

高海拔破碎围岩排水巷道锚索支护参数优化

沈泉生¹,王志勇¹,赵紫月^{2*}

(1. 西藏巨龙铜业有限公司; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院)

摘要:合理的支护形式与支护参数是确保巷道围岩稳定的关键。巨龙铜矿排水巷道Ⅳ级围岩区域采用锚杆+金属网+喷浆进行联合支护效果较差。针对巨龙铜矿Ⅳ级围岩区域支护存在的问题,在现有支护基础上增加锚索和钢拱架支护,同时增加喷浆厚度。设计了不同锚索支护参数,利用有限元数值模拟软件进行了锚索支护参数优化。结果表明:巷道围岩顶板处存在明显应力集中现象。随着锚索支护参数增加,巷道顶板处最大应力值增加。随着锚索间排距增大,巷道顶板最大位移增加,锚杆间距由1.2 m增加至2.0 m,巷道顶板位移分别为4 mm、4.38 mm、4.82 mm。锚索最优支护参数为1.6 m×2.4 m。研究结果为类似巷道锚索支护参数选取提供了理论参考。

关键词:高海拔;巷道支护;破碎围岩;锚索支护;数值模拟

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)05-0009-05

doi:10.11792/hj20240503

引言

随着中国经济高质量发展,矿产资源作为经济发展基础被大量开发应用,浅部且赋存状态良好的矿产资源近年来大量缩减,深部矿床、高海拔矿床的开采成为了资源开发的主流方向^[1-5]。井巷作为矿产资源开采所必需的基础设施,其安全性关系着矿山开发的成败^[6-8]。由于高海拔矿床井巷施工极易遇不良地质条件,故不良地质条件下高海拔巷道支护参数需进行详细的优化工作,以保证井巷施工、营运的安全性^[9-11]。陈才贤等^[12]以西藏某铜矿皮带巷道为工程背景,采用数值模拟软件分析了不同支护方案下巷道开挖支护稳定性,并对皮带巷支护方案与参数进行了优化,通过现场监测验证了该方案满足矿区皮带巷运输安全的要求。丹增等^[13]针对高寒高海拔和软岩地质条件下某隧洞施工过程中遇到的工程问题,研究采用超前支护+刚性支护+柔性支护+有序排水的支护技术,结果表明,该技术可以有效处理围岩支护难题,研究成果对于同类型工程具有一定的参考意义。沙仙武等^[14]针对高海拔大断面皮带巷道变形破坏难题,采用数值模拟的方法研究了皮带巷道开挖过程中的变形规律,总结得出了高海拔大断面皮带巷道变形机理,并提出了相应的支护工艺,符合矿山安全高效开采要求。黄启贵等^[15]以开挖过程中发生突水涌泥事故的西藏某隧道为工程背景,结合数值模拟方法还原了浅埋软弱围岩大断面隧道施工力学模型,研

究结果表明,CRD法在该隧道的应用可以有效控制拱顶下沉及周边位移,并且还可以有效降低围岩扰动,提高巷道全部开挖后围岩的稳定性。黎倩^[16]通过川西高原工程案例,对不良地质条件下隧道施工的基本原则、施工难点和施工限制因素进行总结,提出了高海拔地区软岩隧道施工方案的具体优化措施,有效提高了隧道施工质量。

本次研究对西藏巨龙铜业有限公司(下称“巨龙铜矿”)破碎围岩条件下排水巷道施工稳定性进行探讨,通过数值模拟方法分析不同锚索支护参数下巨龙铜矿排水巷道的变形特征,对软弱围岩排水巷道支护方案进行优化设计。研究结果可为相关高海拔破碎围岩排水巷道的支护设计提供一定的依据。

1 工程概况

巨龙铜矿位于青藏高原冈底斯山脉东段,为极高山地带,平均海拔在5 200 m。目前,该矿区拟施工2条长距离深埋排水巷道,该巷道为直径6.47 m的圆形巷道。前期地质勘探与岩石力学试验结果表明,排水巷道贯穿多种地层和数条破碎带。围岩主要为千枚岩、凝灰岩和英安岩,岩体稳定性为Ⅲ—Ⅴ级。根据岩体稳定性等级设计不同支护方式。

施工过程中,Ⅱ—Ⅲ级围岩采用锚杆+金属网+喷浆进行联合支护。其中,锚杆为直径22 mm、长2.5 m的树脂锚杆,间排距为1.0 m×1.0 m。金属网为直径6 mm、网度100 mm×100 mm的钢筋网。采

收稿日期:2024-01-25;修回日期:2024-03-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2905003)

作者简介:沈泉生(1967—),男,高级工程师,从事矿山管理工作;E-mail:290143567@qq.com

*通信作者:赵紫月(1996—),男,硕士研究生,从事金属矿山采矿工艺等方面的研究工作;E-mail:zhaoyiyue0211@163.com

用 C25 混凝土进行喷浆支护,喷浆厚度 135 mm。该支护方式对 II—III 级围岩支护效果较好,而对 IV 级围岩支护强度较弱。根据现场实际情况,在现有支护基础上增加锚索和钢拱架支护,钢拱架为 29U 型钢支架,厚度 124 mm,间距 500 mm。同时,将喷浆厚度增加到 250 mm。目前,锚索支护参数有待研究。

2 锚索支护方案设计与模型建立

2.1 锚索支护参数设计

在矿山生产过程中,巷道顶板稳定性至关重要。因此,破碎围岩区域巷道顶板采用 4 根锚索进行支护。根据 GB/T 5224—2014《预应力混凝土用钢绞线》,选取直径为 18.9 mm、强度为 1 860 MPa 的标准钢绞线,锚索采用 JLM 型锚具,垫板厚 20 mm、面积 $S = 220 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ 。设计 3 种不同锚索支护参数(如表 1 所示)。

表 1 设计锚索支护参数

Table 1 Design of bolt support parameters

方案	锚索长度/m	锚索间距/m	锚索排距/m
方案一	8.0	1.2	2.0
方案二	8.0	1.6	2.4
方案三	8.0	2.0	2.8

2.2 模型建立

根据巷道设计方案,巷道直径为 6.47 m,模型长度和高度设为巷道直径的 5 倍。建立巷道掘进三维数值模型,模型长、宽、高分别为 32.35 m、10 m、32.35 m。模型共创建 14 683 个网格节点,76 208 个网格。模型采用莫尔—库仑强度准则。支护结构包括锚索、锚杆、钢拱架及喷射混凝土。根据锚索支护设计方案建立 3 种不同锚索支护参数模型。锚杆锚索采用 Cable 结构。数值模型和支护结构如图 1 所示。

2.3 数值模拟参数确定

由于巨龙铜矿未进行地应力测试研究,因此,选

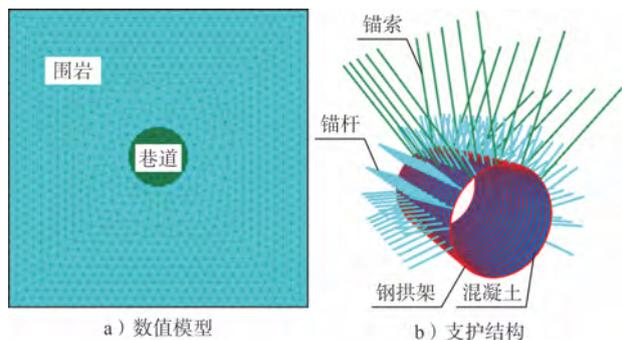


图 1 数值模型与支护结构

Fig. 1 Numerical model and support structure

取距离较近的甲玛矿区地应力测试结果进行数值模拟计算。地应力参数通过查阅文献获取。根据前期岩石力学试验研究结果获取岩石力学参数,结果如表 2 所示。

表 2 岩石力学参数

Table 2 Parameters of rock mechanics

内摩擦角/ (°)	内聚力/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强度/ MPa
25	4.43	0.22	2 650	4.51

3 数值模拟结果及分析

3.1 应力

不同锚索支护参数下应力分布云图如图 2~4 所示。巨龙铜矿地应力以水平方向地应力为主。由图 2~4 可知:水平方向最大应力集中在巷道顶板区域,垂直方向最大应力集中于巷道肩部。最大主应力分布形式与水平方向应力分布相似,最大应力集中于巷道顶板位置。除顶板位置外,巷道围岩应力分布较均匀。最小主应力沿锚杆支护区域近似均匀分布。由最大主应力分布可知:3 种锚索参数下巷道顶板应力值较接近。顶板区域应力随着锚索间排距增大而增大。因此,当锚索间排距大时,巷道顶板位置易发生较大位移,可能出现冒顶等事故。

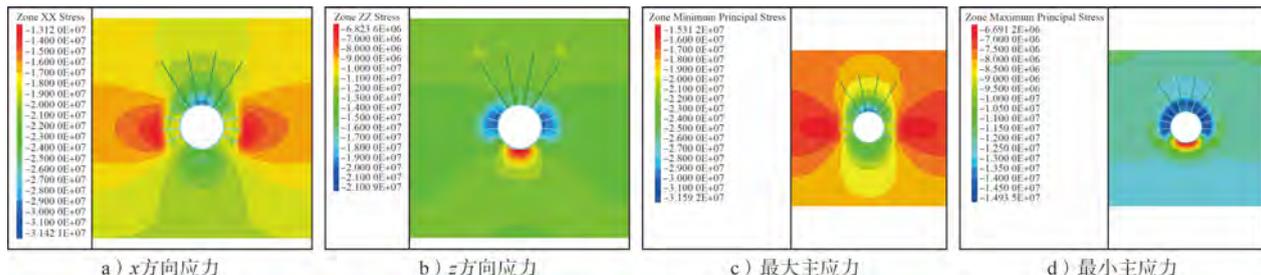


图 2 方案一应力分布云图(锚索间距 \times 排距 1.2 m \times 2.0 m)

Fig. 2 Cloud chart of stress distribution of Scheme 1 (bolt gap \times row gap 1.2 m \times 2.0 m)

不同锚索支护参数垂直应力分布云图如图 5 所示。由图 5 可知:锚索间距为 1.2 m 时,巷道顶板最

外侧锚索位置应力为 18.32 MPa;锚索间距为 1.6 m 时,巷道顶板最外侧锚索位置应力为 19.84 MPa;锚

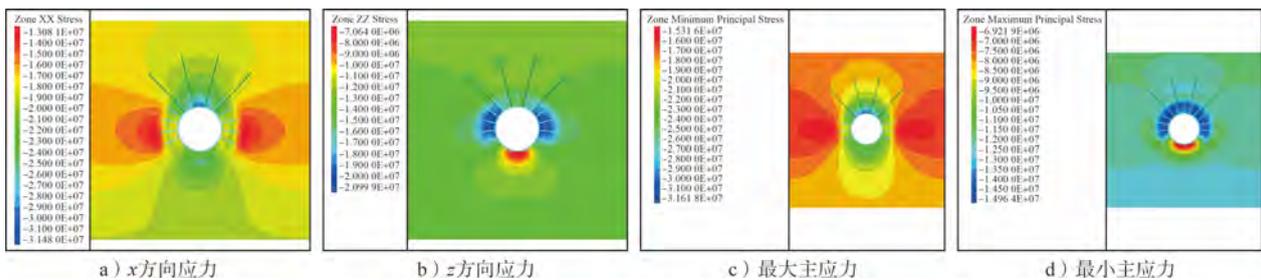


图3 方案二应力分布云图(锚索间距×排距1.6 m×2.4 m)

Fig. 3 Cloud chart of stress distribution of Scheme 2 (bolt gap × row gap 1.6 m × 2.4 m)

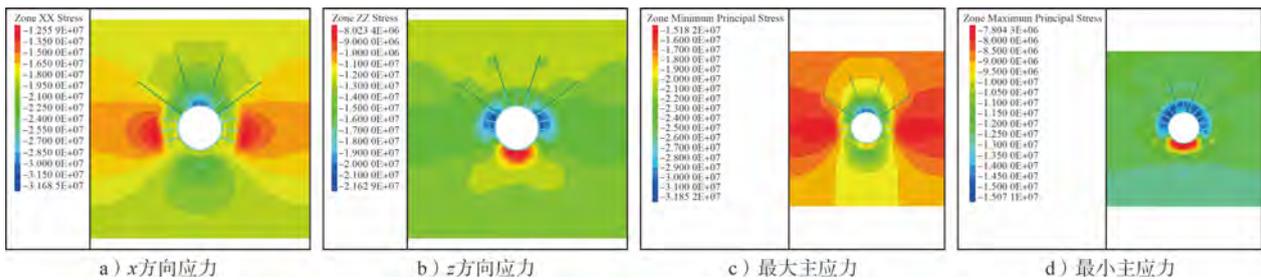


图4 方案三应力分布云图(锚索间距×排距2.0 m×2.8 m)

Fig. 4 Cloud chart of stress distribution of Scheme 3 (bolt gap × row gap 2.0 m × 2.8 m)

索间距为2.0 m时,巷道顶板最外侧锚索位置应力为21.18 MPa。锚索间排距增加导致顶板锚索加固区域应力明显增加。由图5-a)可知,当锚索间距为1.2 m时,

4根锚索间黄色区域贯通为整体,这表明锚索间围岩受力均匀,锚索锚固区围岩共同承载效果较好;而锚索间距大于1.2 m时,锚索间关联性较差。

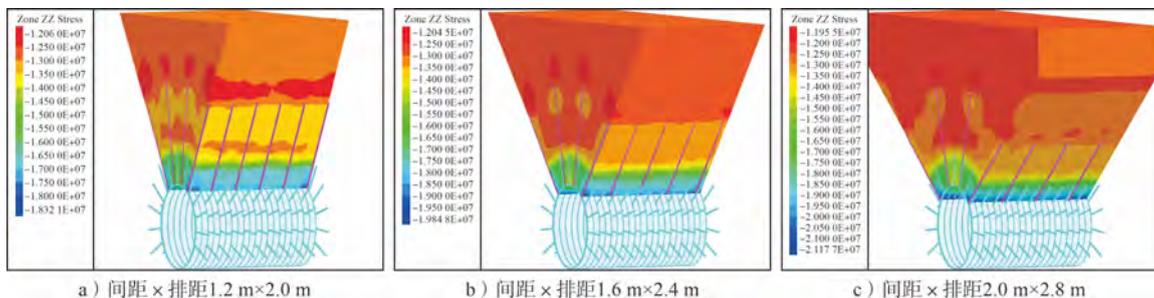


图5 不同锚索支护参数垂直应力分布云图

Fig. 5 Cloud chart of stress distribution of different bolt support parameters

3.2 位移

不同锚索支护参数下位移云图分布形式如图6~8所示。巷道水平方向最大位移主要发生在巷道两帮位置,垂直方向最大位移主要发生在顶板位置。结

合应力可知,巷道围岩地应力以水平方向地应力为主。因此,水平方向位移大于垂直方向位移。例如:当锚索间距为1.2 m时,水平方向最大位移为5.54 mm,垂直方向最大位移为4 mm。

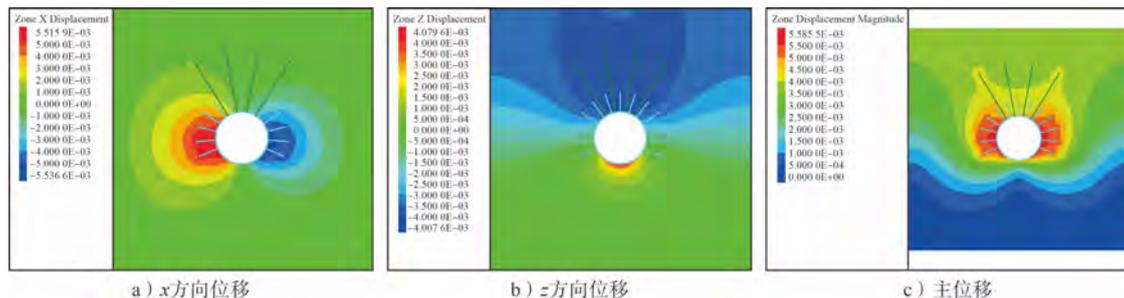


图6 方案一位移分布云图(锚索间距×排距1.2 m×2.0 m)

Fig. 6 Cloud chart of displacement of Scheme 1 (bolt gap × row gap 1.2 m × 2.0 m)

由水平方向位移分布可知,不同锚索支护参数下最大水平位移分别为5.54 mm(锚索间距1.2 m)、

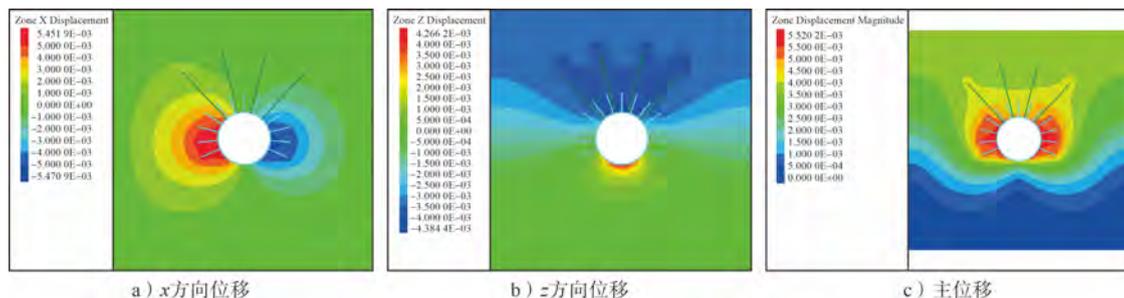


图7 方案二位移分布云图(锚索间距 \times 排距 $1.6\text{ m}\times 2.4\text{ m}$)

Fig. 7 Cloud chart of displacement of Scheme 2 (bolt gap \times row gap $1.6\text{ m}\times 2.4\text{ m}$)

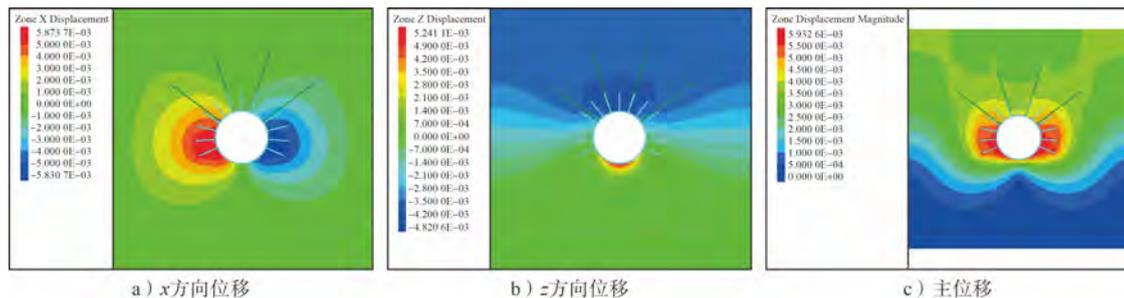


图8 方案三位移分布云图(锚索间距 \times 排距 $2.0\text{ m}\times 2.8\text{ m}$)

Fig. 8 Cloud chart of displacement of Scheme 3 (bolt gap \times row gap $2.0\text{ m}\times 2.8\text{ m}$)

5.47 mm(锚索间距 1.6 m)、5.83 mm(锚索间距 2.0 m)。位移值相差较小,且规律不明显。垂直方向最大位移随着锚索间排距增大而增大。锚索间距离由 1.2 m 增加至 2.0 m ,巷道顶板位移分别为 4 mm 、 4.38 mm 、 4.82 mm 。模拟结果表明,锚索间排距越小,锚索支护效果越好。

此外,通过垂直方向应力云图可以发现,锚索间排距较小时,各个锚索间关联性较强。例如:方案一、方案二中深蓝色区域连通成为整体;而方案三中仅中间两根锚索锚固作用较好,两侧锚索仅单独发挥作用。

综上所述,锚索支护参数为 $2.0\text{ m}\times 2.8\text{ m}$ 时,支护效果相对较差;锚索支护参数为 $1.2\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 时,巷道顶板应力和位移均最小。但是,锚索间排距过小时,顶板锚固区较小。为了使顶板较大区域形成较好的锚固效果,最终确定锚索支护参数为 $1.6\text{ m}\times 2.4\text{ m}$ 。

4 结论

针对现场实际情况,对IV级围岩采用锚杆+钢拱架+喷浆支护的基础上增加锚索支护,设计了不同锚索支护参数,通过有限元数值模拟软件进行计算,分析了不同锚索支护参数下巷道围岩内应力和位移变化,主要结论如下:

1) 巷道围岩最大主应力与水平方向应力分布形式相似,顶板处存在明显应力集中现象。随着锚索支护参数增加,巷道顶板处最大应力值增加。锚索间距离为 2.0 m 时,巷道顶板最外侧锚索位置应力为

21.18 MPa 。

2) 巷道围岩最大位移主要出现在巷道两帮位置。不同锚索支护参数下巷道围岩最大位移相似,主要区别在于巷道顶板位移变化。随着锚索间排距增大,巷道顶板最大位移增加,锚索间距离由 1.2 m 增加至 2.0 m ,巷道顶板位移分别为 4 mm 、 4.38 mm 、 4.82 mm 。锚索最优支护参数为 $1.6\text{ m}\times 2.4\text{ m}$ 。

[参考文献]

- [1] 赵兴东,朱乾坤,代碧波,等.深部金属矿超前序次释压机理与调控方法研究进展[J].金属矿山,2023(8):153-161.
- [2] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
- [3] 杨庆元,魏诚.地下金属矿山开采技术发展探索[J].世界有色金属,2023(1):46-48.
- [4] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉,等.金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3409-3421.
- [5] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.
- [6] 夏泽.大屯锡矿井巷工程三维建模方法与探讨[J].中国金属通报,2022(10):41-43.
- [7] 刘砚捷.YPL萤石矿井巷工程项目施工风险管理研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [8] 亚呼甫,李再易.黄山南铜镍矿井巷工程掘支工艺优化研究[J].采矿技术,2019,19(1):19-21.
- [9] 王清.隧道监控量测在高海拔隧道软弱大变形围岩施工中的应用[J].四川水泥,2023(8):198-200.
- [10] 鲁海峰.高海拔地区富水隧道防排水施工技术研究[J].运输经理世界,2023(14):106-108.
- [11] 王刘勋.高海拔高应力地区隧道施工工艺技术研究[J].价值

- 工程,2023,42(13):31-33.
- [12] 陈才贤,陈磊,黄智强. 高海拔软破大断面巷道支护设计及参数优选研究[J]. 矿业研究与开发,2022,42(10):88-94.
- [13] 丹增,刘杉,冯云龙,等. 高寒高海拔地区软岩长引水隧洞变形塌方处理技术——以西藏拉洛水利枢纽工程德罗引水隧洞为例[J]. 水利水电快报,2022,43(11):44-47,53.
- [14] 沙仙武,吴健辉,刘现培,等. 高海拔软破大断面巷道变形破坏机理及控制技术研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(2):13-19.
- [15] 黄启贵,陈慧伟,胡俊. 高海拔地区贯穿破碎带涌水涌泥地段隧道初期支护体系及开挖方法研究[J]. 公路,2022,67(7):441-444.
- [16] 黎倩. 高海拔地区软弱围岩隧道施工工艺[J]. 四川水泥,2021(6):155-156.

Optimization of bolt support parameters for drainage roadway of high-altitude broken surrounding rock

Shen Quansheng¹, Wang Zhiyong¹, Zhao Ziyue²

(1. Xizang Julong Copper Industry Co., Ltd. ;

2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: Reasonable support form and support parameters are the key to ensuring the stability of the roadway surrounding rock. The joint support effect of bolt + metal mesh + shot grouting in the Grade IV surrounding rock area of the drainage roadway of Julong Copper Mine in Xizang is poor. In this paper, for the problems of support in the Grade IV surrounding rock area of the drainage roadway of Julong Copper Mine, bolt and steel arch support, as well as the thickness of shot grouting, is introduced on the basis of the existing support. Different bolt support parameters are designed and optimized using finite element numerical simulation software. The results show that there is an obvious stress addition phenomenon at the roadway surrounding rock roof. With the increase of bolt support parameters, the maximum stress value at the roadway roof increases. With the increase of row spacing between bolts, the maximum displacement of the roadway roof increases, the bolt spacing increases from 1.2 m to 2.0 m, and the displacement of the roadway roof is 4 mm, 4.38 mm, and 4.82 mm, respectively. The optimal support parameter of the bolts is 1.6 m × 2.4 m. The results of the study provide theoretical references for the selection of the support parameters of the bolts of similar roadways.

Keywords: high altitude; roadway support; broken surrounding rock; bolt support; numerical simulation