高海拔电英岩型厚大矿体安全高效采矿方法研究及应用*

雷敏[1],石小龙[1],李晓辉[2,3],张李代[1],李泽鹏[2,3],林卫星[2,3]

(1.甘肃辰州矿产开发有限责任公司, 甘肃 合作市 747000;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对高海拔电英岩型厚大矿体边界复杂多变、矿石回采率低、采场顶板暴露面积较大和机械化程度较低等问题,为实现安全高效绿色开采目标,系统剖析了电英岩型厚大矿体的赋存特征,提出了4种采矿技术方案,对比了各方案的优缺点、主要技术指标及经济效益指标,最终确定上向进路充填采矿法作为最优开采方案。基于Mathews稳定性图解法,得到了矿体、围岩的最大允许暴露面积。结合数值模拟,揭示了不同进路尺寸下应力、竖向位移和塑性区的分布规律,确定了最佳进路参数:进路宽度为5.0 m,高度为3.5 m。现场工业试验表明,采场顶板最大下沉量为19.2 mm,无垮塌现象;矿石损失率为3.2%、贫化率为3.5%,较浅孔留矿法嗣后充填采矿法降低了8.8个百分点和8.5个百分点,效果显著。研究结果为类似矿山提供了技术范式,推动了高海拔矿产资源的可持续开发。

关键词:高海拔;厚大矿体;采矿方法;参数优化

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0058-08

Research and Application of Safe and Efficient Mining Methods for High-Altitude Tourmalinite-Type Massive Orebodies

LEI Min[1], *SHI Xiaolong*[1], *LI Xiaohui*[2,3], *ZHANG Lidai*[1], *LI Zepeng*[2,3], *LIN Weixing*[2,3]

(1.Gansu Chenzhou Mineral Development Co., Ltd., Hezuo, Gansu 747000, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Addressing the challenges of complex and variable boundaries, low ore recovery rates, extensive roof exposure areas, and a low degree of mechanization associated with high-altitude tourmalinite-type massive orebodies, this study systematically analyzed the occurrence characteristics of the orebody to facilitate safe, efficient, and green mining operations. Four technical mining schemes were proposed, and their respective advantages, disadvantages, principal technical and economic indexes were comprehensively evaluated. Consequently, the upward drift filling mining method was identified as the optimal extraction scheme. The maximum allowable exposed areas of the orebody and surrounding rock were determined using the Mathews stability graphical method. Coupled with numerical simulations, the distribution patterns of stress, vertical displacement, and plastic zones under varying drift dimensions were elucidated, establishing the optimal drift parameters as 5 m in width and 3.5 m in height. On-site industrial tests demonstrate that the maximum roof subsidence of the stope is 19.2 mm, with no occurrences of collapse. Furthermore, the ore loss and dilution rates are 3.2% and 3.5%, respectively, representing significant reductions of 8.8 and 8.5 percentage points compared with the shallow-hole shrinkage mining with subsequent backfill method. These findings establish a robust technical paradigm for analogous mines and propel the sustainable development of high-altitude mineral resources.

Key words: High altitude, Massive orebody, Mining method, Parameter optimization

0 引言

录斗艘金矿高海拔电英岩型厚大矿体开采面临多重挑战:现有采矿方法需留设大量顶底柱及间柱,矿石回采率仅88%,资源浪费严重;采场顶板暴露面积较大,工人直接在高风险环境作业,存在顶板垮

* **收稿日期**:2025-09-17
基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ04)
作者简介:雷敏(1986—),男,湖南常德人,工程师,主要从事矿山生产技术及安全管理等方面的工作。E-mail:409481319@qq.com
通信作者:李泽鹏(1999—),男,河南安阳人,硕士,助理工程师,主要从事金属非金属地下矿山开采研究。E-mail:2945289202@qq.com

塌风险;机械化程度不足 30%,过度依赖人工凿岩出矿,难以满足高原低氧环境下降低工人劳动强度的作业要求。因此,开展高海拔电英岩型厚大矿体安全高效绿色采矿方法研究尤为重要[1-3]。

国内外学者对高海拔厚大矿体采矿方法优选、采场结构参数选取进行了大量的理论及现场实践研究,在采矿方法优选方面,胡建钊[4]、王亚军等[5]、童大志等[6]针对某矿山原采矿方法对矿体形态变化适应性差、回采顺序灵活性差等问题,通过计算采切比和技术经济指标优选最佳方案。梁彦波等[7]、石大庆等[8]根据矿体开采技术条件,提出了相应的采矿方法,并对几种采矿方法的技术与经济指标进行综合分析,完成了方案优选决策。程东旭等[9]、黄志鹏等[10]、武尚荣等[11]则借助数值模拟技术,对不同宽度进路的顶板位移、应力及塑性区分布进行了对比分析,进而确定了最优的进路结构参数。目前高海拔矿体回采研究多聚焦于破碎或薄矿体,而针对边界复杂多变矿体的回采方法优化研究则相对较少,为此亟需一种能够结合室内试验、数值模拟与现场实测的系统方法,对此类矿体的回采进行深入研究。

本文系统分析了电英岩型厚大矿体的赋存特征,基于此提出多种采矿方法,通过综合对比不同方案的技术与经济指标、经济效益,确定最优回采方案;运用 Mathews 稳定性图解法计算采场允许暴露面积,结合数值模拟优化确定上向进路充填采矿法的最优采场结构参数,并开展现场实践验证。该研究不仅是提升资源回收率、降低作业风险、延长矿山服务年限的必然举措,更是适配高原特殊环境、推进"机械化换人"的关键技术路径。

1 研究区域工程背景

录斗艘金矿为地下开采,矿区共圈出金矿体 30 条,目前主采矿体为 Au23,该矿体是矿区唯一一条电英岩型矿体。由于电英岩具有整体矿化特征,矿体与围岩无明显区别,仅在矿化强度上由电英岩中部向外围逐渐降低。总体来看,中部矿化强度较高,电气石颗粒较小,外围矿化强度降低,电气石颗粒变大。电英岩型矿体三维模型如图 1 所示。

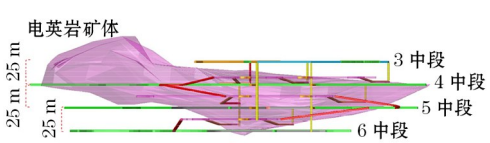


图 1 电英岩型矿体三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of tourmalinite-type orebody

该矿体分布于 16～32 号勘查线间,走向控制长度达 130 m。矿体走向 40°,倾角近乎垂直,形态上窄下宽,呈囊状,控制延深为 115 m,平均厚度约为 30.6 m,平均品位达 2.90 g/t。矿山目前已有中段由高到低依次为 3 255 m、3 220 m、3 198 m、3 175 m、3 150 m、3 136 m 等 6 个中段,中段高度约 25 m。

录斗艘金矿矿区水文地质条件简单,沿脉(矿体)巷道总体穿越破碎带,围岩稳固性较差,需要及时采取支护措施。穿脉巷道所处岩体较为完整,稳定性较高,通常无需支护,工程地质勘探的复杂程度为中等;矿区地质环境质量属简单类型。目前回采作业主要采用浅孔留矿嗣后充填采矿法、分段空场嗣后充填采矿法、留矿全面嗣后充填采矿法和浅孔房柱嗣后充填采矿法。

2 采矿方法优选

2.1 采矿方法初选

2.1.1 浅孔留矿嗣后充填采矿法

沿走向布置矿块,矿块长 40 m,宽 8 m,高度为中段高度,顶柱 3 m,间柱 8 m,不设底柱,出矿进路间距 7 m。采准工作包括人行通风天井、天井联络道、出矿进路等。切割工作包括切割拉底巷道。浅孔留矿嗣后充填采矿法如图 2 所示。

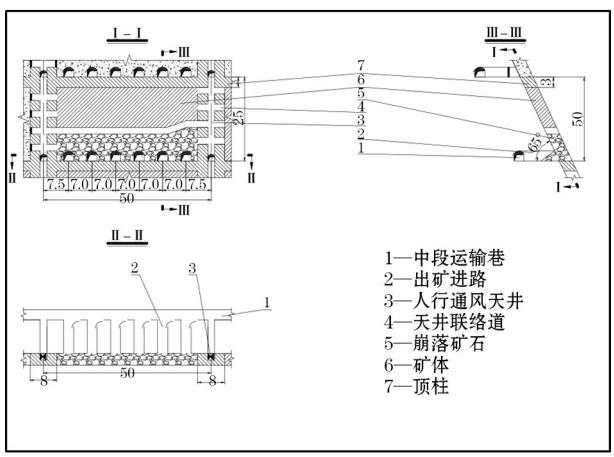


图 2 浅孔留矿嗣后充填采矿法(单位:m)

Fig.2 Shallow-hole shrinkage mining with subsequent filling mining method (unit: m)

2.1.2 上向水平分层充填采矿法

沿矿体走向划分盘区,盘区长度为 72 m,宽度为矿体厚度,6 中段矿体规模较小,因此,留 4～5 m 底柱,采用两步骤回采。采场垂直矿体走向布置,采场之间不留间柱,按 18 m 划分一个矿块,一步骤采场宽度为 10 m,二步骤采场宽度为 8 m,采场高度

为整个矿体赋存高度,不再利用中段现有工程,分层回采高度为 3.3～3.5 m,一个分段负责 5～6 个分层回采。采用斜坡道采准,在整个中段掘进一条斜坡道,斜坡道与各分段沿脉平巷连通。上向水平分层充填采矿法如图 3 所示。

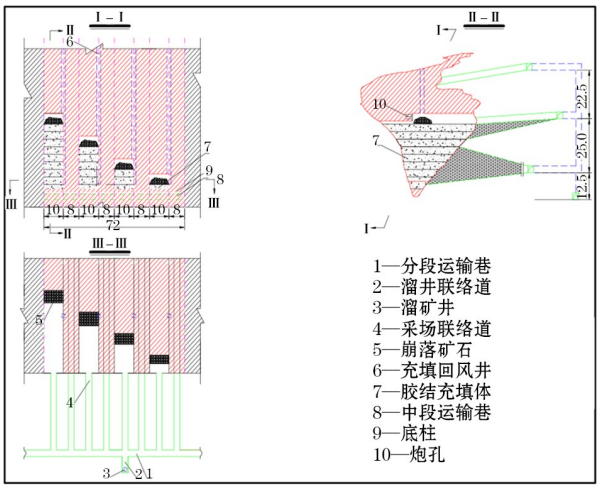


图 3 上向水平分层充填采矿法(单位:m)

Fig.3 Upward horizontal slicing filling mining method (unit: m)

2.1.3 上向进路充填采矿法

沿矿体走向划分盘区,盘区长度约为 70 m,盘区之间不留间柱,不留顶底柱,进路沿矿体走向布置,进路宽度为 5 m,长度为 35～40 m,进路高度为 3.5 m,上下分层进路与相邻下分层进路呈交叉布置。从 3 125 m 中段开始,不留底柱,分段高度为 12.5 m,从斜坡道向矿体掘进分层联络道,分层回采从联络道入口处开始,进路采取隔一采一的方式,采切工程井巷断面规格按所用设备的外形尺寸和其他技术要求确定。上向进路充填采矿法如图 4 所示。

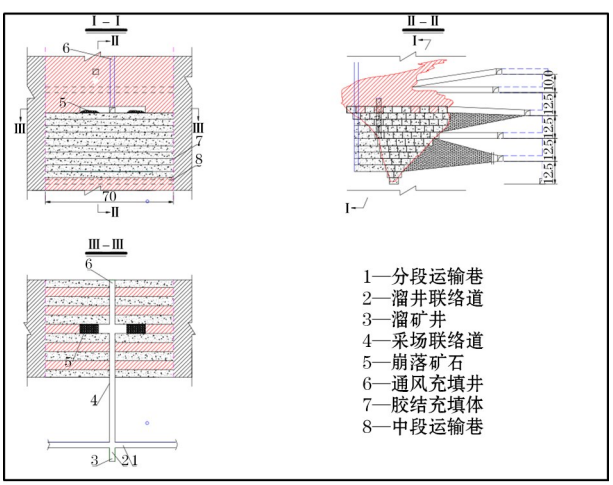


图 4 上向进路充填采矿法(单位:m)

Fig.4 Upward drift filling mining method (unit: m)

2.1.4 分段空场嗣后充填采矿法

当矿体水平厚度小于 20 m 时,采场沿矿体走向布置,采场长度为 50 m,宽度为矿体厚度。由于矿体中段高度(25 m)较小,考虑并段开采,并段高度为 50 m,将采场在垂直高度上划分为三个分段开采,第一、二分段高 17 m,第三分段高 16 m。采场底部布置受矿堑沟,为了减小底部结构矿柱留设量,可将受矿堑沟布置在围岩中。在矿体下盘脉外布置斜坡道,坡度为 15%～20%,每两个中段仅布置一条斜坡道,斜坡道连通上下中段水平通道,并与各分段水平巷道贯通。在各分段水平布置矿体脉外分段平巷及脉内分段凿岩平巷;在采场底部水平沿矿体走向每 10 m 布置出矿联络道,并与分段凿岩巷贯通。矿体下盘布置脉外溜井,该溜井与 6 中段运输巷贯通。分段空场嗣后充填采矿法如图 5 所示。

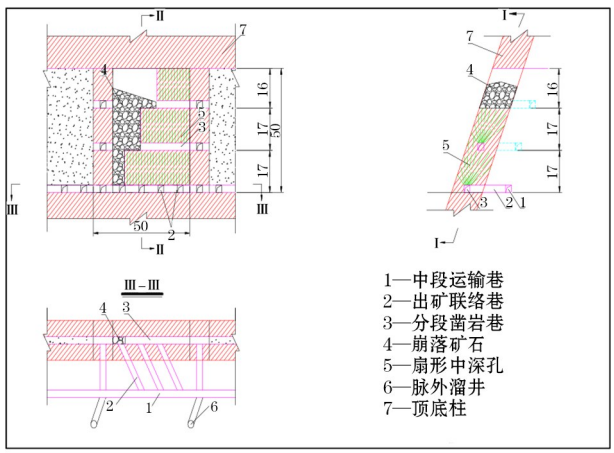


图 5 分段空场嗣后充填采矿法(单位:m)

Fig.5 Sublevel open stoping with subsequent filling mining method (unit: m)

2.2 采矿方法比选

2.2.1 各采矿方法优缺点对比分析

4 种采矿方案优缺点对比分析见表 1。

表 1 各采矿方案优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of each mining scheme

方案	优点	缺点
方案Ⅰ:浅孔留矿嗣后充填采矿法	1.工艺简单; 2.矿山作业人员操作熟悉; 3.能快速回采矿体。	1.采切工程量较大; 2.工人劳动强度大,生产能力较低; 3.机械化程度低、贫化损失率较高; 4.作业安全性较差。
方案Ⅱ:上向水平分层充填采矿法	1.生产能力较大; 2.适合机械化开采; 3.贫化损失率较低; 4.对矿体适用性较强。	1.采切工程量较大; 2.作业安全性相对较差,人员长时间暴露在大面积顶板下作业。

续表

方案	优点	缺点
方案Ⅲ:上向进路充填采矿法	1.作业安全性高; 2.对矿体适用性较强; 3.贫化损失率较低; 4.适合机械化开采。	1.采切工程量较大; 2.采场通风条件较差; 3.充填成本较高。
方案Ⅳ:分段空场嗣后充填采矿法	1.生产能力较大; 2.作业安全性高; 3.适合机械化开采。	1.对矿体适用性较弱; 2.贫化损失率较高。

本着安全第一原则,鉴于方案Ⅰ和方案Ⅱ均存在人员暴露在大面积顶板下作业的安全风险,故不予推荐。经初步筛选,方案Ⅲ能通过及时充填有效控制顶板暴露,安全性较好,且矿石回采率高;而方案Ⅳ生产能力较大、成本较低,但对复杂矿体适应性较差。本研究初步推荐方案Ⅲ和方案Ⅳ作为电英岩矿体回采的主要方法,并对这两种方法进行深入对比分析。

2.2.2 采矿方法进一步对比分析

(1) 虽然6中段至4中段电英岩矿体厚大,但矿体形态变化较大,顶部与底部起伏波动较大,矿体形态复杂。上向进路充填采矿法适应性强,遇夹石可缩小断面回采,过夹石带后再恢复大断面回采,从而降低矿石贫化损失率;而分段空场嗣后充填采矿法难以适应复杂多变的矿体形态,易导致矿石贫化损失率升高。

(2) 在单个采场生产能力方面,分段空场嗣后充填采矿法明显高于上向进路充填采矿法。但上向进路充填采矿法可同时布置的采场数量更多,可实现多个进路采场同时回采,满足矿山的产能要求。

(3) 电英岩矿体保有储量可采用中深孔进行回采的矿量较少,为了减少高原地区工人劳动强度,采购相关中深孔设备,但后期利用率较低,经济上的合理性有待考究;上向进路充填采矿法所使用的设备可用于矿山后期正常的掘进和浅孔采矿,设备利用率更高,经济上更合理。

(4) 基于目前矿山开拓情况,中段高度为25 m,若采用中深孔回采,分段高度25 m则较大,一般凿岩设备很难满足要求,且无法保证凿岩效率和精度;若中间增加一个分段,12.5 m的分段高度较小,难以发挥出中深孔的优势;如果并段回采,目前5中段与4中段的运输巷道大部分位于矿体中,需对相关主运输巷进行改道,且现存的老巷道对后期中深孔凿岩和装药存在较大的影响。上向进路充填采矿法不存在此类问题。

(5) 上向进路充填采矿法可将前期浅孔留矿法残留的一些矿柱一并回采,能极大地提高矿石资源的回采率。6中段至4中段往上14 m左右区域,上向进路充填采矿法可采矿量约75万t,工程总量为6 055.3 m/55 044.3 m^3;首采所需工程量约543.2 m/4 377.9 m^3,根据进度计划,预计2025年8月底能完成所有采准工程,2025年10月底能完成首采所需工程,2025年11月即可进行试验采场回采。分段空场嗣后充填采矿法则必须待斜坡道等工程全部施工完成后,方可作业。

(6) 基于目前电英岩矿体的保有资源储量,尽可能提高矿石资源回采率,减少矿柱留设量至关重要。若采用分段空场嗣后充填采矿法,4中段和5中段现有采场及已回采完毕采场的下部必须留设一定厚度的隔离矿柱,以保证回采过程中的采场安全稳定,后期若再采用进路法回采这部分矿体则较困难,将造成大量矿量永久损失;而采用上向进路充填采矿法,不仅能避免该问题,而且能最大限度地对原有留设的矿柱进行回采,显著降低矿石资源的损失率。

(7) 各采矿方案、主要技术指标对比和经济效益指标对比分别见表2和表3。

表2 各采矿方案主要技术指标对比

Table 2 Comparison of main technical indexes of each mining scheme

采矿方案	矿块地质矿量/t	地质品位/(g/t)	金属量/kg	损失率/%	贫化率/%	采出矿量/t	采出品位/(g/t)	采出金属量/kg	选矿回收率/%	选出金属量/kg
方案Ⅲ	600 000	2.9	1 740	5	6	604 200	2.736	1 653.09	88	1 454.72
方案Ⅳ	600 000	2.9	1 740	20	20	576 000	2.417	1 392.19	88	1 225.13

表3 各采矿方案经济效益指标对比

Table 3 Comparison of economic benefit indexes of each mining scheme

采矿方案	采矿成本/(元/t)	充填成本/(元/t)	选矿成本/(元/t)	运输成本/(元/t)	采选成本合计/(元/t)	采选综合成本/万元	金价格/(元/g)	金产品产值/万元	经济效益/万元
方案Ⅲ	48.76	60	135	7	325.99	19 696.32	720	75 645.44	55 949.12
方案Ⅳ	33.26	42	135	7	282.44	16 268.54	720	63 706.76	47 438.22

从表2和表3可以看出,方案Ⅲ的回采成本高于方案Ⅳ,但其矿石的损失率、贫化率较低。与方案Ⅳ相比,方案Ⅲ的选出金属量多18.74%,综合经济效益高17.94%。

综上所述,推荐采用方案Ⅲ上向进路充填采矿法作为最优开采方案。

3 采场结构参数优化

3.1 基于 Mathews 稳定性图解法的采场最大允许暴露面积确定

基于 Mathews 稳定性图解法,水力半径 R、稳定性系数 N 由下式确定[12-14]:

$$R=\frac{wL}{2(w+L)} \tag{1}$$

$$N=Q'ABC \tag{2}$$

式中:R 为水力半径;w 为采场极限跨度;L 为采场长度;N 为稳定性系数;Q'为修正的岩体 Q 值;A 为岩石应力系数;B 为节理方位系数;C 为重力调整系数。

岩体稳定性系数 N 和采场水力半径 R 决定了采场的稳定性情况,当把 N 和 R 绘制在一个图上时,就可得到 Mathews 稳定性图。将水力半径代入公式(1),可计算出表征采场极限跨度与长度关系的表达式,继而确定最大允许暴露面积。

基于前期工程地质调查,确定了研究区矿岩物理力学参数,见表 4。计算得出围岩和矿体的容许水力半径 R 值分别为 5.4 和 6.2,代入式(1)可得采场长度和采场极限跨度之间的关系,如图 6 所示。根据前文计算得出最大不可支护跨度,围岩跨度取 12 m,矿体宽度取 14 m,围岩和矿体极限长度分别为 108 m 和 108.5 m,因此得出围岩最大允许暴露面积为 1 296 m^2,矿体最大允许暴露面积为 1 519 m^2。

表 4 研究区矿岩物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of ore and rock in the study area

矿岩	岩性	Q'	A	B	C	N	R
围岩	电英岩	11.66	0.6	0.8	2	5.60	5.4
矿体	电英岩	17.26	0.6	0.8	2	8.28	6.2

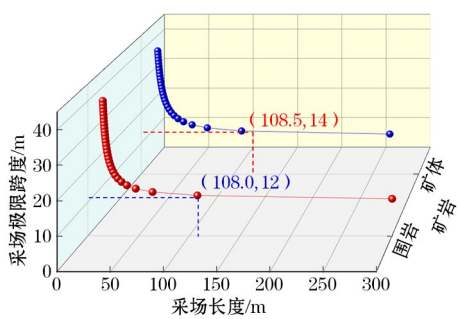


图 6 围岩与矿体临界稳定时长度与跨度的关系

Fig.6 Relationship between length and span of surrounding rock and orebody at critical stability

3.2 进路尺寸数值模拟分析

3.2.1 模型构建

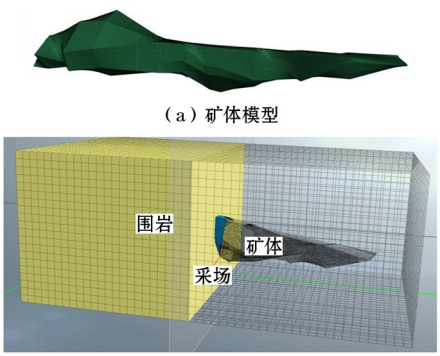
在进行模拟进路开挖之前,应在研究区范围内建立合理的进路模型,为网格划分做准备。当进路失稳破坏时,一般会在进路周围 3～5 倍进路跨度范围内产生影响[15-16],因此应在此范围内建立进路模型。本次模拟选取的模型范围为进路尺寸的 4 倍。模拟方案见表 5。

表 5 模拟方案

Table 5 Simulation schemes

模拟方案	采场长度/m	采场宽度/m	采场高度/m	备注
方案 1	40	3	3.5	
方案 2	40	4	3.5	
方案 3	40	5	3.5	采场宽度优化
方案 4	40	6	3.5	
方案 5	40	7	3.5	
方案 6	40	5	3.0	
方案 7	40	5	3.5	
方案 8	40	5	4.0	采场高度优化
方案 9	40	5	4.5	
方案 10	40	5	5.0	

各方案模型由上下盘围岩、矿体及进路等构成,模型的长×宽×高为 300 m×300 m×200 m,如图 7 所示。



(a) 矿体模型

(b) 采场位置

图 7 矿体及采场位置整体模型

Fig.7 Overall model of orebody and stope location

3.2.2 应力分析

岩体抗压强度远高于抗拉强度,其在受压状态下不易破坏,而在受拉时则容易发生变形与破坏,因此拉张破坏是岩体主要破坏模式之一。因此,将不同方案的最大拉应力与岩体的抗拉强度进行对比,以此判断岩体是否发生破坏。方案 1～10 应力分布特征如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知,方案 1～10 的最小主应力集中于进路顶底板及两侧,方案 4～5、8～10 进路四周产生的拉应力均大于岩体抗拉强度(2.00 MPa),进路围岩易失稳。

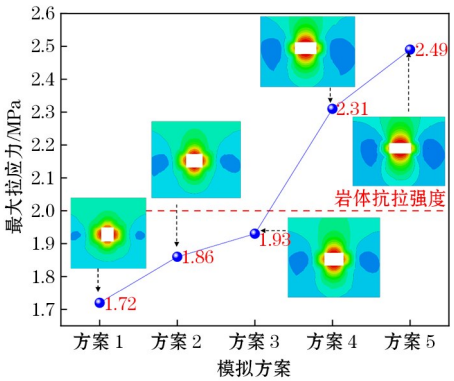


图 8 方案 1～5 应力分布特征

Fig.8 Stress distribution characteristics of schemes 1 -5

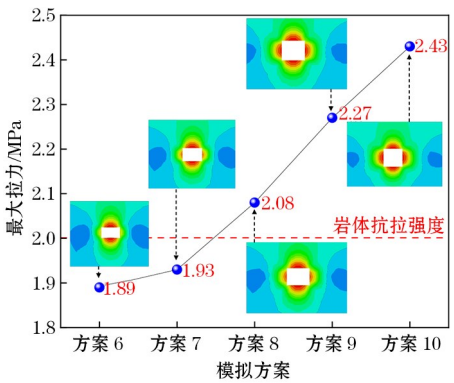


图 9 方案 6～10 应力分布特征

Fig.9 Stress distribution characteristics of schemes 6 -10

3.2.3 竖向位移分析

方案 1～10 竖向位移分布如图 10 和图 11 所示。由图 10、图 11 可知,进路内顶底板均发生了不同程度的位移,且随着进路宽度与高度的增大,进路暴露面积不断增大,位移量相应增大。方案 4～5、8～10 的进路周围围岩竖向位移超过 20 mm,其顶底板及两帮围岩存在失稳可能性。

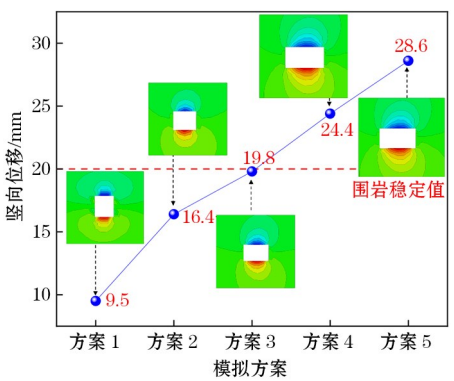


图 10 方案 1～5 竖向位移分布特征

Fig.10 Vertical displacement distribution characteristics of schemes 1 -5

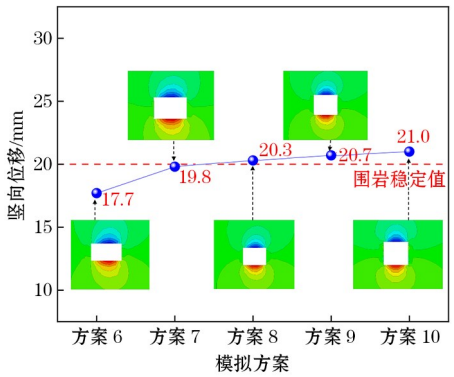


图 11 方案 6～10 竖向位移分布特征

Fig.11 Vertical displacement distribution characteristics of schemes 6 -10

总体而言,方案 1～10 进路顶板的位移受进路宽度的影响更大,且顶板最大位移量大于底板最大位移量,而受进路高度的影响则相对较小。

3.2.4 塑性区分析

方案 1～10 塑性区分布如图 12 和图 13 所示。

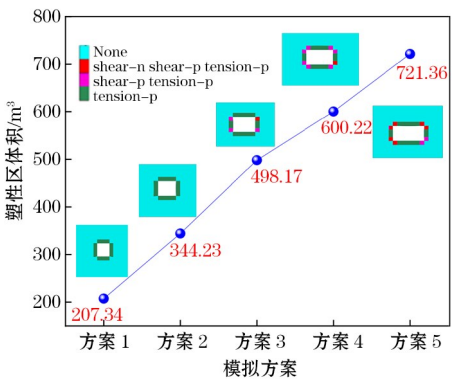


图 12 方案 1～5 塑性区分布特征

Fig.12 Plastic zone distribution characteristics of schemes 1 -5

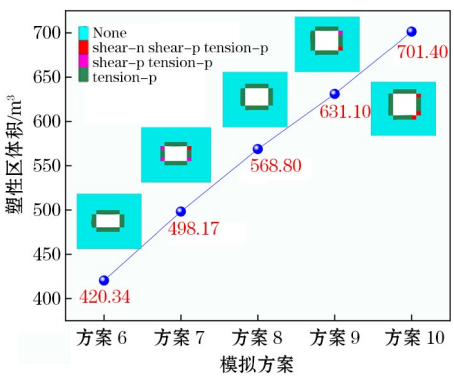


图 13 方案 6～10 塑性区分布特征

Fig.13 Plastic zone distribution characteristics of schemes 6 -10

由图 12、图 13 可知,所有方案在回采后均于进路周边发生了局部损伤。方案 1～3、6～8 的破坏模式以顶底板及两帮的拉伸破坏为主;方案 9～10 则同时出现了拉伸破坏与少量剪切破坏,但其主导破坏机制仍为拉伸破坏,剪切破坏主要发生在四个边角处。此外,剪切破坏区相互贯通,导致进路围岩稳定性显著降低,易引发结构性失稳。

总体而言,方案 1～10 进路顶底板及两帮塑性区的扩展范围随着高度、宽度的增大而增大。通过详细分析不同宽度和高度进路顶底板及两帮的受力情况和围岩破坏特征,得出最佳进路宽度为 5 m、高度为 3.5 m。

4 现场工业试验

选取录斗艘金矿 6 中段附近的 615 采场开展上向进路充填采矿法现场工业试验,试验采场长 40 m、宽 5 m、高 3.5 m,隔一采一、即时充填。现场工业试验如图 14 所示。

试验过程首先进行采准工程施工,掘进分段平巷与分层联络道,采用 CKT3000 型天井钻机施工直径 2 m 的充填回风井;DD2-N 液压凿岩台车钻凿 43 mm 炮孔,孔深 3.3 m,采用光面爆破技术控制轮廓,2 m^3 铲运机出矿;进路采用分级尾砂充填。

顶板位移监测结果表明,最大下沉量仅为 19.2 mm,顶板整体稳定,无垮塌现象。此外,该方案下的矿石损失率与贫化率分别控制在 3.2%和 3.5%,较浅孔留矿嗣后充填采矿法显著降低了 8.8 个百分点和 8.5 个百分点,盘区生产能力达 358 t/d,有效降低了工人的劳动强度,实现了高海拔电英岩型厚大矿体安全高效绿色开采。

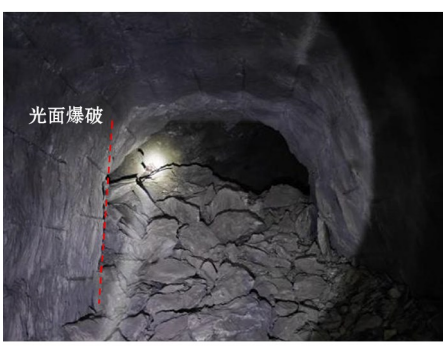


图 14 现场工业试验

Fig.14 On-site industrial test

5 结论

(1) 系统分析了电英岩型厚大矿体的赋存特征,初步提出了 4 种采矿技术方案,对比了各方案的优缺点、主要技术指标和经济效益指标,最终确定上向进路充填采矿法为开采此类矿体的最佳方案。

(2) 采用 Mathews 稳定性图解法与数值模拟,确定了矿岩的最大允许暴露面积,系统分析了不同进路尺寸下应力、竖向位移及塑性区的分布规律,通过综合对比,确定了最佳进路参数:进路宽度为 5 m,高度为 3.5 m。

(3) 顶板位移监测结果表明,最大下沉量仅为 19.2 mm,顶板整体稳定,无垮塌现象;矿石损失率为 3.2%、贫化率为 3.5%,较浅孔留矿嗣后充填采矿法降低了 8.8 个百分点和 8.5 个百分点,效果显著。

参考文献(References):

[1] 高峰,周科平,熊信.我国高海拔寒区金属矿产资源开采现状及关键问题[J].矿业研究与开发,2022,42(10):1-5.
GAO Feng, ZHOU Keping, XIONG Xin. Present situation and key problems of metal mineral resources exploitation in high altitude cold region of China[J]. Mining Research and Development,2022,42(10):1-5.

[2] 曹帅,宋卫东,朱先洪,等.高海拔地区急倾斜薄矿体采矿方法优选[J].金属矿山,2013(2):14-17.
CAO Shuai, SONG Weidong, ZHU Xianhong, et al. Mining method optimization of sharply-inclined thin ore-body in alpine high altitude area[J]. Metal Mine,2013(2):14-17.

[3] 戚伟.高海拔急倾斜薄矿体精细开采关键技术研究与应用[D].北京:北京科技大学,2021.
QI WEI. Research and application of key technology for fine mining of steep thin orebody in high altitude area[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2021.

[4] 胡建钊.某高寒高海拔铜矿采矿方法优化与应用[J].金属矿山,2023(4):22-26.
HU Jianzhao. Optimization and application of mining method for a high-cold and high-altitude copper mine[J]. Metal Mine,2023(4):22-26.

[5] 王亚军,李向东,李强,等.高海拔大型铜多金属矿采矿方法优化及生产设备配套选择[J].矿业研究与开发,2022,42(8):14-18.
WANG Yajun, LI Xiangdong, LI Qiang, et al. Optimization of underground mining methods and selection of supporting production equipment in high-altitude large copper polymetallic mine[J]. Mining Research and Development, 2022,42(8):14-18.

[6] 童大志,朱根鹏,任国顺,等.红岭铅锌矿南西翼残留急倾斜薄矿体采矿方法优选及应用[J].黄金,2021,42(12):29-32.
TONG Dazhi, ZHU Genpeng, REN Guoshun, et al. Optimized selection and application of the mining method for the remaining steeply inclined thin ore bodies in southwest wing of Hongling Lead-Zinc Mine[J]. Gold,2021,42(12):29-32.

[7] 梁彦波,钟永生,周吉谦,等.呷村银多金属矿高效采矿方法及采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):13-19.

LIANG Yanbo, ZHONG Yongsheng, ZHOU Jiqian, et al. Study on efficient mining method and stope structure parameter optimization in Gacun silver polymetallic ore[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):13-19.

[8] 石大庆,王贻明,张纯锋,等.丰山铜矿机械化盘区高效采矿方法优化[J].金属矿山,2023(6):40-44.
SHI Daqing, WANG Yiming, ZHANG Chunfeng, et al. Optimization of efficient mining method in mechanized pan area of Fengshan Copper Mine[J]. Metal Mine,2023(6):40-44.

[9] 程东旭,李晓芸,郭明明.高海拔多矿种缓倾斜多层贫矿脉协同开采研究[J].矿业研究与开发,2025,45(3):17-23.
CHENG Dongxu, LI Xiaoyun, GUO Mingming. Research on collaborative mining of multi ore types at high altitude with gently inclined and multi-layer poor ore veins[J]. Mining Research and Development,2025,45(3):17-23.

[10] 黄志鹏,金长宇,侯俊,等.某断裂带下金矿缓倾斜厚大破碎矿体回采顺序优化研究[J].金属矿山,2025(8):1-8.
HUANG Zhipeng, JIN Changyu, HOU Jun, et al. Research on the optimization of mining sequence of gently inclined thick and large fractured ore bodies in a gold mine under a certain fault zone[J]. Metal Mine,2025(8):1-8.

[11] 武尚荣,费志文,陈帮洪,等.某铜矿分层充填采矿法采场结构参数数值模拟优化研究[J].采矿技术,2025,25(4):1-8.
WU Shangrong, FEI Zhiwen, CHEN Banghong, et al. Numerical simulation optimization study on stope structural parameters of a stratified backfill mining method in a copper mine[J]. Mining Technology,2025,25(4):1-8.

[12] 蒋荣,张庆澳,李俊斌,等.基于采充协同的倾斜中厚破碎矿体安全高效开采技术[J].矿产保护与利用,2025,45(4):39-48.
JIANG Rong, ZHANG Qing'ao, LI Junbin, et al. Safe and efficient mining technology for inclined medium-thick fractured ore bodies based on stoping-backfill synergy[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2025,45(4):39-48.

[13] 黄聪,魏超城,丘永富.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的阿舍勒铜矿深部回采方案优化研究[J].中国矿业,2023,32(11):168-177.
HUANG Cong, WEI Chaocheng, QIU Yongfu. Optimization of deep stoping scheme in Ashele Copper Mine based on modified Mathews stability graph method and FLAC3D[J]. China Mining Magazine,2023,32(11):168-177.

[14] 卢禹然,史秀志,徐泽峰.基于 Mathews 合成图与数值模拟的尾砂处置采场结构参数研究[J].黄金科学技术,2025,33(3):626-637.
LU Yuran, SHI Xiuzhi, XU Zefeng. Research on structural parameters of tailings disposal stope based on Mathews synthetic graph and numerical simulation[J]. Gold Science and Technology,2025,33(3):626-637.

[15] 胡亚飞.下向进路顶板充填体受力变形演化规律与参数优化[D].北京:北京科技大学,2024.
HU Yafei. Parameter optimization and evolution law of stress and deformation of roof backfill in underhand drift[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024.

[16] 刘志明.某矿山复杂环境下地压活动规律研究及开采顺序优化[D].武汉:武汉理工大学,2023.
LIU Zhiming. Study on the law of ground pressure activity and optimization of mining sequence in a complex environment of a mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2023.