

焦家金矿深部巷道围岩稳定性控制优化研究

王兴亚

(山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿)

摘要:针对焦家金矿深部巷道现有支护体系无法有效防止巷道局部破坏的问题,结合岩石力学理论与工程实践展开了深入研究。通过现场调查与典型破坏模式分析,采用先进的结构面三维扫描技术,系统掌握了巷道岩体破坏特征及其成因。采用3DEC离散元软件建立了三维巷道开挖数值模型,对不同支护方案的稳定性进行了模拟分析。研究提出了具有创新性的斜交锚杆支护方案,针对巷道围岩复杂应力环境进行优化设计。数值模拟结果表明,优化后的支护体系显著提升了巷道整体和局部稳定性,有效抑制了破坏的发生,为深部巷道的安全运营提供了可靠保障。该方案不仅提升了支护效率,还降低了施工成本,为焦家金矿深部破碎巷道围岩稳定性控制提供了重要的参考和技术支持。

关键词:岩体力学;结构面扫描;岩体稳定;巷道破坏;支护设计;围岩控制

中图分类号:TD353

文章编号:1001-1277(2025)04-0025-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250405

引言

巷道支护技术是确保地下矿山安全和高效生产的重要环节,尤其是在深部开采中,复杂的地质条件和高地应力环境对支护技术提出了更高的要求^[1]。近年来,随着矿产资源的不断开发,深部矿产资源开采已成为研究的重点领域。深部开采面临的主要问题包括高地应力、软弱岩层、水浸等,这些问题对巷道的稳定性和安全性构成了严重威胁。为了应对这些挑战,众多学者和工程师进行了大量的研究,提出了多种创新性的支护技术和方法。骆秀生等^[2]针对巷道中锚索装卸的安全问题进行了深入探讨,指出了操作过程中的潜在风险点,并提出了相应的安全管理措施,这对于提高巷道施工的安全水平具有重要意义。与此同时,YANG等^[3]研究了高应力和软岩条件下水浸巷道的破坏机理及控制技术,通过理论分析和现场试验,提出了有效的支护方案,为解决类似地质条件下的巷道稳定性问题提供了科学依据。

支护技术的创新和优化也是研究的热点。刘许亭^[4]研究了某矿山破碎巷帮中锚索锚固力的提高技术,通过优化锚索参数和施工工艺,显著提升了支护效果。张延磊^[5]将锚索框架梁技术应用于滑坡的加固,结合预警技术,实现了对滑坡灾害的有效预防。武帅^[6]研究了饱和黏土层中锚索锚固段长度对支护效果的影响,提出了基于工程优化的设计方法,为复

杂地质条件下的支护设计提供了新思路。吴蒸^[7]对某矿山3号工作面的巷道锚杆支护方案进行了合理性分析,通过数值模拟和现场监测,验证了现有支护方案的有效性,并提出了改进措施。单仁亮等^[8]综述了国内外巷道支护技术的研究进展,总结了不同类型巷道支护技术的特点和适用条件,为选择合适的支护方案提供了参考。

此外,深部开采的特殊地质条件也对支护技术提出了新的挑战。周保精^[9]研究了充填体与围岩之间的协调变形机制,提出了沿空留巷技术。张忠辉等^[10]针对焦家金矿巷道围岩松动圈的特性,开展了支护技术研究,提高了巷道的稳定性和安全性。陈洪凯等^[11]研究了径向锚钉与斜交锚杆复合支护技术,证明了该技术在提高围岩稳定性方面的有效性。王云生^[12]对三山岛金矿西山深部北区矿体采场结构参数进行了优化,提出了合理的支护方案,有效提高了采场的稳定性和安全性。王辉等^[13]综述了深井开采地压基础理论与防控研究进展,为深井开采的安全管理提供了理论支持。赵兴东^[14]总结了黄金矿山深井开采的研究进展与发展趋势,指出了未来研究方向。沈泉生等^[15]研究了高海拔破碎围岩排水巷道锚索支护参数的优化,提出了适用于高海拔地区的支护方案。臧冀川^[16]对高水平应力矿岩接触带巷道的稳定性进行了分析,提出了有效的支护措施。鉴于岩体非连续性及多因素制约的力学行为,锚杆支护成为常用策略,但

收稿日期:2024-10-05;修回日期:2024-11-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001300)

作者简介:王兴亚(1988—),男,工程师,从事金属矿山采矿技术研究工作;E-mail:106533252@qq.com

针对破碎围岩的有效支护设计仍具挑战。山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿(下称“焦家金矿”)深部巷道面临围岩破碎问题,传统增密锚杆虽能提升承载力,但成本增加且效果有限,凸显个性化支护设计的重要性。本文针对焦家金矿14中段巷道受深部应力及开采扰动影响显著的现状,分析现有支护效果,借鉴成熟支护体系^[17-21],旨在提出优化策略,以增强围岩稳定性并实现支护成本的经济性。

1 工程背景

焦家金矿床属破碎带蚀变岩型金矿床。焦家金矿主要有焦家矿区、望儿山矿区和寺庄矿区3个矿区。其中,焦家矿区是主要的开采区域,目前已开采至14中段(-630 m水平),矿区内主要为玲珑花岗岩,位于矿体下盘及深部,矿体呈浅肉红色,中粒花岗结构,块状、片麻状构造。矿体上盘围岩为斜长角闪岩,稳固性差,暴露面积较大或滞留时间较长易发生塌落。矿体下盘为绢英岩化、硅化和钾化花岗岩,其内也发育有相互交错的裂隙节理,造成局部围岩破碎。

14中段为目前焦家金矿焦家矿区主要开拓中段,标高-630 m,已进入深部开采阶段,主要采用上向进路充填采矿法,单采场回采能力达94 t/d。在巷道开拓过程中,围岩状况较差的区域时常发生巷道围岩失稳破坏现象,严重干扰正常工期与生产安全。现有支护方案对于围岩破碎区的控制效果不够理想,亟须对现有支护措施进行优化以提升围岩破碎区域巷道的稳定性。

1.1 现有支护措施下围岩典型破坏特征

根据实地调查,14中段巷道围岩破坏形式主要表现为顶拱岩石的冒落、拱脚岩石的压剪型破坏、沿构造面挤出及两帮的片帮破坏(如图1所示)。其中,顶板岩石的三角形冒落多出现在交叉节理发育地段,而在2条垂直巷道的交叉口及周边小范围区域,拱脚的压剪型破坏与侧帮沿构造面挤出的现象更为明显。

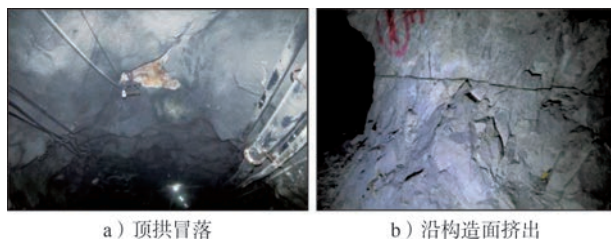


图1 14中段巷道主要破坏模式

Fig. 1 Main failure patterns in the Level 14 roadways

14中段巷道形状主要为直墙拱顶形巷道,顶部拱形基本可认为是三心拱,巷道的初始断面尺寸为3.5 m×3.5 m。三心拱巷道周边应力较大的区域通常为巷道顶板和拱角。这2处地方最容易因为压力过

大而出现岩体破坏,又由于区域地应力的影响,垂直于巷道的地应力大于垂直应力,使得巷道侧帮岩体中同样容易出现拉应力。同时,节理的存在会极大程度地劣化围岩自身的承载能力。巷道主要破坏模式力学状态如图2所示。由图2可知:顶板冒落一般发生在节理交叉发育的地方,岩石被交叉的节理组切割成楔形体,楔形体会在自重(G)作用下沿着节理面下滑,两侧的围岩会对其产生一个挤压力(N),从而使其在沿节理面的方向产生摩擦力(F);而当开挖活动影响到构造面的稳定时,挤压力(N)就会减弱,进而弱化周围岩体对楔形体的摩擦力(F),岩块就会冒落从而形成三角形的冒落空间。当巷道两侧节理较为发育,岩体中存在多组交叉节理面,相互交叉的节理面将两帮围岩切割成独立的岩块,这些岩块在重力分量和摩擦力(F)的作用下保持平衡状态;当有爆破扰动或地下水渗入节理面时,岩块与节理面之间的摩擦系数减小,从而使得重力分量大于摩擦力(F),岩块沿着节理面发生移动,即片帮。

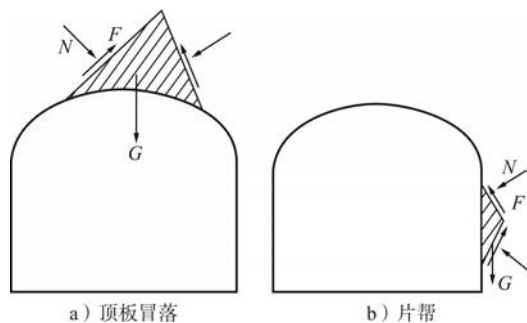


图2 巷道主要破坏模式力学状态

Fig. 2 Mechanical states of primary failure modes of roadways

1.2 巷道围岩结构面分布特征调查

为了能够更贴近真实的构建该区域的岩体数值计算模型,使用结构面数字识别系统ShapeMetriX 3D对14中段巷道围岩进行结构面调查分析(如图3所示),将现场所获取左视图、右视图导入软件分析系统,可以构建得到岩体表面的三维视图及结构面分布情况。

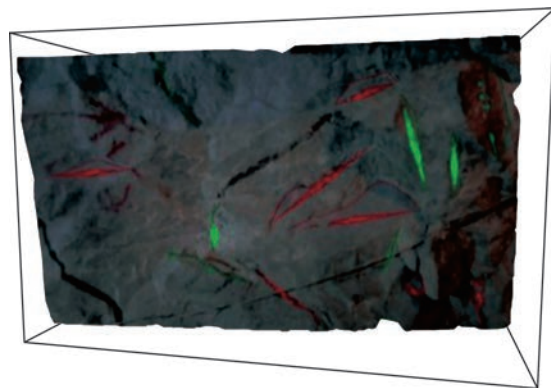


图3 岩体结构面扫描过程与结果

Fig. 3 Scanning process and results of rock mass structural planes

统计汇总巷道范围内的结构面调查信息,得出分析区域内 2 组优势结构面参数,结果如表 1 所示。

表 1 中段优势节理组结构参数

组别	倾向/(°)	倾角/(°)	迹长/m	间距/m	线密度	数量	占比/%
1	92.8	42.3	0.82	0.46	3.21	328	60.3
2	294.3	66.4	0.49	0.32	4.63	243	33.8

2 现有支护方案下巷道围岩变形特性

根据上文中得到的岩体力学参数对 14 中段典型穿脉巷道区域进行建模,结合现场节理裂隙调查结果,利用 3DEC 离散元软件与 DFN 方法,构建符合实际节理产状的随机裂隙网络计算模型(如图 4 所示),模型尺寸为 50 m×30 m×30 m,底部边界固定,其余边界施加法向约束,以巷道轴向为最大主应力方向,则按照地应力实测结果向模型施加应力场 $\sigma_x=26.75\text{ MPa}$, $\sigma_y=32.47\text{ MPa}$, $\sigma_z=25.46\text{ MPa}$ 。

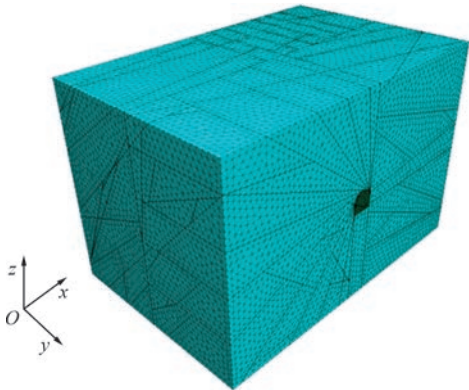
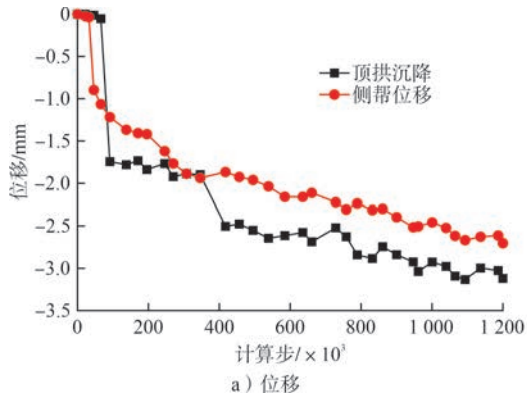
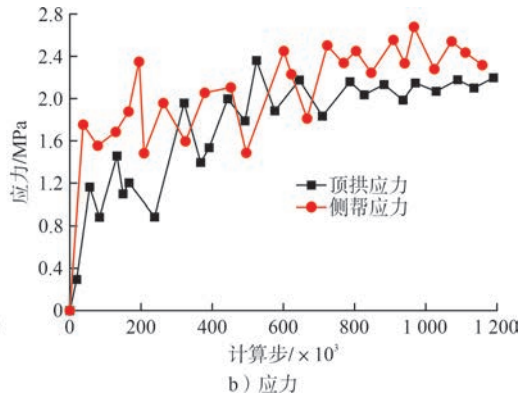


图 4 随机裂隙网络计算模型

Fig. 4 Calculation model for random fissure networks



a) 位移



b) 应力

图 6 监测点位移与应力变化趋势

Fig. 6 Displacement and stress variation trends at monitoring points

巷道围岩塑性区的分布情况如图 7 所示。由图 7 可知:现有支护结构下,在构造面较为发育的部位,塑性区会沿着构造面继续延伸,有多组构造面交叉的部位,巷道极易形成崩落或向临空面挤出的块体,影响巷道的稳定性。

14 中段现有支护方式为锚网支护,支护参数如表 2 所示,建立的现有支护结构数值模型如图 5 所示。

表 2 现有巷道围岩支护参数

Table 2 Support parameters for existing surrounding rock of the roadways	
类型	具体支护参数
管缝锚杆	长度 1.8 m, 直径 43 mm, 网度 1.2 m×1.2 m
钢筋网	规格 2 m×1 m, 直径 6 mm, 网度 1 m×1 m
混凝土喷层	厚度 0.05 m, 强度等级 C20

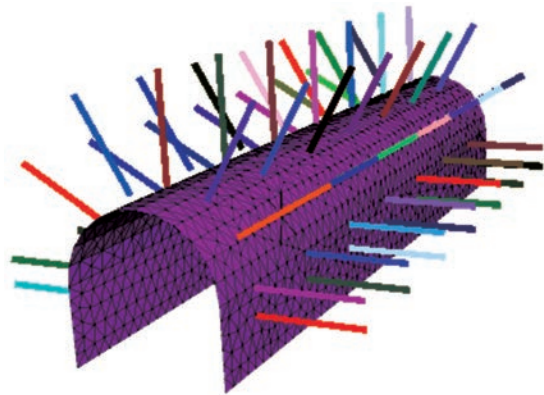


图 5 现有支护结构数值模型

Fig. 5 Numerical model of the existing support structure

巷道采用分步开挖的模式,以 2 m 为一个进尺,共开挖 5 次,在巷道轴向 1 m 位置的顶拱与右帮处设置位移与应力监测点,开挖完成后,监测记录的位移与应力变化趋势如图 6 所示。现有支护结构下,顶拱与侧帮位移在开挖完成后以较快的速度增长并随着巷道推进减缓增速,达到 3 mm 后仍在缓慢增长;巷道浅层围岩的拉应力值最大达 2.8 MPa,已超过岩石自身的抗拉能力,存在一定的风险。

在现有支护体系下,巷道围岩的顶拱沉降量和边帮挤出量均在合理范围边缘,且表层围压承受的拉应力也十分接近岩体的抗拉极限,一旦遇到节理的弱化作用,则极易沿着构造面产生大变形,严重威胁巷道的正常运营,因此需要对现有支护方案进行优化

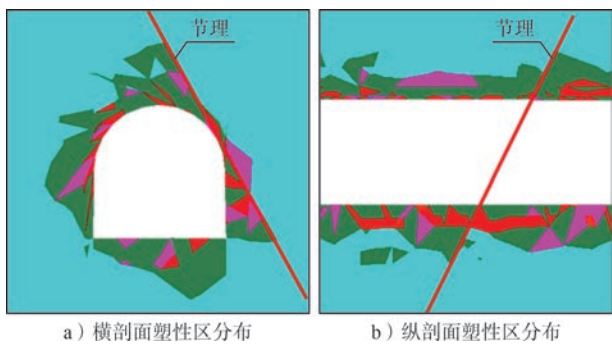


图7 巷道围岩塑性区分布

Fig. 7 Plastic zone distribution in surrounding rock of the roadways

调整,以维护巷道的稳定性与安全性。

3 斜交锚杆支护技术设计

岩体中的天然结构面容易相互交错延伸形成楔形体,而传统径向锚杆很难锚固小倾角径向结构面。当某一相邻排锚杆之间经过巷道壁面任一点的径向裂隙不能被锚杆有效拦截的区域即为锚固盲区(如图8所示),其大小可用式(1)进行量化描述。

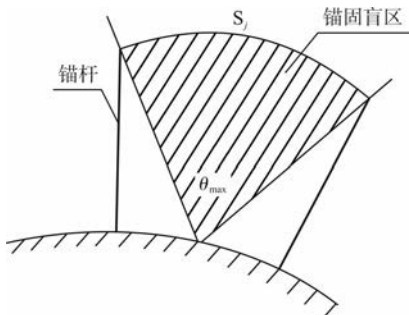


图8 现有支护锚固盲区示意图

Fig. 8 Schematic of blind zones of existing bolt support

$$M = S_j \theta_{\max} \quad (1)$$

式中: M 为锚固盲区(m); S_j 为围岩体内部相邻排锚杆端头间距(m); $\theta_{\max}$ 为盲区最大扫掠角度(°)。

针对现有支护方式对锚固盲区内围岩构造缺乏有效控制的缺点,提出斜交锚杆支护方案,斜交锚杆支护技术中锚固盲区可按式(2)计算,计算模型如图9

所示。

$$M = 2S_j \arctan\left(\frac{S_j}{2h}\right) \quad (2)$$

式中: h 为斜交锚杆顶端距巷道断面的距离(m)。

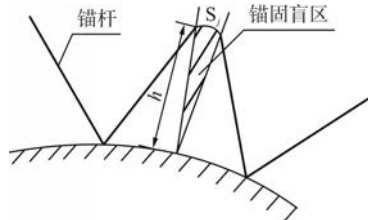


图9 优化支护锚固盲区示意图

Fig. 9 Schematic of blind zones of optimized bolt support

根据现有支护方案,相邻排锚杆端头间距为1.65 m,因此,计算得现有支护锚固盲区为0.872 m。优化后支护锚杆端头间距为0.32 m,锚固盲区为0.34 m,减小幅值约61%。

4 斜交锚杆支护效果验证

将斜交锚杆支护方案应用于数值模型,并进行开挖模拟,结果如图10所示。

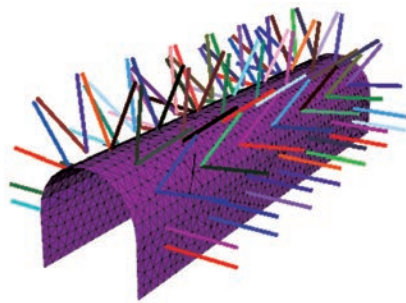


图10 优化后支护结构数值模型

Fig. 10 Numerical model of the optimized support structure

支护方案优化后监测点位移与应力变化趋势如图11所示。由图11可知,斜交锚杆支护技术对巷道顶板沉降、拉应力增长、塑性区分布相较于原支护有好的控制效果,顶拱与侧帮的位移处于安全范围之内,巷道表层围岩的拉应力也远小于围岩的抗拉承载能力,巷道失稳风险降低,稳固性提升。

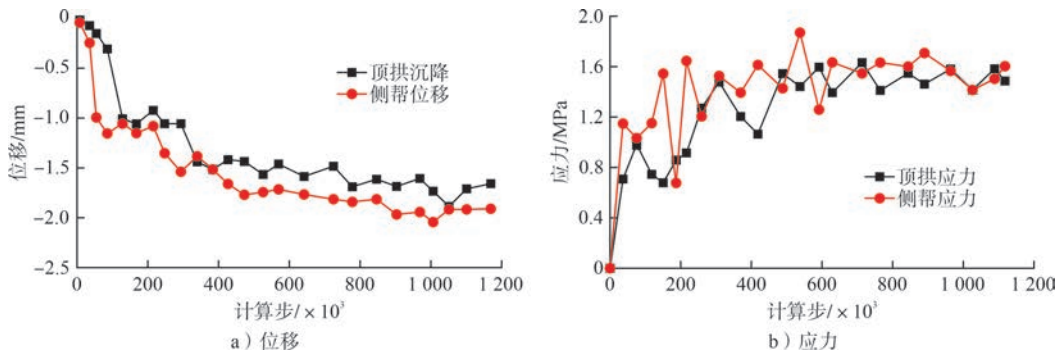


图11 支护方案优化后监测点位移与应力变化趋势

Fig. 11 Displacement and stress variation trends at monitoring points after support scheme optimization

巷道断面塑性区分布如图12所示。由图12可知:优化后的支护有效缩小了巷道顶拱与拱脚的塑性区集中程度,对塑性区会沿构造面进一步延伸的情况有了更好的控制,有效提升了巷道的整体稳定性与局部稳定性。

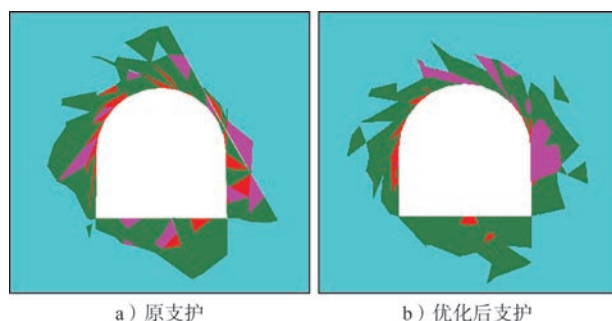


图12 原支护方案与优化支护方案围岩塑性区分布对比

Fig. 12 Comparison of plastic zone distributions in the surrounding rocks under original and optimized support schemes

根据优化后的支护方案,在14中段选择一个独头位置进行了小型工业试验。试验期间,对巷道的变形情况进行了实时监测,发现围岩位移明显减少,巷道轮廓保持了较好的几何形状,没有出现明显的塌陷或裂缝。试验结果显示,优化后的支护方案在多个方面表现优异,能够有效控制破碎围岩的变形与破坏,显著提升了巷道的稳定性。虽然初期投入成本有所增加,但由于支护效果显著,减少了后续的维护和修复工作,整体运营成本得到了有效控制。此外,优化后的支护方案还提高了作业安全系数,减少了因围岩不稳定导致的事故风险,为矿山的安全生产提供了有力保障。

5 结 论

1)通过对焦家金矿焦家矿区14中段巷道围岩主要破坏模式展开调查,明确了巷道的破坏模式以顶板冒落、拱脚崩坏与片帮为主,并对破坏区域典型围岩进行结构面三维扫描,明确了区域优势结构面的产状。

2)通过3DEC离散元软件构建符合现场实际的裂隙岩体三维模型,分析现有支护方案下的巷道稳定性,结果表明现有支护方案下,围岩位移与应力均贴近安全值,且对节理构造处的围岩塑性区控制效果较差。

3)以缩小锚固盲区为基本思路,提出斜交锚杆支护技术,有效地提升了巷道整体的稳定性及对于节理

构造发育的局部区域稳定性的控制能力。

【参 考 文 献】

- [1] 王运敏.现代采矿手册[M].北京:冶金工业出版社,2011.
- [2] 骆秀生,王德勇,王冉.煤矿锚索装卸安全讨论与研究[J].煤矿现代化,2018,27(3):71-72.
- [3] YANG R S, LI Y L, GUO D M, et al. Failure mechanism and control technology of water-immersed roadway in high stress and soft rock in a deep mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(2): 245-252.
- [4] 刘许亨.赵庄煤业破碎巷帮锚索锚固力提高技术研究[J].山东煤炭科技, 2020, 38(3): 28-30.
- [5] 张延磊.锚索框架梁加固公路滑(边)坡的预警技术研究[D].西安:长安大学, 2017.
- [6] 武帅.饱和粘土层锚索锚固段长度效应研究及工程优化[D].济南:济南大学, 2017.
- [7] 吴蒸.东峰煤矿3号煤工作面巷道锚杆支护方案合理性研究[D].西安:西安科技大学, 2017.
- [8] 单仁亮,彭杨皓,孔祥松,等.国内外煤巷支护技术研究进展[J].岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2 377-2 403.
- [9] 周保精.充填体-围岩协调变形机制与沿空留巷技术研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2012.
- [10] 张忠辉,安龙,吴大伟,等.焦家金矿巷道围岩松动圈测试与破碎岩体支护技术[J].金属矿山, 2019(12): 56-61.
- [11] 陈洪凯,梁丹,董平,等.隧道径向锚钉-斜交锚杆复合支护技术研究[J].地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 754-760.
- [12] 王云生.三山岛金矿西山深部北区矿体采场结构参数优化[J].黄金, 2024, 45(9): 17-22.
- [13] 王辉,段文权,刘敬智,等.深井开采地压基础理论与防控研究进展[J].黄金, 2024, 45(8): 19-27.
- [14] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金, 2024, 45(8): 1-18.
- [15] 沈泉生,王志勇,赵紫月.高海拔破碎围岩排水巷道锚索支护参数优化[J].黄金, 2024, 45(5): 9-13.
- [16] 臧冀川.高水平应力矿岩接触带巷道稳定性分析[J].黄金, 2024, 45(1): 23-29.
- [17] 田全虎,和学衡,许卫军,等.深部巷道支护方案数值模拟优选及应用[J].黄金, 2023, 44(2): 8-13.
- [18] 王小平,王文杰,黄永祥,等.金川三矿破碎围岩巷道变形控制方式优选研究[J].矿业研究与开发, 2024, 44(10): 65-72.
- [19] 李全水.深埋松散特厚煤层巷道变形及全锚索梯次让压支护技术研究[J].山西冶金, 2024, 47(9): 220-223.
- [20] 赵磊,杨志,陈新明,等.软岩巷道全断面锚注支护技术应力分布特征研究[J].煤炭技术, 2024, 43(10): 53-58.
- [21] 袁鹏,刘振坡.多因素影响下巷道稳定性控制及支护技术研究[J].煤矿现代化, 2024, 33(5): 73-77, 83.

(下转第47页)

- [4] 刘煜,文全国,孙华丽,等.UP850-N型切粒机切刀崩刃原因分析及处理方法[J].石油化工设备,2020,49(2):75-79.
- [5] 张玉坤.锤式破碎机轴承发热原因分析及处理措施[J].水泥,2022(3):63-64.
- [6] 范子健,李帅.破碎机轴承温度过高原因分析及处理[J].水泥,2021(7):2.
- [7] 王跃辉,吴佳佳,邵彬,等.旋回破碎机破碎腔衬板优化研究进展[J].矿山机械,2020,48(3):1-8.
- [8] 张栋,贾方俊,孙建福,等.料机回转轴承低寿命原因分析及处理方法[J].内燃机与配件,2022(4):100-102.
- [9] 张荣波.旋回破碎机衬板失效机制及其预防措施研究[J].矿山机械,2022,50(2):12-15.
- [10] 王跃辉.旋回破碎机衬板脱离问题的力学分析与改进设计[D].北京:中国矿业大学(北京),2023.
- [11] 王瑞彦.乌山铜钼矿备用设备管理探析[J].黄金,2018,39(6):1-3.
- [12] 龚姚腾,张文明,罗小燕.基于破碎性能和衬板磨损特性分析的旋回破碎腔型优化设计[J].北京科技大学学报,2008(11):1 301-1 306.
- [13] 许翔宇,彭文屹,罗显芝,等.大型旋回破碎机衬板及型腔优化进展[J].江西科学,2024,42(5):1 008-1 014,1 073.
- [14] 张志远.旋回破碎机的工艺参数优化研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(7):164-166.
- [15] 沈鑫.破碎设备基本技术参数的优化及应用[J].黄金,2017,38(10):48-52.

Analysis of liner detachment causes and solutions for gyratory crushers

Gao Xiaoguo

(Inner Mongolia Pacific Mining Co., Ltd.)

Abstract: This study focuses on the liner detachment issue in the Germany ThyssenKrupp KB54-75 gyratory crusher and carries out systematic analysis before proposing solutions. By analyzing the equipment's working principles, structural characteristics, and liner functional roles, the causes of detachment are systematically investigated, including design flaws, inadequate material properties, installation deviations, maintenance oversights, and harsh operating conditions. Comprehensive solutions are proposed correspondingly: optimized liner structural design, high-performance material selection, standardized installation procedures, enhanced maintenance protocols, and improved operational environments. Practical applications demonstrate that these measures significantly enhance liner stability and equipment efficiency, providing technical insights for addressing similar failures in gyratory crushers.

Keywords: gyratory crusher; liner detachment; equipment failure; design optimization; material selection; equipment maintenance

(上接第 29 页)

Optimization study on stability control of surrounding rock in deep roadways of the Jiaojia Gold Mine

Wang Xingya

(Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining Industry (Laizhou) Co., Ltd.)

Abstract: To address the inefficiency of existing support systems in preventing localized failures in deep roadways at the Jiaojia Gold Mine, this study integrates rock mechanics theory and engineering practice. Through field investigations and analysis of typical failure patterns, advanced 3D structural plane scanning technology was employed to systematically master roadway rock mass failure characteristics and causes. A 3DEC discrete element software was used to develop a 3D numerical model for roadway excavation that simulates and analyzes the stability of various support schemes. An innovative diagonal bolt support scheme was proposed, specifically optimized for the complex stress environment of the surrounding rock. Numerical simulation results demonstrate that the optimized support system significantly enhances both global and local stability, effectively suppressing failure initiation and ensuring safe operations in deep roadways. This solution not only improves support efficiency but also reduces construction costs, providing critical references and technical insights for stability control in fractured surrounding rock under deep mining conditions at the Jiaojia Gold Mine.

Keywords: rock mechanics; structural plane scanning; rock mass stability; roadway failure; support design; surrounding rock control