

巨龙铜矿地应力对大断面巷道稳定性与岩爆倾向性数值模拟

沙仙武¹, 陈才贤^{1,2}, 李佳建²

1. 西藏巨龙铜业有限公司, 西藏 拉萨 850200;

2. 北京科技大学, 北京 100083

中图分类号: TD353 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0052-06

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.007

摘要 分析矿山深部巷道稳定性及岩爆倾向性对于矿山安全建设具有重要意义。以巨龙铜矿大断面深埋长巷道为研究对象, 利用数值模拟手段探究了青藏高原地应力影响下环形排水巷稳定性, 分析了巷道掘进后岩爆倾向性。结果表明, 环形排水巷道围岩内应力以水平应力为主, 最大主应力为 32 MPa, 在 16 段排水巷道中, 应力主要集中于巷道 DE、EF、DG 段。巷道围岩水平位移大于垂直位移, 环形排水巷道最大位移以 M 点为中心向四周扩散。GM 段、HL 段、KN 段巷道围岩均发生了较大变形, 对于该区域巷道应加强支护。巷道 DE、EF、DG 段最大弹性应变达到 1.01×10^{-6} J/m³, 呈现出岩爆倾向, 可通过减小开挖进尺削弱岩体局部应力集中。现场监测表明模拟结果可靠。该研究结果为巨龙铜矿环形排水巷施工及地压灾害防控提供了理论参考。

关键词 巨龙铜矿地应力; 大断面; 巷道稳定性; 岩爆倾向性; 数值模拟

随着我国经济社会的高速发展, 基础工业也在蓬勃发展, 而矿产资源作为基础工业的粮食, 需求量也在逐渐增大^[1-3]。在地下矿山开采过程中, 巷道工程施工是必要的一项工作, 而巷道开挖后, 地下空间更容易受到岩爆影响^[4-5]。故巷道稳定性分析和岩爆倾向有效预测对于保证矿山作业人员安全性和矿山生产具有重要的作用^[6-8]。围岩的稳定性研究主要包括顶板下沉、顶板开裂、底鼓、边墙开裂和片帮等方面。岩爆是一种围岩失稳破坏模式, 研究人员对于矿山岩爆倾向性分析进行了大量的实验研究工作。在理论分析方面, 熊泽华等^[9]以某矿区深部铜铅锌矿为工程背景, 利用水压致裂法对该矿区的地应力进行了测试, 基于地应力的测量数据, 对深部围岩应力场进行了综合评价, 应用 Russenes 和 Turchaninov 判别法评估了岩爆倾向性, 结果表明, 埋深超过 550 m 时强岩爆发生概率较大。杜久华等^[10]针对深部金矿岩爆问题, 以阜山金矿为工程背景, 进行了现场地应力测试、室内岩石力学试验, 得到了不同位置下岩体弹性变形能指数, 分析了岩体岩爆倾向性, 提出了不同岩体质量情况下的岩爆防控支护技术, 对于不同围岩条件下的永

久巷道和临时巷道提出了差异化的支护方案。吝曼卿等^[11]以鄂西磷矿为工程背景, 综合分析了 11 个矿区不同埋深的岩爆现象, 探究了磷块岩和白云岩等不同岩性的岩爆倾向性, 探讨了岩爆防控措施, 分析了未来大数据、互联网、遥感探测等新技术的应用。在数值模拟方面, 刘加柱等^[12]为了探究更为符合工程实际的岩爆倾向性评判方法, 依托埋深超千米的某铜矿工程, 将改进的黏结强度弱化-摩擦强度强化模型, 结合能量指标实现岩爆倾向性分析, 并采用点估计-有限元分析方法应用于岩爆倾向性评判, 求得了岩爆倾向性的概率模型, 得到直观的岩爆概率分布情况, 结果对岩爆支护及风险评估具有参考意义。赵磊^[13]利用数值模拟针对晋邦德矿深部巷道应力集中大变形的的问题进行了分析。结果表明, 爆破炮孔超过 5 m 时巷道顶底板位移骤然增大。陈浩等人^[14]针对深部开采面临的“三高一扰动”问题, 分析了深部巷道破坏特征, 提出了锚网喷支护、钻孔卸压、注水等岩爆防治措施, 基于 FLAC3D 数值模拟分析, 选择二郎山判据判别各方案的岩爆情况, 发现软化-锚网喷支护-超前钻孔-周边钻孔方案的岩爆防治效果良好。

收稿日期: 2024-03-13

作者简介: 沙仙武, 学士, 工程师, 主要从事金属矿开采技术与管理等方面工作, E-mail: 290143567@qq.com。

通信作者: 李佳建, 主要从事金属矿开采技术等方面工作, E-mail: lijiajian0123@163.com。

综上所述,现有研究主要通过现场地应力测量与数值模拟进行岩爆倾向性分析。数值模拟能够清晰地呈现研究结果。西藏巨龙铜业有限公司拟建排水巷埋深大、距离长,需对巷道稳定性与岩爆倾向性进行分析。本研究针对巨龙铜矿大断面环形巷道掘进过程中巷道稳定性以及岩爆倾向问题进行了研究分析,采用数值模拟的方法探究了巨龙铜矿排水巷道掘进后各方向位移及应力场变化,对巷道的岩爆倾向进行了预测,以期对相关大断面巷道稳定性研究和岩爆倾向预测提供参考。

1 工程背景

巨龙矿区位于拉萨市墨竹工卡县甲玛乡境内。该区域大地构造位于冈瓦纳大陆北缘,地处冈底斯—念青唐古拉板片中段南部边缘的冈底斯陆缘火山—岩浆弧的东段。冈底斯板片由北向南划分为措勤—纳木错初始弧间盆地、念青唐古拉弧背断隆、冈底斯陆缘火山—岩浆弧、雅鲁藏布江结合带等次级构造单元。根据钻探结果,该区域地层主要有人工填土层、第四系坡残积层及坡洪积层(碎石层),下伏基岩为千枚岩、凝灰岩。目前,巨龙铜矿拟修建两条环形排水巷道。巷道断面尺寸为 $6.2\text{ m}\times 6.2\text{ m}$ 和 $4.4\text{ m}\times 4.4\text{ m}$ 两种。环形排水巷总长度约 18 km ,巷道最大埋深约 660 m ,采用TBM盾构和钻爆法同时施工。属于大断面埋深长距离巷道。

2 数值模拟模型建立

2.1 模型建立

根据地质资料建立三维模型并进行网格划分,所有网格均为四面体网格。模型长度为 $6\,000\text{ m}$,宽度为 $3\,000\text{ m}$,最大高度 $1\,257\text{ m}$ 。三维计算模型如图1所示。图2为环形排水巷剖面图,由图可知,环形排水巷共穿过6种地层。由于环形排水巷道长度较大,为便于分析,将巷道分段命名,共划分为18段巷道,分别为AB段、BC段、CD段、DE段、EF段、FG段、GH段、HI段、HJ段、JK段、KL段、LM段、MN段、NO段、OP段、DG段、GM段、HL段。

2.2 地应力参数确定

现有研究表明,青藏高原地区地应力属于构造应

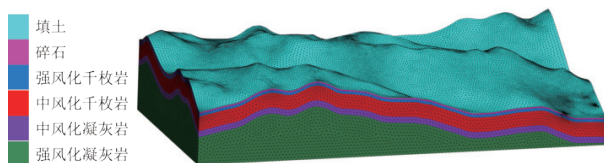


图1 环形排水巷数值模拟网格模型

Fig. 1 Numerical simulation grid model of annular drainage lane

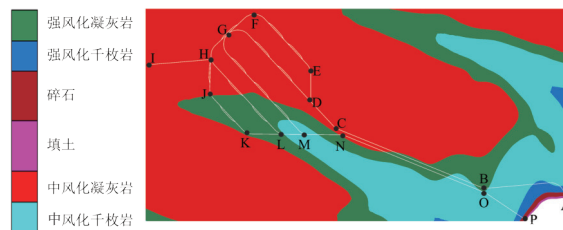


图2 环形排水巷剖面图

Fig. 2 Section view of circular drainage lane

力场类型。巨龙铜矿与甲玛矿区相邻,因此,以甲玛矿区地应力研究结果为依据进行数值模拟计算。刘建东等通过最小二乘法原理和线性回归方法得出甲玛矿区地应力计算公式如下^[19]:

$$\sigma_{h,\max} = 2.36 + 0.04H \quad (1)$$

$$\sigma_{h,\min} = 0.38 + 0.03H \quad (2)$$

$$\sigma_v = 0.06 + 0.03H \quad (3)$$

式中: $\sigma_{h,\max}$ 为最大水平主应力,MPa; $\sigma_{h,\min}$ 为最小水平主应力,MPa; σ_v 为垂直主应力,MPa; H 为深度,m。

计算过程中,对模型侧面和底面施加约束,顶部自由。图3和图4显示了水平方向和垂直方向应力平衡结果。数值模拟过程中应力场与实际地应力场相似。

3 大断面巷道稳定性分析

通过分析环形排水巷围岩应力和位移分布探究其稳定性。图5显示了环形排水巷剖面不同方向应力分布云图。图中最大主应力为 32 MPa ,水平最大应力为 30 MPa ,垂直方向最大应力为 27.5 MPa ,水平最大应力比垂直最大应力高 9.09% 。应力以水平应力为主。整体而言,应力主要集中于巷道AC段和NP段以外的区域。其中,YY方向应力、ZZ方向应力和最大主应力分布情况相似,应力主要集中于巷道DE、EF、DG段。ZZ方向应力主要集中于EF段与DG段巷道的间柱中。这与该区域埋深较大有关。EF段与DG段巷道的间柱内应力主要来自于巷道顶底板,间柱对顶底板起支撑作用,因此,间柱的厚度对于两侧巷道稳定性至关重要。

图6显示了环形排水巷道掘进后围岩位移分布云图。可以发现,AC段和NP段巷道围岩位移量较小,分析认为这可能与该区域埋深较浅、围岩内地应力较小有关。在水平方向,最大位移主要集中分布于GM段和LM段巷道。在垂直方向上,最大位移主要集中于LM段巷道以及该区域巷道间柱内。总体而言,巷道围岩水平位移大于垂直位移。环形排水巷道最大位移以M点为中心向四周扩散。GM段、HL段、KN段巷道围岩均发生了较大变形。应增加GM段、HL段、KN段巷道支护强度,同时对该区域巷道围岩进行位移监测,避免发生冒顶、片帮等安全事故。实

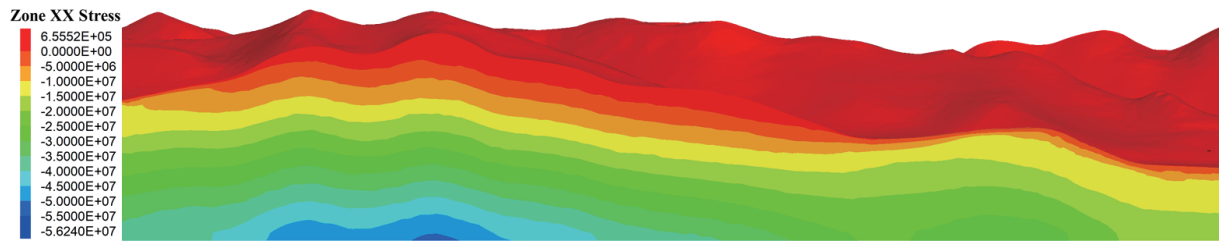


图3 XX方向应力平衡结果

Fig. 3 Stress balance results in XX direction

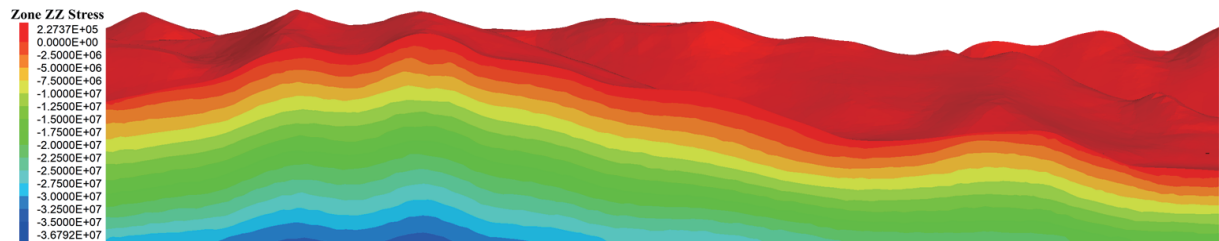


图4 ZZ方向应力平衡结果

Fig. 4 Stress balance results in ZZ direction

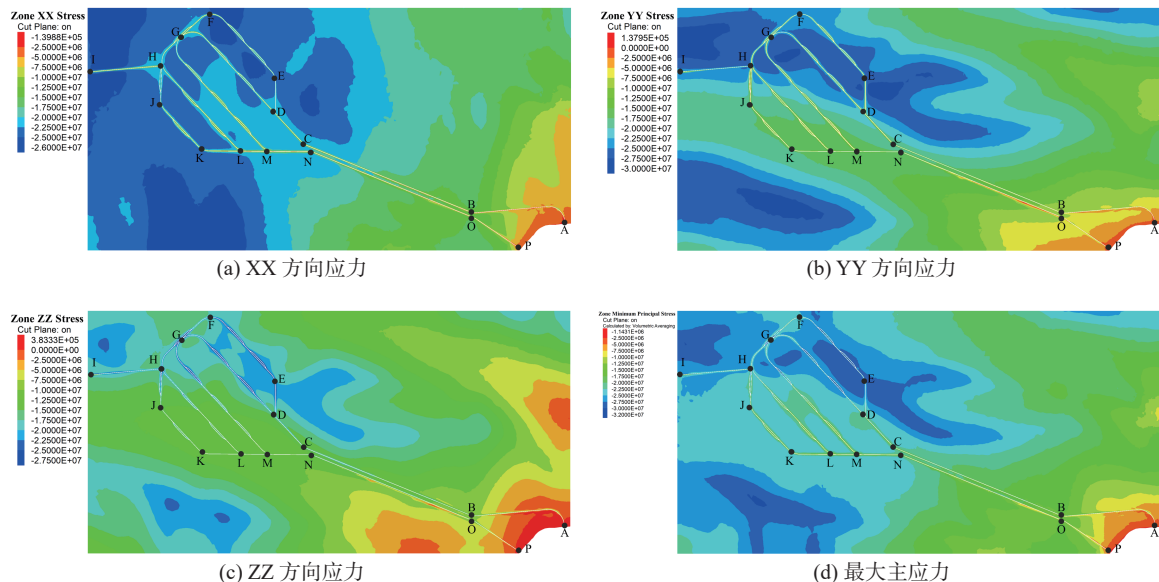


图5 环形排水巷道掘进应力分布云图

Fig. 5 Cloud map of stress distribution in circular drainage roadway

际施工过程中, LN 段、GM 段和 HL 段巷道采用盾构机进行施工, KL 段采用爆破方式掘进, 在以上位移较大区域, 应减小进尺, 同时优化爆破参数, 岩体揭露后及时支护, 避免围岩出现较大位移。

4 大断面巷道岩爆倾向性分析

为了分析环形巷道掘进过程中围岩体能量分布和能量聚集程度, 在数值模拟过程中定义弹性应变能参数 We , 分析掘进过程中巷道围岩能量分布特征。岩石弹性应变能计算公式如下:

$$We = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (4)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别是围岩单元内主应力; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分

别是围岩单元内主应变。

围岩内聚集的应变能越大, 诱发的岩爆强度越高。现有研究成果表明, 围岩内聚集的应变能大于 $1.0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 时, 易发生岩爆和冲击地压^[16-17]。

图7显示了环形排水巷掘进后围岩内弹性应变能分布结果。结合图5可知, 环形排水巷掘进后, 应力主要集中于巷道 DE、EF、DG 段。该区域最大弹性应变能达到 $1.01 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, 巷道围岩呈现出岩爆倾向性, 说明巷道围岩存在一定的安全隐患, 与应力分析结果一致。在该区域巷道掘进过程中应加强超前地质探测, 对岩爆发生的可能性进行预测。在施工过程中, 该区域采用 TBM 盾构掘进。因此, 可通过控制进尺, 减小局部岩体内应力集中。掘进完毕后, 增加该区域支护强度。

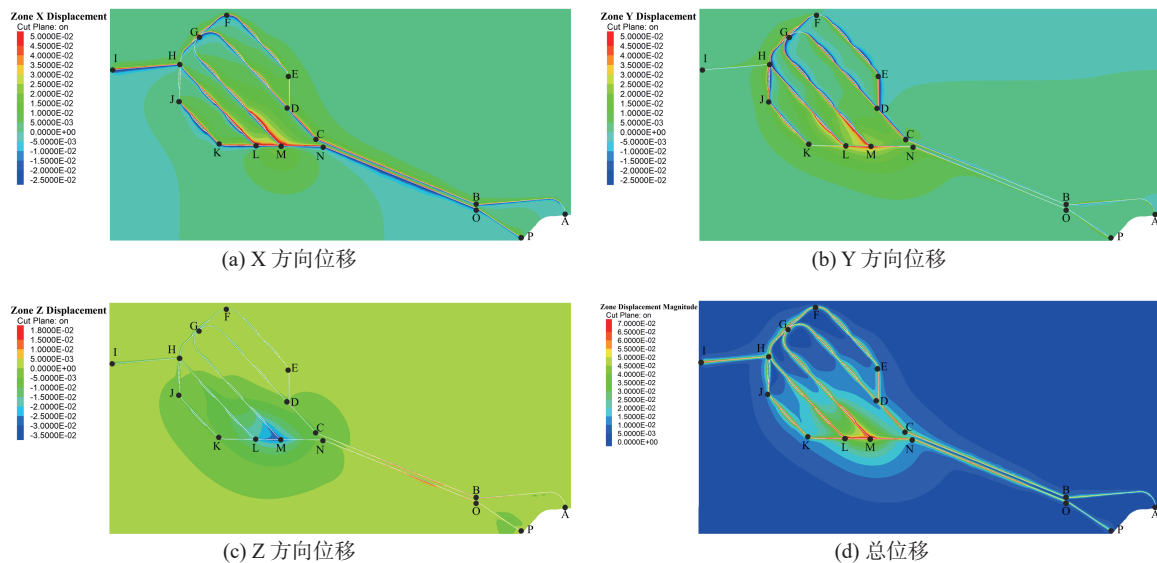


图 6 环形排水巷掘进位移分布云图

Fig. 6 Cloud map of displacement distribution in circular drainage roadway

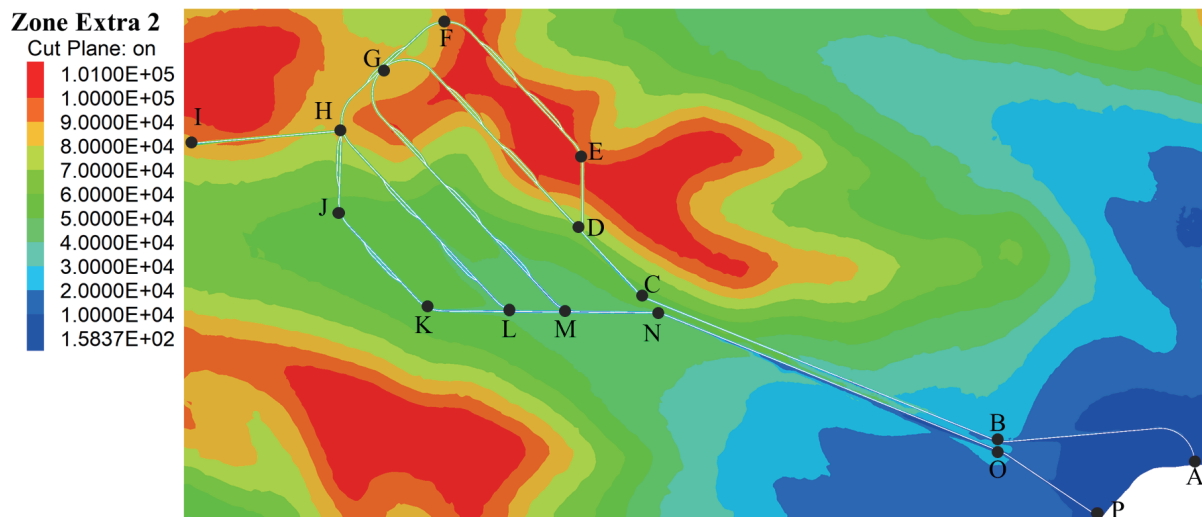


图 7 环形排水巷掘进结束后围岩弹性能分布

Fig. 7 Distribution of elastic energy of surrounding rock after excavation of circular drainage roadway

5 现场监测

目前,排水巷仅完成了 NO 段、OP 段巷道施工 (TBM 盾构)。在 NO 段巷道选取破碎带区域安装了地压检测系统。由破碎带对称向两侧布置监测站,监测站间距 5 m,每个监测站安装一台围岩离层监测仪和两台钻孔应力计,分别安装在巷道两帮距离底板约 1~1.5 m 位置处,安装深度为 3~5 m。监测点布置如图 8 所示。监测结果见表 1。

监测结果表明,巷道围岩应力在 3.78~6.05 MPa 之间。围岩位移值在 0.13~0.75 mm 之间,此位移值为支护后巷道位移值,因此比模拟结果较小。整体而言,监测结果与模拟结果相一致,NO 段巷道稳定性较好。岩爆倾向性小。

6 结论

(1)巨龙铜矿环形排水巷道围岩最大主应力为 32 MPa,水平最大应力为 30 MPa,垂直方向最大应力为 27.5 MPa,水平最大应力比垂直最大应力高 9.09%。应力以水平应力为主。应力主要集中于巷道 DE、EF、DG 段。

(2)环形排水巷 AC 段和 NP 段巷道围岩位移量较小,水平方向最大位移主要集中分布于 GM 段和 LM 段巷道。垂直方向最大位移主要集中于 LM 段巷道以及该区域巷道间柱内。环形排水巷道最大位移以 M 点为中心向四周扩散。GM 段、HL 段、KN 段巷道围岩均发生了较大变形。对于该区域施工,TBM 盾构应减小进尺,钻爆法掘进应进行爆破参数优化,以减小围岩内应力集中。

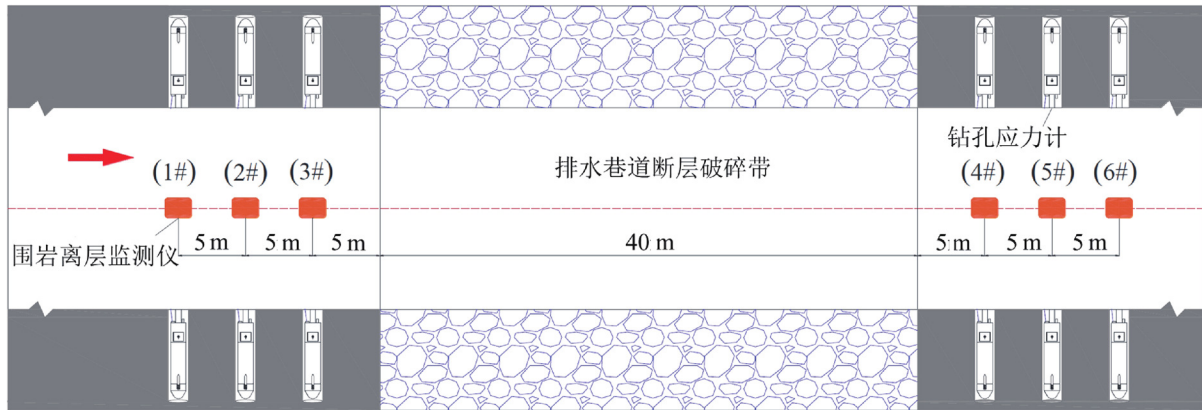


图8 监测点位布置平面图

Fig. 8 Monitoring point layout plan

表1 现场监测结果

Table 1 Field monitoring results

监测设备	监测结果/MPa	监测设备	监测结果/MPa	监测设备	监测结果/mm
钻孔应力计1	4.94	钻孔应力计7	4.67	离层监测仪1	0.60
钻孔应力计2	5.86	钻孔应力计8	4.92	离层监测仪2	0.75
钻孔应力计3	3.92	钻孔应力计9	4.30	离层监测仪3	0.36
钻孔应力计4	5.55	钻孔应力计10	4.59	离层监测仪4	0.44
钻孔应力计5	4.91	钻孔应力计11	5.58	离层监测仪5	0.68
钻孔应力计6	5.14	钻孔应力计12	4.99	离层监测仪6	0.13

(3) 环形排水巷掘进后, 应力主要集中于巷道 DE、EF、DG 段, 该区域最大弹性应变达到 $1.01 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, 巷道围岩呈现出岩爆倾向性, 说明巨龙铜矿巷道围岩存在一定的安全隐患。

(4) 现场监测结果与模拟结果一致性较好, NO 段巷道较稳定, 表明模拟结果可靠, 可为相关大断面巷道稳定性研究和岩爆倾向预测提供一定的参考依据, 用于指导现场生产。

在未来的研究中, 应对巨龙铜矿大断面巷道岩爆倾向性做进一步深入研究, 并对岩爆倾向性较高区域进行监测。

参考文献:

[1] 李强, 刘春, 李仕俊, 等. 浅谈有色金属矿产资源地质找矿勘查布局[J]. 世界有色金属, 2023(12): 69-71.
LI Q, LIU C, LI S J, et al. Discussion on the geological prospecting and exploration layout of non-ferrous mineral resources[J]. World Non-ferrous Metals, 2023(12): 69-71.

[2] 刘金菊. 浅谈我国有色金属矿产资源综合利用的现状、问题及对策[J]. 世界有色金属, 2023(6): 94-96.
LIU J J. Discussion on the status quo, problems and countermeasures of comprehensive utilization of non-ferrous mineral resources in China[J]. World Nonferrous Metals, 2023(6): 94-96.

[3] 彭齐鸣. 矿业与英国工业革命[J]. 中国矿业, 2023, 32(12): 1-7.
PENG Q M. Mining industry and British industrial revolution[J]. China Mining Industry, 2023, 32(12): 1-7.

[4] 乔兰, 董金水, 刘建, 等. 我国地下金属矿山岩爆灾害发生机制及预测方法研究进展[J]. 金属矿山, 2023(3): 14-28.

QIAO L, DONG J S, LIU J, et al. Research progress on occurrence mechanism and prediction method of rock burst disaster in underground metal mines in China[J]. Metal Mine, 2023(3): 14-28.

[5] 梁伟章, 赵国彦. 深部硬岩矿山岩爆风险防控技术研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 454-468.
LIANG W Z, ZHAO G Y. Research progress of rock burst risk prevention and control technology in deep hard rock mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 454-468.

[6] 李夕兵, 宫凤强, 王少锋等. 深部硬岩矿山岩爆的动静组合加载力学机制与动力判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 708-723.
LI X B, GONG F Q, WANG S F, et al. Mechanical mechanism and dynamic criterion of rock burst under combined dynamic and static loading in deep hard rock mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 708-723.

[7] 江飞飞, 周辉, 刘畅, 等. 地下金属矿山岩爆研究进展及预测与防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 956-972.
JIANG F F, ZHOU H, LIU C, et al. Research progress, prediction and prevention of rock burst in underground metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 956-972.

[8] 黄凤辉. 金属矿山岩爆调查及防治[J]. 新疆有色金属, 2018, 41(6): 11-14.
HUANG F H. Rock burst investigation and prevention in metal mines[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2018, 41(6): 11-14.

[9] 熊泽华, 林金山. 基于地应力测量的深部矿区岩爆预测研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(9): 1-4+9.
XIONG Z H, LIN J S. Research on rock burst prediction in deep mining area based on in-situ stress measurement[J]. Modern Mining, 2023, 39(9): 1-4+9.

[10] 杜久华, 刘海波, 高新雨, 等. 深部金矿岩爆倾向性分析与防控支护设计研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 404-408.

- DU J H, LIU H B, GAO X Y, et al. Research on rock burst tendency analysis and control support design of deep gold mine[J]. China Mining Industry, 2023, 32(S1): 404–408.
- [11] 吝曼卿, 孙郡阳, 张继豹, 等. 地下磷矿山岩爆研究进展及防控措施[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(4): 16–21+55.
- LIN M Q, SUN J Y, ZHANG J B, et al. Research progress and prevention measures of rock burst in underground phosphate mines[J]. Chemical Minerals and Processing, 2023, 52(4): 16–21+55.
- [12] 刘加柱, 高永涛, 吴顺川, 等. 考虑岩体性质空间变异的岩爆倾向性概率评估[J]. 工程科学学报, 2024, 46(1): 1–10.
- LIU J Z, GAO Y T, WU S C, et al. Probabilistic evaluation of rockburst tendency considering spatial variation of rock mass properties[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2019, 46(1): 1–10.
- [13] 赵磊. 深部巷道围岩钻孔卸压与控制技术研究[J]. 机械管理开发, 2023, 38(8): 268–270.
- ZHAO L. Research on pressure relief and control technology of deep roadway surrounding rock drilling[J]. Machinery Management Development, 2023, 38(8): 268–270.
- [14] 陈浩, 李子彬. 深部巷道岩爆防控措施效果对比研究[J]. 有色金属 (矿山部分), 2023, 75(4): 37–45.
- CHEN H, LI Z B. Comparative study on effect of rock burst prevention and control measures in deep roadway[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(4): 37–45.
- [15] 刘建东, 于世波. 高海拔矿区地应力测量和岩爆倾向性评价[J]. 中国矿业, 2022, 31(1): 140–145.
- LIU J D, YU S B. In-situ stress measurement and rockburst tendency evaluation in high altitude mining area[J]. China Mining Industry, 2002, 31(1): 140–145.
- [16] 张书国, 戴岭, 贺永胜, 等. 深部隧道岩爆倾向性预测与开挖优化数值模拟[J]. 现代矿业, 2023, 39(9): 5–9.
- ZHANG S G, DAI L, HE Y S, et al. Numerical simulation for prediction of rockburst propensity and optimisation of excavation in deep tunnels[J]. Modern Mining Industry, 2023, 39(9): 5–9.
- [17] 柳禄湧, 李凯舟, 王能伟, 等. 山东招远水旺庄金矿深部地应力特征及其岩爆倾向性分析[J]. 地质力学学报, 2023, 29(3): 417–429.
- LIU L Y, LI K Z, WANG N W, et al. Characteristics of the deep geological stresses in the Zhaoyuan Shuiwangzhuang gold mine and analysis of its tendency to rockburst[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(3): 417–429.

Numerical Simulation of the Impact of Geostress on the Stability and Rockburst Susceptibility of Large Cross-section Roadways at Julong Copper Mine

SHA Xianwu¹, CHEN Caixian^{1,2}, LI Jiajian²

1. Tibet Julong Copper Industry Co., Ltd, Lhasa, Tibet 850200, China;

2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: Analysing the stability of deep mine passages and rockburst propensity is of great significance to the safe construction of mines. The stability of the circular drainage tunnel under the influence of geostress on the Tibetan Plateau was investigated by numerical simulation using a large cross-section deep buried long roadway in Julong Copper Mine as the research object. The propensity for rockbursts after roadway excavation was analysed. The results show that the internal stresses in the surrounding rock of the circular drainage tunnel are dominated by horizontal stresses, and the maximum principal stress is 32 MPa. In the 16 sections of the drainage roadway, the stresses are mainly concentrated in sections DE, EF and DG of the roadway. The horizontal displacement of the roadway enclosure is greater than the vertical displacement. The maximum displacement of the circular drainage roadway spreads in all directions with point M as the centre. GM section, HL section, KN section of the roadway perimeter rock have occurred a large deformation, for this area of the roadway should be strengthened support. The maximum elastic strain of the DE, EF and DG sections of the roadway reached $1.01 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, showing a tendency of rock explosion. Weakening of local stress concentrations in the rock mass by reducing the excavation scales. On-site monitoring has shown the modelling results to be reliable. The results of this paper provide theoretical references for the construction of ring drainage tunnel and ground pressure disaster prevention and control in Julong copper mine.

Keywords: ground stress of Julong copper mine; large section; tunnel stability; rockburst propensity; numerical simulation

引用格式: 沙仙武, 陈才贤, 李佳建. 巨龙铜矿地应力对大断面巷道稳定性与岩爆倾向性数值模拟[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 52–57.

SHA Xianwu, CHEN Caixian, LI Jiajian. Numerical simulation of the impact of geostress on the stability and rockburst susceptibility of large cross-section roadways at Julong copper mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(2): 52–57.