

基于数值模拟的不同等级顶板支护效果分析

杨志芳

(内蒙古金陶股份有限公司)

摘要:金陶金矿井下岩体掘进过程中存在的地质问题、掌子面及成形巷道均出现冒顶片帮现象,尤其是破碎区域巷道冒顶片帮出现概率较高。通过数值模拟和现场应用等方式,对不同等级顶板支护效果进行评价,结果表明:金陶金矿井下岩体质量较好,但巷道掘进过程中易在拱肩位置产生应力集中;通过对拱肩进行加强支护,并对不同等级顶板采取相应的支护方式和参数,在生产过程取得了良好效果。

关键词:巷道掘进;顶板分级;地压管理;顶板支护;分级支护;数值模拟;支护参数

中图分类号:TD353

文章编号:1001-1277(2025)05-0023-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250505

引言

内蒙古金陶股份有限公司(下称“金陶金矿”)每年掘进量近万米,近些年由于开采深度的不断增加,地压不断增大,由此带来的安全问题日益显著,主要体现在个别区域巷道和部分超宽采场出现破坏现象,其破坏形式以冒顶片帮^[1]为主,兼有岩石潮解膨胀破坏现象,某些高地压区域还存在岩爆现象。这些由于地压显现造成的巷道失稳破坏给矿山生产带来了极大安全隐患,严重制约了企业的健康发展。为此,金陶金矿对井下主采矿脉进行了深入调查,结合现场情况进行了顶板分级,并提出了不同等级顶板的支护参数。本文采用Flac^{3D}软件数值模拟分析方法,结合现场应用情况对金陶金矿的顶板分级支护效果进行分析,结果表明,金陶金矿井下岩体应力集中主要发生在巷道拱肩处,但支护后最大位移量未超过允许最大值,不会发生岩体失稳。

1 地质概况

矿区范围内的工程岩体以斜长角闪片麻岩的变质岩系为主,多为坚硬岩类,局部岩体节理、裂隙发育。金厂沟梁金矿床为岩浆热液型脉状岩金矿床,矿体与围岩界线清楚,倾角平均在70°以上,厚度0.42 m。围岩蚀变围绕成矿活动发生,主要类型为绿泥石化、绢云母化、硅化和碳酸盐化等。以弱裂隙含水层充水为主,水文地质条件中等,整体工程地质条件为第二类中等类型。

2 不同等级顶板支护参数

2.1 顶板分级

通过岩石力学试验获取了矿区范围内各矿脉岩体的岩石力学基本参数,结合节理裂隙和工程地质调查,基于RMR分类法^[2-3]、Q分类法^[4-6]、《工程岩体分级标准》分类方法(BQ分类法)对矿体和围岩的岩体稳定性进行了分级,结果如表1所示。

表1 金陶金矿矿体围岩稳定性分级情况

Table 1 Surrounding rock stability classification of orebodies in the Jintao Gold Mine

岩性	位置	RMR分类法	Q分类法	BQ分类法
围岩	一矿浅部	II	II	III
	一矿深部	II	II	I
	二矿浅部	II	III	I
	二矿深部	II	III	I
	三矿浅部	III	III	II
	三矿深部	II	II	I
	六矿浅部	II	II	I
	六矿深部	II	II	I
矿体	一矿浅部	III	II	IV
	一矿深部	III	II	IV
	二矿浅部	III	III	V
	二矿深部	III	III	V
	三矿浅部	III	III	III
	三矿深部	III	II	III
	六矿浅部	III	II	III
	六矿深部	III	II	III

收稿日期:2025-01-01; 修回日期:2025-02-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2905003,2022YFC2905004)

作者简介:杨志芳(1971—),男,高级工程师,从事岩金矿山地下开采研究工作;E-mail:389396329@qq.com

由分级结果可知:井下岩体多在Ⅰ—Ⅲ级,即大部分岩体质量尚可,岩体质量分三级即可覆盖井下绝大多数岩体。因此,为方便工程技术人员现场定级和使用,根据顶板岩石的稳固程度、断层情况、含水情况、地质构造,将顶板(岩体)分为一级、二级、三级(三级为好,一级为差)3个级别,并建立了不同顶板分级支护参数。

2.2 岩石松动圈测试

采用RSM-SY5智能声波检测仪对井下具有代表性的地点进行松动圈范围测试。通过对波速突变点进行分析,得到松动圈范围,测试结果如表2所示。

表2 松动圈测试结果

Table 2 Loose circle test results

矿区	位置	松动圈/m	备注
一矿	采场	0.6	17391-1
	巷道	1.1	沿脉巷
三矿	采场	0.7	17564
	巷道	1.1	沿脉巷
六矿	巷道1	1.0	沿脉巷
	巷道2	1.0	沿脉巷

金陶金矿沿脉巷宽度为2.15 m,穿脉巷宽度为2.4 m。由松动圈测试结果可知,金陶金矿巷道岩石松动圈范围为1.0~1.1 m,约为巷道宽度的一半。

2.3 分级顶板支护参数设计

1)支护方式设计。参考T/CGA 033—2022《黄金矿山巷道围岩分级及支护技术规范》,选取锚杆、锚喷、喷锚网等支护形式。

2)锚杆长度设计。

(1)锚杆拉拔力设计。金陶金矿锚杆抽样率为3%,拉拔力最大值为70~120 kN,设计时取平均拉拔力为95 kN。

(2)树脂锚杆长度计算。计算公式为:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 \tag{1}$$

式中: l 为锚杆长度(m); l_1 为锚杆外露长度,根据锚杆支护要求,一般不大于0.1 m; l_2 为锚杆有效长度,按照松动圈范围确定,取1.1 m; l_3 为锚杆锚固长度,一般不小于0.3 m。

取 $l_1=0.1$ m, $l_2=1.1$ m, $l_3=0.3$ m,由此可确定树脂锚杆长度为1.5 m。

3)支护密度设计。根据井下巷道实际情况,取巷道长度10 m,以拱顶作为重点区域,按2.4 m×2.6 m最大巷道规格的1/4三心拱计算,支护长度约为2.93 m,支护面积约为29.3 m²。岩石密度为2.6 t/m³,松动圈按照1.1 m计算,悬吊体质量约为83.798 t,由此可得锚杆数量为:

$$n = m/F \tag{2}$$

式中: n 为锚杆数量; m 为悬吊体质量(t); F 为锚杆拉拔力(kN)。

经计算,所需锚杆数量为8.82根,取整为9根,每根锚杆的负担面积为3.25 m²。按照锚杆间排距相等的原则布置锚杆,则锚杆的支护间排距约为1.8 m。

4)分级顶板支护设计。结合松动圈测试结果和金陶金矿井下工程地质条件,不同等级顶板下的松动圈范围接近,但岩石破碎程度不同,三级顶板围岩较完整,二级顶板次之,一级顶板最差。因此,在支护设计时主要考虑不同分级顶板特点,针对性地选择支护方式:三级顶板岩体较为完整,仅采用锚杆支护;二级顶板稍差,补充双筋条对易冒、易垮的局部岩体进行补强支护;一级顶板较为破碎,需补充锚网和喷浆支护。由此可确定金陶金矿分级顶板支护参数和支护形式。

(1)三级顶板:树脂锚杆,直径18 mm,长度1.5 m,外露长度0.1 m,间排距1.0~1.8 m×1.0~1.8 m。

(2)二级顶板:树脂锚杆,直径18 mm,长度1.5 m,外露长度0.1 m,间排距1.0~1.5 m×1.0~1.5 m,补充双筋条强化支护。

(3)一级顶板:树脂锚杆,直径18 mm,长度1.5 m,外露长度0.1 m,间排距1.0 m×1.0 m,挂网喷浆厚度50 mm。

3 分级支护效果评价

3.1 数值模拟模型

在数值模拟模型建立时,考虑到地质条件的复杂性,对模型按照以下原则进行简化^[7-9]:

- 1)岩体为连续介质,且各向同性。
- 2)模拟过程中,忽略所有因素如爆破振动等影响,仅考虑自重和地应力。
- 3)忽略节理、裂隙和断层等地质因素对采场稳定性的影响。

本次模拟区域主要集中在埋深800 m附近,巷道为2.4 m×2.6 m规格的1/4三心拱,依据岩石力学与覆岩位移及应力变化的规律,通常开挖会造成开挖单元周围3~5倍的围岩发生变化^[10-12]。因此,建立的模型以沿巷道走向为 y 轴,长度取5 m;垂直矿体走向为 x 轴,长度取50 m;垂直水平面方向为 z 轴,沿 z 轴取50 m,采用六面体网格划分,建立的模型如图1所示。

采用零位移边界条件,对模型各边界的具体处理如下:上部边界为自由边界,不施加约束;左右、前后边界都施加法向约束;底面边界施加固定约束。

结合岩石力学试验结果,通过Hoek-Brown方法对岩体力学参数进行折减,得到岩体强度参数,如表3所示。

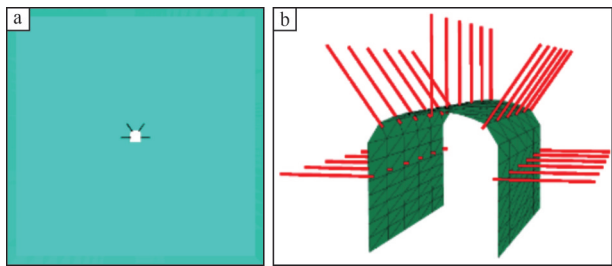


图 1 数值模拟模型

Fig. 1 Numerical simulation model

模型上表面垂直应力为 21.4 MPa,下表面垂直应力为 22.74 MPa,侧压力系数为 0.5,水平应力为 10.7 MPa,

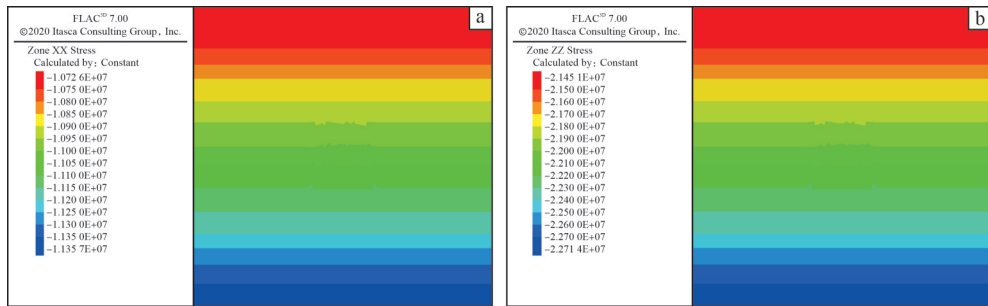


图 2 加载地应力后数值模拟结果

Fig. 2 Numerical simulation results after loading ground stress

3.2 失稳判据

采用位移失稳判据对岩体稳定性进行评估。

- 1)位移量 20 mm 以下时,不影响岩体稳定性。
- 2)位移量 20~50 mm 时,岩体可以保持稳定性。
- 3)位移量 50~100 mm 时,岩体存在潜在稳定问题。

4)位移量 100 mm 以上时,岩体存在破坏现象,大规模破坏也可能产生。

3.3 数值模拟结果及分析

不同等级顶板支护前后应力、位移、塑性区云图如图 3~5 所示。

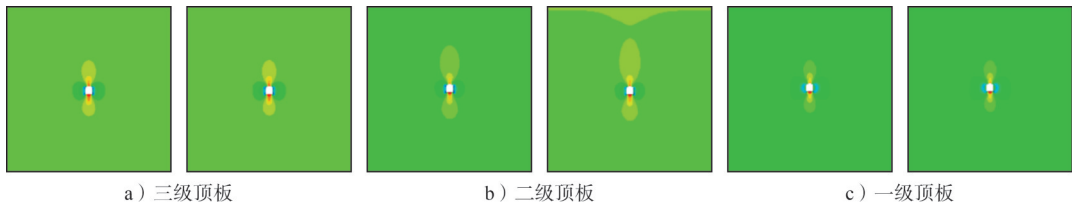


图 3 不同等级顶板支护前后应力云图

Fig. 3 Stress cloud diagram of roofs of varying classes before and after support

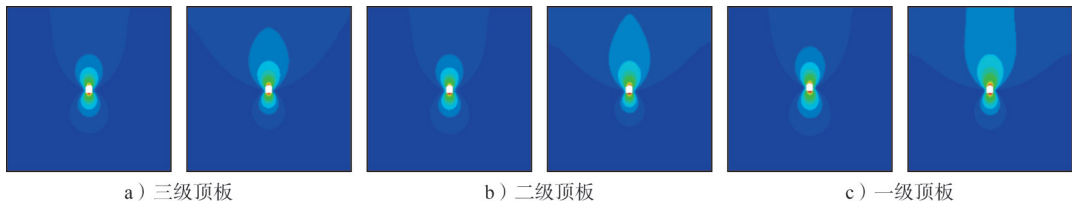


图 4 不同等级顶板支护前后位移云图

Fig. 4 Displacement cloud diagram of roofs of varying classes before and after support

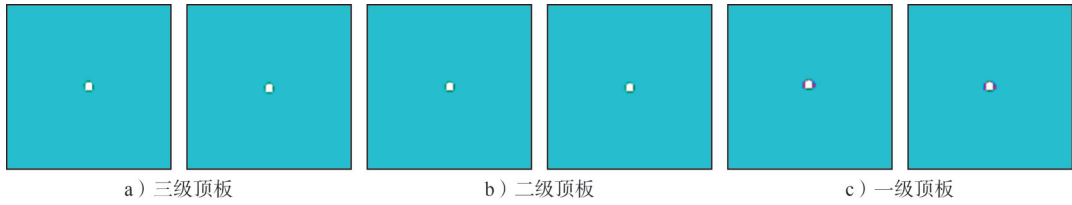


图 5 不同等级顶板支护前后塑性区云图

Fig. 5 Plastic zone cloud diagram of roofs of varying classes before and after support

1) 应力。随矿岩开挖,其内部的初始应力平衡将重新分布,经过动态调整后重新达到新的应力平衡^[13]。从图3可以看出:随着采场岩体的开挖,初始应力平衡状态被打破,围岩中出现了应力集中现象,显现在巷道拱肩及两边底板处,三级顶板支护后的最大应力约为42.41 MPa,二级顶板支护后的最大应力约为42.61 MPa,一级顶板支护后的最大应力约为38.28 MPa。上述情况表明,应对巷道拱肩加强支护,防止应力集中导致岩体失稳情况出现。

2) 位移。采动过程会导致岩体原岩应力平衡遭受破坏,矿岩变形也会随之发生。从图4可以看出:开挖后位移最大处发生在顶板与上盘附近,三级顶板无支护时最大位移量约0.75 mm,支护后降低至0.73 mm;二级顶板无支护时最大位移量约1.43 mm,支护后降低至1.38 mm;一级顶板无支护时最大位移量约7.01 mm,支护后巷道最大位移量约6.73 mm。通过位移判据可判断,支护前后岩体位移量均在20 mm以下,不会对岩体稳定性产生影响,不同顶板分级支护能够有效控制围岩垮落。

3) 塑性区。采动过程会导致原岩初始应力平衡状态反复历经应力平衡过程,并引发岩体塑性破坏,不同等级岩体开挖前后的塑性区分布特征如图5所示。三级顶板岩体支护前后均无明显塑性区,表明三级岩体质量较好;二级顶板岩体支护前后无明显塑性区,表明二级岩体质量尚可;一级顶板岩体支护前塑性区损伤约1.1 m,与松动圈实测结果相近,支护后可见塑性区面积减少,表明支护可有效加固岩体,有效改善围岩损伤范围。

根据Flac^{3D}软件数值模拟分析不同等级顶板支护方案的结果:金陶金矿井下岩体质量较好,支护后可有效控制岩体失稳;塑性区、位移等分析结果均满足安全要求,表明不同等级顶板的支护参数合理。

4 现场应用

通过对不同等级顶板支护参数开展系统性现场工程验证,充分考虑金陶金矿井下岩体结构特点而建立的3级顶板分级制度及其对应的差异化支护方案(锚杆支护、双筋条支护和喷锚网支护),显著提升了支护体系与围岩自承能力的协同作用,充分证明该分级支护体系在控制岩体剪切滑移、抑制裂隙扩展等方面具有显著优势,大幅度减少了顶板失稳风险(如图6所示),验证了顶板分级结果及其差异化支护方式在金陶金矿的可行性和适用性。

5 结论

通过对金陶金矿井下岩体进行顶板分级,提出了

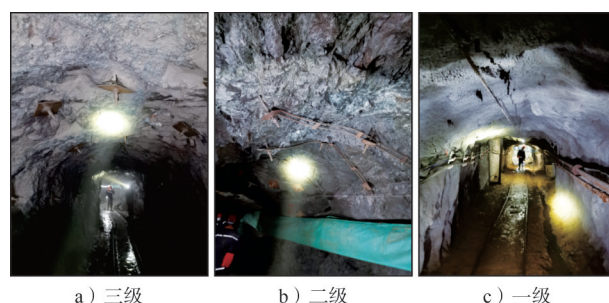


图6 现场应用效果

Fig. 6 Field application effectiveness

相对应的支护参数。采用Flac^{3D}软件数值模拟分析方法对不同等级顶板支护效果进行模拟,结合现场应用情况,得到以下结论:

1) 金陶金矿井下岩体条件整体较好,支护后可有效减少围岩位移量,但岩体位移量随着围岩等级变差而增加。

2) 通过Flac^{3D}软件数值模拟分析方法,结合岩体破坏指标,金陶金矿井下不同等级岩体开挖并支护后塑性区较小,位移未超过允许最大位移量,表明对应的支护方法能够起到支护作用。

3) 金陶金矿井下岩体开挖后,应力集中主要显现在拱肩处,因此在锚杆支护时拱肩位置必须进行支护。通过现场应用表明,该支护方式能够有效控制围岩,取得了良好成效。

[参考文献]

- [1] 赵兴东,朱乾坤,曾楠.三山岛金矿深部高应力节理化巷道围岩控制技术研究[J].黄金,2023,44(9):5-12.
- [2] 刘震.基于修正RMR分级法的金属矿山岩体稳定性分析[J].科技创新与应用,2024,14(11):143-146.
- [3] 汪炳烽,江铃峰.基于深部岩体特征的RMR法修正[J].采矿技术,2023,23(5):6-11.
- [4] 王游悬,沈伟升,华丽晶,等.Q值法和RMR法在铁路隧道围岩分级中的应用探讨[J].铁道勘察,2025,51(1):144-149.
- [5] 李书强,刘志祥,刘伟军.黄金矿山岩体质量分级知识库与PLS简化预测模型[J].黄金,2024,45(10):47-53.
- [6] 秦绍龙,赵兴东,张武.纱岭金矿深部巷道顶板分级支护设计与分析[J].采矿技术,2023,23(6):59-63.
- [7] 刘军晓.焦家金矿破碎岩体变形破坏规律研究[J].黄金,2024,45(7):22-25.
- [8] 张旭飞,郭运鸿,王兴亚,等.焦家金矿巷道掘进过程中围岩变形及应力分布演化规律[J].黄金,2024,45(6):1-5.
- [9] 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.
- [10] 王志强,武超,石磊,等.基于复变理论的双向不等压圆形巷道围岩应力及塑性区分析[J].煤炭学报,2019,44(增刊2):419-429.
- [11] 贾晓亮.基于FLAC^{3D}的深部巷道围岩稳定性数值模拟研究[J].

- 能源与环保, 2017, 39(6): 18–22.
- [12] 卓先德, 崔伟. 基于 FLAC^{3D} 的巷道围岩高强预紧力支护数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 210–212, 216.
- [13] 牛双建, 靖洪文, 杨大方, 等. 深部巷道破裂围岩强度衰减模型及其在 FLAC^{3D} 中的实现[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 601–606.

Analysis of the support effectiveness for roofs of varying classes based on numerical simulation

Yang Zhifang

(Inner Mongolia Jintao Co., Ltd.)

Abstract: During underground rock excavation at the Jintao Gold Mine, ground pressure issues have led to occurrences of roof caving and sidewall spalling at the tunnel face and formed roadways, particularly in fractured zones where roof caving and sidewall spalling are more frequent. This study evaluates the support effectiveness for roofs of varying classes using numerical simulation and field application. Results indicate that although the underground rock mass quality at the Jintao Gold Mine is generally good, stress concentration tends to occur at the arch shoulder during roadway excavation. By reinforcing the arch shoulder and adopting appropriate support methods and parameters for roofs of varying classes, favorable outcomes have been achieved in the production process.

Keywords: roadway excavation; roof classifications; ground pressure management; roof support; graded support; numerical simulation; support parameters

.....

(上接第 16 页)

Development and application of a full-life-cycle management system for blast holes

Zheng Mingshan, Wang Jia, Cheng Zhiping, Li Shulin

(Dexing Copper Mine, Jiangxi Copper Corporation Limited)

Abstract: To address issues in traditional blast hole design such as inflexible data recording, lack of real-time updates, and low system integration, an innovative full-life-cycle management system for blast holes has been developed to enhance the efficiency and safety of mine blasting operations. Utilizing advanced information technologies, the system enables monitoring and management throughout the entire process—from design, drilling, and blasting to filling and recovery. By incorporating real-time data acquisition and intelligent analysis, the system significantly optimizes blast hole design and construction schemes. Its versatility and adaptability allow for customization to meet the personalized management needs of different mining enterprises. Major contributions of this system include improving operation efficiency, enhancing operation safety, enabling refined management, and promoting the digital transformation of the mining industry. This research offers a novel approach to information-based management in mines and lays a solid foundation for improving resource utilization rate and construction safety.

Keywords: intelligentization; full-life-cycle of blast holes; blast hole design system; blasting management; blasting effectiveness; whole-process monitoring; operation efficiency