复杂破碎带厚大矿体分区协同式开采技术研究与应用*

丛宏章[1],蒋博[2,3],李跃国[1],李士超[2,3]

(1.西乌珠穆沁旗银漫矿业有限责任公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 026299;
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:银漫矿业Ⅲ区17#厚大矿体上下盘非均匀发育高岭土化破碎带,采场垮冒风险高、充填体易软化,传统上向水平分层充填采矿法难以兼顾安全与效益。针对该问题,构建"中部稳固区-边部破碎区"分区渐进协同开采思路。采用5种方法计算不同区域充填体所需强度,结合三维数值模拟分析回采顺序、采场宽度及安全暴露面积对围岩-充填体稳定性的影响。结果表明:回采顺序以"隔一采一"的交错回采方案(方案3)为宜,可将高风险塑性带控制在顶板约5~7 m内,并将单次安全暴露面积控制在约300 m^2;采用分区协同采矿方法后,破碎带影响区采场日产量稳定在390~400 t,采切比和吨矿成本明显降低,顶板下沉控制在30~40 mm范围内;单中段产能提升至4 500 t/d,提升幅度为60.7%,充填成本降至66.3元/t,降幅为25.5%,实现了"提效降本、控险增稳"的分区协同效果。

关键词:厚大矿体;复杂破碎带;分区协同开采;护壁式分段充填采矿法

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0001-10

Research and Application of Zonal Cooperative Mining Technology for Thick and Large Ore Bodies with Complex Fractured Zones

Cong Hongzhang[1], *Jiang Bo*[2,3], *Li Yueguo*[1], *Li Shichao*[2,3]

(1.Xi Ujimqin Banner Yinman Mining Co., Ltd., Xilingol League, Inner Mongolia 026299, 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: In the 17# thick and large ore body of Zone Ⅲ at Yinman Mining, kaolinized fracture zones develop non-uniformly in the hanging wall and footwall, leading to a high risk of stope collapse and easy softening of the filling body. The conventional upward horizontal cut-and-fill mining method struggles to balance safety and economic efficiency. To address this issue, a progressive zonal cooperative mining concept of "central stable zone-peripheral fracture zone" was constructed. Five methods were employed to calculate the required filling body strength for different zones. Combined with three-dimensional numerical simulation, the effects of mining sequence, stope width, and safe exposure area on the stability of the surrounding rock and filling body system were analyzed. The results indicate that the alternating mining sequence of "extracting one leaving one" (Scheme 3) is the optimal option. This scheme can confine the high-risk plastic zone to approximately 5-7 m within the roof and control the single safe exposure area to approximately 300 m^2. After adopting the zonal cooperative mining method, the daily production of stopes in the fracture-affected zone stabilizes at 390-400 t. The development ratio and cost per ton of ore are significantly reduced, and roof subsidence is controlled within a range of 30-40 mm. The production capacity of a single sublevel increases to 4 500 t/d, representing an improvement of 60.7%, while the filling cost decreases to 66.3 yuan/t, a reduction of 25.5%. Consequently, the zonal cooperative effects of "improving efficiency and reducing costs while controlling risks and enhancing stability" are achieved.

Key words: Thick and large ore body, Complex fractured zone, Zonal collaborative mining, Wall-supporting sublevel filling mining method

---

* **收稿日期**:2025-12-05
基金项目:深地国家科技重大专项项目(2025ZD1010801)
作者简介:从宏章(1982—),男,内蒙古锡林郭勒人,工程师,主要从事金属矿山开采方面的研究工作。E-mail:2751945284@qq.com
通信作者:蒋博(2000—),男,四川绵阳人,硕士,助理工程师,主要从事金属矿山采矿方法研究工作。E-mail:57851263@qq.com

0 引言

随着矿产资源的持续开发,厚大矿体伴生发育构造破碎带的问题关注度持续上升[1-2]。内部复杂破碎带频现使得岩体呈现出不连续与强非均质的特点,导致微震扰动集中,临界暴露跨度减小,上下盘稳定性显著降低;同时破碎带使爆破能量耦合效率下降、块度与出矿连续性变差,对生产效率与成本构成双重威胁。在这些因素的共同影响下,开采过程中的复杂破碎带已成为矿井生产的严重安全隐患,且造成了资源的巨大损失[3]。

常规情况下,应对破碎带风险需强调控制地压并减小采场暴露面积,工程中常采用进路式充填采矿法或小跨度分段充填采矿法[4]。但前者作业面长期暴露在破碎带的无支护顶板下,同时产出矿量低,效率与安全易受牵制;后者采切工作量大、生产循环频繁限制产能,且对充填体强度与衔接管理较为敏感。针对类似复杂破碎带情况,许多学者开展了多方面研究,取得了大量的研究成果。安龙等[5]针对深部厚大矿体高地应力与多采场相互影响的问题,提出"阶段-分区-错层回采"的回采顺序优化思路,实现了集中应力区的迁移与削峰。李启月等[6]针对V#厚大矿体提出垂直孔与水平孔协同回采的分段充填工艺,通过 ANSYS-SURPAC 耦合建模优化分段高度与跨度,现场应用表明,该工艺可提高生产能力与围岩稳定性。在采矿方法与采场结构参数协同方面,展卫露等[7]结合 Mathews 稳定图与数值模拟对比优化结构参数,优选适应破碎带发育条件的采矿方法及采场结构参数组合。Mortazavi 等[8]基于扩展 Mathews 数据库重构稳定图,针对非进路类采矿方法提出"整合型稳定图"并修正稳定数计算过程,为不同采场暴露稳定性提供了统一的判据。Shnorhokian 等[9]利用三维数值模型和"脆性剪切比"指标,定量分析了岩体参数空间变异对采场失稳体积的影响,为复杂破碎带条件下的可靠性设计提供了思路。梁巨理等[10]针对局部破碎带发育矿体提出预留护壁上向水平充填采矿法,通过优化护壁厚度、充填体强度改善采场位移、塑性区演化,得出合理的护壁参数组合,为类似场景提供了参考借鉴。综上可知,破碎矿体的采矿方法优选是矿山"安全、高效、低成本"生产的核心要素,而细化的采场结构优化则可充分发挥合理采矿方法的优势[11]。

本文以银漫矿业Ⅲ区 17# 含破碎带段厚大矿体为对象,构建"中部稳固区-两侧破碎带区"分区渐进协同开采思路。围绕该思路,本文系统开展分区协同采矿方法与采场构成要素设计、采场结构参数-充填体强度匹配关系的数值模拟分析及分段充填现场工业试验与变形监测评价,在确保破碎带邻近采场长期稳定的前提下,实现银漫矿业Ⅲ区 17# 厚大矿体的安全、经济与高效开采,并为类似厚大矿体+复杂破碎带条件下采矿方法优选与采场结构设计提供可借鉴的技术路线。

1 分区协同开采采矿方法优选

1.1 工程背景与分区思路

银漫矿业Ⅲ区 17# 矿体总体呈近直立脉状赋存,厚度变化大,一般为 10~30 m,局部可达 30 m 以上。矿体上、下盘沿断层带发育高岭土化破碎带,破碎带宽度自中部向两翼增大,局部达数米。其中Ⅲ-13 线以西和Ⅲ-8 线以东与破碎带直接接触的采场内多次出现上盘垮塌与变形超限,严重制约资源安全高效回收。

基于矿体与破碎带的空间配置特征,本章首先从宏观上以Ⅲ-13 与Ⅲ-8 勘探线为界,将矿体划分为"中部稳固区-两侧破碎带区",明确不同区域"功能定位"的差异。综合国内外矿山工程实践,中部稳固区应以扩展增效、矿柱主力回采为主;破碎带区则以改善应力环境、控制暴露跨度与变形、抑制充填体冲刷为主。相应地,中部稳固区优选下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法,两侧破碎带区优选护壁式分段充填采矿法,形成"分区匹配-协同开采"的总体思路。

1.2 稳固区下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法

(1) 采场构成要素。中部稳固区采场沿矿体走向划分长度约 18~22 m 的矿块、沿倾向垂向划分为高度约 60 m 的中段和高度约 20 m 的分段。采场宽度取矿体平均厚度的 70%~80%,从而控制顶板暴露跨度;矿柱宽度根据围岩稳定性与后续回采需求,取 6~8 m,形成"矿房+矿柱"的组合结构。中段运输巷道沿矿体中腰布置,兼顾通风、运输与排水。

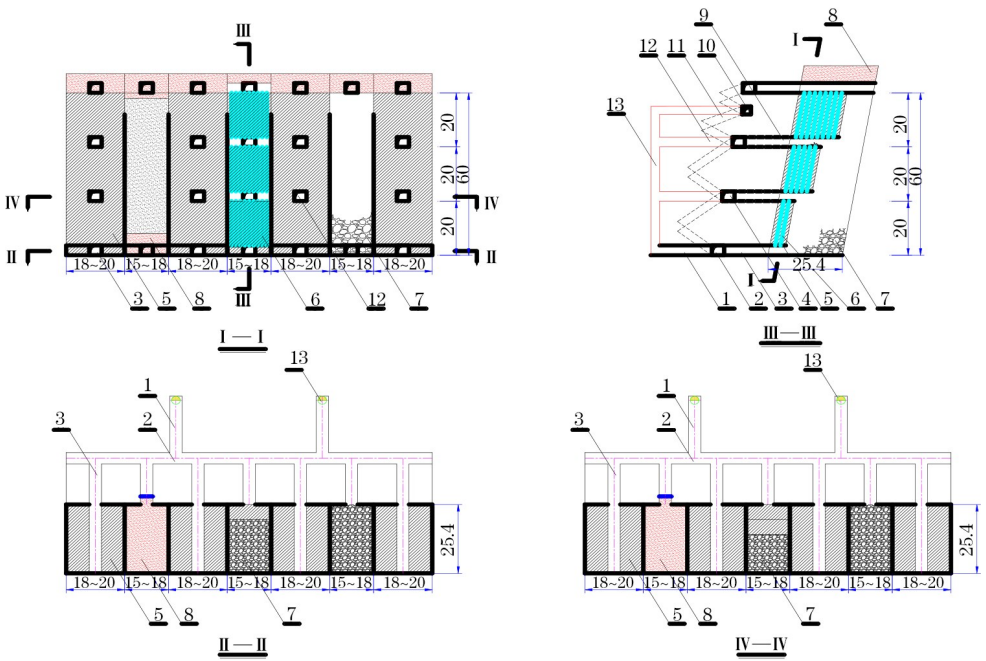
(2) 采切工程布置。采切工程首先沿矿体中部布置中段运输巷道;随后在矿房两端布置切割巷道,通过浅孔爆破形成起爆切槽,创造大规模中深孔爆破自由面;再沿倾向布置溜井贯通各分段。

(3) 凿岩爆破。在底部结构和分段凿岩巷道中进行中深孔凿岩爆破,凿岩设备为 CYTC70 液压凿岩台车,炮孔直径为 72 mm。在采场底部结构中向第一分段矿体钻凿上向平行孔,其余矿体则分别在各分段凿岩巷道钻凿上向扇形孔。炮孔采用 BQF-100 型装药器装药,上向平行孔回采爆破的炸药单耗约为 0.39 kg/t,上向扇形孔回采爆破的炸药单耗约为 0.43 kg/t。

(4) 出矿。采场底部采用遥控铲运机出矿,各分段通过分段凿岩巷道装矿。矿山现用的铲运机型号为 XYWJ-3,载重 7.5 t,铲运机的台班出矿能力约为 350～440 t。各分段初始拉槽阶段需要在分段就地出矿,铲运机直接在作业面铲装,矿石由溜井放至中段后装车。

(5) 采空区充填。为保证充填采场强度可靠同时成本合理,针对不同分段采用差异化充填。一步骤回采采场底部 8 m 充填体强度≥2.8 MPa;每分段的顶部 4 m 充填体强度≥2.0 MPa;其余部位充填体强度≥1.5 MPa。二步骤回采充填体强度要求第一分段采场底部 8 m 强度≥2.8 MPa;每分段的顶部 4 m 强度≥2.0 MPa;其余部位强度≥0.5 MPa。

下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法标准方案如图 1 所示。



1—装矿联络巷 2—中段运输巷 3—凿岩拉底巷 4—分段平巷 5—矿体 6—炮孔 7—崩落矿石
8—充填体 9—分段凿岩巷道 10—充填回风平巷 11—采区斜坡道 12—溜井联络道 13—溜井

图 1 下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法标准方案(单位:m)

Fig.1 Standard scheme of the downward sublevel drilling and subsequent filling mining method (unit:m)

1.3 破碎带区护壁式分段充填采矿法

Ⅲ-13 线以西和Ⅲ-8 线以东区域上盘或下盘围岩显著破碎,使用护壁式分段充填采矿法保留一定宽度的护壁矿柱,将采场暴露界面从破碎带转移至相对完整的矿体内部,形成“护壁矿柱+充填体”的复合承载体系,显著减弱破碎带对采场稳定性的直接影响。并且护壁矿柱在后期可回采,有利于提高资源回收率,是破碎带影响区较为合理的采矿方法选择。

(1) 采场构成要素。破碎带区采场沿矿体走向布置,采场宽度一般控制在 10～14 m,靠近破碎带一侧保留 3～5 m 护壁矿柱,远离破碎带一侧布置采场工作空间及充填体。在Ⅲ-13 线以西区域主要保护上盘破碎带,护壁矿柱靠近上盘布置;在Ⅲ-8 线以东区域则以保护下盘破碎带为主,护壁矿柱靠近下盘布置。采场高度一般为 40～60 m,可根据破碎带强度与充填条件灵活调整。中段运输巷道尽量布置在远离破碎带一侧,以减弱破碎带对巷道稳定性的影响[12]

(2) 采切工程布置。护壁式分段充填采场采

切工程强调“短进尺、小暴露、多分段”[13-14]。每个中段布置1～2条采准斜坡道连接分段平巷与中段运输巷;矿体沿倾向划分3个分段,2条分段平巷布置于上盘、距矿体约15～20 m,与斜坡道通过短联络巷相通。沿分段平巷外侧每隔约50 m布置一座直径3 m的溜井,兼具出渣与出矿。切割平巷和切割天井位置主要依据破碎带空间展布设至上盘或下盘,从而控制在矿岩或壁柱边界范围内。

(3) 凿岩爆破。护壁式分段充填采场回采同样遵循“自上而下、分段顺序”的原则,但严格控制分段回采步距与暴露时间。凿岩孔位主要布置在护壁矿柱与充填体侧。在分段底部结构采用中深孔凿岩爆破,凿岩设备为CYTC70液压凿岩台车,凿上向平行孔,排距1.8 m,孔间距1.9～2.0 m,炮孔深15～17 m。回采爆破的炸药单耗约0.39 kg/t。

(4) 出矿。分段底部采用遥控铲运机出矿,铲装的矿石转运至附近溜井。每次爆落矿石后,底部不宜出空,需保持一定厚度的矿石缓冲垫层,防止采场顶板可能产生的片帮垮落或自然垮塌事故,保障采场出矿安全[15]。

(5) 采空区充填。为保证充填采场强度可靠同时成本合理,针对不同分段采用差异化充填。一步骤回采要求第一分段底部6 m充填体强度≥4.0 MPa;每分段的顶部2 m充填体强度≥2.0 MPa;其余部位充填体强度≥1.5 MPa。二步骤回采要求第一分段底部6 m充填体强度≥4.0 MPa;每分段的顶部2 m充填体强度≥2.0 MPa;其余部位充填体强度≥0.5 MPa。

护壁式分段充填采矿法标准方案如图2所示。

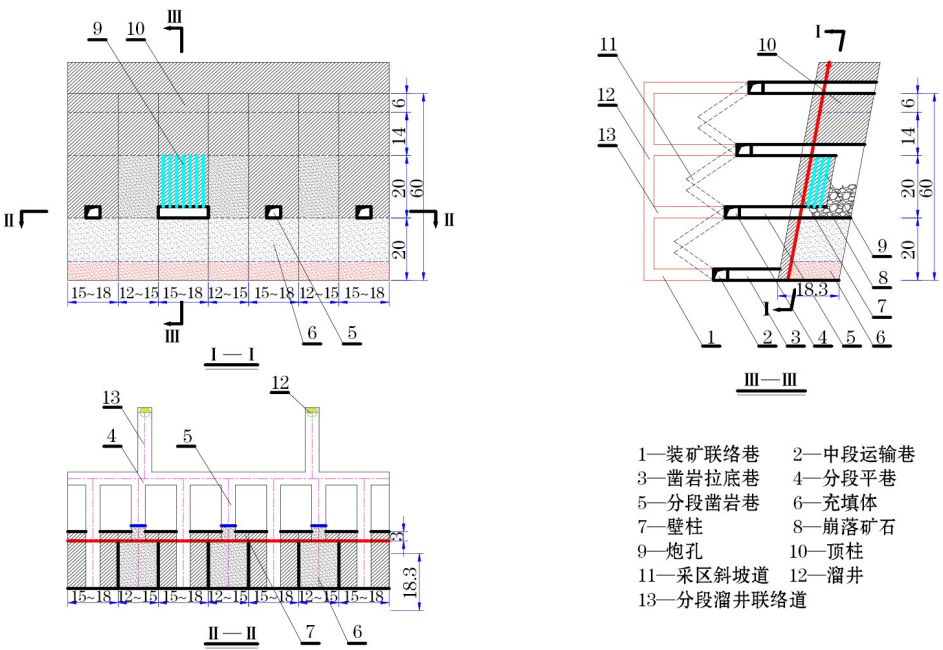


图2 护壁式分段充填采矿法标准方案(单位:m)

Fig.2 Standard scheme of wall-supporting sublevel filling mining method (unit:m)

1.4 采矿方法技术经济指标对比分析

由表1可知,本文提出的分区采矿方法在技术经济指标上均明显优于原上向水平分层充填法。稳固区采用下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法后,采场生产能力提升至490 t/d,较原采矿方法提升近2倍;在贫化率、损失率基本不变的前提下,采切比降至约4.8 m/kt,采矿成本降至52.75元/t,体现出“高产能、低采切比、低损失”的综合优势,适合围岩完整的厚大矿体高效开采。

破碎带区引入护壁式分段充填采矿法后,产能可稳定在390～400 t/d,远高于原采矿方法(约140～160 t/d),而采切比亦由原来的18.9 m/kt降低至8.8 m/kt;虽然为保障护壁安全预留了一定保护矿柱,损失率相对较高,但贫化率仍控制在12%以内,且顶板下沉和塑性区范围显著收敛,有效提升了破碎带区可采资源量。总体上,分区协同采矿方法通过“稳固区提效降本、破碎带区控险增稳”,实现了产能、贫损与安全性的综合优化。

表 1　采矿方法主要技术经济指标对比

Table 1　Comparison of main technical and economic indicators for mining methods

区域	采矿方法	采场生产能力/(t/d)	贫化率/%	损失率/%	采切比/(m/kt)	吨矿成本/(元/t)	围岩稳定性
稳固区	下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法	490	12	11	4.8	52.75	中等
破碎带区	护壁式分段充填采矿法	390～400	12	24	8.8	63.01	较好
稳固区	上向水平分层充填采矿法(原采矿方法)	180	10	11	14.0	63.95	中等
破碎带区	上向水平分层充填采矿法(原采矿方法)	140～160	12	12	18.9	66.22	较差

2　采场结构参数与充填体强度综合研究

2.1　公式法计算与充填体强度推荐

基于采场结构参数和上覆围岩特征，采用 Thomas 模型法、Mitchell 计算法、杨辛公式、覆岩承重计算法和蔡嗣经经验公式[16]，计算中部稳固区矿房充填体、两侧破碎带区护壁式采场充填体所需 28 d 抗压强度，综合考虑上覆围岩厚度、充填体尺寸、矿岩容重与自重应力等因素确定推荐值。结果表明，中部稳固区在采场宽度 10～14 m、分段高度约 20 m 条件下，充填体 28 d 抗压强度宜控制在 1.5～2.0 MPa 之间；破碎带影响区由于围岩破碎、荷载路径复杂，充填体强度应提高至 3.0～3.5 MPa，底部一次挡墙、护壁接头等局部高风险部位采用3.5～4.0 MPa 高强度充填体。根据表 2 可知，Thomas 模型法、杨辛公式、覆岩承重计算法得出的结果接近，Mitchell 计算法和蔡嗣经经验公式得出的结果接近。不同方法的计算结果存在差异，且充填体强度取值过小会增加回采过程中的安全风险，而取值过大，则会增加充填成本，不利于矿山的降本增效。因而，还需要通过数值模拟进一步优化充填体强度的取值。

表 2　公式法计算的矿房所需充填体 28 d 强度

Table 2　28-day required strength of the filling body in the stope calculated by the formula methods

矿房位置	矿房高度 H/m	需要的充填体强度/MPa				
		Thomas 模型法 $k=2.0$	Mitchell 计算法 $k=2.0$	杨辛公式 $k=2.0$	覆岩承重计算法 $k=1.5$	蔡嗣经经验公式 $k=1.5$
稳固区	20	0.422	1.377	0.236	0.513	1.105
破碎带区	60	0.508	5.494	0.430	1.334	2.090

注：表中 k 为安全系数。

2.2　数值模拟下的充填体揭露稳定性分析

2.2.1　数值模拟方案

为验证公式法结果的合理性，并进一步揭示充填体强度与采场结构参数之间的耦合关系，本研究采用 FLAC3D 对中部稳固区及矿柱回采条件下的充填体揭露稳定性进行三维数值模拟。模型显式考虑上盘砂岩、矿体、下盘斑岩与充填体 4 类材料，围岩采用弹塑性本构，充填体采用摩尔-库仑屈服准则。埋深 140～320 m，仅考虑矿岩自重应力场影响，侧边界施加静水压力，底部为固定边界、顶部施加等效重力荷载。

根据前期矿区矿岩物理力学试验得出矿岩特性参数，见表 3。矿柱开采三维数值模型如图 3 所示。根据矿区“隔一采一”的总体回采原则，对矿柱资源回采阶段的内部回采顺序进行编排，将工况划分为三种回采方案：方案 1，优先回采中部矿柱，随后回采两侧矿柱；方案 2，先回采一侧矿柱，再依次向另一侧推进；方案 3，“隔一采一”的交错回采，即在不同时段交替回采左右两侧矿柱，使上部充填体受力逐步重分配。

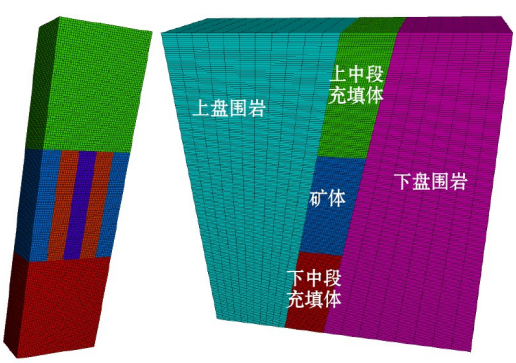


图 3　矿柱开采三维数值模型

Fig.3　Three-dimensional numerical model for pillar mining

表 3 矿岩与充填体的物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of ore-rock and filling body

材料	密度/(t/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
上盘砂岩	2.69	34.98	0.20	10.12	24.07	30.22
矿体	2.90	60.00	0.20	17.13	20.86	55.00
下盘斑岩	2.62	58.72	0.20	21.95	37.19	29.75
充填体	1.73	5.43	0.25	0.36	1.08	39.21

2.2.2 应力场分析

不同回采方案下采场主应力分布云图如图 4 所示。随着矿体的开采,回采区域及其附近一定范围内矿岩的主应力变化明显,相较于原始应力的梯度分布,回采后主应力场以矿体开挖区域为界呈现明显分区特征。采场尚未充填时,顶底板出现明显应力释放区域,充填体能够有效控制矿岩应力,形成围岩-充填体复合承载结构支撑采场,应力从充填体与围岩交界逐步向上传递,最终趋于原岩应力状态。

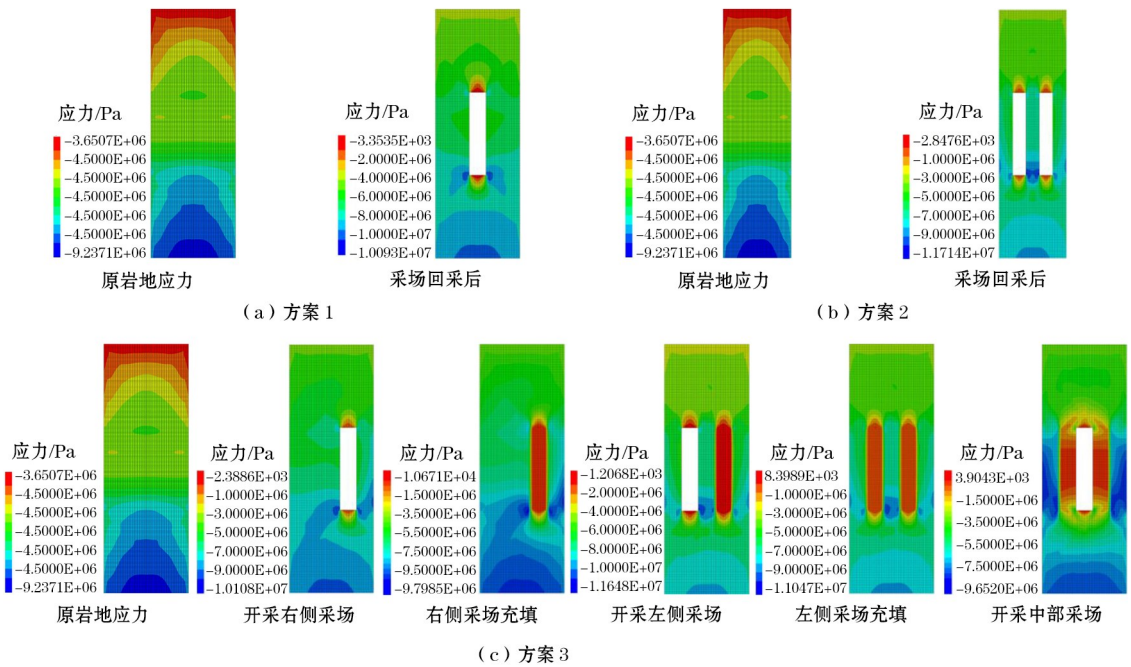


图 4 不同回采方案下采场主应力分布云图

Fig.4 Nephograms of principal stress distribution in the stope under different mining schemes

相较于初始地应力状态,矿体开挖引起了明显应力重分布。对比三种回采方案可以发现,回采体积越大,采动效应越显著,其中方案 3 变化相对较为平缓,最有利于矿体稳定。数值模拟结果表明,矿岩与充填体交界处出现显著拉应力集中,使得此区域在拉应力的作用下极易出现拉剪破坏。方案 1 采场顶板 6 m 高度范围内呈现了拉应力集中区域,拉应力分布规律出现半圆形梯度分布,其中 0～2.8 m 范围内拉应力为 0.40～0.59 MPa,2.8～3.5 m 范围内拉应力为 0.20～0.40 MPa。按当前类比充填体强度参数,抗拉强度为抗压强度的 1/10～1/20,则充填体抗拉强度应为 0.25～0.50 MPa,因此方案 1 采场顶板 0～3.5 m 范围内出现垮冒概率较大。方案 2 采场顶板拉应力分布与方案 1 一致,其中 0～2 m 范围内拉应力为 0.50～7.50 MPa,2～3 m 范围内拉应力为 0.25～0.50 MPa,3～4 m 范围内拉应力为 0～0.25 MPa。因此方案 2 采场强度 0～3 m 范围内出现垮冒概率较大。方案 3 中第一个Ⅰ步骤采场的 0～2 m 内拉应力范围为 0.50～7.50 MPa,2～3 m 范围内拉应力为 0.25～0.50 MPa,3～4 m 范围内拉应力为 0～0.25 MPa。因此采场顶板 0～3 m 范围内出现垮冒概率较大。第二个Ⅰ步骤采场开挖完毕后应力分布与第一个Ⅰ步骤采场几乎相同,0～3 m 范围内出现垮冒概率较大。Ⅱ步骤采场顶板 0～3 m 范围内拉应力为 0.40～0.59 MPa,3～3.5 m 范围内拉应力为 0.20～0.40 MPa,3.5～5.0 m 范围内拉应力为 0～0.20 MPa,因此采场顶板 0～3.5 m 范围内出现垮冒概率较大。采场侧帮部分区域拉应力为 0～0.20 MPa,小于充填体抗拉强度,侧帮发生充填体垮冒现象的概率较小。

2.2.3　位移与塑性区分析

本次模拟过程中，采场岩层位移与塑性区变化具有一致性，故将塑性区与位移场结合分析。位移场分析结果表明，矿体开采完毕后，变形主要发生在矿体顶底板处，其中以底板变形较为显著，主要影响矿房开采过程中的出矿平底工序。

不同回采方案下采场塑性区分布云图如图 5 所示。塑性区云图表明，矿房回采过程中塑性区主要发育于采场顶、底板，且顶板 0～2 m 范围内 3 种回采方案均出现明显剪切-拉张破坏，为最易发生垮冒的高风险带；2～5 m 为历史剪切屈服区，在充填体均质性较好的条件下当前失稳概率较低。在 10 m 宽采场条件下，方案 1 和方案 2 采用单侧集中回采，随回采推进顶板充填体上部连续塑性带高度可达约 17 m，并向上盘、下盘扩展，垮落风险显著增大；方案 3 采用交错回采，一步骤采场塑性分布与方案 2 相近，但通过分批卸荷削弱了累积破坏，整体塑性区高度稳定在 5～7 m，单次安全暴露面积控制在约 300 m^2，且主要表现为局部边角破坏，未形成贯通剪切带。综合比较可见，交错回采显著降低了顶板充填体塑性区发育高度和贯通程度，有利于矿柱回采阶段采场整体稳定性控制。

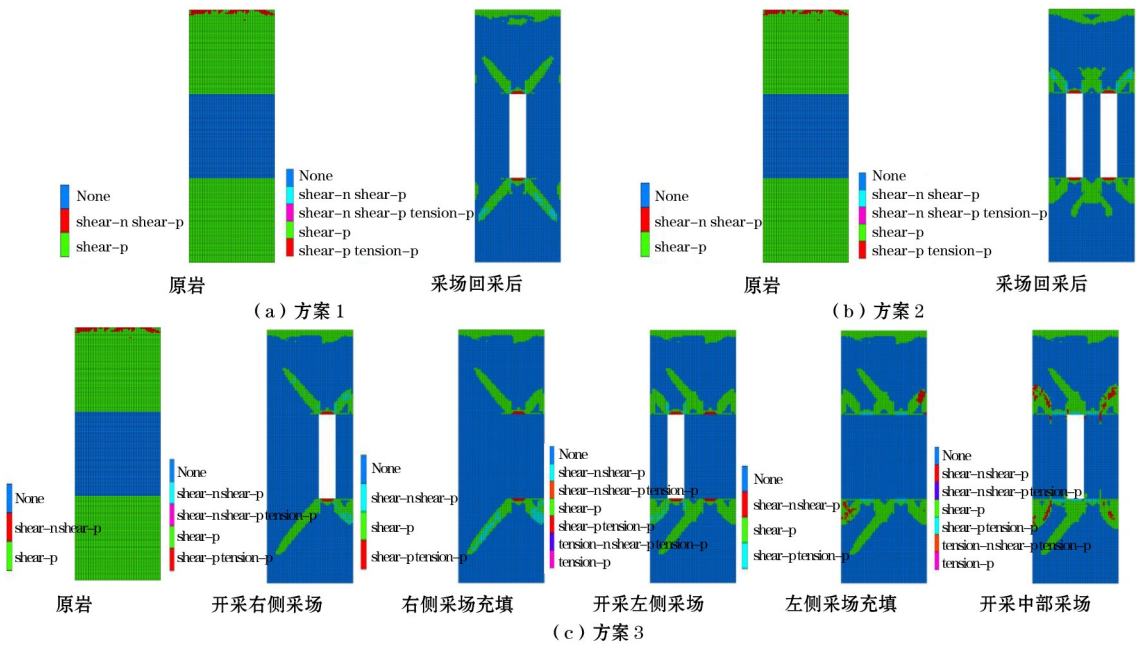


图 5　不同回采方案下采场塑性区分布云图

Fig.5　Nephograms of plastic zone distribution in the stope under different mining schemes

综合理论计算与数值模拟结果，确定回采顺序以“隔一采一”的交错回采方式为宜，即方案 3 为最佳回采顺序方案。稳固区充填体 28 d 强度控制在 2.5～3.0 MPa、破碎带区控制在 3.0～3.5 MPa、底部一次挡墙关键部位强度提高至 3.5～4.0 MPa，从而保证充填体与围岩形成共轭承载结构。

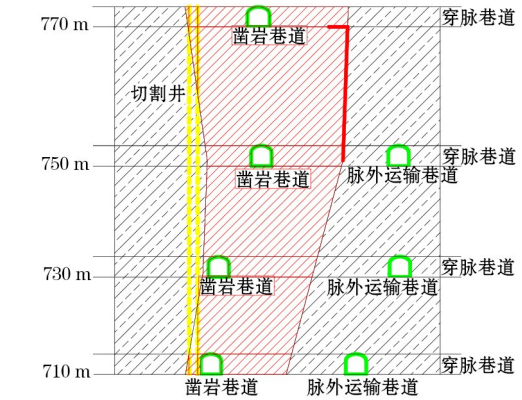
3　破碎带分区协同开采现场试验

为验证分区协同开采技术在银漫矿业Ⅲ区的适用性和安全性，本章在典型矿块分别采用两种采矿方法开展现场工业试验。综合分析采场布置、工程实施与地压响应及技术经济指标多参数影响重要性，评价新工艺在中部稳固区与破碎带影响区的工程效果，为矿区范围内推广应用提供实践依据。

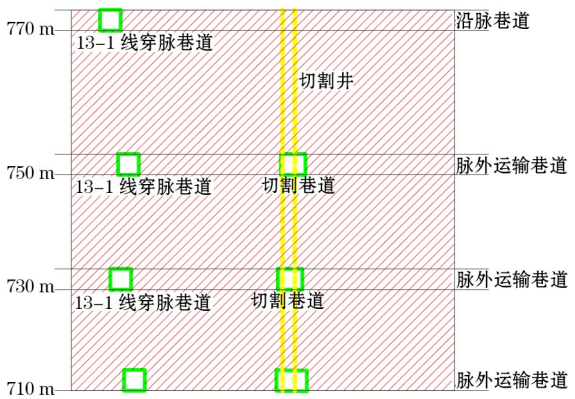
3.1　稳固区采场试验

中部稳固区采用下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法开采，试验采场回采高度约 60 m，分 3 个分段，走向长度约 18 m，平均厚度约 20 m，为厚大陡倾脉状矿体。中段运输巷沿矿体中腰布置，上、中、下分段分别设凿岩巷和溜井，形成“上凿岩-中运输-下出矿”三层系统，围岩稳定性等级为Ⅲ级。稳固区矿体垂直剖面布置情况如图 6 所示。采场试验结果表明，单班钻孔进尺 60～80 m，炸药单耗约 0.48 kg/t，爆破块度满足机械出矿要求。分段回采后采用水泥-矿渣-尾砂胶结体系一次嗣后充填，28 d 龄期充填体抗压强度实测为 2.6～3.1 MPa，与上文推荐值一致。回采期间采场顶板最大下沉量小于 30 mm，围岩-充填体界面未见贯通裂隙，吨矿充填及综合

采矿成本均有所下降,验证了稳固区采矿方法与充填体强度优化设计的合理性。



(a) 矿体垂直剖面



(b) 切割巷道具体布置点位

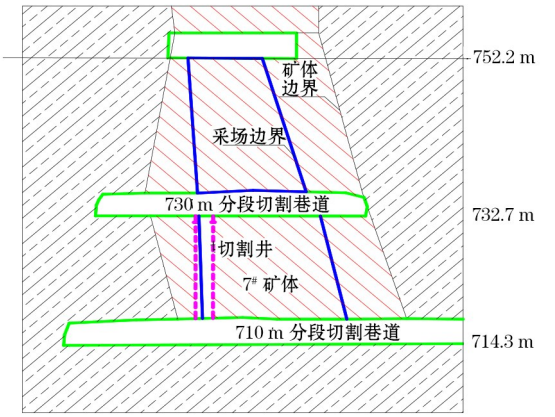
图 6 稳固区矿体垂直剖面布置情况

Fig.6 Layout of the vertical profile of orebody in stable zone

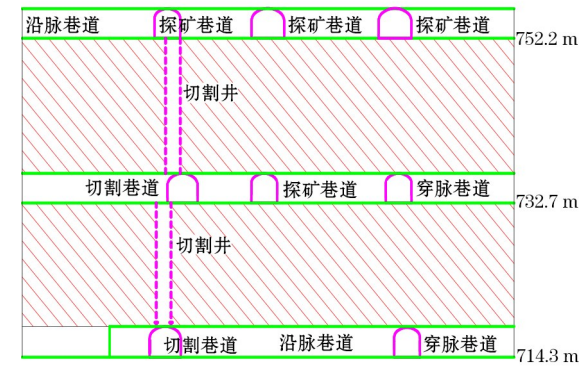
3.2 破碎带区采场试验

破碎带区采用护壁式分段充填采矿法开采,试验段位于Ⅲ-8 线附近 712.15～754.68 m 标高范围内,矿体走向约 85°、倾角约 85°。控矿主断层宽 0.7～1.0 m,自西向东逐渐增宽,裂隙发育,围岩整体破碎。针对该地质条件,采场护壁式分段充填结构靠近破碎带一侧留设 3～5 m 护壁矿柱,工作空间布置在远离破碎带一侧,采场宽度控制在 10～12 m 范围,高度约 40～60 m,根据破碎带稳定性和充填条件灵活调整。破碎带区垂直剖面布置情况如图 7 所示。

破碎带区采场回采遵循“小步快进、强支护、快充填”原则。各分段采用短进尺中深孔爆破,适当减小最小抵抗线和孔距,以降低爆破对破碎带及护壁矿柱的扰动。充填体实测 28 d 抗压强度普遍为 3.2～3.6 MPa,与设计范围 3.0～3.5 MPa 相符。底部一次挡墙等关键构件通过适当加厚和提高水泥掺量提升强度,确保挡墙抗滑与抗倾覆安全系数满足要求。充填施工过程中配合顶板离层仪和收敛计监测充填体与围岩变形,实时掌握采场稳定状态。



(a) 矿体垂直剖面



(b) 切割巷道具体布置点位

图 7 破碎带区矿体垂直剖面布置情况

Fig.7 Layout of the vertical profile of orebody in fractured zone

工业试验结果表明,护壁式分段充填采矿法可有效保障破碎带影响区采场稳定性。监测数据显示,试验期间采场顶板最大下沉量不超过 40 mm,护壁矿柱与充填体界面未见贯通裂隙,未发生冒顶、片帮及充填体冲刷事故。破碎带影响区采场地质矿量约 3.58 万 t,采出矿量约 2.08 万 t,采矿损失率 23%、贫化率约 12%,炸药单耗约 0.48 kg/t,钻机进尺能力保持在 60～80 m/台班。综合分析,护壁式分段充填采矿法在破碎带影响区实现了“安全可靠、损失可控、成本可接受”的目标。

新旧采矿方法指标对比见表 4。由表 4 可知,采用分区协同采矿方法后,单中段产能由原来的 2 800 t/d 提升至 4 500 t/d,提升幅度为 60.7%,充填成本由 89 元/t 降至 66.3 元/t,降幅为 25.5%,实现了“提效降本、控险增稳”的分区协同效果。

表 4 新旧采矿方法指标对比

Table 4 Comparison of indicators between new and old mining methods

采矿方法	单中段产能/(t/d)	矿石损失率/%	充填成本/(元/t)	设备综合效率/(m/台班)
原采矿方法	2 800	22	89	60
分区协同采矿方法	4 500	11(中部) 23(破碎区)	66.3	80
变化幅度	提升 60.7%	降低 50% 提升 4%	降低 25.5%	提升 33.3%

4 结论

(1) 基于银漫矿业Ⅲ区 17# 厚大矿体与破碎带空间耦合特征，本文提出了“中部稳固区采用下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法、两侧破碎带区采用护壁式分段充填采矿法”的分区协同开采技术路线，构建“护壁矿柱＋高强度充填体”复合承载体系，相比传统上向分层充填采矿法更适应厚大矿体＋复杂破碎带条件，为类似矿山工程设计提供参考。

(2) 在公式法计算充填体强度的基础上，采用 FLAC3D 数值模拟进一步优化充填体强度的取值。数值模拟确定回采顺序以“隔一采一”的交错回采方案(方案 3)为宜，该方案下中部稳固区在采场宽度为 10～14 m 时，充填体 28 d 强度为 2.5～3.0 MPa，破碎带区充填体 28 d 强度为 3.0～3.5 MPa，关键挡墙强度为 3.5～4.0 MPa，可将高风险塑性带控制在顶板约 5～7 m 内，并将单次安全暴露面积控制在约 300 m^2。

(3) 分区协同采矿工艺具备工业可行性。中部稳固区采用下向分段凿岩阶段嗣后充填采矿法开采后，贫化率约 12%、损失率约 11%，顶板最大下沉量小于 30 mm，成本显著下降；破碎带区采用护壁式分段充填采矿法开采后，采场日产量稳定在 390～400 t，顶板最大下沉量不超过 40 mm，未出现冒顶、片帮及跑浆事故。

(4) 采用分区协同采矿方法后，单中段产能由原来的 2 800 t/d 提升至 4 500 t/d，提升幅度为 60.7%，充填成本由 89 元/t 降至 66.3 元/t，降幅为 25.5%，实现了“提效降本、控险增稳”的分区协同效果。

参考文献(References)：

[1] 尹延天，刘焕新，刘震，等.金属矿山采场稳定性评价方法进展与展望[J].中国矿业，2023，32(6)：96-103.
Yin Yantian, Liu Huanxin, Liu Zhen, et al. Advances and prospects of stope stability evaluation methods in metal mines[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6): 96-103.

[2] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术，2017，49(2)：1-16.
Xie Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.

[3] 鲍敏，高进，郭明.丰山铜矿南缘采矿方法优选与应用[J].矿业工程，2018，16(2)：10-13.
Bao Min, Gao Jin, Guo Ming. Mining method optimization and application in south edge of Fengshan Copper Ore[J]. Mining Engineering, 2018, 16(2): 10-13.

[4] 曹伟，康锡升，李晓辉，等.锡矿山南矿深部采场结构参数优化研究[J].采矿技术，2024，24(5)：37-43.
Cao Wei, Kang Xisheng, Li Xiaohui, et al. Optimization of deep stope structural parameters in the southern mine of Xikuangshan[J]. Mining Technology, 2024, 24(5): 37-43.

[5] 安龙，徐帅，任少峰，等.深部厚大矿体回采顺序设计及优化研究[J].东北大学学报(自然科学版)，2013，34(11)：1642-1646.
An Long, Xu Shuai, Ren Shaofeng, et al. Study on design and optimization of mining sequence for deep and large ore body[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(11): 1642-1646.

[6] 李启月，刘恺，李夕兵.基于协同回采的深部厚大矿体分段充填采矿法[J].工程科学学报，2016，38(11)：1515-1521.
Li Qiyue, Liu Kai, Li Xibing. Sublevel filling method for a heavy orebody in deep mining based on collaborative stoping [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(11): 1515-1521.

[7] 展卫露，张忠传，李正明，等.锡铁山铅锌矿采矿方法优选及采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发，2024，44(8)：48-55.
Zhan Weilu, Zhang Zhongchuan, Li Zhengming, et al. Optimal selection of mining methods and optimization of stope structure parameters in Xitieshan Lead-Zinc Mine[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(8): 48-55.

[8] Mortazavi A, Osserbay B. The consolidated Mathews stability graph for open stope design[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5): 2409-2424.

[9] Shnorhokian S, Macneil B, Mitri H S. Volumetric analysis of rock mass in stability around haulage drifts in underground mines [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(1): 60-71.

[10] 梁巨理，张庆嵩，林卫星，等.预留护壁式上向水平充填采矿法采场稳定性研究[J].矿业研究与开发，2025，45(7)：63-72.
Liang Juli, Zhang Qingsong, Lin Weixing, et al. Research onstope stability of upward horizontal filling mining method with reserved retaining wall [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(7): 63-72.

[11] 张绍周，苏之品，陈玉明.基于 FLAC3D 的某矿山开采方案优选及应用[J].黄金，2023，44(12)：14-17.

Zhang Shaozhou, Su Zhipin, Chen Yuming. Optimized selection of mining plans in a certain mine based on FLAC3D and its application[J]. Gold,2023,44(12):14-17.

[12] 张雄天,马炳德,张春阳,等.多中段开采复杂采空区群稳定性数值模拟研究[J].矿冶工程,2025,45(2):26-33.
Zhang Xiongtian, Ma Bingde, Zhang Chunyang, et al. Numerical simulation for stability of complex mined-out areas in multi-level mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2025,45(2):26-33.

[13] 马明辉.残矿回采围岩-充填体协同承载机制与稳定性分析[D].北京:北京科技大学,2023.
Ma Minghui. Collaborative bearing mechanism of surrounding rock-backfill and stability analysis in residual ore recovery [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2023.

[14] 袁世冲.深部矿山裂隙岩体帷幕注浆浆液扩散机理及"浆-岩"组合体采动效应研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
Yuan Shichong. Investigation on thegrout propagation mechanism of curtain grouting in fractured rock mass in deep mines and mining influence on the grout-rock composite[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2023.

[15] 白银.缓倾斜中厚复杂矿体采矿方法优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
Bai Yin. Optimizationresearch on mining method for the complex orebody of gentle dip and medium thickness[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.

[16] 张金坤,何银东,刘龙琼,等.佩吉铜金矿二采区充填材料配合比的优化与应用[J].矿业研究与开发,2025,45(2):66-72.
Zhang Jinkun, He Yindong, Liu Longqiong, et al. Optimization and application of backfill material mix ratio in the second mining area of Peki Copper-Gold Mine [J]. Mining Research and Development,2025,45(2):66-72.