遥控铲运机与平底结构联合出矿的空场嗣后充填采矿法及其工程应用*

宋景仪[1,2],赵兴东[1,2],王元坤[1,2],王昌[1,2],秦绍龙[1,2],周鑫[1,2]

(1.深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对传统空场嗣后充填采矿法在实际应用中存在的采准工程复杂、充填体内掘巷困难等问题,提出了基于遥控铲运机与平底结构联合出矿的空场嗣后充填采矿法。基于"遥控铲运机+平底结构"的出矿系统,建立了4种不同采场布置方向和采场结构参数的工况下,遥控铲运机出矿量占比系数理论计算式,提出了传统空场嗣后充填采矿法改进后的采场结构参数优化方法。以帮中锌铜矿为工程背景,开展了基于"遥控铲运机+平底结构"出矿系统的空场嗣后充填采矿法的应用研究,介绍了采场结构参数设计方法。结果表明:该方法可降低采准工程量21%,减少矿石损失约12%,遥控铲运机出矿量占比达22%(理论值19.6%),单个采场的采准—切割—回采周期与原采矿方法基本持平。研究成果为厚大矿体安全高效开采提供了创新解决方案。

关键词:厚大矿体高效开采;平底结构;遥控铲运机;空场嗣后充填采矿法

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0018-07

Open Stoping with Subsequent Filling Mining Method Combining Remote-Controlled LHD and Flat-Bottom Structure for Ore Removal and Its Engineering Application

SONG Jingyi[1,2], *ZHAO Xingdong*[1,2], *WANG Yuankun*[1,2], *WANG Chang*[1,2], *QIN Shaolong*[1,2], *ZHOU Xin*[1,2]

(1.Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mines,
National Mine Safety Administration, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To address the challenges of complex preparation work and difficult roadway excavation within backfill bodies encountered in thick ore bodies using conventional open stoping with subsequent filling mining method, a new stoping technique combining remote-controlled LHD with flat-bottom structures for ore removal has been proposed. Based on the ore removal system utilizing LHD with flat-bottom structures, theoretical calculation formulas for the ore removal volume contribution coefficient of LHD were established under the working conditions of four different stope layout directions and stope structure parameters. An optimized method for determining the stope structure parameters was proposed for the improved traditional open stoping with subsequent filling mining method. Taking the Bangzhong Zinc-Copper Mine as the engineering background, an application research on the open stoping with subsequent filling mining method based on the LHD with flat-bottom structure mining system was carried out. The design method of the mining site structure parameters was also introduced. The results show that, the method can achieve a 21% reduction in stope preparation engineering quantity, an approximately 12% decrease in ore loss, and a 22% ore output ratio for remote-controlled LHD (the theoretical value is 19.6%). The preparation-cutting-extraction cycle of a single stope is comparable to that of the original mining method. The study results provide innovative solutions for the safe and efficient extraction of thick and large ore bodies.

Key words: Efficient mining of thick orebody, Flat-bottom structure, Remote-controlled LHD, Open stoping with subsequent filling mining method

---

* **收稿日期**:2025-04-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52130403);深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003801);教育部基本科研业务费重大需求项目(N2301027)

作者简介:宋景仪(2000—),男,云南保山人,博士研究生,主要研究方向为工程爆破技术与金属矿床开采技术。E-mail:2637581519@qq.com

通信作者:赵兴东(1975—),男,辽宁辽中人,博士,教授,主要研究方向为深部金属矿床开采。E-mail:neu537zhaoxingdong@126.com

0 引言

厚大矿体具有矿石储量多、采区范围大、开采年限长等特点,在开采效率方面具有巨大的提升潜能[1]。我国主要采用无底柱分段崩落采矿法、上向水平分层充填采矿法、空场嗣后充填采矿法[2]开采厚大矿体。其中,空场嗣后充填采矿法具有对地表破坏强度低、生产效率高、回采率高、采切工程量小等优点,逐渐成为厚大矿体开采的主流方法[3-5],如凡口铅锌矿、安庆铜矿、铜绿山铜矿、阿舍勒铜矿、草楼铁矿、李楼铁矿、周油坊铁矿等均采用该方法[6]。

目前,空场嗣后充填采矿法普遍采用"隔一采一"的回采顺序,即先回采一步骤矿房,嗣后进行尾砂胶结充填,再回采二步骤矿房,嗣后进行全尾砂充填[7-12]。传统的空场嗣后充填采矿法底部结构主要采用"V"形堑沟,存在采准工程量大、工艺复杂、桃形矿柱回采难度大、出矿进路眉线破坏严重、支护困难等难题。此外,部分矿山二步骤矿房回采时,需要在充填体内开挖出矿巷道[13],受充填体强度低、残矿堆积影响,出矿巷道掘进效率低、施工难度大、施工成本和安全风险高。

近年来,遥控铲运机的应用使作业人员无需进入采区即可完成出矿作业,为"遥控铲运机+平底结构"出矿系统在矿山的应用提供了技术保障。然而,遥控铲运机存在应用时间短、普及程度低、驾驶员经验缺乏等问题,使遥控铲运机出矿效率低。同时,采用平底结构替代传统堑沟底部结构,能够有效解决充填体内掘巷困难的问题[14-18]。因此,合理控制遥控铲运机的出矿量,提高出矿效率,是"遥控铲运机+平底结构"出矿系统成功应用的关键。

针对传统空场嗣后充填采矿法应用中存在采准工程复杂、充填体内掘巷困难的技术难题,基于"遥控铲运机+平底结构"的出矿系统,建立了遥控铲运机出矿量占比系数理论计算式,在此基础上,提出了传统空场嗣后充填采矿法改进后的采场结构参数优化方法。以西藏中凯矿业帮中锌铜矿为工程背景,开展了基于"遥控铲运机+平底结构"出矿系统的空场嗣后充填采矿法的应用研究,并介绍了采场结构参数设计方法。

1 采场尺寸设计理念

基于遥控铲运机与平底结构联合出矿的空场嗣后充填采矿法,以平底结构替代传统的"V"形堑沟。这一改进虽减少了采准工程量,避免了充填体内掘进巷道,缩短了采准工期,但由于仅能从采场端部出矿,空区内将会残留大量矿石。此时需采用遥控铲运机进入采空区内部,回采残矿,这可能导致平底结构的综合出矿效率低于"V"形堑沟。因此,采用平底出矿结构的关键在于平衡遥控铲运机和铲运机的出矿量,同时控制出矿时间,使延长的出矿时间与缩短的采准工期相互补偿,保障采场的生产能力。为此,下文将建立不同工况下遥控铲运机出矿量占比系数的计算式,基于此,提出基于遥控铲运机出矿量控制的采场结构参数确定方法。

1.1 遥控铲运机出矿量占比系数计算式

根据采场布置方向和采场长度,设置 4 种不同工况(见表 1),分别计算遥控铲运机出矿量占比系数。表 1 中,L 为采场长度,m;H 为采场高度,m;S 为铲运机出矿安全距离,一般取 1～2 m;α 为矿体倾角,(°);φ 为崩落矿石散体的自然安息角,(°)。

表 1 4 种采矿工况

Table 1 Four mining conditions

工况	采场布置方向	采场长度 L
一	垂直矿体走向	$L<\frac{H}{\tan\varphi}-\frac{H}{\tan\alpha}-S$
二	垂直矿体走向	$L\geqslant\frac{H}{\tan\varphi}-\frac{H}{\tan\alpha}-S$
三	沿矿体走向	$L<\frac{H}{\tan\varphi}-S$
四	沿矿体走向	$L\geqslant\frac{H}{\tan\varphi}-S$

1.1.1 工况一

采用平底结构出矿时,以采场切割槽为补偿空间进行侧向崩矿。崩落的矿石在重力作用下自流至采场出矿口,采用铲运机出矿,小于自然安息角的残矿则堆积在采场内部,重复上述过程,直至所有矿石崩落完毕。最后,采场内残矿采用遥控铲运机清理,具体流程如图 1 所示。

空区残矿高度 h 可由式(1)计算:

$$h=\frac{(S+L)\tan\alpha\tan\varphi}{\tan\alpha-\tan\varphi} \tag{1}$$

空区残矿体积 V 可由式(2)计算:

$$V=\frac{W(S+L)^2\tan\alpha\tan\varphi}{2(\tan\alpha-\tan\varphi)} \tag{2}$$

式中:V 为残矿体积,m^3;W 为采场宽度,m。

考虑到碎胀系数的影响,可求得残矿质量 M:

$$M=\frac{\rho W(S+L)^2\tan\alpha\tan\varphi}{2F(\tan\alpha-\tan\varphi)} \tag{3}$$

式中:M 为残矿质量,kg;ρ 为矿石密度,kg/m^3;F 为矿石碎胀系数,一般介于 1.2～1.6 之间。

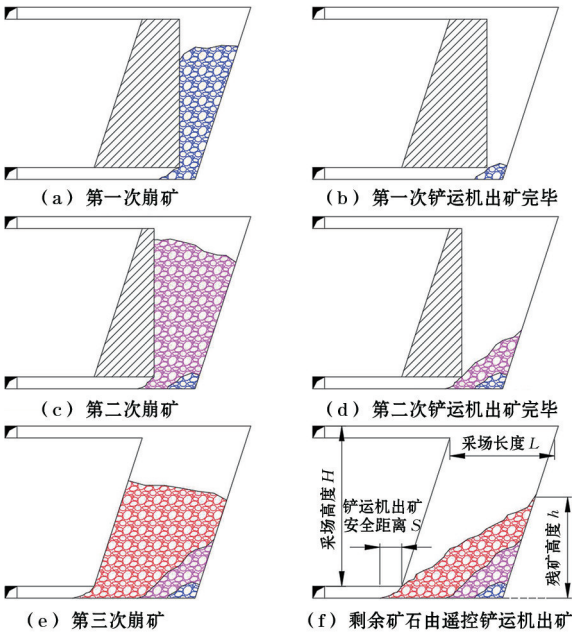


图 1 平底结构采场出矿示意

Fig.1 Schematic of ore removal in flat-bottom stope structure

据此计算出遥控铲运机出矿质量占采场矿石质量的比例,即遥控铲运机出矿量占比系数 P:

$$P=\frac{(S+L)^2\tan\alpha\tan\varphi}{2F(\tan\alpha-\tan\varphi)HL}\times 100\% \tag{4}$$

P 取 10%~30%,可根据矿山遥控铲运机出矿效率确定,遥控铲运机出矿效率较高时取大值,确保平底结构条件下,采场的回采时间不大于"V"形堑沟。

1.1.2 工况二

采场长度较长时,残矿不断堆积。当残矿高度等于采场高度后,其高度将不会再增加,此时残矿堆形态如图 2 所示。残矿体积 V 可由式(5)计算:

$$V=HW\left(L+S-\frac{H}{2\tan\varphi}+\frac{H}{2\tan\alpha}\right) \tag{5}$$

残矿高度等于采场高度时,遥控铲运机出矿量占比系数 P:

$$P=\frac{\left(S+L-\frac{H}{2\tan\varphi}+\frac{H}{2\tan\alpha}\right)}{FL}\times 100\% \tag{6}$$

1.1.3 工况三和工况四

(1)工况三条件下:

$$P=\frac{(S+L)^2\tan\varphi}{2FHL}\times 100\% \tag{7}$$

(2)工况四条件下:

$$P=\frac{S+L-\frac{H}{2\tan\varphi}}{FL}\times 100\% \tag{8}$$

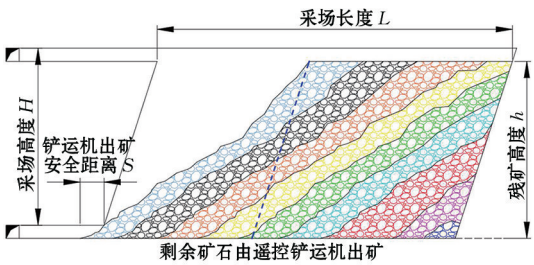


图 2 残矿高度等于采场高度时残矿形态

Fig.2 The shape of residual ore when its height equals the stope height

1.2 基于遥控铲运机出矿量控制的采场长度确定方法

由式(4)、式(6)、式(7)、式(8)可知,遥控铲运机出矿量占比系数 P 主要受矿体倾角、崩落矿石散体的自然安息角、碎胀系数和采场尺寸影响。因此,可以通过调整采场尺寸来控制遥控铲运机的出矿量。

在平底结构采场设计过程中,根据矿山开拓工程布置条件确定采场高度和宽度,根据式(9)确定采场长度,以达到控制遥控铲运机出矿量的目的。

$$L=\min(L_{\mathrm{p}},L_{\mathrm{stable}}) \tag{9}$$

式中:L_{p} 为根据遥控铲运机出矿量确定的采场长度上限,m;L_{stable} 为根据采场围岩稳定性确定的采场长度上限,m。

要保证平底结构与"V"形堑沟的出矿、采准工程时间之和相等,得到如下关系式:

$$HWL_{\mathrm{p}}\left[\frac{P}{AE}+\frac{(1+P)}{E}\right]=\frac{HWL_{\mathrm{p}}}{E}+T \tag{10}$$

式中:A 为遥控铲运机出矿效率折减系数;E 为铲运机出矿效率,t/d;T 为采用平底结构缩短的采准工程时间,d。

将式(4)、式(6)、式(7)、式(8)分别代入式(10),得到不同工况条件下采场长度上限 L_{p}。

工况一条件下:

$$L_{\mathrm{p}}=\sqrt{\frac{2TAEF(\tan\alpha-\tan\varphi)}{(1-A)\tan\alpha\tan\varphi W\rho}}-S \tag{11}$$

工况二条件下:

$$L_{\mathrm{p}}=\frac{AEFT}{(1-A)WH\rho}-S+\frac{H}{2\tan\varphi}-\frac{H}{2\tan\alpha} \tag{12}$$

工况三条件下:

$$L_p=\sqrt{\frac{2TAEF}{(1-A)\tan\varphi W\rho}}-S \tag{13}$$

工况四条件下：

$$L_p=\frac{AEFT}{(1-A)WH\rho}-S+\frac{H}{2\tan\varphi} \tag{14}$$

2 工程应用实例

2.1 工程概况

帮中锌铜矿矿区矿体平均厚度为 25 m，倾角 77°，为急倾斜厚大矿体，中段高度为 50 m。矿床围岩岩石类型简单，矿体上盘为斑岩、下盘为角岩；矿体以角岩为主，部分为斑岩，岩体稳定性较好。采用阶段空场嗣后充填采矿法开采，矿体厚度大于 15 m 时，采场垂直于矿体走向布置，采场高度与中段高度一致。由于二步骤矿房回采时需在充填体里掘进出矿巷道，存在成巷难度大、效率低、施工成本和安全风险高等难题。因此，矿山拟采用基于平底结构的阶段空场嗣后充填采矿法对矿体进行回采。

2.2 采场结构参数优化

2.2.1 基于岩体稳定性的采场长度上限计算

合理的采场结构参数可使采场处于有利的力学状态，使围岩的应力、应变分布趋于均匀化。减少支护工作量，是保障地下金属矿山安全高效开采的前提[19-22]。矿区在近地表开采，地应力小，围岩稳定性主要由结构面控制。由于矿体存在倾角，下盘不易发生掉块及塌方灾害，故将矿体顶板及上盘围岩稳定性作为采场结构参数的设计依据。

Mathews 稳定性图解法是由 Mathews 等[23]于 1980 年首先提出的用于 1 000 m 以下硬岩中进行矿山开采设计的方法。该方法的设计过程是以稳定性系数 N' 和水力半径 HR 这两个因子为基础进行的。其中，稳定性系数 N' 代表岩体在给定应力条件下维持稳定的能力，水力半径 HR 反映了采空区尺寸和形状。

采场稳定性系数 N' 由式(15)进行计算：

$$N'=Q'\times A'\times B\times C \tag{15}$$

式中：Q' 为修正的 NGI 隧道质量指标；A' 为采动应力系数；B 为节理产状调整系数；C 为重力调整系数。

修正的 NGI 隧道质量指标 Q' 可由下式确定：

$$Q'=\frac{RQD}{J_n}\frac{J_r}{J_a} \tag{16}$$

式中：RQD 为岩石质量指标；J_n 为节理组数；J_r 为节理粗糙度系数；J_a 为节理蚀变系数。

水力半径 HR 可由式(17)计算：

$$HR=\frac{L_1\times W_1}{2\times L_1+2\times W_1} \tag{17}$$

式中：L_1 为暴露面长度，m；W_1 为暴露面跨度，m。

根据工程地质调查与岩石力学试验结果，采用巴顿岩体质量分级(Q)对矿体及上盘围岩进行岩体质量评价，分级评价结果见表 2。

表 2 巴顿岩体质量分级(Q)结果

Table 2 Bartonrock mass quality classification (Q) results

位置	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	分级
4 500～4 550 m 中段矿体	88.50	4	2	1	1	2.5	17.7	I
4 500～4 550 m 中段上盘	92.36	4	2	1	1	2.5	18.5	I

帮中锌铜矿矿区采场围岩稳定性系数 N' 计算结果见表 3。根据稳定性系数 N' 计算结果，结合 Mathews 稳定性图，确定采场顶板与上盘的水力半径分别为 5.6 m 及 10.8 m(见图 3)。

表 3 稳定性系数 N' 计算结果统计

Table 3 Statisticalresults of stability coefficient N' calculations

位置	Q'	A'	B	C	N'
采场顶板	44.3	0.52	0.2	2.00	9.20
采场上盘	46.2	1.00	0.2	6.65	61.45

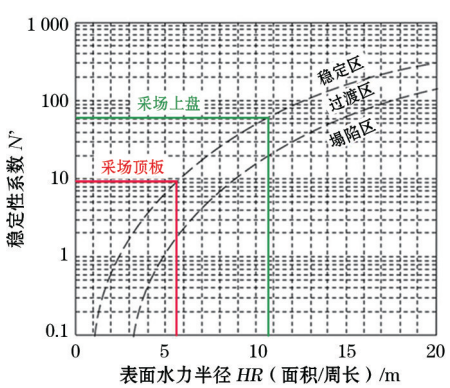


图 3 Mathews 稳定性图

Fig.3 Mathews stability graph

当采场沿矿体走向布置时,矿体厚度即为采场宽度,取 15 m。由式(18)计算得到,满足采场围岩稳定性的采场长度上限 L_{stable} 为 38 m。

$$\begin{cases} L_r = \dfrac{2\times HR_r\times W}{W-2HR_r} \\ L_h = \dfrac{2\times HR_h\times H}{H-2HR_h} \\ L_{stable} = \min(L_r, L_h) \end{cases} \tag{18}$$

式中:L_r 为顶板最大允许长度,m;HR_r 为顶板水力半径,m;L_h 为上盘最大允许长度,m;HR_h 为上盘水力半径,m。

当采场垂直于矿体走向布置时,设计采场宽度为 18 m,采场长度主要由顶板围岩稳定性决定,计算可得根据采场围岩稳定性确定的采场长度上限 L_{stable} 为 30 m。

2.2.2 基于遥控铲运机出矿量占比系数的采场长度上限计算

帮中锌铜矿崩落矿石的自然安息角为 41°,遥控铲运机出矿效率的折减系数为 0.2,铲运机出矿效率 1 000 t/d,采用平底结构缩短的采准工程时间 80 d,碎胀系数为 1.5,矿石密度 3.9 g/cm^3,铲运机出矿安全距离为 1 m。采场垂直于矿体走向布置时,根据计算遥控铲运机出矿量确定的采场长度上限 L_p 为 27 m;采场沿矿体走向布置时,根据计算遥控铲运机出矿量确定的采场长度上限 L_p 为 33.3 m。

2.2.3 确定采场结构参数

根据式(9),帮中锌铜矿最终采场结构参数确定如下:

(1) 采场垂直于矿体走向布置时,长×宽×高=27 m×18 m×50 m;

(2) 采场沿矿体走向布置时,长×宽×高=33 m×矿体厚度×50 m。

在生产实际中,可根据矿体产状和采场布置对结构参数进行微调,但注意采场长度不能过大,避免影响采场出矿效率。

3 应用效果分析

选定帮中锌铜矿 4 500~4 550 m 中段 13# 采场作为试验采场,试验采场位于矿体端部,垂直于矿体走向布置。矿体厚度为 25 m,倾角 77°,宽度为 18 m,采场长度为矿体厚度,采场高度为 50 m。图 4 为试验采场现场照片和空区三维激光扫描结果,由图 4 可知试验采场顶板完整,采场边界平整,围岩稳定性良好。

采用基于遥控铲运机与平底结构联合出矿的空场嗣后充填采矿法进行回采,取得良好效果:采准工程量降低了 21%;避免了留设桃形矿柱带来的矿石损失问题(多采矿石量约 12%);试验采场矿石损失率约为 4%,矿石贫化率约为 6.1%;单个采场的采准—切割—回采周期较原采矿方法基本持平,矿山生产能力得到有效保障;试验采场遥控铲运机的出矿量约为 17 672 t,占总出矿量的 22%,理论计算值为 19.6%,验证了遥控铲运机出矿量占比系数计算方法的合理性。



图 4 试验采场现场照片和空区三维激光扫描结果

Fig.4 Field photos of the test stope and 3D laser scanning results of the goaf

4 结论

本文以帮中锌铜矿为工程背景,开展了基于"遥控铲运机+平底结构"出矿系统的空场嗣后充填采矿法的应用研究,并介绍了采场结构参数设计方法,得到以下主要结论。

(1)提出了遥控铲运机出矿量占比系数的概念,并给出了不同工况下占比系数的计算方法和基于遥控铲运机出矿量控制的采场长度确定方法。

(2)采用基于遥控铲运机与平底结构联合出矿的空场嗣后充填采矿法提高了作业安全性,简化了采准工艺,采准工程量降低了 21%,避免了留设桃形矿柱带来的矿石损失问题(多采矿石量约 12%)。二步骤采场回采时,能够避免充填体内掘进巷道。

(3)提出的采场长度确定方法有效控制了遥控铲运机的出矿量,试验采场遥控铲运机的出矿量占比为 22%(理论计算值 19.6%),矿山生产能力得到了有效保障。

参考文献(References):

[1] 宋超,马驰,路增祥,等.提高厚大矿体开采效率的采矿工艺优化[J].矿业研究与开发,2022,42(2):1-4.
SONG Chao, MA Chi, LU Zengxiang, et al. Optimization on mining technology to improve mining efficiency of thick ore bodies[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(2):1-4.

[2] 罗志桃.黄沙坪矿区钨钼厚大矿体采矿方法选择及优化[J].采矿技术，2022，22(4)：4-7.
LUO Zhitao. Selection and optimization of mining methods for tungsten-molybdenum thick and large ore bodies in Huangshaping mining area[J]. Mining Technology，2022，22(4)：4-7.

[3] 宋贵明，李航空，董凯程，等.大直径深孔开采关键技术优化研究[J].有色金属(矿山部分)，2023，75(4)：46-51.
SONG Guiming，LI Hangkong，DONG Kaicheng，et al. Optimization on key technology of large-diameter long hole mining method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2023，75(4)：46-51.

[4] 黄小彬，王聪聪，李斌，等.采场周边控制爆破影响因素分析及参数计算[J].矿业工程，2017，15(1)：56-59.
HUANG Xiaobin，WANG Congcong，LI Bin，et al. Analysis of influencing factors and parameter calculation of controlled blasting around stope[J]. Mining Engineering，2017，15(1)：56-59.

[5] 陈贤春.安庆铜矿大孔爆破效果分析及对策[J].有色金属(矿山部分)，2009，61(1)：53-55.
CHEN Xianchun. Analysis and countermeasures of large hole blasting effect in Anqing Copper Mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2009，61(1)：53-55.

[6] 赵兴东，宋景仪，田斌，等.中凯矿业大直径深孔爆破落矿装药结构优化研究[J].爆破，2024，41(1)：60-66.
ZHAO Xingdong，SONG Jingyi，TIAN Bin，et al. Optimization study by Zhongkai Mining on charge structure of large-diameter and deep-hole blasting[J]. Blasting，2024，41(1)：60-66.

[7] 尚振华，唐绍辉，焦文宇，等.基于FLAC3D模拟的大规模采空区破坏概率研究[J].岩土力学，2014，35(10)：3000-3006.
SHANG Zhenhua，TANG Shaohui，JIAO Wenyu，et al. Failure probability of goaf in large-scale based on simulation of FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics，2014，35(10)：3000-3006.

[8] 何晓文.罗河铁矿充填体需求强度数值模拟分析[J].现代矿业，2019，35(12)：85-90.
HE Xiaowen. Numerical simulation analysis on requirement strength of filling body in Luohe Iron Mine[J]. Modern Mining，2019，35(12)：85-90.

[9] LI Genwei，DENG Guangzhe，MA Jingong. Numerical modelling of the response of cemented paste backfill under the blasting of an adjacent ore stope[J]. Construction and Building Materials，2022，343：128051.

[10] 马凤山，卢蓉，郭捷，等.金川二矿区大体积充填体变形的三维数值模拟[J].工程地质学报，2019，27(1)：14-20.
MA Fengshan，LU Rong，GUO Jie，et al. Deformation analysis of large backfill by three-dimensional numerical simulation in No.2 zone of Jinchuan Mine[J]. Journal of Engineering Geology，2019，27(1)：14-20.

[11] 文兴，赵亮，黄敏.阿舍勒铜矿二步骤采场回采充填体稳定性分析[J].矿冶，2021，30(4)：1-6+19.
WEN Xing，ZHAO Liang，HUANG Min. Stability analysis of filling body in two-step stope of Ashele Copper Mine[J]. Mining and Metallurgy，2021，30(4)：1-6+19.

[12] ZAKA EmadMuhammad，MITRY Hani，KELLY Cecile. Effect of blast-induced vibrations on fill failure in vertical block mining with delayed backfill [J]. Canadian Geotechnical Journal，2014，51(9)：975-983.

[13] 张建强，林炜，赵海祥，等.阿舍勒铜矿残矿堆巷道围岩特征及超前支护优化研究[J].采矿技术，2024，24(6)：110-115.
ZHANG Jianqiang，LIN Wei，ZHAO Haixiang，et al. Study on the characteristics of the surrounding rock of the residual ore heap roadway of the Ashele Copper Mine and the optimization of the advance support [J]. Mining Technology，2024，24(6)：110-115.

[14] 刘建东，王邦策，孙永茂，等.地下矿山铲运机智能远程遥控技术的应用[J].现代矿业，2020，36(10)：134-136+141.
LIU Jiandong，WANG Bangce，SUN Yongmao，et al. Application of intelligent remote control technology for loaders in underground mines[J]. Modern Mining，2020，36(10)：134-136+141.

[15] 牟少良.基于5G通信技术的地下遥控铲运机开发及应用[J].现代矿业，2021，37(12)：69-71.
MOU Shaoliang. Development and application of underground remote control scraper based on 5G communication technology [J]. Modern Mining，2021，37(12)：69-71.

[16] 杨雄，徐石清.矿用地下铲运机的遥控改装应用[J].世界有色金属，2018(12)：235-236.
YANG Xiong，XU Shiqing. Remote control modification and application of mine underground scraper [J]. World Nonferrous Metals，2018(12)：235-236.

[17] 林尧.浅孔平底结构在中深孔采场底柱回收中的应用[J].采矿技术，2024，24(3)：61-64.
LIN Yao. The application of shallow hole flat bottom structure in the recovery of bottom pillar in medium-deep hole stope[J]. Mining Technology，2024，24(3)：61-64.

[18] 刘国泽.地下铲运机智能遥控系统国产化升级改造方案研究[J].中国金属通报，2025(2)：88-90.
LIU Guoze. Research on domestic upgrading and transformation scheme of intelligent remote control system for underground scraper[J]. China Metal Bulletin，2025(2)：88-90.

[19] 王滔，孙刚友，杨江坤，等.基于AHP-TOPSIS的急倾斜薄矿脉采矿方法及采场结构参数优选[J].铀矿冶，2025，44(2)：38-51.
WANG Tao，SUN Gangyou，YANG Jiangkun，et al. AHP-TOPSIS-based mining method for steeply inclined thin veins and optimization of stope structural parameters[J]. Uranium Mining and Metallurgy，2025，44(2)：38-51.

[20] 郭玉豹,张苏闯,杨凯.深部开采地压活动特征分析及采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(6):43-47.
GUO Yubao, ZHANG Suchuang, YANG Kai. Analysis of ground pressure activity characteristics and optimization of stope structure parameters in deep mining [J]. Mining Technology,2024,24(6):43-47.

[21] ZHANG Long, HU Jianhua, WANG Xueliang, et al. Optimization of stope structural parameters based on Mathews stability graph probability model[J]. Advances in Civil Engineering,2018(2):1-7.

[22] 刘建东,解联库,曹辉.大规模充填采矿采场稳定性研究与结构参数优化[J].金属矿山,2018(12):10-13.
LIU Jiandong, XIE Lianku, CAO Hui. Study on structural parameters optimization and stability of stope for large-scale backfill mining[J]. Metal Mine,2018(12):10-13.

[23] MATHEWS K, HOEK E, WYLLIE D, et al. Prediction of stable excavations for mining at depths below 1000 metes in hard rock [R]. Ottawa: Nature Resources Canada, 1980: 18-46.