深部厚大矿体近水平转缓倾斜-倾斜回采方案优化与应用*

郑攻关[1]，张九雨[1,2]，林峰[2]，古绪球[3]，陈东友[3]，谢经鹏[1]，覃星朗[1]，熊良锋[1,4]

（1.铜陵有色金属集团控股有限公司技术中心， 安徽 铜陵市 244000；
2.深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室， 辽宁 沈阳 110819；
3.铜陵有色金属集团股份有限公司冬瓜山铜矿， 安徽 铜陵市 244000；
4.江西理工大学， 江西 赣州市 341000）

摘要：缓倾斜矿体是公认的难采矿体之一，而在矿山生产系统固定的条件下，不同赋存条件矿体的回采转换会显著影响矿山生产效率与安全。某矿山由近水平矿体转向缓倾斜-倾斜回采时，采用传统方法面临着部分采场无法利用现有巷道进行采切的问题，需要开拓大量新采准工程。针对以上问题，提出了“垂直矿体走向布置采场，取消切割天井，以出矿进路为初始自由面与补充空间”的回采方案，可节省堑沟巷道、中深孔拉底、出矿进路及出矿巷道等部分采准工程。通过FLAC3D软件论证了该结构的稳定性，并在现场开展工业试验。结果表明：采场62-A采空区模型形态较为规整，顶板及侧帮基本未发生冒落，矿石损失率为2.3%，贫化率约为8.5%，采切工程量减少约14.8%。该方案具有适应矿体倾角变化、简化采场结构及减少工程量等优势，为类似矿体回采提供了参考。

关键词：深部开采；缓倾斜-倾斜矿体；回采方案优化；深孔落矿

中图分类号：TD853.21 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)04-0001-07

Optimization and Application of the Mining Scheme for Transition from Near-Horizontal to Gently Inclined and Inclined Ore Bodies in a Deep Thick Ore Body

ZHENG Gongguan[1], *ZHANG Jiuyu*[1,2], *LIN Feng*[2], *GU Xuqiu*[3], *CHEN Dongyou*[3], *XIE Jingpeng*[1], *QIN Xinglang*[1], *XIONG Liangfeng*[1,4]

(1.Technology Center of Tongling Nonferrous Metals Group Holding Co., Ltd., Tongling, Anhui 244000, China;
2.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Shenyang, Liaoning 110819, China;
3.Dongguashan Copper Mine, Tongling Nonferrous Metals Group Holding Co., Ltd., Tongling, Anhui 244000, China;
4. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Gently inclined ore bodies are recognized as one of the difficult-to-mine ore bodies. Under the condition that the mine production system is fixed, the conversion of mining for ore bodies with different occurrence conditions significantly affects the mine production efficiency and safety. When a mine converts from mining near-horizontal ore bodies to gently inclined-inclined ore bodies, the traditional method is faced with the problem that some stopes cannot utilize existing roadways for mining and cutting, and a large number of new mining preparation projects need to be developed. To address the above problems, a mining scheme of “arranging stopes perpendicular to the strike of the ore body, canceling cutting raise shafts, and using ore drawing drifts as the initial free surface and supplementary space” was proposed. This scheme can save some mining preparation projects such as trench roadways, medium-deep hole bottom pulling, ore drawing drifts and ore haulage roadways. The stability of this structure was demonstrated using FLAC3D software, and industrial tests were carried out on-site. The results show that the goaf model of stope 62-A has a relatively regular shape, basically no caving occurs and side walls, the ore loss rate is 2.3%, the dilution rate is about 8.5%, and the mining and cutting engineering quantity is reduced by about 14.8%. This scheme has advantages such as adapting to the change of ore body dip angle, simplifying stope structure and reducing engineering quantity, and provides a reference for the mining of similar ore bodies.

Key words: Deep mining, Gently inclined-inclined ore body, Mining scheme optimization, Deep hole blasting ore breaking

---

* **收稿日期**：2025-12-29

基金项目：国家自然科学青年基金项目(52404116)；国家重点研发计划项目(2023YFC2907202)

作者简介：郑攻关(1972—)，男，安徽萧县人，高级工程师，主要从事采矿方法、绿色矿山研究。E-mail：zhenggg@tlys.cn

通信作者：张九雨(1990—)，男，安徽砀山县人，博士，工程师，主要从事岩石力学、采矿方法及深井灾害治理研究。E-mail：1160479184@qq.com

0 引言

随着经济社会的发展,我国对铜金属需求量也日益增加,尤其是新能源、人工智能等新兴产业发展的背景下,我国铜资源对外依存度高达 74%[1-2]。经过多年连续开采,浅部及易采矿体已逐渐被开采完毕,各矿山逐渐转向地下、深部及难采矿体开采[3]。在矿山生产中,采矿方法、采场结构与矿体赋存条件密切相关,若赋存条件发生变化,采矿系统也会发生相应变化。因此,在生产系统确定的情况下,不同赋存条件矿体回采转换会显著增加矿山生产难度、降低生产效率。

缓倾斜矿体由于倾角较缓,矿石自溜能力有限,部分矿石不容易放出,导致矿石损失率增加,被认为是难采矿体之一[4-5]。学者们从采矿方法、采场结构、回采参数等方面,对缓倾斜矿体安全高效开采开展了系列研究[6-7]。姜永恒等[8]采用双进路的采场结构及中深孔落矿回采缓倾斜中厚矿体,取得了良好的经济技术指标。高雄等[9]采用相似试验研究了回采顺序对缓倾斜矿体矿岩移动规律的影响。林友[10]针对新沟白钨矿缓倾斜至倾斜中厚矿体,改进了传统无底柱分段崩落采矿法,通过崩落少量下盘围岩增大放矿倾角,有效解决了采场矿石搬运难题,在降低采矿成本、提高生产能力与作业安全性方面效果显著。刘培正等[11]采用组合分段方式回采某铁矿缓倾斜至倾斜厚矿体,降低了采切比,提高了生产能力。程东旭等[12]提出采用伪倾斜条带进路充填采矿法回采多矿种缓倾斜多层贫矿体。

某矿山前期主要开采矿床中部的近水平厚-极厚矿体,边部及端部矿体转变为缓倾斜-倾斜中厚-厚矿体。若继续采用原有采场结构,存在部分采场无法利用原有工程进行采切的问题,需要开拓大量新工程,降低矿山生产效率。针对近水平矿体转缓倾斜-倾斜回采,可对采场结构及落矿工艺进行优化,以便利用已有工程进行正常回采。此外,通过 FLAC3D 软件分析该采场结构下的矿岩稳定性,并开展工业试验,利用三维激光扫描的空区模型评价回采效果。研究结果有望为类似矿体回采提供参考。

1 矿床回采概述

某矿床铜矿石储量超过 1 亿 t,主金属铜品位超过 1%,主要赋存深度-790～-1 000 m,为近水平-倾斜厚大矿体,设计生产能力 300 万 t/a。顶板主要为大理岩、闪长岩及矽卡岩,底板主要为砂岩,矿体主要为含铜磁黄铁矿、含铜蛇纹岩,节理裂隙不发育,矿岩稳固-极稳固。矿床沿走向划分盘区,盘区间暂留隔离矿柱,盘区长度为 100 m,盘区隔离矿柱宽为 18 m,盘区内沿走向划分一步骤采场和二步骤采场。目前,该矿 42～64 线中部矿体已基本回采完毕,考虑对边部及端部矿体进行回采,回采现状模型如图 1 所示。该部分矿体赋存条件有明显变化:厚度为 10～40 m,倾角为 25°～45°,由近水平厚-极厚转变为缓倾斜-倾斜中厚-厚矿体,岩体侵入程度增加,矿体深度变大。当倾角变大时,若按照原有的采场结构回采,部分采场无法利用原有盘区巷道进入矿体进行采切,需要沿矿体倾向开拓新工程,如盘区巷道、溜井等,增加了采切工程量与准备时间。因此,原有采场布置形式已不适应端部矿体回采,难以满足矿山生产任务。

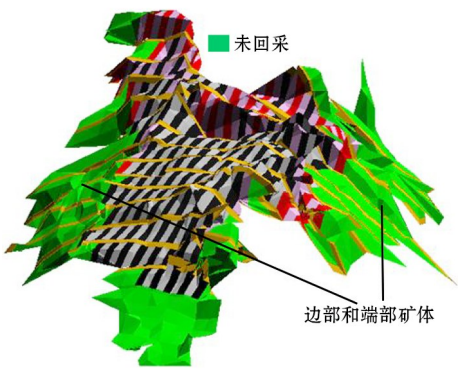


图 1 回采现状模型

Fig.1 Mining status model

2 采场结构优化

中部厚大矿体采场沿矿体走向布置时,一步骤采场长度为 82 m,二步骤采场长度为 78 m,宽度均为 18 m,高度为矿体厚度(30～100 m),隔三采一或隔一采一。采矿方法以垂直大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法为主,一步骤采场采用全尾砂胶结充填(单轴抗压强度≥2 MPa),二步骤采场采用全尾砂或全尾砂微胶结充填(单轴抗压强度 0.5～1 MPa)。采准工程分为凿岩层与出矿层,凿岩层主要包括凿岩联络巷、凿岩巷道、凿岩硐室,出矿层主要包括联络巷、出矿进路、出矿巷道及堑沟巷道等,各中段盘区巷道与凿岩层、出矿层连接,采用长进路双采场堑沟式底部结构,沿矿体走向布置的采准系统如图 2 所示。在堑沟巷道中进行中深孔拉底工作,高度 10～15 m,形成深孔落矿的补充空间;在凿岩层布置垂直大直径深孔,孔径 165 mm,采用垂直深孔球状药包后退式崩落法(VCR)爆破落矿,无轨铲运机出矿。

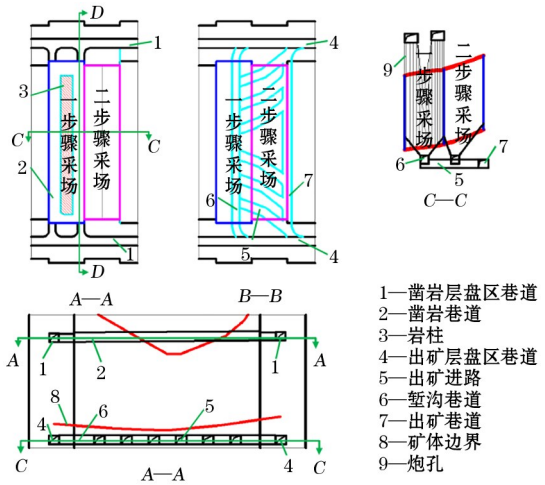


图 2　沿矿体走向布置采场的采准系统

Fig.2　Mining preparation system arranged along the strike of ore body

端部矿体采场结构方案可设计为沿矿体走向与垂直矿体走向布置两个方案，其优缺点对比见表 1。方案 2 技术可行、经济更合理、安全可控，较符合矿山生产需要。具体如下：在盘区内垂直矿体走向布置采场，划分 4 个或 5 个采场，采场宽度为 16～20 m(共 82 m)，采场长度不超过 95 m，采场高度为矿体厚度(10～40 m)；在矿块顶部及底部布置采准工程，利用下中段盘区巷道进入矿块底部准备出矿层，包括出矿进路、出矿巷道、联络巷道；通过原有上中段盘区巷道进入矿块顶部或中部准备凿岩层工程，仅需新掘进部分联络巷道，形成通风、运输系统，解决了部分采场无工程进行采切的问题。垂直矿体走向布置的采准系统如图 3 所示。

表 1　端部矿体采场结构方案对比

Table 1　Comparison of stope structure schemes for end ore bodies

方案	优点	缺点
方案 1：沿矿体走向布置采场	1.爆破工艺简单，技术成熟；2.出矿口较多，采矿强度大；3.采场短边靠近盘区巷道，安全性好。	1.需要开拓新盘区巷道、溜井等，周期长、投资大；2.通过采场宽度增加单采场出矿量，风险相对较大；3.采切比增加；4.受限于出矿设备爬坡能力，出矿效率降低。
方案 2：垂直矿体走向布置采场	1.不需要开拓大量新巷道及溜井，仅需掘进部分联络巷；2.结构上，可省去一条堑沟巷道、取消拉底工作并减少部分出矿进路与出矿巷道，降低采切比；3.采场结构简单，可利用现有工程，准备周期短、投资少；4.出矿进路少，可减少进路间的三角矿柱损失。	1.需要深孔爆破形成漏斗井，对钻孔精度要求较高；2.需要先利用炮孔开辟落矿空间，分段逐步爆破，爆破工艺相对复杂；3.增加放矿角及形成漏斗井，需要回采部分岩石，增加矿石贫化率。

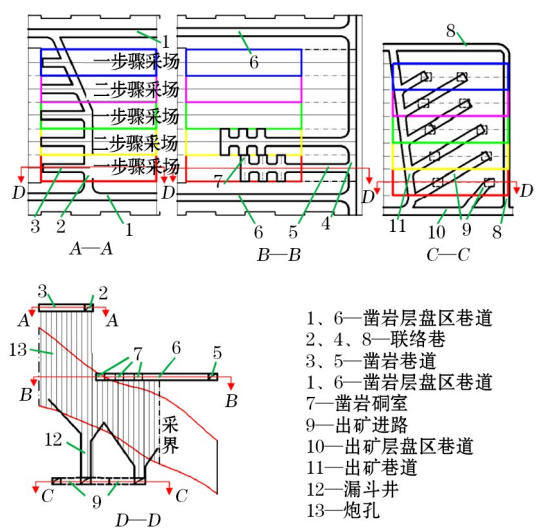


图 3　垂直矿体走向布置采场的采准系统

Fig.3　Mining preparation system arranged perpendicular to the strike of ore body

当部分矿体倾角较小、矿石自溜能力不足时，可回采下盘部分岩石来增加放矿角，矿岩分采分出，尽量控制矿石贫化率；其次，采用高漏斗并额外增加出矿口，减少矿石残存，漏斗井及扩斗(倾角不小于 45°)均由深孔爆破形成；先以出矿进路为初始自由面和补充空间，通过大直径垂直深孔爆破形成漏斗井；再以放矿漏斗或下部空场为自由面，并以漏斗井为放矿通道，逐次向上及两侧爆破形成 1～3 个槽区，再大规模落矿，具体见 4.2 小节。

3　数值分析

3.1　计算模型及参数设置

选择某盘区端部矿体作为研究对象，上、下盘分别为大理岩、砂岩，矿体为磁黄铁矿，矿体厚度为 30～40 m，倾角为 34°～45°，深度为－790～－900 m。利用 AutoCAD 与 FLAC3D 软件建立矿岩数值模型，其长×宽×高为 404.9 m×321.1 m×300 m，以满足边界条件，模型深度－700～－1 000 m，采用六面体网格，单元数量为 25.93 万个。假设矿体、围岩和充填体均为各向同性的连续均匀介质。根据地应力实测，设定最大主应力沿 Y 方向(平行于矿体走向)，大小为 $10.626\ 3+0.030\ 55h$(h 为深度，单位 m)，中间主应力沿 X 方向，大小为 $3.944+0.029\ 54h$，最小主应力沿 Z 方向，大小为 $7.822\ 3+0.027\ 78h$。为更准确还原矿岩初始应力场，模型顶部及前后左

右面均施加应力边界条件,其大小根据初始地应力设定,模型底部施加固定位移边界条件,采用快速应力边界法生成初始应力场[13-14]。

本文选择摩尔-库伦强度准则,矿岩、充填体物理力学参数由常规三轴试验获取,见表 2。实验室中获取的岩块参数与现场岩体参数相差较大,以此指导生产存在较大误差。Hoek 与 Brown 通过分析大量室内及现场试验成果,提出了 Hoek-Brown 强度准则及基于此的岩体参数估算方法,输入参数包括常数 m_i、地质强度因子 GSI、扰动因子 D 及单轴抗压强度 σ_c,取值方法见文献[15],估算后的岩体强度与变形参数见表 3。模拟方案有两个,分别为沿矿体走向布置采场(方案 1)、垂直走向布置采场(方案 2)。采场参数保持一致,长度均为 82 m、宽度为 18 m、高度为 40 m,仅回采一步骤采场(采场 4、采场 6),研究同一矿块下不同采场结构回采后矿岩响应,采用应力分布、损伤程度(塑性区)及变形作为评价指标,分析垂直走向布置时的矿岩稳定性。采场布置示意如图 4 所示。

表 2 岩体、充填体物理力学参数

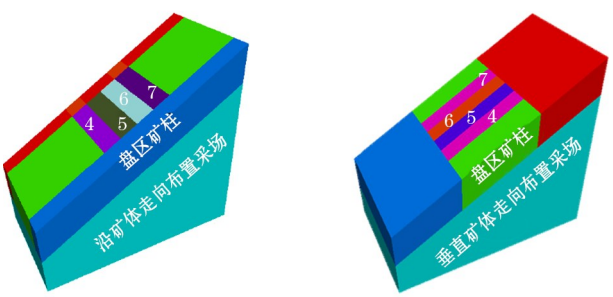
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass and filling body

材料	密度/(t/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
大理岩	2.729	22.31	0.329 0	15.00	36.00	8.96
砂岩	2.778	27.10	0.208 7	11.53	43.00	19.17
矿体	3.970	51.48	0.253 0	44.33	53.02	9.12
充填体	1.950	0.83	0.170 0	0.40	32.00	0.30

表 3 估算后的岩体强度与变形参数

Table 3 Estimated strength and deformation parameters of rock mass

材料	m_i	GSI	σ_c/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
大理岩	9.46	75	77.04	18.212	6.102	37.18	1.237
矿体	12.80	63	120.00	30.258	12.500	36.49	0.576
砂岩	10.88	70	77.99	19.859	5.628	37.07	0.746



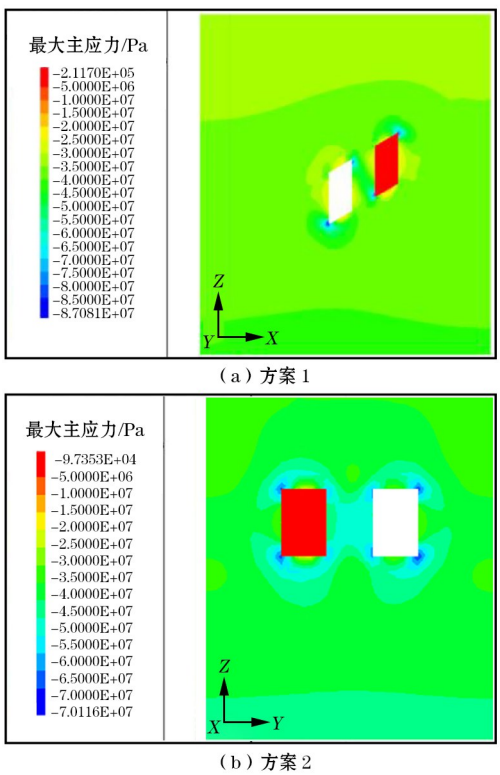
(a) 方案 1　　(b) 方案 2

图 4 采场布置示意

Fig.4 Schematic of stope layout

3.2 结果与分析

采场 4、采场 6 回采后的最大主应力如图 5 所示。在采场宽度与长度中点位置做剖面,负值表示压应力,正值表示拉应力,采场附近初始最大主应力约为 37.7 MPa。回采后,沿矿体走向与垂直矿体走向布置时矿岩二次应力分布特性具有相似性:在采场边缘附近产生应力集中现象,尤其是拐角位置;短轴侧帮最大主应力大于长轴侧帮,在长轴侧帮顶板、底板中部为应力降低区;在顶底板处出现拉应力,而拉应力基本不随回采步骤发生显著变化,均小于 1 MPa。沿矿体走向布置采场时,回采后最大主应力分别为 81.2 MPa、87.0 MPa。垂直矿体走向布置采场时,回采后最大主应力分别为 74.80 MPa、70.12 MPa,说明先回采采场有利于降低后回采采场的应力集中程度,且垂直走向布置采场的应力集中程度小于沿矿体走向布置采场。定义高于 1.05 倍初始最大主应力或低于 0.95倍初始应力为影响区,比较矿体回采后围岩扰动范围。沿矿体走向布置采场时,顶板扰动范围约为 22.34 m,侧帮约为 17.5 m;垂直矿体走向布置采场时,顶板扰动范围约为 32.5 m,侧帮约为 7.9 m。由上述分析可知,垂直矿体走向布置采场的应力集中程度小于沿矿体走向布置采场,但回采扰动范围更大一些。



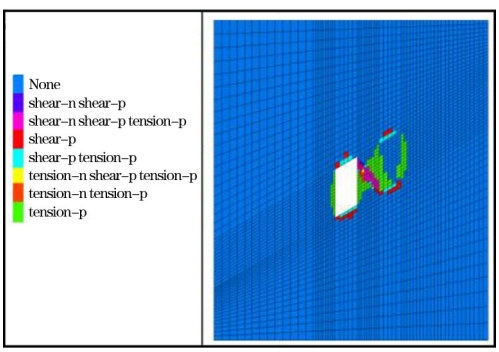
(a) 方案 1

(b) 方案 2

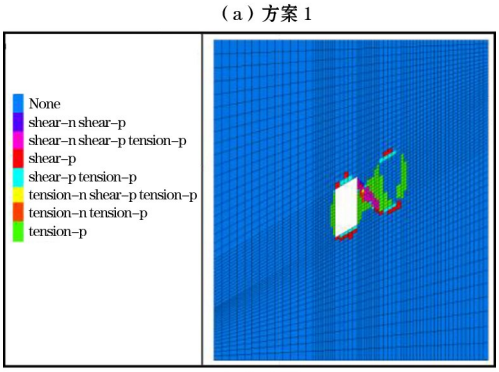
图 5 采场 4、采场 6 回采后的最大主应力

Fig.5 Maximum principal stress of stope 4 and stope 6 after mining

根据矿山采场冒落特征，主要关注顶板及侧帮矿岩体破坏及变形。采场 4、采场 6 回采后的塑性区分布及侧向变形(垂直侧帮方向)分别如图 6 和图 7 所示。矿块回采后，矿岩以拉破裂为主(约 60%)，伴有剪切破裂(约 40%)，主要分布在顶板大理岩与底板砂岩及长边侧帮矿体中，矿体损伤程度大于顶底板。方案 1 中回采采场 4 时，矿体损伤范围约为 5.8 m，矿体最大变形量为 5 cm，损伤体积约为 57 518.3 m^3；回采采场 6 时，矿体最大变形量为 5.4 cm，矿柱变形量相对较小，最大变形位置转移至底部，约 4.8 cm，两次回采扰动使损伤范围贯穿整个二步骤采场矿体，其中间部分拉应力贯穿，靠近顶底板时转变为压应力，拉应力最大值约为 0.85 MPa，损伤体积约为 112 019.7 m^3。方案 2 中回采采场 4 时，矿体两侧损伤范围约为 5.8 m，最大位移量为 4.49 cm，损伤体积量 62 647.8 m^3；回采采场 6 时，仅在二步骤采场矿体自由面附近局部有拉应力，矿体最大位移量为 3.17 cm，损伤体积约为 89 339.2 m^3。相比于方案 1，方案 2 采场两侧矿体损伤范围基本不变，位移量、损伤程度降低，相邻矿体拉应力范围均有所降低。结合该矿已有采场稳定特性，沿着矿体走向布置采场时，采场基本保持稳定。因此，缓-倾斜矿体采用垂直矿体走向布置采场时，采场也能够保持稳定。



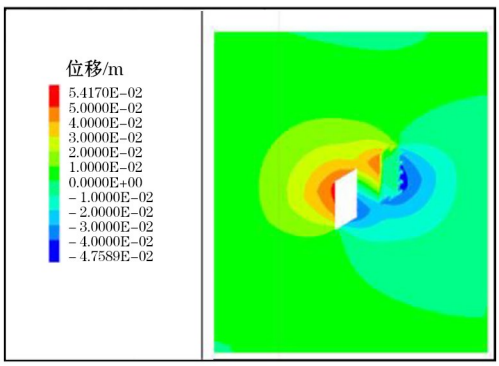
(a) 方案 1



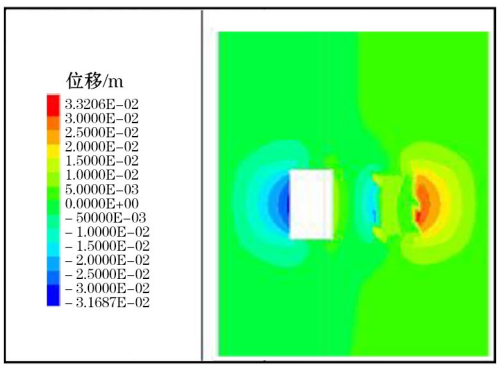
(b) 方案 2

图 6　采场 4、采场 6 回采后的塑性区分布

Fig.6　Distribution of plastic zone of stope 4 and stope 6 after mining



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 7　采场 4、采场 6 回采后的侧向变形(垂直侧帮方向)

Fig.7　Lateral deformation of stope 4 and stope 6 after mining (vertical side direction)

4　工业试验

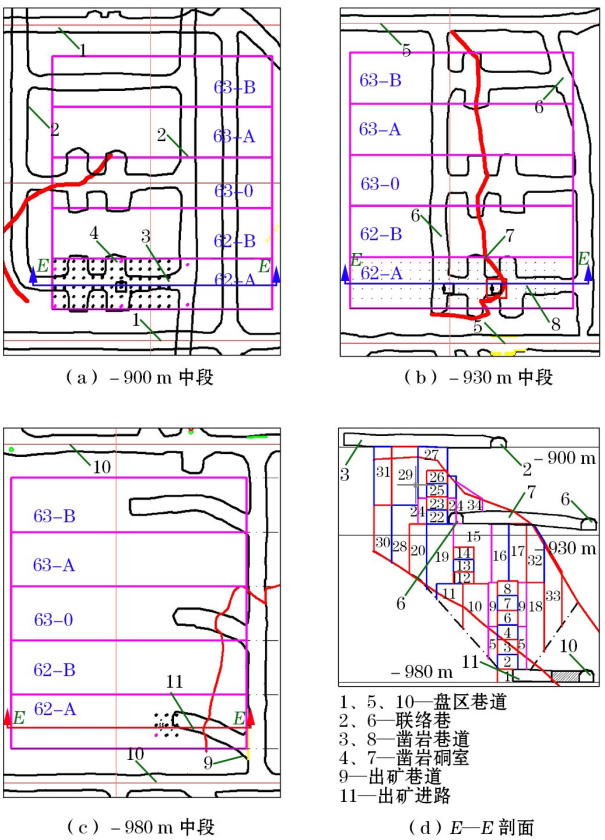
4.1　概述

选择 62 盘区南东翼端部矿体作为试验区，垂直矿体走向布置采场，共分为 5 个采场，分别为 62-A、62-B、63-0、63-A、63-B，其中 62-A、63-0、63-B 为一步骤采场，采场宽度为 16～18 m，长度为 82 m，高度为矿体厚度，均采用大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法，一步骤采场采用全尾砂胶结充填。62-A 采场顶板主要为大理岩、闪长岩，底板为砂岩，矿岩稳固，无岩脉侵入。矿体以含铜磁黄铁矿石为主，矿体倾角 34°～45°，矿体厚度 27～37 m，赋存深度 −900～−980 m，可采矿量 127 769 t，品位 0.94%。

4.2　回采方案

采场 62-A 采准系统及爆破次序如图 8 所示。由于矿体倾角变大，无法通过 62 盘区和 64 盘区巷道进入 62-A 采场顶部。在−900 m 中段 66 盘区巷道施工 2 条凿岩联络巷道，连通 62 盘区端部矿体顶端(用于该部分矿体顶部凿岩层的施工、行人、运输

材料、通风等)。同样地,通过-930 m 中段 62 盘区巷道施工凿岩巷道,形成该部分矿体的中部凿岩层。由凿岩联络巷道分别进入-900 m、-930 m 矿体位置施工凿岩巷道、大孔硐室及钻孔。在-980 m 位置布置出矿系统,包括出矿进路、出矿运输巷,形成材料运输、通风、出矿、行人系统。部分切割槽及高漏斗井位于岩体中,该部分废石尽量单独爆破,并转运至废石溜井。



(a) -900 m 中段 (b) -930 m 中段

(c) -980 m 中段 (d) *E*—*E* 剖面

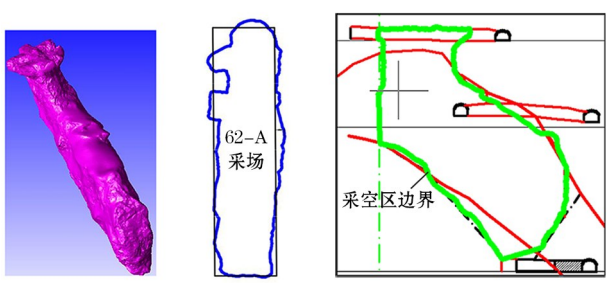
图 8 62-A 采场采准系统及爆破次序

Fig.8 Mining preparation system and blasting sequence of 62-A stope

爆破工艺:总体上,从底部及沿倾向逐步向上爆破,形成多个槽区自由空间,在形成过程中控制爆破规模,然后以侧向崩矿为主,提高生产效率。在槽区位置钻大直径垂直深孔,取消了切割天井。首先以出矿进路为自由面与补偿空间,从钻孔底部多次分段爆破形成立槽(1→2→3→4),每次爆破高度不超过 5 m,然后交替进行扩槽与拉槽(5,6→7→8→9),达到一定高度后(15～20 m,不破顶),形成第一个落矿空间的槽区。为了减少后续落矿夹制作用,沿倾向从底部逐步向上发展(10→11),开拓额外新槽区以形成更多落矿空间,并进行爆破落矿(12→13→14→15),待第一槽区附近矿体破顶后(16→17),形成了较大落矿空间(18→…→27),再进行大规模侧向崩矿(28→…→34)。采场 62-A 排间距 2.8～3.0 m,孔间距 2.8～3.5 m,炮孔直径 165 mm,垂直平行布置,采用乳化炸药,间隔及不耦合装药,毫秒延迟爆破,共 34 次,炸药单耗约 0.347 kg/t。

4.3 效果评价

若试验采场垂直矿体走向布置 5 个采场,采准工程量合计为 66 160 m^3,沿矿体走向布置 4 个采场,采准工程量合计约为 77 671 m^3,可减少采切工程量约 14.8%。采场出矿完成后,利用三维激光扫描技术对采空区进行测量,获取采空区体积模型,采空区模型水平投影与剖面图如图 9 所示。采空区侧帮形态较为规整,投影与设计边界重合度较好,采场宽度方向最大冒落宽度为 1.9 m,采场长度方向最大冒落宽度为 2.4 m,说明侧帮矿体基本未冒落;其次,模型剖面与矿体边界重合性较好,说明顶板基本未冒落。上述结果说明垂直矿体走向布置时采场稳定,未对盘区巷道产生影响。62-A 采场出矿量 12.5 万 t,矿石损失率 2.3%。为扩大放矿角,底部部分岩体混入矿石中,约 1.06 万 t,贫化率约为8.5%,各项指标均达到生产目标。



(a) 采空区模型 (b) 采空区水平投影 (c) 采空区剖面图

图 9 采空区模型水平投影与剖面图

Fig.9 Horizontal projection and section diagrams of goaf model

5 结论

以近水平矿体转缓倾斜-倾斜回采工况为研究对象,优化了采场布置结构及落矿工艺;通过 FLAC3D 软件论证了采场稳定性,并进行了现场试验,采用三维激光扫描模型进行效果评价,得出如下结论。

(1) 缓倾斜-倾斜矿体回采时,采用“垂直矿体走向布置采场,取消切割天井,以出矿巷道为初始自由面与补偿空间”的回采方案,可避免沿矿体倾向开拓新盘区巷道,节省堑沟巷道、中深孔拉底、出矿进

路、出矿巷道等采准工程。

(2) 数值分析结果表明，相比于沿矿体走向布置采场，垂直矿体走向布置采场的应力集中程度更小，采场两侧矿体损失范围基本不变，位移量、损伤程度降低，相邻矿体拉应力范围均有所降低，该结构下采场稳定。

(3) 通过现场试验，62-A 采场采空区模型形态较为规整，顶板及侧帮基本未发生冒落，矿石损失率为 2.3%，贫化率约为 8.5%。该方案可减少采切工程量约 14.8%，可降低该部分矿体的采切比，取得良好效果。

(4) 该方案具有适应矿体倾角变化、简化采场结构及减少工程量等优势，为类似矿体回采提供了参考。

参考文献(References)：

[1] 路增祥，李角群，马强英.中国空场嗣后充填采矿法研究进展与展望[J].金属矿山，2026(1)：22-41.
LU Zengxiang, LI Jiaoqun, MA Qiangying. Research progress and prospects of open-stope mining with subsequent filling method in China[J]. Metal Mine, 2026(1): 22-41.

[2] 张楠.新能源产业发展背景下我国铜资源供需现状与趋势[J].中国矿业，2023，32(6)：2-9.
ZHANG Nan. Analysis of supply and demand status and trend of copper resources in China under development background of new energy industry[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6): 2-9.

[3] 王连成，邵安林，曲福明，等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报，2025，47(5)：971-983.
WANG Liancheng, SHAO Anlin, QU Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(5): 971-983.

[4] 黄敏，王晓军，邱纪香，等.倾斜中厚矿体阶段空场嗣后充填采矿工艺优化研究[J].矿业科学学报，2024，9(4)：483-492.
HUANG Min, WANG Xiaojun, QIU Jixiang, et al. Optimization of mining method for stage open-stoping with backfill of inclined medium-thick orebody[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(4): 483-492.

[5] 赵长政，王贻明，徐恒，等.某锡矿缓倾斜中厚矿体的分段空场嗣后充填采矿法[J].金属矿山，2017(1)：20-24.
ZHAO Changzheng, WANG Yiming, XU Heng, et al. Sublevel open stope afterwards back-filling mining method of inclined medium thickness ore-body in a tin-mine[J]. Metal Mine, 2017(1): 20-24.

[6] 贾通平.缓倾斜厚大矿体采矿方法及结构参数优化研究[D].贵阳：贵州大学，2023.
JIA Tongping. Study on mining method and structural parameter optimization of gently inclined thick large orebody[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[7] 尹升华，吴爱祥.缓倾斜中厚矿体采矿方法现状及发展趋势[J].金属矿山，2007(12)：10-13.
YIN Shenghua, WU Aixiang. Status quo of mining methods for gently inclined medium-thick orebodies and their development trend[J]. Metal Mine, 2007(12): 10-13.

[8] 姜永恒，刘博.黄金矿山缓倾斜中厚矿体双进路分段空场采矿法及其应用[J].黄金，2023，44(9)：41-45.
JIANG Yongheng, LIU Bo. Research and application of double-approach sublevel open-stope mining method for gently dipping medium-thick ore bodies in gold mines[J]. Gold, 2023, 44(9): 41-45.

[9] 高雄，陈旭，孙德宁.缓倾斜中厚矿体回采效果优化以及矿废运移规律研究[J].矿业研究与开发，2025，45(1)：55-62.
GAO Xiong, CHEN Xu, SUN Dening. Study on the optimization of mining effect and the migration law of ore and waste rock in gently inclined medium-thick orebody[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(1): 55-62.

[10] 林友.新沟白钨矿缓倾斜至倾斜中厚矿体采矿方法改进研究[J].矿业研究与开发，2020，40(9)：1-5.
LIN You. Study on the improvement of mining method of gently-inclined to inclined ore body with medium thickness in Xingou scheelite mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 1-5.

[11] 刘培正，黎明.某铁矿缓倾斜至倾斜厚矿体绿色协同开采技术应用[J].现代矿业，2011，37(2)：33-36.
LIU Peizheng, LI Ming. Application of green cooperative mining technology for gently inclined to inclined thick ore bodies in an iron mine[J]. Modern Mining, 2011, 37(2): 33-36.

[12] 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.

[13] 陈育民，徐鼎平.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京：中国水利水电出版社，2013：103-109.
CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D basics and engineering examples[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 103-109.

[14] 崔松，王晓南，丁勇，等.基于卸荷应力的思山岭深部采区地应力场反演方法研究[J].金属矿山，2025(7)：25-32.
CUI Song, WANG Xiaonan, DING Yong, et al. Study on inversion method of in-situ stress field in the deep mining process of sishanling based on unloading stress[J]. Metal Mine, 2025(7): 25-32.

[15] 董金奎.焦家金矿破碎矿体高效开采稳定性分析及动态调控研究[D].沈阳：东北大学，2015.
DONG Jinkui. Dynamic control and stability analysis of gentle-dip and fractured medium thickness orebody in Jiaojia Gold Mine[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.