某铜镍矿高品位底柱超前回采与人工假顶构筑研究*

冯福康[1,2],杨甜滋[3],刘东锐[1,2],盖向阳[3],马磊[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.哈密和鑫矿业有限公司, 新疆 哈密市 839000)

摘要:针对某铜镍矿因备采中段和采场数量不足、出矿品位波动大等导致的高品位底柱回采难题,提出了3种回采技术方案:盘区机械化上向进路充填采矿法、下向进路充填采矿法、上向进路+分条中深孔联合采矿法,通过综合对比分析各方案优缺点及技术经济指标,确定盘区机械化上向进路充填采矿法为最优方案。基于古典杨森散体压力理论计算底柱压覆荷载,并采用简支梁、软支弱板力学模型分析人工假顶厚度与最大压应力之间的关系。综合考虑人工假顶构筑形式和胶凝材料力学性能,确定了人工假顶的充填构筑参数:假顶厚度7.0 m,充填体28 d强度为4.5 MPa。针对人工假顶构筑中存在的质量、安全与成本问题,通过优化构筑方案,确定当人工假顶作为下部采场10 m顶柱的直接顶板时(优化方案一)为最佳方案,人工假顶采用底筋-腰筋-顶筋组合的配筋设计方案。应用结果表明,该底柱回采方案切实可行,底柱采场盘区生产能力提升至276 t/d,矿柱回采率达82%,采场地压活动稳定,人工假顶构筑工艺操作性强、安全可靠,实现了底柱资源的安全高效回采,为同类矿山底柱回采工作提供了技术借鉴。

关键词:高品位底柱;超前回采;人工假顶;力学模型;方案优化;配筋设计

中图分类号:TD853.391 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0079-11

Research on Advanced Mining of High-Grade Pillars and Construction of Artificial False Roof in a Copper-Nickel Mine

FENG Fukang[1,2], *YANG Tianzi*[3], *LIU Dongrui*[1,2], *GAI Xiangyang*[3], *MA Lei*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hami Hexin Mining Co., Ltd., Hami, Xinjiang 839000, China)

Abstract: In response to the mining technical problems of high-grade pillars caused by insufficient preparation in mining levels and stopes, as well as significant fluctuations in ore output grade in a copper-nickel mine, three mining methods were proposed, namely panel mechanized upward drift filling mining method, downward drift filling mining method, and combined mining method of upward drift and strip medium-length hole. The panel mechanized upward drift filling mining method was determined to be the optimal solution with comparative analysis of the advantages, disadvantages, technical and economic indexes of these methods. The classical Janssen theory of granular pressure was used to calculate the overburden load of pillars. The mechanical models of simply supported beam and soft support weak plate were adopted to analyze the relationship between the thickness of artificial false roof and the maximum compressive stress. By comprehensively considering the construction form of artificial false roof and the mechanical properties of cementitious materials, the filling and construction parameters of artificial false roof were determined as follows: the thickness of the artificial false roof is 7.0 m, and the 28-day strength of the filling body is 4.5 MPa. To address the quality, safety and cost problems in the construction of artificial false roof, by optimizing the construction plan, the Optimization Scheme Ⅰ was confirmed as the optimal solution, that is, the artificial false roof serves as the direct roof of the 10 m roof pillar in the lower stope. The artificial false roof adopted a reinforcement design scheme of bottom reinforcement, waist reinforcement and top reinforcement combined. Application results show that the proposed pillar mining scheme is practical and feasible. The panel production capacity of pillar stopes increases to 276 t/d, the pillar recovery rate reaches 82%, and the stope ground pressure activities remain stable. The construction technology of

* **收稿日期**:2025-01-11
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFC2905102)
作者简介:冯福康(1984—),男,山西临猗人,硕士,高级工程师,主要从事采矿工艺、岩石力学研究。E-mail:346426717@qq.com

artificial false roof is highly operable, safe and reliable. This scheme has realized the safe and efficient recovery of pillar resources, providing technical reference for pillar mining in similar mines.

Key words: High-grade pillar, Advanced mining, Artificial false roof, Mechanical model, Scheme optimization, Reinforcement design

0 引言

在地下采矿过程中,采场底柱作为支撑采场围岩、传递分散应力以及维护区域地压的重要结构,对中段矿体开采与安全生产起着至关重要的作用[1-2]。对于采用充填法开采的矿山,底柱回采工作一般是在本中段与相邻下中段采场充填回采完毕后才开始着手实施,回采时需在充填体覆盖层下施工作业,回采过程中易出现顶板下沉、冒落、片帮等地压问题,给矿山生产带来巨大的安全隐患[3]。

相较于正常回采工作而言,底柱超前回采的时间节点要早于本中段或相邻下中段采场的正常回采时间,一方面可以提前采出部分有价矿石,满足矿山特殊的开采需求,另一方面方便重新构筑形成人工底柱或假顶,从根本上消除采场顶底柱的回采技术难题,但也存在着人工底柱或假顶构筑成本过高、构筑物可靠性低、充填体压覆荷载下开采难度大等系列问题[4-5],在国内外矿山的应用案例相对较少。

针对矿柱回采及人工假顶问题,许多学者开展了大量的研究。胡勇等[6]提出底部结构三角矿柱超前回采及人工构筑技术;黄明发等[7]采用两步骤进路充填间隔回采解决了不良胶结充填体矿柱回采难题;刘源[8]研发了一种采场底部残留矿石及底柱安全高效回采技术,采用漏斗结构将采场底部残留矿石进行回采;陈祉颖等[9]基于结构力学模型和ABAQUS有限元软件对4种方案下间柱及顶底柱回采的应力位移时空演化特征进行分析,得到了不同矿柱留设方案回采率、位移特征、应力-应变演化规律和塑性应变变化;侯国权等[10]针对回采遗留的高品位矿柱,通过综合分析残矿资源分布、开采技术条件、采空区分布及稳定性等条件,拟定采空区治理与矿柱回收方案,合并多个中段布置矿块对矿柱进行回采;杜永亮[11]建立钢筋混凝土假顶力学模型,揭示了钢筋混凝土假顶强度、安全系数与厚度之间的演化规律;朱斌等[12]针对不同厚度水平矿柱提出差异化回采方法,为矿山创造了一定的经济价值;朱俊宁等[13]采用高强度充填体置换底柱作为人工假顶,回采顶底柱中的高品位矿石;杨久富等[14]采用受力状态分析、理论计算等方法,设计出地下矿山钢筋混凝土人工假顶结构回采采场顶柱资源;李小松等[15]建立大跨度充填体假顶薄板理论模型,确定配筋参数,探索了大跨度充填体假顶力学演化规律。然而,针对不良充填体下底柱超前回采工艺及人工假顶构筑方案的研究仍显不足。

针对某铜镍矿高品位底柱超前回采需求,本文对3种技术可行的回采方案进行优选,确定最佳回采方案,并采用简支梁、软支弱板力学模型计算人工假顶技术参数,优化构筑方案并创新配筋布置形式,为底柱资源安全高效回采提供技术支撑,同时为同类矿山提供技术借鉴。

1 矿山开采现状

某铜镍矿至今已开采十多年,生产规模为40万t/a。现采用分段凿岩阶段空场嗣后充填法开采,开拓中段高度为50 m,分段高度为15 m。受多方面因素影响,当前矿山备采中段、采场数量严重不足,加之个别采场地质品位偏低,采矿车间出矿品位整体波动较大。为稳定平衡车间的出矿品位与供矿能力,急需超前回采900 m中段至908 m分层P11~P15线高品位底柱资源。底柱上下中段开采现状及工程布置如图1所示。

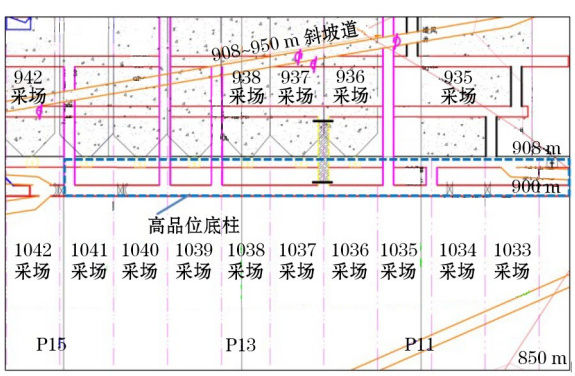


图1 850~900 m中段P11~P15线开采现状纵投影图

Fig.1 Longitudinal projection of mining status along lines P11-P15 at 850 m to 900 m level

900 m中段至908 m分层底柱赋矿岩石主要为角闪橄辉岩、角闪橄榄岩及角闪辉长岩等基性-超

基性岩类。矿体呈似层状、脉状及囊状产出，展布方向为 NE 至 SW 向，其形态受岩体控制明显，表现出膨大狭缩、分枝复合等特征。矿体与围岩均以坚硬岩层为主，岩体稳固性良好。经测定，矿石平均密度为 2.88 t/m^3，围岩密度为 2.70 t/m^3；矿石普氏硬度系数 f 值为 11，围岩 f 值为 6～12。

900 m 中段矿体产状近直立，厚度变化特征显著：倾向方向较为稳定，走向方向则呈现明显变化，整体呈中间厚、两侧薄的透镜状形态。900～908 m 底柱矿体边界与中段矿体边界一致，走向延伸长度约 230 m，平均厚度为 23 m，最大厚度为 57 m(位于 P13 线附近)。经计算，底柱矿石储量为 13.55 万 t，Cu 平均品位为 0.73%，Ni 平均品位为 1.05%，其中 Cu 金属量 993.98 t，Ni 金属量 1 427.88 t，属高品位富矿段。

开采现状表明，底柱以下矿体因基建工程滞后暂未开采，而底柱以上采场已完成回采充填作业。充填体灰砂比呈现明显分层特征：底部 7～8 m 灰砂比为 1∶4～1∶6，顶部 4 m 灰砂比为 1∶6，中间 32～33 m 灰砂比为 1∶8～1∶10。调查发现，底部结构存在少量存窿矿石，且充填体强度实测值仅 1.0～2.0 MPa，充填质量有待提高。底柱 900 m 水平工程布置现状如图 2 所示。

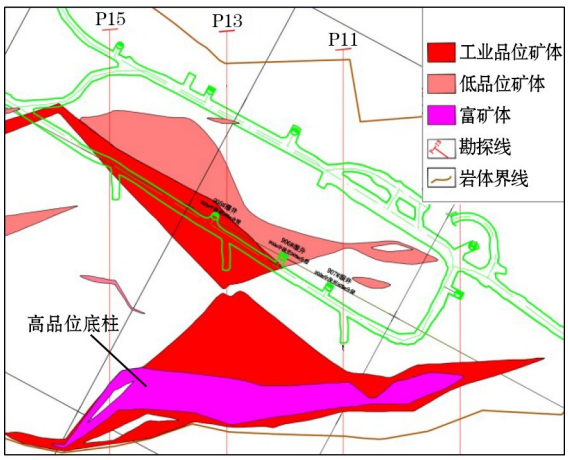


图 2　底柱 900 m 水平工程布置现状

Fig.2　Current project layout of sill pillar in the 900 m level

2　底柱回采方案研究

结合底柱开采技术条件及生产现状，初步确定了 3 种技术可行的回采技术方案，具体如下：

方案一，盘区机械化上向进路充填采矿法；

方案二，下向进路充填采矿法；

方案三，上向进路＋分条中深孔联合采矿法。

2.1　盘区机械化上向进路充填采矿法

标准开采方案如图 3 所示，总体设计采用分层开采技术，具体参数如下。

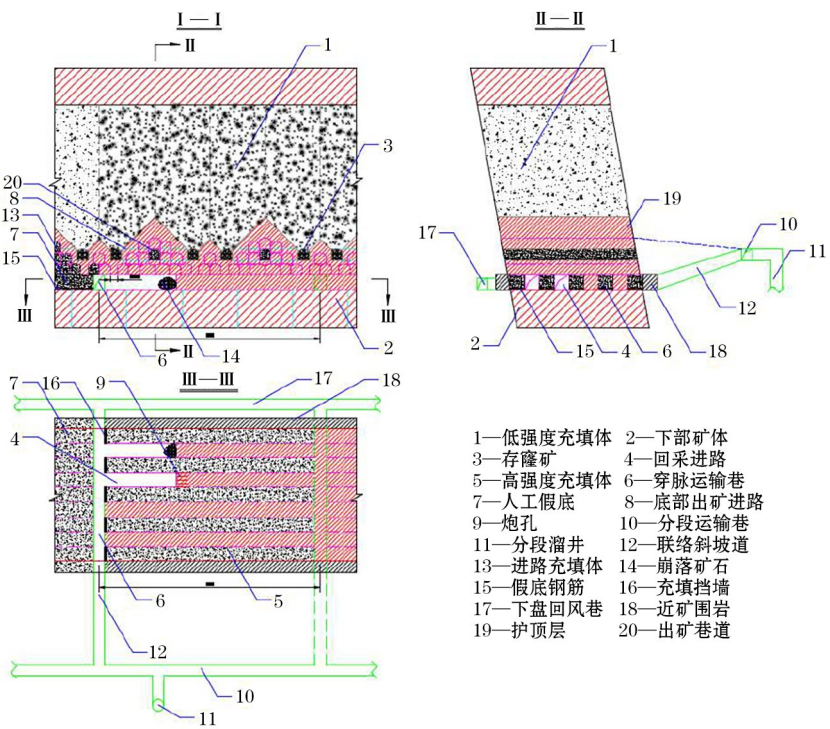


图 3　盘区机械化上向进路充填采矿法标准方案

Fig.3　Standard scheme for panel mechanized upward drift filling mining method

(1) 分层划分与开采顺序。沿垂直方向划分900 m、904 m、907 m和910 m四个分层,采用上行式开采顺序,依次从900 m分层向上推进。

(2) 900 m分层开采参数。进路沿矿体走向布置,规格(宽×高)为4 m×4 m,长度为50～60 m。

(3) 904 m分层开采参数。进路垂直于矿体走向布置,规格(宽×高)为(3～4) m×3 m。上部为受矿堑沟巷时,相邻进路间预留2 m厚间柱。

(4) 907 m分层开采参数。进路垂直于矿体走向布置,规格(宽×高)为3 m×3 m。三角矿柱位置预留2～3 m厚护顶矿,后期采用后退式压顶选择性回采。

(5) 910 m分层开采参数。进路垂直于矿体走向布置,规格(宽×高)为3 m×3 m。三角矿柱位置预留2～3 m厚护顶矿。

(6) 充填体强度要求。人工假底充填体,7 d抗压强度≥1.5 MPa,28 d抗压强度≥4.5 MPa;普通进路采场充填体7 d抗压强度≥1.5 MPa。

2.2 下向进路充填采矿法

标准开采方案如图4所示,总体设计仍采用分层开采技术,具体参数如下。

(1) 分层划分与开采顺序。沿垂直高度划分为910 m、907 m、904 m、900 m四个分层,采用下行式开采顺序,从910 m分层依次向下推进。

(2) 910 m分层开采参数。进路垂直于矿体走向布置,规格(宽×高)为3 m×3 m,长度以矿体实际厚度为准。进路与充填体间预留2～3 m厚护顶矿。

(3) 907 m分层开采参数。进路垂直于矿体走向布置,规格(宽×高)为3 m×3 m。上部为低强度充填体时,预留2～3 m厚护顶矿。

(4) 904 m分层开采参数。进路垂直于矿体走向布置,规格(宽×高)为(3～4) m×3 m。位于受矿堑沟下方时,相邻进路间预留2 m厚间柱。

(5) 900 m分层开采参数。进路沿矿体走向布置,规格(宽×高)为4 m×4 m,长度50～60 m。

(6) 充填体强度要求。所有进路充填体需满足7 d抗压强度≥1.5 MPa,28 d抗压强度≥4.5 MPa。

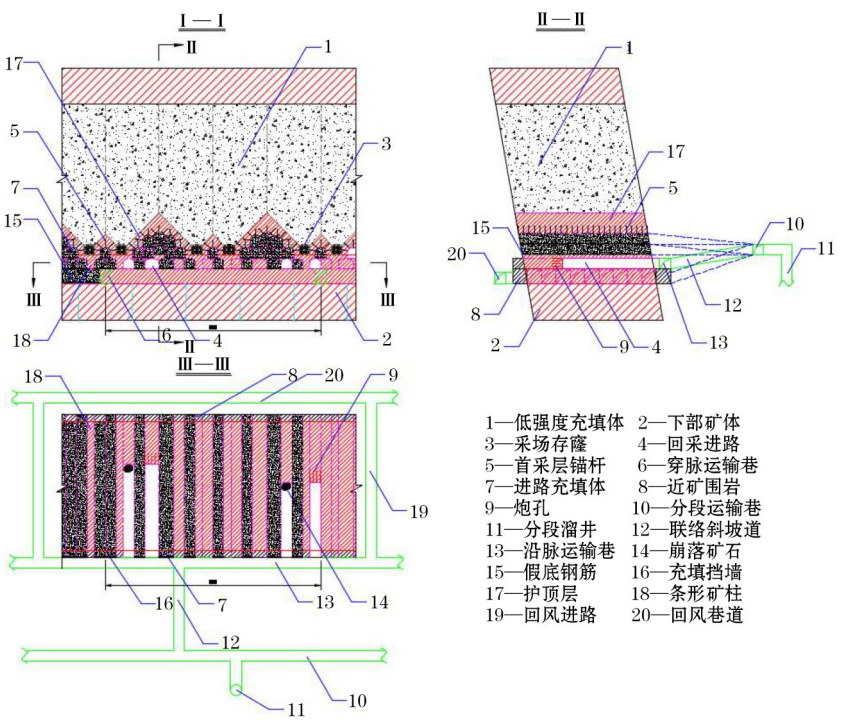


图4 下向进路充填采矿法标准方案

Fig.4 Standard scheme for downward drift filling mining method

2.3 上向进路十分条中深孔联合采矿法

标准方案如图5所示,总体设计仍采用分层开采技术,具体参数如下。

(1) 分层划分与开采顺序。盘区内沿垂直高度划分为900 m、904 m两个分层,依次进行开采。

(2) 900 m分层开采参数。进路沿矿体走向布置,规格(宽×高)为4 m×4 m,长度为50～60 m。

(3) 904 m分层开采参数。采场垂直于矿体走向布置,宽度为3～7 m,高度为4～11 m。当采场跨度达7.0 m时,上部充填体以下预留3.0～4.0 m

厚护顶矿。

(4) 充填相关要求。首采层人工假顶采用高强度混凝土浇筑。中深孔采场分多次充填，每次高度为1.0～2.0 m；当充填高度≥4.0 m且高于凿岩进路顶板时，可一次充填至采场顶板。充填体28 d抗压强度为1.5～2.0 MPa。

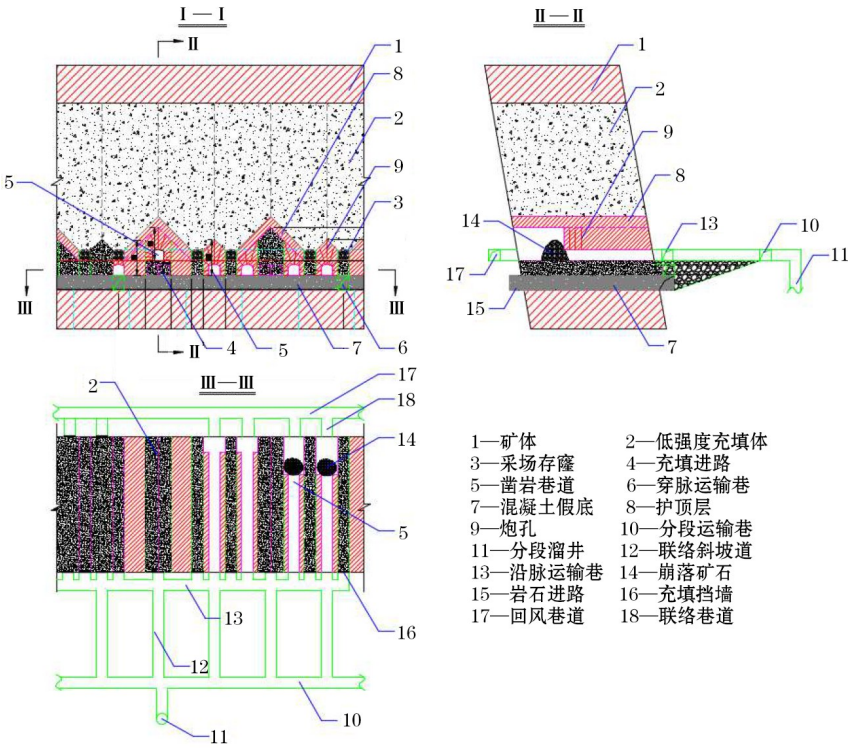


图5　上向进路＋分条中深孔联合采矿法标准方案

Fig.5　Standard scheme for combined mining method of upward drift and strip medium-length hole

2.4　方案综合对比分析

为了深入了解各回采方案的技术优劣，以下对方案回采工艺及技术方面的优缺点进行阐述分析与综合比较，具体见表1。

表1　各方案优缺点对比分析

Table 1　Comparison of the main advantages and disadvantages of each scheme

方案	优点	缺点
盘区机械化上向进路充填采矿法(方案一)	①首采地段处于未扰动状态，可大规模集中强化开采，有助于缓解矿山当前的生产形势； ②首采地段采准工程量小，施工周期短，投产时间早； ③上下分层充填体衔接效果好、整体性强，有利于人工假顶的安全稳定； ④三角矿柱护顶层可部分回采，采矿损失率低。	①首采层开挖会加剧下一分层的岩体质量恶化，对后期进路采场的稳定性造成不利影响； ②第二分层矿柱留设造成回采综合损失率较高。
下向进路充填采矿法(方案二)	①首采地段处于采场三角矿柱下方，有助于超前控制分层采场地压，减轻下部分层采场地压活动； ②第二、三、四分层均在高强度的人工假顶下实施作业，安全性好，回采效率高，生产能力大。	①首采层处于采场底柱扰动区，矿岩质量差，回采安全性低，生产效率低，不利于矿山快速摆脱当前的生产形势； ②首采分层采准工程量大，进路支护强度大、成本高，施工周期长，充填养护时间长； ③首采层矿柱留设造成回采综合损失率高，生产组织管理难度大； ④上下分层之间接顶效果差，人工假顶上下分层连续性差。
上向进路＋分条中深孔联合采矿法(方案三)	①首采地段处于未扰动状态，可大规模集中强化开采，有助于缓解矿山当前的生产形势； ②首采地段采准工程量小，施工周期短，投产时间早； ③第二分层中深孔落矿效率高，配合遥控铲运机出矿，采场生产能力大； ④可以实现对上部三角矿柱回采，采矿损失率低。	①人工假顶受分层高度影响，仅可采用混凝土浇筑工艺，造成假顶成本过高，采矿分摊成本大； ②第二分层采场千吨采切比高，采准工程量大，转层施工周期长； ③第二分层中深孔爆破易造成上部矿柱或充填体变形垮塌，遥控铲运机空区下作业存在安全风险，采矿贫化率较大。

为便于更直观评价各回采方案的好坏，以下对各方案的主要技术经济指标进行对比分析，具体见表2。

表 2 各方案主要技术经济指标

Table 2 The main technical and economic indexes of each scheme

方案	盘区生产能力/(t/d)	千吨采切比/(m³/kt)	采矿损失率/%	矿石贫化率/%	安全状况	通风条件	劳动强度	工艺复杂程度	对矿体适应性
方案一	300	70.75	20	10	一般	较差	较高	较高	好
方案二	300	70.75	30	10	好	较差	高	较高	好
方案三	400	38.21	15	15	差	较好	低	低	较好

通过综合分析可知,方案三在技术经济性方面表现出显著优势:不仅盘区采场生产能力较大,而且采矿效率较高,矿石损失率较低。然而,该方案也存在一些局限性:其一,混凝土浇筑人工假顶的施工成本较高;其二,由于中深孔采场与上部充填体距离较近,存在顶板矿岩或充填体垮塌贯通的安全隐患。相比之下,方案一与方案二在多项技术经济指标上具有相似性,但方案一在回采工艺和回采顺序方面展现出更显著的技术优势:其前期采场生产能力更大、投产周期更短,且构筑的人工假顶具有更高的可靠性。此外,方案二的矿石损失率相对较高,充填成本也更为昂贵。

基于上述分析,综合考虑技术可行性、经济性和安全性等因素,确定盘区机械化上向进路充填采矿法(方案一)为该矿高品位底柱回采的最优方案。

3 人工假顶方案研究

为提高矿产资源的开采水平,实现中段矿体的连续回采,在本中段底柱回采的同时同步构筑形成下中段采场人工假顶是十分必要的。

3.1 覆压荷载计算方法

人工假顶所承受荷载主要为上部充填体的压覆荷载。考虑到底柱上覆充填体最高强度仅为 1.0~2.0 MPa,可近似看作松散体特征的不良充填体,据此引入古典杨森散体压力理论进行覆压荷载计算[16]。国内外学者以地下矿松散矿岩或充填料填充空区条件下的压覆底柱承载为研究对象,研究得到了底柱覆压荷载即人工假顶载荷计算公式[17]如下:

$$q=\frac{\gamma(1-\cot\alpha\cdot F)\sin\alpha}{2F[(1-\sin\varphi)/(1+\sin\varphi)](1/A+1/B)}\cdot\left\{1-\exp\left[-2Fz\,\frac{1}{\sin\alpha}\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}\left(\frac{1}{A}+\frac{1}{B}\right)\right]\right\} \quad (1)$$

式中:q 为人工假顶所受载荷,MPa;γ 为充填体容重,kN/m³;α 为矿体倾角,(°);F 为摩擦因数,取0.56;φ 为充填体内摩擦角,(°);A 为底柱水平长度,m;B 为底柱水平宽度,m;z 为压覆充填体的高度,m。

3.2 假顶力学理论模型

结合人工假顶的结构功能与承载作用,理论上可将人工假顶看作一个近似楼板的结构体,上下盘围岩或周围充填体约束限制人工假顶的平动与转动,据此可将其简化为简支梁或薄板理论模型[18]。

3.2.1 简支梁力学模型

当下部开挖采场两侧为矿体即一步骤采场开挖时,可将人工假顶简化为受均布荷载和自重应力的简支梁模型,其力学模型如图 6 所示。

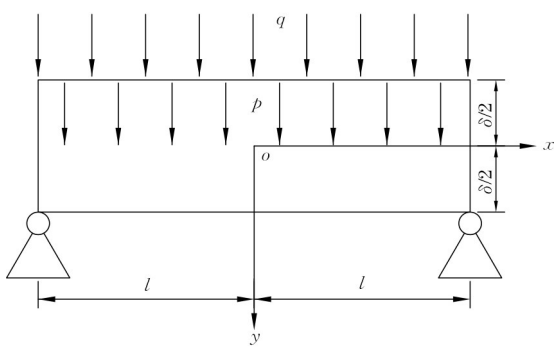


图 6 人工假顶简支梁力学模型

Fig.6 Simply supported beam mechanical model of artificial false roof

人工假顶在自重及上部充填体荷载作用下,其假顶中的应力可采用公式(2)计算:

$$\begin{cases}\sigma_x=\dfrac{6(q+p\delta)}{\delta^3}(l^2-x^2)y+\dfrac{(q+p\delta)y}{\delta}\left(\dfrac{4y^2}{\delta^2}-\dfrac{3}{5}\right)\\ \sigma_y=-\dfrac{py}{2}\left(1-\dfrac{4y^2}{\delta^2}\right)-\dfrac{q}{2}\left(1+\dfrac{y}{\delta}\right)\left(1-\dfrac{2y}{\delta}\right)^2\\ \tau_{xy}=-\dfrac{6(q+p\delta)}{\delta^3}\left(\dfrac{\delta^2}{4}-y^2\right)x\end{cases} \quad (2)$$

式中:σ_x 为人工假顶在 x 方向的应力,MPa;σ_y 为人工假顶在 y 方向的应力,MPa;τ_{xy} 为人工假顶的剪应力,MPa;l 为采场宽度的一半,m;p 为人工假顶的自重应力,MPa;δ 为人工假顶厚度,m。

3.2.2 软支弱板力学模型

当下部开挖采场两侧为充填体即二步骤采场开挖时,鉴于人工假顶的弹性模量往往大于开挖采场两

帮充填体的弹性模量，此时可将人工假顶简化为受均布载荷和自重应力的软支弱板力学模型，如图 7 所示。

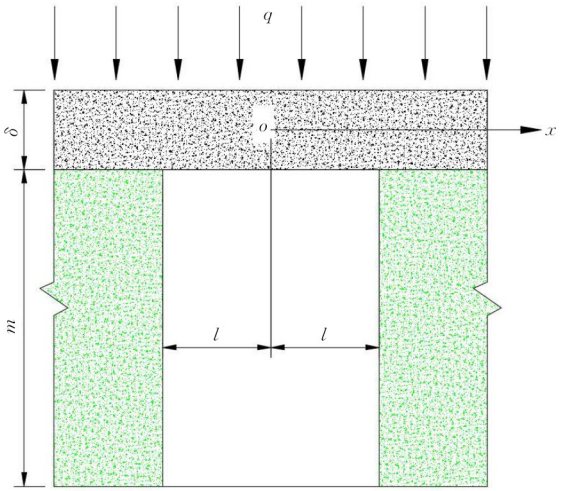


图 7　人工假顶软支弱板力学模型

Fig.7　Soft support weak plate mechanical model of artificial false roof

人工假顶所受弯矩 M_{max} 可采用公式(3)计算：

$$M_{max}=\left[\frac{l}{6}+\frac{l}{2.88l\ (m\delta^3)^{-\frac{1}{4}}+3}+\frac{1}{1.84l\ (m\delta^3)^{-\frac{1}{2}}+1.92\ (m\delta^3)^{-\frac{1}{4}}}\right]ql \tag{3}$$

式中，m 为下部开挖采场高度，m。

人工假顶作为荷载的承载结构体，其结构强度首先应能抵抗最大弯矩所产生的压应力。根据材料力学和弹性力学理论，人工假顶极限应力 σ_{max} 可由公式(4)弯矩方程计算得到：

$$\sigma_{max}=\frac{M_{max}}{w}=\frac{6M_{max}}{\delta^2} \tag{4}$$

式中，w 为抗弯模量，m^3。

将公式(3)代入公式(4)推导得到人工假顶厚度 δ 与极限应力 σ_{max} 的关系式如下：

$$\sigma_{max}=\left[l+\frac{6l}{2.88l\ (m\delta^3)^{-\frac{1}{4}}+3}+\frac{6}{1.84l\ (m\delta^3)^{-\frac{1}{2}}+1.92\ (m\delta^3)^{-\frac{1}{4}}}\right]\frac{ql}{\delta^2} \tag{5}$$

3.3　人工假顶参数计算分析

分析表明，人工假顶的最大压应力和拉应力分别出现在上下表面支座中点处。破坏时表现为上表面压裂或下表面拉断。压裂破坏由假顶材料抗压强度承受，拉断破坏则由假顶内钢筋共同承担。

以人工假顶上表面中点最大压应力(最危险点)为厚度选择依据，计算得到一步骤、二步骤采场人工假顶最大压应力(极限应力)σ_{max} 与厚度 δ 之间的关系曲线，如图 8 所示。计算过程中充填体容重取 20 kN/m^3，矿体倾角取 80°，充填体内摩擦角取 32°。

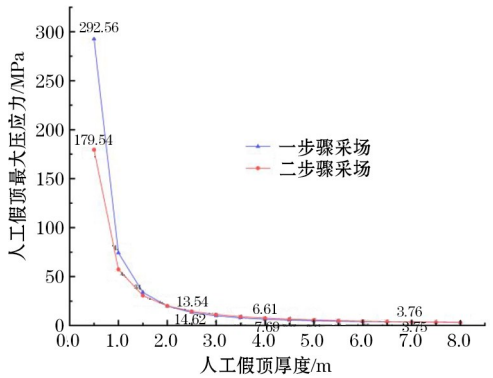


图 8　人工假顶最大压应力与厚度之间的线性关系

Fig.8　Linear relationship between maximum compressive stress and thickness of artificial false roof

人工假顶构筑形式主要包括钢筋混凝土、钢结构、尾砂(膏体)充填、坑木和钢筋网柔性隔离 5 种类型[19]。基于底柱回采面积大、工期紧迫及原材料供应等实际因素，选定钢筋混凝土和尾砂充填作为主要构筑形式。人工假顶压应力与厚度的线性关系分析如下。

(1) 人工假顶厚度为 2.5 m 时，一步骤和二步骤采场最大压应力分别为 13.54 MPa 和 14.62 MPa，可采用 C20 钢筋混凝土假顶。该厚度与底柱回采方案三技术要求高度契合，适用性显著。

(2) 人工假顶厚度增至 4.0 m 时，一步骤和二步骤采场最大压应力分别降至 6.61 MPa 和 7.69 MPa，可采用 C10 钢筋混凝土假顶。该厚度与进路回采单分层高度匹配，适用于各类底柱回采方案。

(3) 人工假顶厚度为 7.0 m 时，一步骤和二步骤采场最大压应力分别为 3.76 MPa 和 3.75 MPa，可采用抗压强度 4.5 MPa 的尾砂充填假顶，满足方案一和方案二技术要求，工程适用性良好。

上述分析表明，人工假顶厚度与其承受的压应力呈显著负相关，不同厚度对应的假顶形式可满足特定底柱回采方案的技术要求，为优化假顶设计、提高回采效率提供了理论依据。

3.4　充填胶凝材料试验

胶凝材料的好坏是决定人工假顶能否构筑成功的关键因素之一。矿山日常用的胶凝材料主要有水泥、G 料两种。水泥产地主要为当地骆驼圈子工业园区，G 料作为长沙矿山研究院有限责任公司研制的一种专利产品，以其优越的材料性能，受到国内多家矿山企业单位的认可与采购。当料浆质量浓度为

70%时,不同灰砂比下水泥充填体与G料基充填体试件的抗压强度试验结果如图9所示。

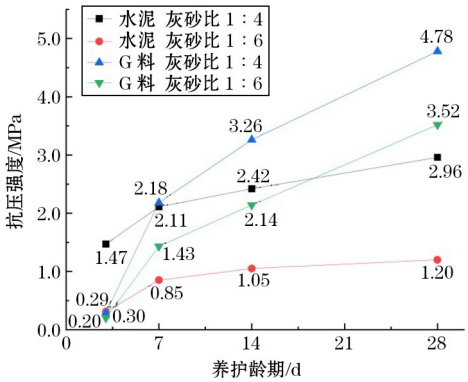


图9 不同配比充填体试件抗压强度与养护龄期之间的线性关系

Fig.9 Linear relationship between compressive strength and curing age of backfill specimens with different mix ratios

试验结果表明,不同配比条件下全尾砂充填体的抗压强度存在显著差异。当充填料浆质量浓度为70%时,灰砂比1∶4的水泥基充填体7 d和28 d抗压强度分别为2.11 MPa和2.96 MPa,而灰砂比1∶6时则降至0.85 MPa和1.20 MPa。相比之下,G料基充填体力学性能更优,灰砂比1∶4时,7 d和28 d抗压强度分别达2.18 MPa和4.78 MPa;灰砂比1∶6时分别为1.43 MPa和3.52 MPa。

对比分析表明,G料胶凝材料的力学性能显著优于传统水泥,28 d养护龄期抗压强度超过4.5 MPa,满足尾砂充填假顶强度设计要求。

3.5 假顶配筋率计算

人工假顶通常采用矩形截面底部单筋配筋设计。由材料力学、结构力学理论推导求得配筋率δ的计算公式如下:

$$\delta=\frac{\alpha_1 f_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2M_{max}}{\alpha_1 f_c b h_0^2}}\right) \tag{6}$$

式中:α_1为混凝土强度等级,一般为1.0;f_c为混凝土抗压强度设计值,取充填体抗压强度设计值4.5 MPa;f_y为受力钢筋抗拉强度设计值,取HRB400钢筋抗拉强度值360 MPa;M_{max}为结构承受的最大弯矩值,$M_{max}=qL^2/8$;L为结构的跨度,m,取下部中深孔采场宽度;b为人工假顶截面宽度,为简化计算,沿人工假顶长度方向取1.0 m;h_0为人工假顶截面有效高度,理论上等于纵向受拉钢筋的合力作用点至截面受压区边缘的距离。

将各项参数分别代入公式(6),计算得到配筋率δ为0.096%。

3.6 人工假顶构筑初步方案

综上所述,初步确定人工假顶采用全尾砂充填构筑方案,胶凝材料选用G料,充填料浆质量浓度为70%,灰砂比为1∶4,人工假顶厚度为7.0 m,充填体强度(28 d)需达到4.5 MPa,采用底部单筋配筋设计,配筋率为0.096%。

4 人工假顶构筑优化研究

4.1 人工假顶构筑方案优化

人工假顶构筑质量受底柱回采工艺、应力场分布、胶凝材料性能、料浆均匀性及养护条件等多因素影响[20-21],导致其浇筑效果和整体质量存在较大不确定性。若将人工假顶作为下中段阶段空场法采场的直接顶板,矿山将面临重大安全管理风险。此外,构筑成本也是制约其工程应用的重要经济因素。

基于上述考虑,在初步方案基础上,通过合理调整下中段采准布置、采场结构参数及回采顺序等技术要素,研究提出了两种人工假顶构筑优化方案,方案特征详见表3。

表3 人工假顶构筑优化方案对比

Table 3 Comparison of optimized schemes for artificial false roof construction

项目名称	项目特征	初步方案	优化方案一	优化方案二	备注
下中段采矿方法及工艺	1.采矿方案		分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法		
	2.采场跨度		一步骤矿柱12 m、二步骤矿房13 m		
	3.分段数量/个	3	4	4	
	4.分段高度/m	15,15,20	15,15,10,10	15,15,15,5	
	5.增设分段	—	890 m	895 m	
下部中段顶柱留设情况	1.是否留顶柱	否	是	是	
	2.顶柱厚度/m	—	10	5	下部采场直接顶板
	3.顶柱回采方法	—	两步骤分条中深孔嗣后充填采矿法	上向进路充填采矿法	
	4.顶柱采场参数				
	4.1 采场跨度/m	—	6~8	4.0	
	4.2 采场高度/m	—	10	5.0	

续表

项目名称	项目特征	初步方案	优化方案一	优化方案二	备注
人工假顶构筑方案	1.人工假顶特征				
	1.1 假顶厚度/m	7	7	4	
	1.2 充填体强度值/MPa	4.5	4.5	3.5	国内矿山安全
	1.3 假顶安全系数	1.2	3.0	2.8	系数 2.0～3.0
	2.假顶承载计算				
	2.1 假顶承受荷载值/MPa	0.742	0.742	0.742	
	2.2 极限压应力值/MPa	3.76	1.49	1.24	
	3.假顶充填设计				
	3.1 充填灰砂比	1∶4	1∶4	1∶6	质量浓度 70%
	3.2 充填材料成本/(元/m^3)	152.6	152.6	109.0	初步估算
	4.假顶配筋参数				
	4.1 配筋率计算值/%	0.096	0.027	0.004	纵向受拉
	4.2 钢筋规格及型号	HRB400 Φ25 mm	HRB400 Φ25 mm	HRB300 Φ12 mm	
	4.3 主筋网格间距/mm	100×100	250×250	500×500	
	4.4 辅筋网格间距/mm	—	—	250×250	Φ6.5 mm
	4.5 设计配筋率/%	0.105	0.028	0.009	纵向受拉
	4.6 钢筋成本/(元/t)	73.4	27.6	4.2	钢筋总量
	5.假顶吨矿总成本/(元/t)	135.7	89.6	51.2	

通过综合对比分析,得出以下结论。

(1) 初步方案虽可实现无矿柱连续开采,但人工假顶构筑成本最高,安全系数仅为 1.2,可靠性和稳定性不足,存在较大安全隐患。

(2) 优化方案二构筑成本最低,安全系数较高,且能利用现有工程,新增工程量较小,但存在技术局限性:顶柱开采效率低,生产周期长;顶柱厚度仅 5 m,低于安全矿柱厚度 8 m,无法满足安全生产要求。

(3) 优化方案一技术经济性最优:构筑成本适中,安全性最佳;成本仅增加 10～20 元/t,经济效益显著;留设 10 m 厚安全顶柱,保证下部采场安全回采;采用两步骤分条中深孔嗣后充填法,采场跨度小,人工顶板安全性高。

综上,优化方案一在构筑成本、安全性能及顶柱回采效率等方面均具显著优势,是底柱回采的最佳技术方案。

4.2 人工假顶配筋优化

针对人工假顶底部单筋布置的局限性,优化设计了底筋-腰筋-顶筋组合布置方案(见图 10),具体如下:

(1) 人工假顶构筑层内沿上下层进路方向设置底层受力钢筋网,采用 HRB400 级 Φ25 mm 螺纹钢筋,网格间距为 250 mm×250 mm,保护层厚度为 150 mm;

(2) 底层一步骤进路侧帮 3.0 m 以下布置腰筋,采用 HRB400 级 Φ14 mm 螺纹钢筋,网格间距为 500 mm×500 mm;

(3) 腰筋间设置顶筋作为连接构件,形成封闭类圈梁结构,采用 HRB400 Φ14 mm 螺纹钢筋,网格间距为 500 mm×500 mm;

(4) 腰筋、顶筋表面铺设矿用金属网,采用 HRB300 级 Φ6.5 mm 螺蚊钢筋,网格间距为 250 mm×250 mm。

该方案通过多层钢筋网协同作用,显著提升了人工假顶的承载性能和结构稳定性。

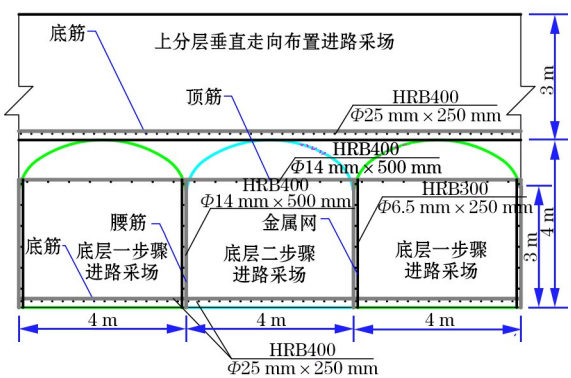


图 10 人工假顶截面配筋示意

Fig.10 Schematic of rein forcement arrangement for artificial false roof section

4.3 人工假顶施工工艺

(1) 进路回采与质量控制。进路回采主要工序包括凿岩爆破、通风、顶板支护及运搬出矿。施工中实施光面爆破技术,巷道底板设置 3°～5°正向坡度,为充填接顶创造有利条件。

(2) 底板整平与垫层铺设。回采完毕使用液压破碎锤修整进路底板。在距底板 30～40 cm 处按 1.0～2.0 m 的间距布置底筋锚杆孔,2.5～2.6 m 处按 2.0 m 的间距布置顶筋锚杆孔,孔深 0.3～0.5 m。安装 Φ36 mm 圆钢作为托底锚杆,必要时可间隔3.0～5.0 m 设置全长锚杆托架。处理后进路应满足:底板平整度误差≤5 cm,底角线平直,无积水。最后铺设 10～20

cm 厚碎矿垫层,覆盖塑料彩条篷布作为隔离层。

(3) 钢筋加工与铺设工艺。钢筋在专用车间加工,切割成 3.0 m 或 6.0 m 标准长度,通过罐笼运输至井下。铺设顺序为由内而外,先安装侧帮托架锚杆,再依次铺设底筋、顶筋和腰筋。底筋铺设时,纵向受力钢筋置于下层,横向钢筋置于上层。纵向受力钢筋焊接连接,搭接长度为 10～15 cm;其他部位钢筋可绑扎连接。进路口纵向受力钢筋延伸至充填挡墙外 15～20 cm,便于后续搭接施工。

(4) 管路架设与充填施工。钢筋铺设同时安装充填管、滤水管和排气管,其末端固定于进路顶板最高处。在进路口构筑充填挡墙,并引出充填管路。采用分段多次充填,每次充填高度≤2 m。充填体强度要求:7 d 抗压强度(R7 d)≥1.5 MPa,28 d 抗压强度(R28 d)≥4.5 MPa。进路端部顶板最高点设置双管道,实施多点放料充填。严禁充填引管水和洗管水进入待充填采场。

(5) 人工假顶验收与养护。人工假顶充填体养护时间≥7 d,期间严禁相邻进路回采。充填过程中按规定取样,实验室检测充填体强度。建立质量反馈机制,记录不合格区段,制定安全技术处理方案,确保工程质量满足设计要求。

5 现场应用效果

截至目前,底柱 900 m 分层一步骤进路采场已基本回采完毕,共计采出高品位矿石 19 768 t,盘区平均生产能力约 276 t/d,矿柱回采率约 82%,回采过程中未出现明显的地压活动。另外多数进路已经按充填设计要求完成钢筋铺设,施工效率为 15～20 m/d,钢筋布置效果如图 11 所示。当 4～5 条进路均完成充填准备工作后,再基于整体考量,对充填站进行统筹调度,适时开展料浆制备,集中实施井下充填作业。



图 11 进路钢筋架设效果

Fig.11 Effect of steel bar installation in the access route

6 结论

(1) 针对底柱开采技术条件,研究提出了 3 种底柱回采方案:盘区机械化上向进路充填采矿法、下向进路充填采矿法以及上向进路+分条中深孔联合采矿法。通过综合对比分析各方案的优缺点及技术经济指标,最终确定盘区机械化上向进路充填采矿法为最优底柱回采方案。

(2) 基于古典杨森散体压力理论以及简支梁和软支弱板力学模型,对人工假顶参数进行了理论计算与论证分析。结果表明,人工假顶采用全尾砂充填构筑方案具有显著优势,其中胶凝材料选用 G 料,充填料浆质量浓度设定为 70%,灰砂比为 1∶4。假顶设计厚度为 7.0 m,充填体 28 d 强度值为 4.5 MPa。

(3) 研究指出,矿山充填人工假顶不宜直接作为下中段阶段空场法采场的顶板。通过开展优化方案研究,论证得出优化方案一(即人工假顶作为下部采场 10 m 顶柱的直接顶板)为最佳选择。该方案不仅有效降低了假顶构筑成本,还显著提升了人工假顶的安全性。此外,相较于传统的底部单筋布置形式,采用底筋-腰筋-顶筋组合布置的配筋设计方案可显著提升人工假顶的性能。

(4) 现场实践应用充分验证了底柱回采与假顶构筑方案的可行性与可操作性。该方案成功助力矿山及时回采了高品位矿柱资源,有效扭转了生产困难局面。具体而言,底柱采场盘区生产能力提升至 276 t/d,矿柱回采率高达 82%,回采期间采场地压活动稳定。研究结果为同类矿山的底柱超前回采工作提供了宝贵的技术经验。

参考文献(References):

[1] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
GU Desheng, LI Xibing. Science and technology of modern metal deposit mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.

[2] 张钦礼,王新民.金属矿床地下开采技术[M].长沙:中南大学出版社,2016.
ZHANG Qinli, WANG Xinmin. Underground mining technology of metal deposits[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.

[3] 史秀志,苟永刚,陈新,等.顶底柱残矿回收的充填体假顶厚度确定与应用[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1080-1088.
SHI Xiuzhi, GOU Yonggang, CHEN Xin, et al. Determination and application of the backfill thickness in the residual ore recovery of crown and sill pillar[J]. Journal of Mining Safety Engineering, 2016, 33(6): 1080-1088.

[4] 况丹阳，周玉成，万串串，等.三山岛金矿下向进路采矿法人工假顶参数设计研究[J].有色金属(矿山部分)，2021，73(6)：99-103.
KUANG Danyang，ZHOU Yucheng，WAN Chuanchuan，et al. Study on design parameters of artificial roof of downward drift mining method in Sanshandao Gold Mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2021，73(6)：99-103.

[5] 黄丹，郑志杰，崔松.下向进路充填采矿法人工假顶强度及配筋参数研究[J].现代矿业，2019，35(9)：43-46＋55.
HUANG Dan，ZHENG Zhijie，CUI Song. Study on the strength and reinforcement ratio of the artificial roof of underhand drift cut-and-fill stoping[J]. Modern Mining，2019，35(9)：43-46＋55.

[6] 胡勇，江飞飞，帅金山，等.堑沟底部结构超前回采及其重构技术研究[J].矿业研究与开发，2017，31(1)：1-5.
HU Yong，JIANG Feifei，SHUAI Jinshan，et al. Study on advanced mining and reconstruction technology of trench sill structure[J]. Mining Research and Development，2017，31(1)：1-5.

[7] 黄明发，李永辉.不良胶结充填体条件下矿柱回采方案选择[J].采矿技术，2016，15(2)：22-24＋43.
HUANG Mingfa，LI Yonghui. Selection of mining plan for pillars under poor cementing filling conditions[J]. Mining Technology，2016，15(2)：22-24＋43.

[8] 刘源.某多金属矿采空区底部残留矿石及底柱安全高效回收技术应用及实践[J].采矿技术，2024，24(4)：108-111.
LIU Yuan. Application and practice of safe and efficient recovery technology for residual ore and bottom pillars at the bottom of goaf in a polymetallic mine[J]. Mining Technology，2024，24(4)：108-111.

[9] 陈祉颖，刘志祥，李夕兵，等.残矿矿柱回采方案数值模拟与优化研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2023，54(6)：2150-2161.
CHEN Zhiying，LIU Zhixiang，LI Xibing，et al. Numerical simulation and optimization of recovery scheme for residual ore pillars[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2023，54(6)：2150-2161.

[10] 侯国权，郭利杰，许文远.多中段复杂残留矿柱回采方案数值模拟分析[J].中国矿业，2023，32(增刊 1)：337-343.
HOU Guoquan，GUO Lijie，XU Wenyuan. Numerical simulation analysis of mining schemes for complex residual pillars in multiple immediate sections[J]. China Mining Magazine，2023，32(Suppl.1)：337-343.

[11] 杜永亮.钢筋混凝土假顶力学模型构建与参数优化[J].金属矿山，2018(12)：19-26.
DU Yongliang. The mechanical mode construction and parameter optimization for false roof of reinforced concrete[J]. Metal Mine，2018(12)：19-26.

[12] 朱斌，张柏春，李晓辉，等.东塘子铅锌矿矿柱回采方案研究及应用[J].矿业研究与开发，2022，42(6)：5-8.
ZHU Bin，ZHANG Baichun，LI Xiaohui，et al. Study and application of pillar recovery scheme in Dongtangzi Lead-Zinc Mine[J]. Mining Research and Development，2022，42(6)：5-8.

[13] 朱俊宁，赵周能，张志贵，等.某矿分段空场嗣后胶结充填底柱置换方法研究[J].金属矿山，2018(3)：19-25.
ZHU Junning，ZHAO Zhouneng，ZHANG Zhigui，et al. Study on the method of the sill pillar replacement by sublevel open stoping with backfilling method[J]. Metal Mine，2018(3)：19-25.

[14] 杨久富，张小波，李晓刚.某矿山钢筋混凝土人工假顶设计[J].现代矿业，2020(7)：76-78.
YANG Jiufu，ZHANG Xiaobo，LI Xiaogang. Design of reinforced concrete artificial false roof in a mine[J]. Modern Ming，2020(7)：76-78.

[15] 李小松，李夕兵，龚永超，等.大跨度充填体假顶力学模型及稳定性分析[J].矿冶工程，2018，38(6)：23-28＋38.
LI Xiaosong，LI Xibing，GONG Yongchao，et al. Mechanical model and stability analysis for long-span artificial roof with backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2018，38(6)：23-28＋38.

[16] 陈喜山.古典杨森散体压力理论的拓展及采矿工程中的应用[J].岩土工程学报，2010，32(2)：315-319.
CHEN Xishan. Extension of classical Janssen loose mass pressure theory and its application in mining engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2010，32(2)：315-319.

[17] 黄明清，于少峰.充填体下阶段水平矿柱回采顶板安全厚度及进路充填采矿法[J].有色金属(矿山部分)，2018，70(1)：6-9＋34.
HUANG Mingqing，YU Shaofeng. Roof safe thickness and drift cut-and-fill mining of horizontal stage pillar under overburden backfill materials[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2018，70(1)：6-9＋34.

[18] 范文录.中厚急倾斜破碎矿体开采人工假顶结构研究与应用[D].长沙：中南大学，2013.
FAN Wenlu. Study and application of the artificial roof structure for medium thickness steep fractured ore mining[D]. Changsha：Central South University，2013.

[19] 龚新华，侯克鹏，孙健.人工假底在金属矿山的应用现状及展望[J].中国钨业，2014，29(1)：21-24.
GONG Xinhua，HOU Kepeng，SUN Jian. Application status and prospects of artificial false bottom in metal mines[J]. China Tungsten Industry，2014，29(1)：21-24.

[20] 刘超，王亮，张帅，等.中深孔爆破对采场人工假顶的影响研究[J].矿业研究与开发，2024，44(5)：19-24.
LIU Chao，WANG Liang，ZHANG Shuai，et al. Influence of medium and deep hole blasting on artificial false roof in stopes[J]. Mining Research and Development，2024，44(5)：19-24.

[21] 徐港.下向分层进路充填假顶稳定性分析及配筋优化研究[D].昆明：昆明理工大学，2023.
XU Gang. Research on the stability analysis and reinforcement optimization of false roof in downward slicing drift filling[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2023.