某铜金矿进路式充填采矿方案优选及稳定性分析*

李文东[1],刘立辉[2],江科[3],汪志国[4],朱豪[3],薛小蒙[1],欧任泽[3],李国骁[1]

(1.塞尔维亚紫金矿业有限公司, 塞尔维亚 波尔 19210;
2.四川黄金股份有限公司, 四川 成都 610041;
3.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
4.长春黄金研究院有限公司, 吉林 长春 130012)

摘要:针对深部破碎围岩高品位矿体开采难题,以某铜金矿为工程背景,探索进路式充填采矿法的适用性。通过钻孔取芯、单轴压缩与巴西劈裂试验,结合Hoek-Brown及Mohr-Coulomb强度准则,获取了围岩与充填体的关键力学参数。随后,开展了上向与下向进路式充填采矿法的数值模拟研究,分析相应支护条件下的围岩位移特征,并结合技术经济指标进行优选。结果表明:上向法适用于矿岩稳固性较好至中等的矿体,而下向进路法更适用于矿岩极破碎、稳固性极差的矿体;两种进路式充填采矿法的围岩总位移量均较小,但受顶底板差异影响,位移分布不同。经济性对比显示,下向法采充成本较高(较上向法高4.01元/t),而其支护成本较低(较上向法低0.313元/t)。综合考虑,推荐整体采用上向进路充填采矿法,仅在局部围岩高度破碎区域采用下向法开采。

关键词:进路式充填采矿法;岩石力学;破碎围岩;采充成本;数值模拟

中图分类号:TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0030-09

Optimization and Stability Analysis of Drift Filling Mining Scheme in a Copper-Gold Mine

Li Wendong[1], *Liu Lihui*[2], *Jiang Ke*[3], *Wang Zhiguo*[4], *Zhu Hao*[3], *Xue Xiaomeng*[1], *Ou Renze*[3], *Li Guoxiao*[1]

(1.Serbia Zijin Mining Co., Ltd., Bor 19210, Serbia;
2.Sichuan Gold Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610041, China;
3.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
4.Changchun Gold Research Institute Co., Ltd., Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: Aiming at the extraction challenges of high-grade ore bodies in deep fractured surrounding rock, the applicability of the drift filling mining method was explored using a copper-gold mine as the engineering background. Through core sampling, uniaxial compression and Brazilian splitting tests, combined with the Hoek-Brown and Mohr-Coulomb strength criteria, the key mechanical parameters of the surrounding rock and backfill were obtained. Subsequently, numerical simulations on overhand and underhand drift filling mining methods were conducted to analyze the displacement characteristics of the surrounding rock under corresponding support conditions, and scheme optimization was achieved by integrating technical and economic indicators. The results indicate that the overhand drift filling mining method is applicable to ore bodies with good to moderate rock mass stability, whereas the underhand drift filling mining method is more suitable for ore bodies featuring extremely fractured and highly unstable rock masses. For both drift filling mining methods, the total displacement of the surrounding rock remains relatively small; however, the displacement distributions differ due to variations between the roof and the floor. An economic comparison reveals that the underhand drift filling mining method incurs higher mining and filling costs (4.01 yuan/t higher than the overhand drift filling mining method), while its support costs are lower (0.313 yuan/t lower than the overhand drift filling mining method). Based on a comprehensive evaluation, the overall application of the overhand drift filling mining method is recommended, with the underhand drift filling mining method reserved exclusively for localized areas

* **收稿日期**:2025-08-04
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907203)
作者简介:李文东(1987—),男,福建龙岩人,工程师,主要从事矿山生产管理和技术研究工作。E-mail:wendong.li@zijinmining.com
通信作者:江科(1992—),男,湖北天门人,硕士,高级工程师,主要从事矿山绿色充填开采及安全相关的研究工作。E-mail:Jiangk92@163.com

containing highly fractured surrounding rock.

Key words: Drift filling mining method, Rock mechanics, Fractured surrounding rock, Mining and filling cost, Numerical simulation

0 引言

矿产资源作为国民经济和社会发展的重要物质基础，其安全、高效、绿色开采始终是矿业领域的核心议题[1-2]。随着浅部易采资源的逐渐枯竭，开采条件日益复杂，如矿体形态多变、矿岩破碎、地压显现剧烈、地表环境保护要求严格等，传统的空场法、崩落法等采矿方法面临严峻挑战[3-4]。在此背景下，充填采矿法凭借其有效控制地压、维护采场稳定、最大限度回采资源、减少地表沉陷与环境污染等显著优势，已成为复杂难采矿体开采的首选方法，并在全球范围内得到广泛应用和不断发展[5]。

在众多充填采矿工艺中，进路式充填采矿法因其高度的灵活性和适应性，特别适用于开采矿岩稳固性较差、矿体形态不规则的矿体，如薄至中厚、急倾斜或缓倾斜、价值较高的矿体[6-8]。进路式充填采矿法可进一步划分为上向进路式与下向进路式充填采矿法，二者存在较大的应用区别，选择合适的采矿方法，是矿山实现安全高效生产的关键因素。例如，徐恒等[9]、邱景平等[10]分别针对谦比希铜矿西部矿体与鲁中矿业小官庄铁矿存在的地质条件复杂、高地压、围岩破碎及涌水量大的问题，基于现场实际，采用上向进路充填采矿法进行回采。郝英杰等[11]针对金属矿山缓倾斜中厚矿体采用上向水平分层走向进路充填采矿法时存在的生产效率低、矿石损失率高等问题，提出了一种上向水平互错式进路充填二步骤回采的新方案。张宏伟等[12]针对大尹格庄金矿采用点柱式上向水平分层充填法落矿时存在的安全性差、生产效率低及矿石损失率高等问题，提出小规格上向水平进路分层充填采矿法，使得采场地压得到有效控制。以上研究成果均以进路式充填采矿法与其他充填采矿法进行对比，而针对上向与下向进路式充填采矿法之间的系统比较研究较少。

因此，以某铜金矿为工程背景，采集上向与下向进路采场的围岩与充填体钻芯试件，开展围岩基本力学试验。结合 Hoek-Brown 强度准则与 RMR 岩体质量分类法对试件力学参数进行修正，得出围岩与充填体力学参数。在此基础上，采用 FLAC3D 软件分别建立两种进路布置方向下的模型，通过分析围岩稳定性并综合对比技术经济指标，优选出最佳采矿方法，以期为类似深部破碎矿体的开采设计提供参考依据。

1 工程背景

1.1 工程概况

某铜金矿位于塞尔维亚东部的 Bor 市南部，矿区出露地层主要为晚白垩纪砾岩层(UCCM)，泥灰岩-砂岩层、火山、火山碎屑岩及第三纪、第四纪地层。矿区断裂构造发育，主要有 NNW 向与 NEE 向断裂，大致控制矿体的边界，并切割矿体，为破矿构造。矿床为上部带属高硫浅成热液型铜金矿床，共有主矿体、UZ-2 矿体与下矿带 3 个矿体，矿体分布位置如图 1 所示，其中主矿体为隐伏矿体，呈不规则的椭球体，向下部规模变小并呈分支状，主矿体内部结构简单，少见夹石。

以现有钻孔岩芯资料分析，该铜金矿围岩稳固性差，矿体破碎且内部发育多条破碎带，地下水丰富。高品位矿石(Cu 6.51%，Au 4.93 g/t)遇水和空气风化现象显著。矿体赋存条件复杂(规模小、埋深大、地应力高)，开采难度极大。采场围岩剥落与假底破坏频发，严重威胁人员设备安全，制约深部开发。针对上述条件，矿山主要采用上向与下向进路充填法(采场尺寸 5 m×5 m)，沿矿体走向或垂直矿体走向布置采场。为探究上向与下向进路充填法对围岩变形破坏及支护条件下围岩稳定性的影响，以深部上、下向进路采场围岩为对象，综合采用现场调研、室内试验、数值模拟与工业试验方法进行分析。

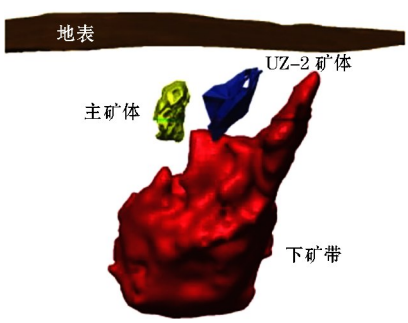


图 1 矿体分布位置

Fig.1 Ore body distribution location

1.2 进路式充填采矿法特征

根据该铜矿矿体赋存状态及高效安全开采需求,可供选择的采矿方法有上向进路充填采矿法与下向进路充填采矿法两种。

1.2.1 上向进路充填采矿法

上向进路充填法是一种自下而上分层回采、分层充填的采矿方法,以进路形式进行作业,适用于矿岩稳固性相对较好的条件。随着回采工作面推进,需及时对采空区进行充填。该工序是上向进路充填法的关键环节,其核心作用在于支护两帮围岩、抑制岩层移动、保障相邻矿柱的安全回采,并为持续上向开采创造安全作业条件。待整个分层的进路全部回采并充填完毕后,方可进行上分层进路的回采作业[13]。

上向进路充填采矿法如图 2 所示。盘区沿矿体走向划分,长度为 50 m,宽度与矿体厚度一致;阶段高度为 60 m,分段高度为 15 m,分层高度为 5 m;采场断面为矩形,规格为 5 m(宽)×5 m(高)。采准工程采用脉外斜坡道布置方式,斜坡道设于矿体下盘围岩中。沿采场高度方向,每隔 15 m 布置一条分段平巷,并通过分段联络道与斜坡道连通。各分层回采时,由分段平巷掘进分层联络道通达矿体。单个分段可服务于 3 个分层的回采作业。从分段平巷开始,沿矿体走向每隔 50 m 掘一条分层联络道至矿体下盘,联络道到达矿体下盘后继续向前掘进水平分层出矿巷道,直至穿透矿体。沿垂直分层运输巷道布置进路采场,铲运机经分层运输巷道进入进路采场内,将崩落矿石铲运至溜井内。

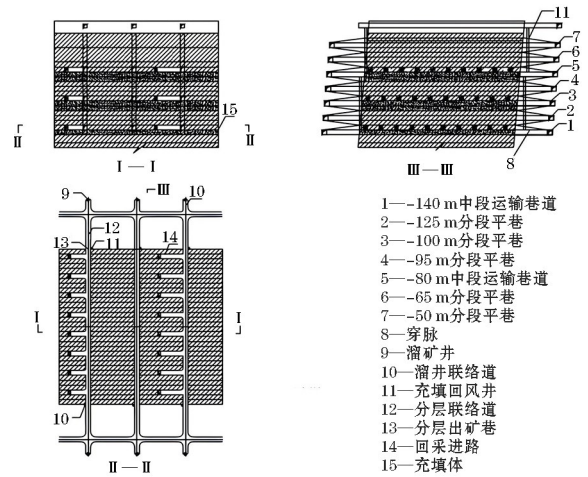


图 2 上向进路充填采矿法

Fig.2 Upward drift filling mining method

1.2.2 下向进路充填采矿法

下向进路充填法是一种自上而下分层回采、分层充填的采矿方法。随着回采推进,采空区需及时充填,该工序是下向进路充填法的关键环节,其作用在于支护两帮围岩、抑制岩层移动、保障相邻矿柱的回采安全,并为下层回采构筑人工假顶(工作顶板)。该方法除满足充填采矿法的基本适用条件外,主要适用于矿岩不稳固甚至极不稳固、地压极大的高品位有色金属或稀有贵金属矿床。该方法有利于实现机械化开采,并能更早开展回采作业[14]。

下向进路充填采矿法如图 3 所示。根据矿体产状及中段巷道的布置方式,阶段高度 60 m,分段高度 15 m,采场断面为矩形,规格为 5 m(宽)×5 m(高)。采准工程采用脉外斜坡道布置方式,斜坡道设于矿体下盘围岩中。沿采场垂直方向,每下降 15 m 布置一条分段平巷,并通过分段联络道与斜坡道相连。自分段平巷掘进分层联络道以通达各分层矿体。单个分段可服务于 3 个分层的回采作业。从分段平巷开始,沿矿体走向每隔 50 m 掘一条分层联络道至矿体下盘,联络道到达矿体下盘后,继续向前掘进一条水平的分层出矿巷道,直至穿透矿体。沿垂直分层运输巷道布置进路采场,铲运机经分层运输巷道进入到进路采场内,将崩落矿石铲运到溜井内。

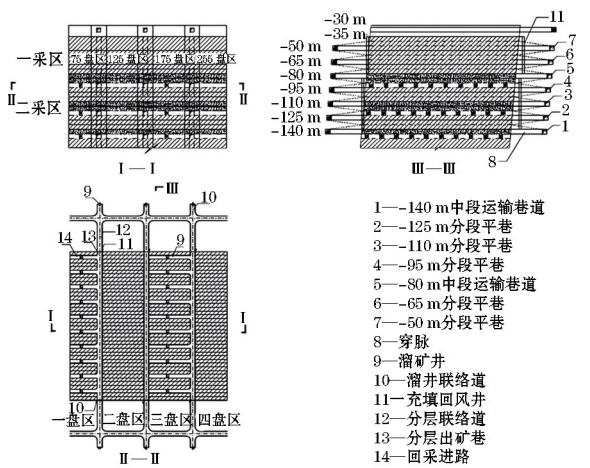


图 3 下向进路充填采矿法

Fig. 3 Downward drift filling mining method

2 岩石力学试验

2.1 试件制备及试验设备

为获取采场围岩与充填体的力学性质,利用切

割机及打磨设备对围岩及充填体钻孔岩芯试件进行二次加工,制作成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准尺寸试件。巴西劈裂试件的尺寸为直径 50 mm、高度 25 mm,试件尺寸及加工精度符合国际岩石力学试验标准[15]。对加工后的试件进行了容重、弹性模量、泊松比及单轴抗压强度参数测试。测试在 MTS-815 型加载系统上完成。加载系统采用轴向变形控制加载,控制加载速度为 0.002 mm/s,利用链条式环向应变计测得的横向应变与轴向应变之比求得泊松比。试验全过程由计算机控制,并实时采集、存储所有试验的图形与数据结果。

2.2 单轴抗压试验

单轴抗压试验力学参数测试结果见表 1。由表 1 可知,围岩试件平均容重为 26.08 kN/m^3,平均抗压强度为 106.58 MPa,平均弹性模量为 56.05 GPa,泊松比为 0.21,破坏形式以纵向劈裂与纵向炸裂为主。充填体试件平均容重为 20.91 kN/m^3,平均抗压强度为 3.64 MPa,平均弹性模量为 0.57 MPa,泊松比为 0.26,破坏形式以纵向劈裂为主。

表 1 单轴抗压试验力学参数测试结果

Table 1 Test results of mechanical parameters from uniaxial compressive strength test

类型	试件编号	质量/g	容重/(kN/m^3)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	破坏描述
围岩	A-1	890.1	26.61	119.90	66.27	0.21	纵向劈裂
	A-2	876.5	25.72	98.71	50.27	0.20	纵向炸裂
	A-3	902.3	25.90	101.13	51.62	0.21	纵向炸裂
充填体	B-1	410.2	20.71	3.32	0.55	0.26	纵向劈裂
	B-1	412.5	20.92	3.45	0.56	0.26	纵向劈裂
	B-1	415.3	21.11	4.15	0.59	0.25	纵向劈裂

2.3 单轴抗拉试验

单轴抗拉强度试验采用圆盘劈裂法。试样直径平面上的拉应力与其所受载荷的关系,可由式(1)表示:

$$R_t=\frac{2P}{\pi\cdot d\cdot t} \tag{1}$$

式中:R_t 为抗拉强度,MPa;P 为试件断裂时,所施加的最大载荷,kN;d 为试件直径,mm;t 为试件厚度,mm。

劈裂抗拉试验力学参数测试结果见表 2。由表 2 可知,围岩试件平均破坏载荷为 27.00 kN,平均抗拉强度为 13.76 MPa,充填体试件平均破坏载荷为 1.35 kN/m^3,平均抗拉强度为 0.69 MPa。

表 2 劈裂抗拉试验力学参数测试结果

Table 2 Test results of mechanical parameters from splitting tensile strength test

类型	试件编号	破坏载荷/kN	抗拉强度/MPa	破坏描述
围岩	S-1	27.00	13.76	中间劈裂
	S-2	23.75	12.10	沿裂隙劈裂
	S-3	30.25	15.41	中间劈裂
充填体	K-1	1.25	0.64	中间劈裂
	K-2	1.45	0.74	中间劈裂
	K-3	1.34	0.68	中间劈裂

2.4 试件力学参数

试件力学参数受其自身性质与结构面特征等多因素影响,较初始完整状态显著弱化。因此,开展采场围岩变形数值模拟前,需要确定准确的力学参数。采用 Bieniawski 提出的 RMR 岩体质量分类法对试件力学参数进行修正。此外,基于试件力学行为的理论分析与实践经验,Hoek-Brown 通过迭代方法建立了试件破坏时的主应力关系方程[16]。

$$\sigma_1=\sigma_3+\sigma_c\left(m_i\frac{\sigma_3}{\sigma_c}+s\right)^a \tag{2}$$

式中:σ_1 为试件破坏时的最大主应力,MPa;σ_3 为试件破坏时的最小主应力,MPa;m_i 为完整试件的 Hoek-Brown 常数;s 与 a 为试件特征有关的常数,对于完整试件,s、a 分别取 1,0.5;σ_c 为试件的单轴抗压强度,MPa。

通过引入地质强度指标 G_{GSI} 来估算不同地质条件下试件强度的折减:

$$m_b=m_i\exp\left(\frac{G_{GIS}-100}{28}\right) \tag{3}$$

式中,m_b 为折减后的 Hoek-Brown 常数。

地质强度指标是表征岩体强度特性的参数,其取值依据现场岩体结构特征与结构面表面状态评估确定。应用 Hoek-Brown 准则估算试件强度参数时,需确定 3 个关键变量:完整岩石单轴抗压强度、m_i 及 G_{GSI} 值。其中,单轴抗压强度可通过试验测定,m_i 可依据经验确定,而 G_{GSI} 的评估则存在一定主观性。基于对矿山岩体质量的现场调研,发现围岩稳定性较差,整体质量等级主要为Ⅲ级,充填体质量等级主要为Ⅳ级。据此确定围岩与充填体的岩体质量评分值 R_{RMR} 分别为 58 和 32。G_{GSI} 与 R_{RMR} 之间存在以下转换关系:

$$G_{GIS}=R_{RMR}-5 \tag{4}$$

由式(4)可知,当 G_{GIS} 大于 25 时,根据原始的 Hoek-Brown 准则,有:

$$\begin{cases} s=\exp\left(\dfrac{G_{GSI}-100}{9}\right) \\ a=0.5 \end{cases} \tag{5}$$

由 Hoek-Brown 准则可知,折减后的试件抗压强度与抗拉强度为:

$$\sigma_{mc}=\sqrt{s}\sigma_c \tag{6}$$

$$\sigma_{mt}=\frac{1}{2}\sigma_c(m-\sqrt{m^2-4s}) \tag{7}$$

式中:σ_{mc} 为折减后的试件抗压强度,MPa;σ_{mt} 为折减后的试件抗拉强度,MPa;m 为常数,取值与试件材料相关。

根据摩尔-库伦准则可得,岩体的内摩擦角、黏聚力、抗压强度为:

$$\begin{cases} \theta=45°+\dfrac{\varphi}{2} \\ \sigma_{mc}=\dfrac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \end{cases} \tag{8}$$

式中:θ 为试件的断裂角,(°);c 为试件的黏聚力,MPa;φ 为试件的内摩擦角,(°)。

修正后的围岩与充填体力学参数见表 3。

表 3 修正后的试件力学参数

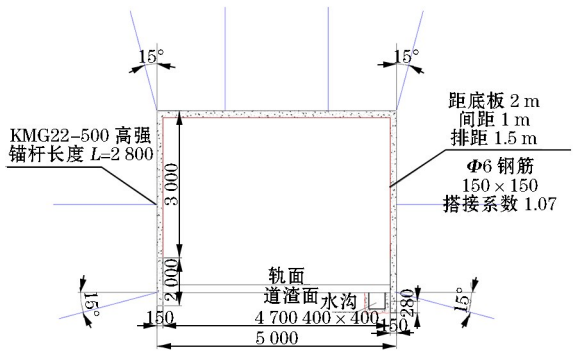
Table 3 Modified mechanical parameters of specimens

类型	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
围岩	85.48	8.50	45.50	1.22	42.88	0.20
充填体	0.55	0.36	0.45	0.20	22.50	0.25

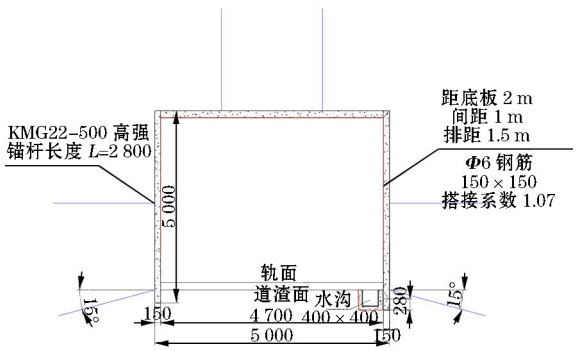
3 围岩稳定性数值模拟

3.1 数值模拟方案

由于围岩破碎程度差别大,根据当地标准,在围岩一般破碎的情况下,行人巷道或工作面顶板与侧帮均需进行支护。当采用上向进路充填法开采时,通常对距离底板 2 m 的侧帮及顶板采用锚网支护,即可保证采场作业安全;采用下向进路充填法开采时,因顶板为内部铺设钢筋的充填体,因此对下向进路充填法,只需要支护侧帮而无需支护顶板,便能保证采场作业安全。对围岩高度破碎的区段,常规锚网支护难以保证安全,需升级为锚网喷联合支护(喷射混凝土厚度为 50 mm)。其中,上向进路充填法需进行全断面支护,而下向进路充填法仍仅需对侧帮进行锚网喷支护。上述两种充填采矿法在围岩高度破碎段的支护方案如图 4 所示,为研究该支护方案的效果,有必要采用 FLAC3D 数值模拟软件,分析该支护条件下围岩位移情况。



(a) 上向进路充填采矿法



(b) 下向进路充填采矿法

图 4 高度破碎段采场支护方案(单位:mm)

Fig.4 Support scheme for stopes in highly fractured sections (unit:mm)

3.2 模型建立

模型尺寸为 50 m×50 m×35 m,采用摩尔-库伦本构模型。模型岩体的初始应力场主要考虑自重应力,在模型的左右和前后边界施加法向位移约束,底部施加固定位移约束,上边界为自由边界。根据现场地应力检测数据,在模型建立完成之后添加 Z 方向应力为 10 MPa,且侧压力系数设置为 1。根据上向与下向进路充填采矿法的工艺区别,将模型从上至下依次进行分组,并分别赋予表 3 中的物理力学参数。在支护模拟方面,锚杆与锚索均采用 Cable 结构单元模拟,采用非全长黏结锚固设计并施加预应力。模型中通过设定锚固剂参数,以区分锚杆和锚索的托盘、自由段及锚固段。其中,锚杆施加的预应力为 0.1 MPa,锚索施加的预应力为 0.07 MPa。巷道内壁处的混凝土喷层与钢筋网则采用 Shell 结构单元进行等效模拟,将其设定为各向同性材料,弹性模量为 1 GPa,厚度为 0.20 m,建立的模型如图 5 所示。

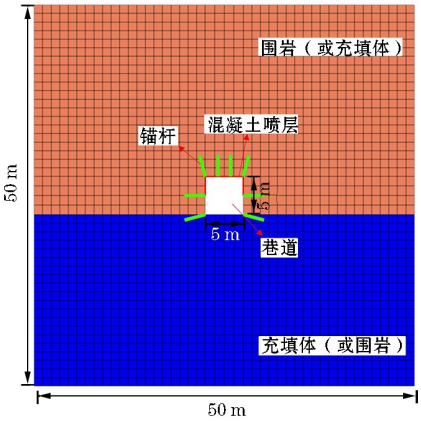
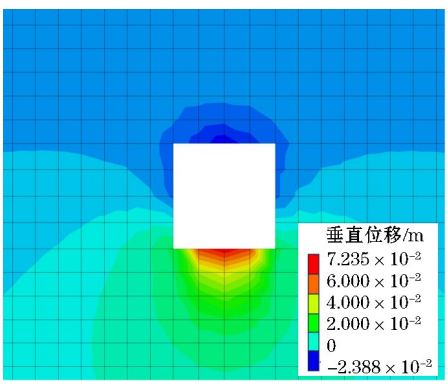


图 5 围岩支护数值模型

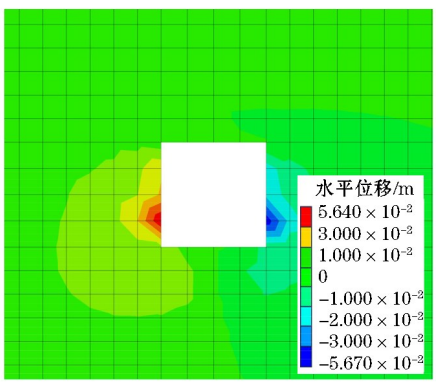
Fig.5 Numerical model of surrounding rock support

3.3 模型结果

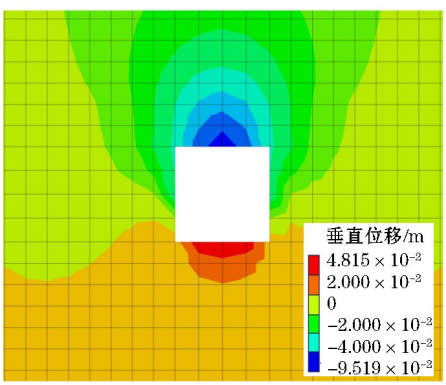
图 6 为采用上向、下向进路充填采矿法的巷道位移云图。由图 6(a)与图 6(b)可知，当采用上向进路充填采矿法时，巷道顶板与两帮为高度破碎围岩，底板为充填体，此时左右两帮位移量约为 56 mm，顶部位移量为 24 mm，底部位移量为 72 mm；由图 6(c)与图 6(d)可知，当采用下向进路充填采矿法时，巷道顶板与两帮为充填体，底板为高度破碎围岩，此时左右两帮位移量约为 93 mm，顶部位移量为 95 mm，底部位移量为 48 mm。说明支护方案取到了良好的支护效果，巷道围岩得到了有效控制。



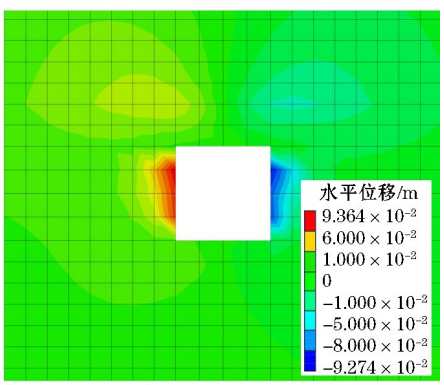
（a）上向进路垂直位移云图



（b）上向进路水平位移云图



（c）下向进路垂直位移云图



（d）下向进路水平位移云图

图 6 数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulation results

4 技术经济指标对比分析

4.1 采矿充填成本计算

采用上向与下向进路充填采矿法回采时，每采 1 t 矿石所需费用见表 4。当断面均为 5 m×5 m 时，采用下向进路充填采矿法开采，采充成本比采用上向进路充填采矿法开采高 4.01 元/t。因此，上向进路充填法在采充成本方面优于下向进路充填法。

表 4 断面 5 m×5 m 时上向进路与下向进路采充成本对比

Table 4 Cost comparison of mining and backfilling between upward drift and downward drift with a cross section of 5 m × 5 m

元/t

采矿方法	采矿成本	材料成本	人工成本	充填挡墙	材料动力费	采充成本合计
上向进路	12.710	1.881	0.247	0.400	1.500	16.738
下向进路	12.710	5.891	0.247	0.400	1.500	20.748

注：含人工运输等其他费用；下向进路充填材料成本按 1∶3 配比预估。

4.2 支护成本计算

采用上向与下向进路充填采矿法回采时,每支护 1 m 巷道所需的材料与费用分别见表 5 与表 6。当上向与下向进路断面均为 5 m×5 m 时,经折算对比可知,围岩在一般破碎条件下,采用下向进路充填采矿法开采,支护成本比采用上向进路充填采矿法开采低 0.313 元/t,但采充成本要高 4.01 元/t。围岩在高度破碎条件下,采用下向进路充填采矿法开采,支护成本比采用上向进路充填采矿法开采低 2.540 元/t。

表 5 支护每米进路所需材料

Table 5 Materials required per meter of drift for support

矿体破碎程度	材料消耗	上向进路	下向进路	备注
一般破碎	断面/m	5×5	5×5	—
	锚杆/(根/m)	8	6	距底板 2 m,间距 1 m,排距 1.5 m
	金属网/(m^2/m)	11.77	11.77	Φ6 mm 钢筋,150 mm×150 mm,搭接系数 1.07
	钢筋/(kg/m)	—	7.175	下向进路底板固定金属网的钢筋
高度破碎	断面/m	5×5	5×5	—
	锚杆/(根/m)	8.000	6	距底板 2 m,间距 1 m,排距 1.5 m
	金属网/(m^2/m)	11.77	11.77	Φ6 mm 钢筋,150 mm×150 mm,搭接系数 1.07
	钢筋/(kg/m)	—	7.175	下向进路底板固定金属网的钢筋
	喷砼/(m^3/m)	0.75	0.5	喷 50 mm 厚

表 6 支护每米进路所需成本

Table 6 Cost required per meter of drift for support

矿体破碎程度	材料成本	上向进路	下向进路
一般破碎	锚杆(按 5.73 元/根计算)/(元/m)	45.840	30.560
	金属网(按边帮挂网 2 140 元/t,底板铺设金属网 1 180 元/t 计算)/(元/m)	73.599	54.758
	钢筋(按 1 370 元/t 计算)/(元/m)	—	9.830
	成本/(元/m)	119.439	95.148
	折吨矿成本/(元/t)	1.541	1.228
高度破碎	锚杆(按 5.73 元/根计算)/(元/m)	45.840	30.560
	金属网(按边帮挂网 2 140 元/t,底板铺设金属网 1 180 元/t 计算)/(元/m)	73.599	54.758
	钢筋(按 1 370 元/t 计算)/(元/m)	—	9.830
	喷砼(按 690 元/t 计算)/(元/m)	517.500	345.000
	成本/(元/m)	636.939	440.148
	折吨矿成本/(元/t)	8.219	5.679

在成本与工艺复杂度方面,上向进路充填法优势显著,采充成本更低、工艺更简单、分层转换更便捷。因此,推荐该铜金矿整体以上向进路充填采矿法为主,若局部碰到非常破碎的区域,考虑改用下向进路充填采矿法开采。

5 工程实践

基于岩石力学试验及数值模拟结果,该铜矿采用脉外斜坡道采准系统。斜坡道布置在矿体下盘围岩中,采场每隔 15 m 布置一条分段平巷,分段联络道与斜坡道相连,采场每层由分段平巷掘分层联络道进入矿体。采矿方法整体以上向进路充填采矿法为主,以下向进路充填法为辅。进路与首采分层路进路呈“品”字形布置,上下分层进路间交错布置。整个分层进路回采充填结束后,于该回采分层与下一回采分层交界处架设充填挡墙并进行充填,待充填体养护一周后即可进行上分层回采。进路内崩落下的矿石采用 6 m^3 铲运机出矿,单条进路生产能力达到 280~300 t/d,矿山的采切比小,采区成本低,损失贫化指标控制较好,均控制在 6%以内。虽然采、支、充总成本相对较高,但矿山吨矿价值极高、生产效率高,整体经济效益非常可观。此外,对进路法采场的顶板和侧帮进行位移监测,监测结果如图 7 所示。在监测期间,采场未发生大面积垮塌现象,也

未出现重大安全事故，整体安全性较好。

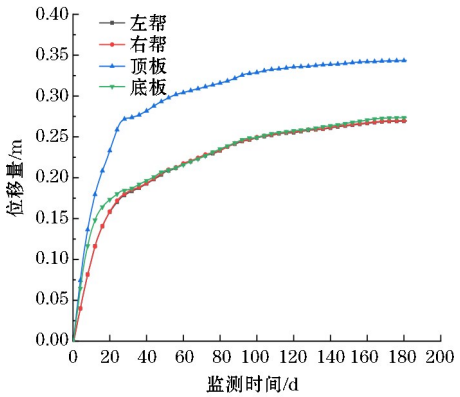


图 7　采场位移监测

Fig.7　Stope displacement monitoring

6　结论

以某铜金矿充填采矿法的优化选择为研究对象，在上向与下向进路充填法工艺特征的基础上，通过岩石力学试验获取了深部围岩基本力学参数。结合岩体质量调查，应用 Hoek-Brown 准则与 Mohr-Coulomb 准则确定了岩体综合力学参数，进而利用数值模拟验证不同支护方案的可靠性，并综合技术经济指标进行比选，最终确定最优采矿方法，主要结论如下。

(1) 上向进路充填采矿法适用于开采矿岩稳固性相对较好至中等的矿体，其生产效率通常更高；下向进路充填采矿法的人工假顶为下部作业提供了可靠屏障，特别适用于开采矿岩极破碎、稳固性极差的高价值矿体，其核心风险在于人工假顶的施工质量。

(2) 数值模拟结果表明，采用上向进路充填采矿法时，左右两帮位移量约为 56 mm，顶部位移量为 24 mm，底部位移量为 72 mm；采用下向进路充填采矿法时，左右两帮位移量约为 93 mm，顶部位移量为 95 mm，底部位移量为 48 mm。由此可见，相应支护方案可有效维持围岩稳定。

(3) 当断面均为 5 m×5 m 时，下向进路充填采矿法的采充成本比上向进路充填采矿法高 4.01 元/t，而支护成本则比上向进路充填采矿法开采低0.313 元/t。因此，建议该铜金矿整体以上向进路充填采矿法为主开采，遇局部高度破碎区域时，可改用下向进路充填采矿法。

参考文献(References)：

[1]　吴爱祥，王勇，张敏哲，等.金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山，2021(1)：1-13.
Wu Aixiang，Wang Yong，Zhang Minzhe，et al. New developments and prospects of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine，2021(1)：1-13.

[2]　袁亮，张通，王玥晗，等.深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J].煤炭学报，2025，50(1)：1-12.
Yuan Liang，Zhang Tong，Wang Yuehan，et al. Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(1)：1-12.

[3]　朱豪，江科，龚永超，等.基于塑性区范围的深部破碎围岩巷道支护技术研究[J].矿业研究与开发，2025，45(6)：12-21.
Zhu Hao，Jiang Ke，Gong Yongchao，et al. Research on roadway support technology of deep crushed surrounding rock based on the range of plastic zone[J]. Mining Research and Development，2025，45(6)：12-21.

[4]　孙朝燚，陈从新，夏开宗，等.金属矿山复杂采空区围岩破坏及岩层移动机制研究[J].岩石力学与工程学报，2024，43(3)：670-682.
Sun Chaoyi，Chen Congxin，Xia Kaizong，et al. Mechanism of surrounding rock failure and strata movement in complex goaf of metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(3)：670-682.

[5]　程海勇，吴爱祥，吴顺川，等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报，2022，44(1)：11-25.
Cheng Haiyong，Wu Aixiang，Wu Shunchuan，et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering，2022，44(1)：11-25.

[6]　张宝，李永辉，盛佳.深部高应力破碎矿床下向进路充填采矿法盘区卸荷回采应用研究[J].矿业研究与开发，2023，43(11)：6-11.
Zhang Bao，Li Yonghui，Sheng Jia. Research on panel unloading stoping with downward drift filling mining method in deep，highly stressed fractured deposits[J]. Mining Research and Development，2023，43(11)：6-11.

[7]　张金来，王建栋，韩斌，等.金川三矿区下向进路胶结充填采矿法采场结构参数优化[J].矿业研究与开发，2022，42(11)：1-7.
Zhang Jinlai，Wang Jiandong，Han Bin，et al. Optimization of stope structure parameters of downward drift cemented filling mining method in the third mining area of Jinchuan[J]. Mining Research and Development，2022，42(11)：1-7.

[8]　贾珍，原少洁，张贵银.破碎围岩矿体下向进路充填采矿法技术研究[J].矿业研究与开发，2017，37(1)：23-26.
Jia Zhen，Yuan Shaojie，Zhang Guiyin. Downward drift filling mining method for orebody with fractured surrounding rock[J]. Mining Research and Development，2017，37(1)：23-26.

[9] 徐恒,王贻明,吴爱祥,等.缓倾斜破碎矿床上向进路膏体充填采矿技术[J].金属矿山,2016(8):12-18.
Xu Heng, Wang Yiming, Wu Aixiang, et al. Upward drift paste backfill mining technique for gently inclined and fractured ore deposits[J]. Metal Mine,2016(8):12-18.

[10] 邱景平,辛国帅,张国联,等.小官庄铁矿上向进路充填采矿方法试验研究[J].金属矿山,2013(8):5-7.
Qiu Jingping, Xin Guoshuai, Zhang Guolian, et al. Experimental study on upward drift stoping method with backfill in Xiaoguanzhuang iron mine[J]. Metal Mine,2013(8):5-7.

[11] 郝英杰,王春龙,姜明伟,等.缓倾斜中厚矿体上向进路充填采矿方法优化及地压控制研究[J].有色金属工程,2023,13(5):114-121.
Hao Yingjie, Wang Chunlong, Jiang Mingwei, et al. Optimization of upward drift filling mining method and ground pressure control for gently inclined medium-thick orebody[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(5):114-121.

[12] 张宏伟,张富兴,孙胜,等.缓倾斜破碎矿体高效进路充填采矿方法研究与应用[J].黄金科学技术,2021,29(6):899-907.
Zhang Hongwei, Zhang Fuxing, Sun Sheng, et al. Research and application of high-efficiency drift backfill mining method in gently inclined broken orebody[J]. Gold Science and Technology,2021,29(6):899-907.

[13] 王文胜,张忠传,秦秀合,等.上向进路充填采矿法采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2023,23(5):22-28.
Wang Wensheng, Zhang Zhongchuan, Qin Xiuhe, et al. Study on optimization of stope structure parameters of upward drift filling mining method[J]. Mining Technology,2023,23(5):22-28.

[14] 邢超,高铭阳,邱洋洋,等.下向进路充填采矿法深部矿岩破坏机理数值模拟研究[J].黄金,2024,45(8):58-63.
Xing Chao, Gao Mingyang, Qiu Yangyang, et al. Numerical simulation study on failure mechanism of deep rock mass using downward drift filling mining method[J]. Gold,2024,45(8):58-63.

[15] 刘建,赵国彦,彭府华.岩石介质弹塑性应变软化本构细观力学参数统计分布模型[J].煤炭学报,2020,45(Suppl.2):692-705.
Liu Jian, Zhao Guoyan, Peng Fuhua. Statistical probability model for mesoscopic mechanical parameters of rock materials under elastoplastic strain-softening framework[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(Suppl.2):692-705.

[16] 余一松,李地元,刘家明,等.进路式充填采场围岩强度特征及稳定性分析[J].矿业研究与开发,2025,45(6):22-31.
Yu Yisong, Li Diyuan, Liu Jiaming, et al. Strength characteristics and stability analysis of surrounding rock in approach filling stope [J]. Mining Research and Development,2025,45(6):22-31.