钻孔卸压、聚能爆破等手段。

本文基于现场实际工程,通过数值模拟研究了工作面回采后较为普适性的采动空间应力分布规律,并基于非等压力学环境分析了孔洞/巷道围岩塑性区的 RPP 扩展特性,获得了基于蝶形理论的孔洞卸压解危机理,以理论指导设计并进行了现场应用。

1 采动区域应力场分布特征

以鄂尔多斯某矿(煤层近水平赋存,埋深约 380 m,工作面宽 300 m)为工程背景,通过 FLAC 数值模拟软件,建立大型采动数值模型,探索具有普适性的采动区域应力场分布及演化规律。

1.1 采动数值模型及模拟方案

建立 800 m × 1 000 m × 300 m 的 FLAC^{3D}采动数值模型,模型 X 方向和 Y 边界分别留有 85 m 和 100 m 的最小边界条件,工作面长度 300 m,模型计算采用 Mohr-Coulomb 准则,采空区处理采用 Double-yield 准则,数值模型如图 1 所示。

对于开挖 22204 工作面,研究其侧方及侧方轴向应力分布规律;对于开挖接续的 22205 工作面,研究其二次采动巷道应力分布规律。首先模拟 22204 工作面推进 100 m、200 m、400 m、600 m、800 m,再模拟 22205 工作面推进 100 m、200 m、400 m、600 m、800 m 时的情形。

1.2 采动区域应力场分布特征

仅受一次采动时,提取侧方轴向位置(距离工作面 20 m)应力数据,经处理后如图 2 所示。由图 2 可见,随着工作面推进,工作面侧方轴向最大主应力 P_1 逐渐增加,直至两个见方后, P_1 的最大值趋于稳定

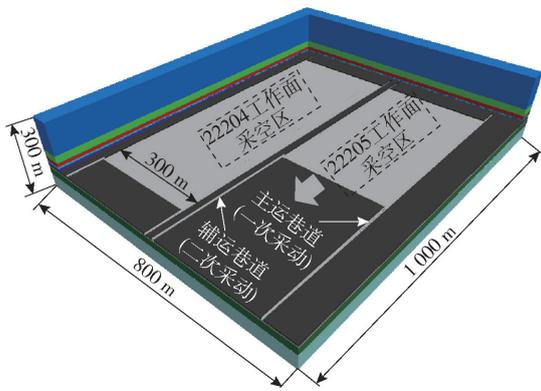
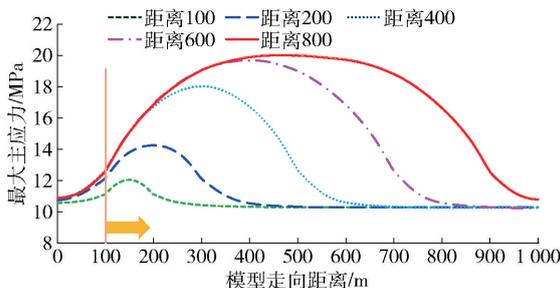
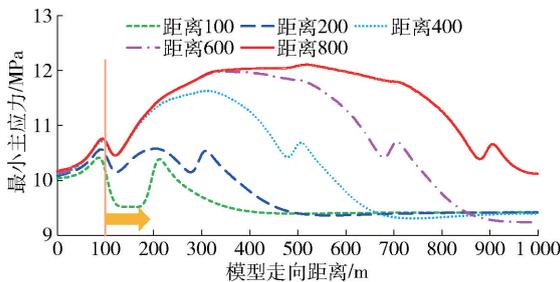


图 1 数值模型三维示意图

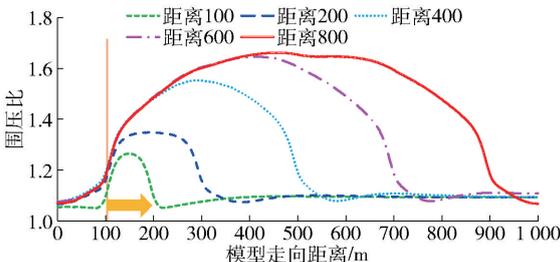
(图 2(a));最小主应力 P_3 的规律与 P_1 基本一致,但有两个差异:一是其应力值远小于 P_1 ,二是在采空区前后一定位置受水平应力卸载的影响,最小主应力 P_3 出现了两个波动点(图 2(b));围压比的变化趋势与最大主应力 P_1 一致(图 2(c))。



(a) 不同推进距离时走向最大主应力 P_1 演化规律



(b) 不同推进距离时走向最小主应力 P_3 演化规律



(c) 不同推进距离时围压比 η 演化规律

图 2 一次采动采空区侧方轴向应力分布规律

提取稳态采空区中部侧方应力数据,结果如图 3 所示。由图 3 可见,在支承压力影响下,侧方 30 m 内最大主应力 P_1 急剧增加,显著影响距离可达

90 m,而在水平应力卸载主控作用下 P_3 增加有限(图3(a));与应力分布规律相一致,应力系数也发生明显变化,集中围压比 η 在采空区10 m内急剧变化,远大于原岩应力时的1.1,轴向侧压系数(Y/Z)变化较稳定,但垂向侧向系数(X/Z)在近采空区出现较大波动(图3(b))。

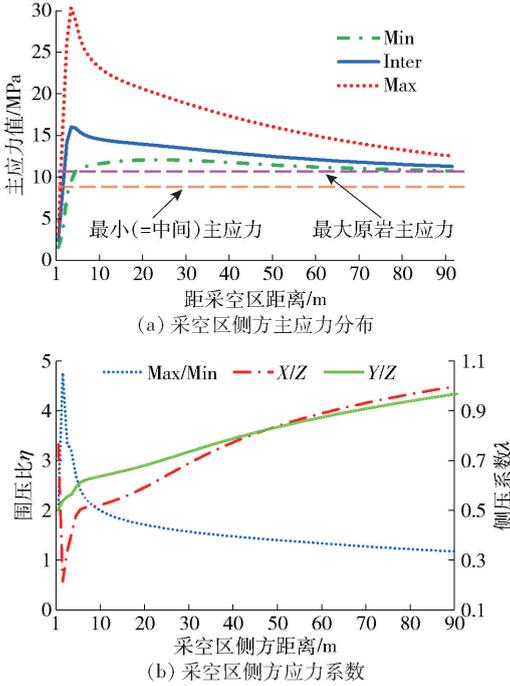


图3 一次采动采空区中部侧方应力分布规律

需要说明的是,本次数值模拟分析主要探索采动空间区域内普适性的规律,其中与本文密切相关的是采空区周边应力状态呈现明显的非均匀性,而接续工作面持续开挖后应力分布的变化主要为接续工作面超前段应力与原采空区侧方应力的叠加,这里不再进行专门赘述。

2 采动区域塑性区扩展规律

2.1 非等压巷道围岩损伤解析

采动影响区域范围内高偏非均匀应力场作用下,巷道围岩的破坏模式将发生改变。简化高偏非均匀应力场为双向非等压应力环境,建立了圆形孔洞围岩非等压力学模型^[9-11]。双向非等压圆形巷道周边围岩任意一点的应力解和 Mohr-Coulomb 准则的极坐标表达式见式(1)。

$$9 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \left(\frac{a_0}{R_0}\right)^8 - \left[12 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 + 6 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos 2\theta\right] \left(\frac{a_0}{R_0}\right)^6 +$$

$$2 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 [\cos^2 2\theta (5 - 2\sin^2 2\theta) - \sin^2 2\theta] + \left(1 + \frac{P_1}{P_3}\right)^2 + 4 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos 2\theta \left(\frac{a_0}{R_0}\right)^4 - \left[4 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos 4\theta + 2 \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos 2\theta (1 - \sin^2 \varphi)\right] - \frac{4}{\gamma H} \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 C \cos 2\theta \sin 2\varphi \left(\frac{a_0}{R_0}\right)^2 (1 - \lambda)^2 - \sin^2 \varphi \left(1 + \frac{P_1}{P_3} + \frac{2C \cos \varphi}{\gamma H \sin \varphi}\right)^2 = 0 \quad (1)$$

式中, η 为围压比(P_1/P_3); R_0 为巷道半径; R_m 为巷道塑性区边界; θ 为任一点极坐标角度; φ 为内摩擦角; C 为内聚力, γH 为垂直应力; a_0 为塑性区半径。

根据上式,给定埋深垂直应力环境和围岩固有属性参数,仅改变 η 时,围岩塑性区边界双向等压状态下塑性损伤边界为圆形;随着 η 的持续增加,围岩塑性损伤边界将由圆形过渡至椭圆形,并最终演化为蝶形,如图4所示。

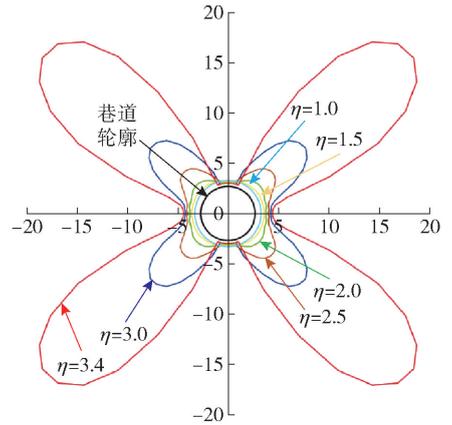


图4 非均匀应力场巷道塑性区蝶化特性

2.2 蝶形塑性区 RPP 特征数值演示

建立 $50 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 薄板数值模型,以实测垂直应力和围岩力学参数为初始条件,改变 η ,模拟结果如图5所示。图5反映了围岩最大塑性区边界 R 与 $P_1 - P_3$ 的关系,定义围岩由稳态至蝶形失稳过程为 RPP 特征。由图5可见,随着 η 的增加,数值模拟塑性区形态与理论计算具有较高的一致性。在给定围岩参数下, η 为1.8左右时,塑性区演化为椭圆形;在 $\eta = 1.8 \sim 2.4$ 时,塑性区逐渐形成蝶形;在 $\eta = 2.4 \sim 3.0$ 时,蝶叶开始明显扩展;当 $\eta = 3.0 \sim 3.4$ 时,围压塑性区劣化;当围压比大于3.4时,模型整体无法运算平衡,工程现场对应则表现为巷道大范围失稳。

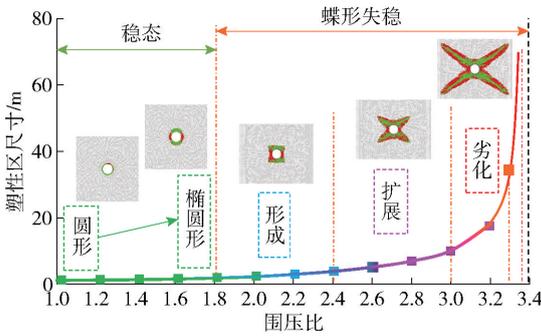


图5 围岩塑性区对围压比的响应程度

3 工作面超前倾向钻孔卸压机理

3.1 超前影响区孔洞演化规律

采动巷道围岩强矿压失稳的实质就是应力与塑性区之间失去平衡。岩石强度较硬时能够抵抗围岩

塑性损伤,但在巷道近表处形成高应力集中;在覆岩运移产生扰动时,外界微小启动力就会导致围岩塑性区急剧蝶化扩展,蝶叶内能量瞬间释放,发生冲击动力灾害。

基于此,在工作面超前位置,尤其是临空侧巷道内平行于工作面向煤体施工大直径卸压钻孔时,钻孔将受到采动工作面的移动支撑压力影响,其应力环境将从原岩状态过渡为高偏状态,钻孔煤体塑性区将逐渐蝶化直至劣化(图6),在长时效应下钻孔蝶形塑性区将形成破碎区。合理的钻孔间距可将煤层内孔间塑性区相互贯通,通过钻孔围岩的变形破坏而消除或减缓煤体积聚的弹性能,最终达到冲击动力灾害解危的目的。

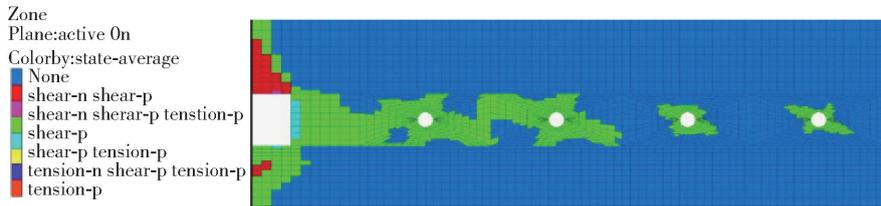


图6 工作面前方大直径钻孔塑性区分布

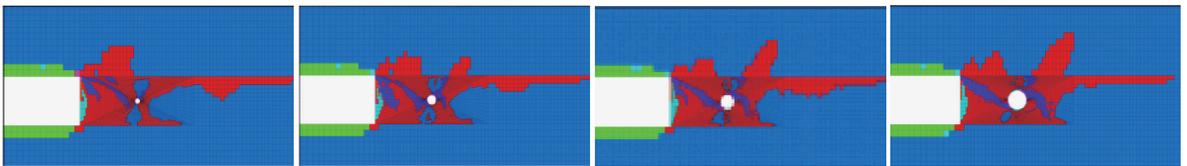
3.2 钻孔参数影响规律

利用上述采动数值模型,运算结束后截取对应结果,分析孔径、孔距及孔深的塑性区分布特征及应力分布规律。

3.2.1 不同孔径下围岩损伤特征

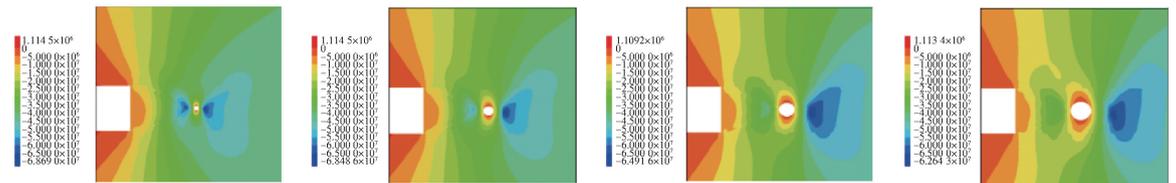
在采动影响下,对孔径分别为200 mm、400 mm、600 mm、800 mm 钻孔的塑性区和垂直应力进行数值

分析,结果如图7~图8所示。数值模拟显示:孔径大小与其周边采动蝶化塑性区范围呈现正相关关系,与钻孔靠工作面侧垂直应力呈负相关关系,与钻孔靠实体煤侧垂直应力正相关。因此,综合塑性区分布、应力分布与施工便利性,选择600 mm 钻孔进行作业。



(a) 200 mm 钻孔 (b) 400 mm 钻孔 (c) 600 mm 钻孔 (d) 800 mm 钻孔

图7 不同孔径钻孔塑性区分布



(a) 200 mm 钻孔 (b) 400 mm 钻孔 (c) 600 mm 钻孔 (d) 800 mm 钻孔

图8 不同孔径钻孔应力分布

3.2.2 不同孔间距下围岩损伤特征

采用孔径为600 mm 卸压钻孔,在采动影响下

对2.5 m、5.0 m、7.5 m 等不同孔间距的钻孔塑性区和垂直应力进行数值分析,结果如图9~图10所

示。数值模拟结果显示:钻孔间距为 5.0 m 时,钻孔塑性区可实现贯通,但考虑到工作面的持续推进会助力钻孔蝶叶塑性区扩张,且在孔间距 7.5 m 时两

个钻孔之间的垂直应力集中区最小。因此,综合塑性区分布、应力分布与施工工程量,选择 7.5 m 钻孔间距进行作业。

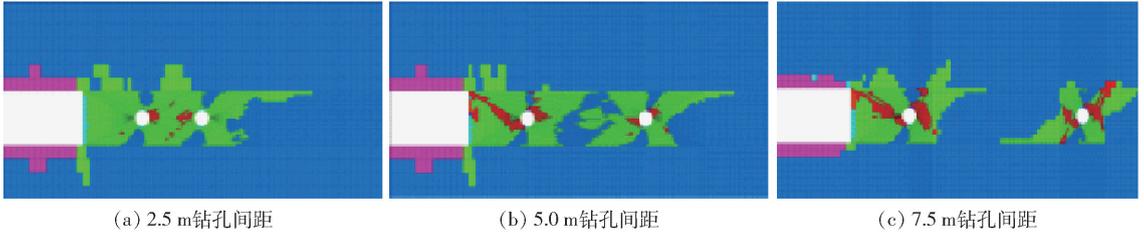


图9 不同孔径钻孔塑性区分布

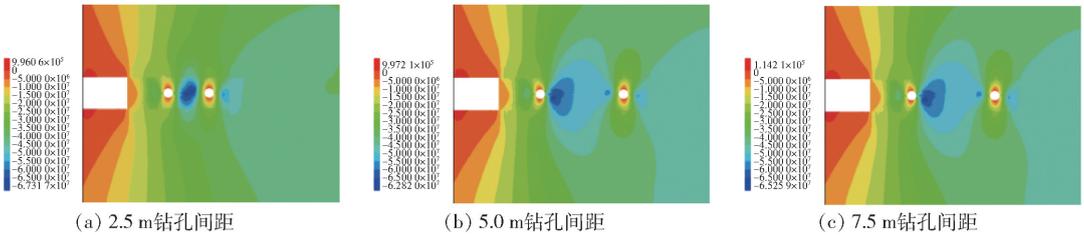


图10 不同孔径钻孔应力分布

3.2.3 不同孔深下围岩损伤特征

沿着工作面倾向方向,向煤体中钻取深度分别为 30 m、45 m、60 m、75 m,孔径为 600 mm 的大直径卸压钻孔,进行数值模拟运算。结果显示:不同孔深时其塑性区分布规律基本一致,但在沿钻孔方向在孔底上下塑性区分布差异较大,孔底卸压效果有限(图 11)。因此采用贯穿钻孔效果更佳。

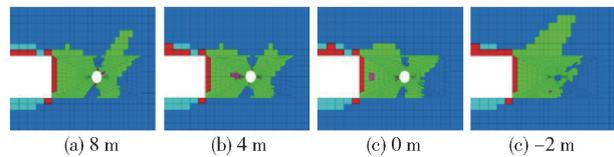


图11 60 m 孔深条件下距孔底不同位置塑性区分布特征

4 大直径钻孔解危工程应用

4.1 工程概况与方案布置

某矿工作面煤层平均厚度 2.0 m,平均埋深 500 m,工作面倾斜长度 155 m,煤层伪顶为厚度 1.0~2.9 m 的细砂岩,直接顶为厚度 35 m 的粉砂岩,老顶为厚度 19 m 的中粗砂岩,直接底为厚度 1 m 的细砂岩,老底为厚度 7 m 粉砂岩。煤层及顶底板符合“三硬”条件,其上覆顶板厚且坚硬,因此煤层易积聚弹性能,使其具备动力灾害的条件。

基于上述理论研究,进行超前钻孔卸压设计,具体参数为:沿工作面倾向布置孔径 600 mm、间距 7.5 m,贯穿工作面的大直径卸压钻孔。

4.2 现场工业性试验

在工作面临空侧超前顺槽每隔 5 m 沿巷帮布置 1 个 KBD7 在线式电磁辐射监测仪,检测电磁信号的频率、强度变化,以此分析测试区域应力变化,进而推断冲击地压发生的可能性,并在工作面利用 KBD5 便携式电磁辐射监测仪(距临空侧顺槽 5 m 布置第一个,每隔 10 m 布置 1 个)进行补充。

检测结果显示,在工作面前方 15 m 范围内,电磁辐射最大值的平均值(MAVE) < 37.03E/mV;而在工作面前方 20~30 m 范围内,压力显现较工作面前 15 m 范围内大,MAVE > 37.03E/mV。由此可见,电磁辐射的基值比较小、强度较低,表现比较平稳,说明工作面前方整个压力显现较弱,工作面前方大直径卸压钻孔作用明显。

5 结论

1) 当推进长度大于两个见方时,采空区周边应力趋于稳态,沿采空区最小主应力 P_3 受应力卸载影响,在采空区边界处出现拐点;垂直采空区 30 m 内最大主应力 P_1 急剧增加,显著影响距离可达 90 m,围压比 η 在采空区 10 m 内变化明显,轴向侧压系数变化较稳定,垂向侧向系数在近采空区出现较大波动。

2) 孔洞围岩在非等压应力场呈现 RPP 扩展特性,即在围压比 η 持续增大时孔洞围岩塑性区将出现圆形-椭圆形-蝶形的演化规律,其敏感性越强

烈并最终表现为塑性劣化,围岩失稳,能量释放,解释了工作面前方大直径钻孔卸压机理。

3) 基于蝶形理论,在某矿沿工作面倾向布置孔径 600 mm、间距 7.5 m,贯穿工作面的大直径卸压钻孔,现场实施后通过电磁辐射监测显示,取得了理想效果。

[参考文献]

- [1] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [2] 李永恩. 深部承压水上底抽巷围岩破坏规律及合理位置[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.
- [3] 李臣,霍天宏,吴峥,等. 动压巷道顶板非均匀剧烈变形机理及其稳定性控制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(5):1317-1327.
- [4] LI C, WU Z, ZHANG W, et al. A case study on asymmetric deformation mechanism of the reserved roadway under mining influences and its control techniques [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 22 (5): 449 - 460.
- [5] 汪北方,梁冰,张晶,等. 浅埋煤层采空区岩体应力空间分布特征研究[J]. 采矿与安全工程学报,2019,36(6):1203-1212.
- [6] 吴祥业,王婧雅,陈世江,等. 重复采动巷道塑性区调控原理与稳定控制[J]. 岩土力学,2022,43(1):205-217.
- [7] LI J, REN J, LI C, et al. Failure mechanism and stability control of soft roof in advance support section of mining face[J]. *Minerals*, 2023,13(2):1-17.
- [8] 康红普,高富强. 煤矿采动应力演化与围岩控制[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(1):1-40.
- [9] 马念杰,李季,赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [10] 郭晓菲,马念杰,赵希栋,等. 圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J]. 煤炭学报,2016,41(8):1871-1877.
- [11] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等. 煤层巷道冒顶机理与预警方法[J]. 煤炭学报,2018,43(S2):369-376.
- [12] 李臣. 蒙陕矿区双巷布置留巷围岩破坏机理及适用采深研究[D]. 中国矿业大学(北京),2022.
- [13] 康红普,姜鹏飞,黄炳香,等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报,2020,45(3):845-864.
- [14] 李臣,辛德林,贾成刚,等. 深部强采动巷道围岩稳定性控制策略分析[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2022年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司,中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,中科院武汉岩土力学研究所,2022:5.
- [15] 窦林名,田鑫元,曹安业,等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报,2022,47(1):152-171.
- [16] 姜福兴,张翔,朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术,2023,51(1):203-213.

Mechanism and Technical Application of Danger Elimination in Advance Drilling of Working Face Based on Butterfly Theory

LI Chen^{1,2,3}, YU Qiwei^{3,4}, LIAN Xiaoyong^{3,5}, WU Tong^{2,3}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. CCTEG Wuhan Engineering Company, Wuhan 430064, China;

3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

4. China Coal Xi'an design engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

5. Uroica (Shandong) Mining Technology Co., Ltd., Taian 271000, China)

Abstract: The paper is aimed at the problem of impact dynamic disasters caused by stress concentration ahead of the working face in mining. The universal axial and vertical stress distribution patterns in the mining space were studied through numerical simulations. The plastic damage mechanism of surrounding rock due to the action of non-uniform stress field was theoretically analyzed. The extension characteristics of the plastic zone of the surrounding rock under sustained stress field evolution were obtained. The

the manganese slag yard and its remediation were discussed by collecting the soil with different pollution levels around the manganese slag yard and using ryegrass as the test plant for pot-leaching test. The results showed that the migration of Mn and Cd to water was significantly reduced after planting ryegrass, and the dissolution of Mn and Cd in soil with different pollution levels was generally expressed as the aboveground part of ryegrass group. From the enrichment ability of ryegrass to heavy metals, the enrichment coefficients of Cd in roots were 0.788, 0.739, 0.547, 0.691 and 0.316, respectively, which were higher than those of Mn in roots, indicating that ryegrass had better remediation effect on Cd. After planting ryegrass, the content of available Mn and available Cd in soil increased significantly compared with the control group, but the total Mn content and total Cd content were lower than the control group. The total Mn content decreased by 206.55 – 897.41 mg/kg, and the total Cd content decreased by 0.02 – 0.40 mg/kg. The growth of ryegrass can promote the activation of heavy metals and increase their effectiveness, and then fix heavy metals in the body through plant absorption, thereby reducing the content of heavy metals in the external environment. The growth of ryegrass can reduce the migration of heavy metals to the external environment, reduce the impact of heavy metals on the surrounding environment, and play a certain role in repairing the contaminated soil around the manganese slag yard.

Key words: ryegrass; manganese slag yard; leaching; migration; heavy metals; repairing effect

(上接第 66 页)

mechanism of the butterfly-degradation trend of the plastic zone of the surrounding rock ahead of the working face under the effect of large-diameter unloading boreholes was explained. The results show that when the advancing length is greater than two square, the stress around the goaf tends to be stable, and the minimum principal stress P_3 along the goaf is affected by stress unloading, and there is an inflection point at the boundary of the goaf. The maximum principal stress P_1 increases sharply within 30 m in the vertical goaf, and the significant influence distance can reach 90 m. The confining pressure ratio changes obviously within 10 m in the goaf, the axial lateral pressure coefficient changes more stably, and the vertical lateral coefficient fluctuates greatly near the goaf. The surrounding rock of the hole shows RPP expansion characteristics in the non-isostatic stress field, that is, when the confining pressure ratio continues to increase, the plastic zone of the surrounding rock of the hole will appear the evolution law of circular-elliptical-butterfly shape, and its sensitivity is more and more intense and finally shows plastic deterioration, surrounding rock instability, energy release, which explains the pressure relief mechanism of large diameter borehole in front of the working face. Based on the above research, the layout parameters of large-diameter boreholes ahead of the working face in a certain mine were designed with a borehole diameter of 600 mm and a spacing of 7.5 m. After on-site application, monitoring points were respectively set up in the working face and roadway for electromagnetic monitoring. The monitoring results showed a weaker pressure ahead of the working face and a significant effect of the unloading boreholes.

Key words: stress distribution; butterfly plastic zone; RPP extension; large diameter drilling; relieve pressure and relieve danger