基于采场结构参数的充填体强度预测模型及参数优化*

田文东[1],秦帅[1],胡胜[1],武鹏杰[2,3],李成龙[2,3],王少勇[2,3]

(1.中色非洲矿业有限公司谦比希铜矿, 赞比亚 基特韦市 22592;
2.北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083;
3.金属矿膏体充填安全绿色开采国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100083)

摘要:针对充填体强度设计常通过室内配比试验或工程经验法来确定,而忽略了采场高度、采场长度及采场宽度等采场结构参数对所需充填体强度的影响。以某铜矿为工程背景,基于L-L强度解析法,通过正交试验分别计算不同结构参数下,一步骤采场和二步骤采场的充填体理论强度值。结果表明,采场结构参数影响充填体理论强度的影响权重排序为:采场高度>采场宽度>采场长度。构建了一步骤采场和二步骤采场的充填体强度预测模型,结合现有充填工艺,反向优化采场结构参数,最终推荐最优采场结构参数为:采场高度为5~25 m,采场宽度为9~12.5 m,采场长度为80~120 m。将该采场结构参数进行现场生产应用,严格管控采场施工规格,杜绝超挖、欠挖现象,实践结果表明,现场因采场结构参数不合理、充填体强度不足导致的垮冒现象基本消失。研究结果可为充填体理论强度预测及采场结构参数优化提供参考。

关键词:充填体强度;预测模型;采场结构参数;正交试验;参数优化

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0099-09

Strength Prediction Model of Filling Body and Parameter Optimization Based on Stope Structure Parameters

TIAN Wendong[1], *QIN Shuai*[1], *HU Sheng*[1], *WU Pengjie*[2,3], *LI Chenglong*[2,3], *WANG Shaoyong*[2,3]

(1.Chambishi Copper Mine, NFC Africa Mining Co., Ltd., Kitwe 22592, Zambia;
2.School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3.Key Laboratory of Safe and Green Mining of Metal Mines with Cemented Paste Backfill of the National Mine Safety Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: The strength design of filling body is often determined by indoor proportioning test or engineering experience method, but the influences of stope structure parameters such as stope height, stope length and stope width on the strength of required filling body are ignored. Taking a copper mine as the engineering background, based on the L-L strength analysis method, the theoretical strength values of filling body in one-step stope and two-step stope under different structural parameters were calculated by orthogonal tests. The results show that the influence weights of stope structure parameters on the theoretical strength of filling body are ordered as follows: stope height > stope width > stope length. The strength prediction model of filling body in one-step stope and two-step stope was constructed, combined with the existing filling technology, the stope structure parameters were optimized reversely. Finally, the optimal stope structure parameters are recommended as follows: stope height of 5-25 m, stope width of 9-12.5 m, and stope length of 80-120 m. The structural parameters of the stope have been used for on-site production, with strictly controlling the construction specifications of the stope, as well as eliminating the phenomenon of over-excavation and under-excavation. The practical results show that the collapse phenomenon caused by unreasonable structural parameters of the stope and insufficient strength of the filling body basically disappears. The research results can provide reference for the theoretical strength prediction of filling body and the optimization of stope structure parameters.

Key words: Strength of filling body, Prediction model, Stope structure parameters, Orthogonal test, Parameter optimization

---

* **收稿日期**:2024-12-02

作者简介:田文东(1974—),男,宁夏固原人,高级工程师,主要从事金属矿采矿方法等方面的研究工作。E-mail:nfcatianwendong@163.com

通信作者:王少勇(1983—),男,蒙古族,山东烟台人,博士,高级工程师,研究方向为膏体充填理论与技术。E-mail:wshy0226@163.com

0 引言

充填采矿法通常将矿业固废与胶凝材料混合后回填至采空区,既能为地下开采提供安全作业环境,又能实现“一废治两害”的综合效益[1-2]。胶结充填体的强度是保障充填采矿效果的基本要素,其与胶凝材料、灰砂比、料浆质量浓度、养护龄期、温度等因素有关。吴爱祥等[3]对不同胶凝材料进行分析,总结了各种胶凝材料的强度特征。刘超军等[4]研究了不同灰砂比、料浆质量浓度和养护龄期对充填体强度的影响,结果表明,灰砂比越高、料浆浓度越大、养护龄期越长,充填体的强度越高。陈金刚等[5]对高寒地区的充填体强度进行了研究,发现在低温环境中,胶凝材料水化反应的速率及程度有一定程度的降低,进而影响充填体强度。

胶结充填体所需的强度是指回采相邻矿块时,保障充填体具有一定的自立高度和暴露宽度,并且处于稳定状态的最低充填体强度[6],主要取决于回采相邻采场(包括两侧和上下盘采场)时充填体的力学作用及其暴露尺寸[7-8]。不同结构参数的采场采用同一强度充填体时,会导致小规格采场充填体强度盈余,造成成本浪费;而大规格采场则可能出现充填体因强度不足而垮塌、安全性差等问题。因此,胶结充填体强度设计应当基于充填体在采空区所起的力学作用来考虑[9]。早期的重力法、简化楔形模型、拉裂楔形模型、太沙基应力模型和滑坡法[10-12]等理论分析法以二维平面解析为主,忽略了充填体实际的三维受力情况[13]。

近年来,国内外学者从三维角度进行了充填体强度分析。卢宏建等[14]将充填体与围岩综合考虑,提出胶结充填体-围岩组合体力学模型,揭示了不同接触面倾角充填体-围岩组合体的破坏特征。LIU 等[15]基于充填体本构方程,结合开挖释放能量与充填体能量积蓄,得到胶结充填体安全评价公式。MITCHELL 等[16]根据实验室中单侧暴露胶结充填体物理模型试验和解析计算模型分析,提出了三维楔形体滑动模型,用于计算单侧暴露胶结充填体所需强度,被国内外众多矿山广泛应用[17-18]。ZHAO 等[19]基于土质斜坡稳定性 Morgenstern 法和微分切片法,并考虑了采场充填体的不均匀性,提出了充填体暴露面的安全性计算方法。曾照凯等[20]以安庆铜矿为背景,基于 Mitchell 解析法,提出了适合高阶段采场充填体理论强度计算的半经验半理论公式。LI 等[21-23]结合充填体应力分布特征及各向力学边界,考虑实际采场充填体分层和摩擦作用,对充填体强度需求理论方法进行了改进,提出的基于两种破坏面穿切情况的充填体强度计算公式(L-L 公式),系统解答了“高瘦”与“矮胖”两种采场类型的充填体强度。LIU 等[24]在研究充填体强度时,考虑二步骤矿柱开采阶段,一步骤矿房采场内充填体单侧揭露时,采场充填体承受线性分布侧推力的工况[25],但仅针对“高瘦”采场类型,其研究成果在“矮胖”采场中的应用有待进一步研究。

为此,本文基于 L-L 公式,通过正交试验计算某铜矿在不同采场结构参数下的充填体理论强度值,并对预测结果进行多元非线性回归分析,最终构建了不同结构参数下,一步骤采场和二步骤采场充填体强度预测模型。研究结果可为充填体理论强度预测及采场结构参数优化提供参考。

1 强度理论解析方法

1.1 L-L 强度解析法

MITCHELL 等[16]率先提出了三维楔形体滑动模型,用于计算单侧暴露时的胶结充填体理论强度,模型如图 1 所示,解析方程见式(1)。

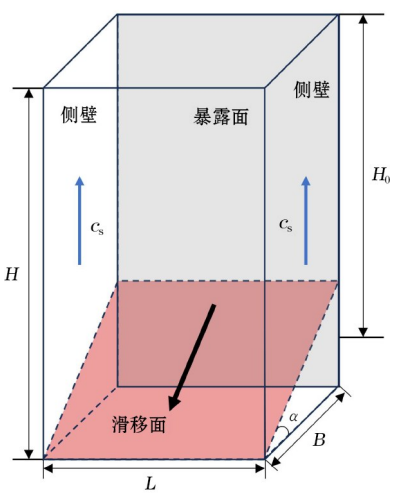


图 1 Mitchell 法充填体强度解析模型

Fig.1 Analytical model of filling body strength of Mitchell method

$$\sigma_c=\frac{1}{2M}\cdot\frac{\gamma L(F_s\tan\alpha-\tan\varphi)\left[H-\frac{B\tan\alpha}{2}\right]\sin2\alpha}{L\tan\alpha+r_s(F_s\tan\alpha-\tan\varphi)\left[H-\frac{B\tan\alpha}{2}\right]\sin2\alpha} \tag{1}$$

式中:σ_c为充填体单轴抗压强度,kPa;F_s 是单侧揭露充填体安全系数;L 为充填体单侧暴露面长度(采

场长度)，m；B 为采场充填体宽度(采场宽度)，m；H 为充填体单侧暴露面高度(采场高度)，m；γ 为充填体容重，kN/m³；M 为充填体黏聚力 c 与单轴抗压强度 σ_c 的比值，$M=c/\sigma_c$；α 为滑动面与水平面夹角，$\alpha=45°+\varphi/2$；φ 为充填体内摩擦角，(°)；r_s 为充填体与侧壁围岩接触面的黏聚力 c_s 与充填体黏聚力 c 的比值，$r_s=c_s/c$。

假设 $M=0.5$，$F_s=1$，$\varphi=0$，$r_s=1$，$H\gg B$，则简化后的 Mitchell 公式为：

$$\sigma_c=\frac{\gamma H}{1+\frac{H}{L}} \tag{2}$$

假设 $F_s\neq1$，则得到简化后的 Mitchell 公式为：

$$\sigma_c=\frac{\gamma H}{\frac{1}{F_s}+\frac{H}{L}} \tag{3}$$

虽然 Mitchell 解析法在充填体强度计算中得到了广泛引用，但 Mitchell 解析法仅考虑了高宽比较大的采场，并不完全适用于矮宽型或者狭长型采场。一般假设 $c_s=c$，但已有研究发现 $c_s<c$，导致解析解偏小。此外，Mitchell 解析法忽略了充填体顶部载荷及侧壁摩擦剪切，同样导致解析解偏小。

为了保证充填体理论强度值的合理性，LI 等[23]在 Mitchell 解析法的基础上进行了改进，分别构建了“高窄型”和“狭长型”采场的 L-L 强度解析模型，如图 2 所示。

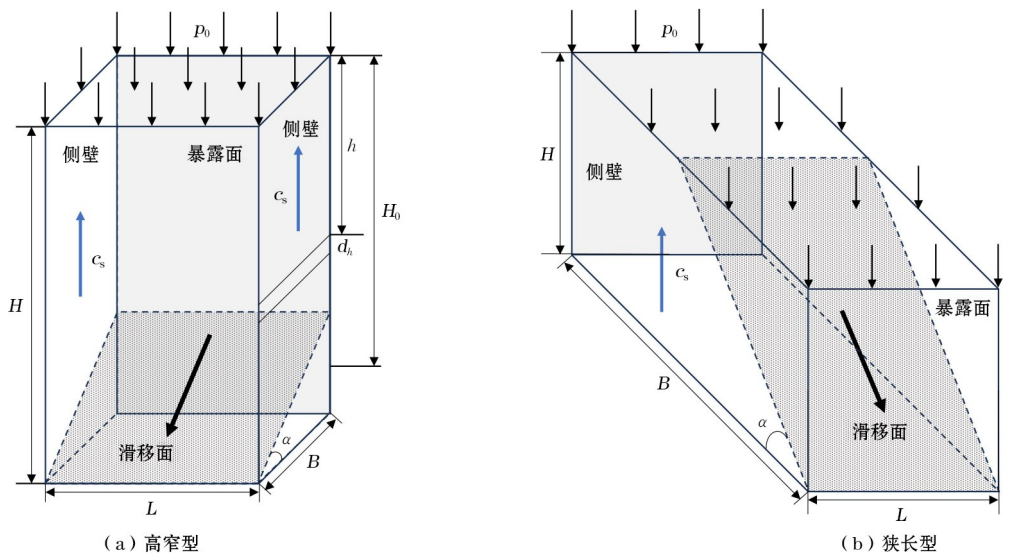


图 2　改进的充填体强度解析模型

Fig.2　Improved analytical models of filling body strength

(1)“高窄型”采场。

适用于高宽比较大的采场($H/B>\tan\alpha$)，此时，充填体滑移破坏面与后壁穿切(见图 2(a))，解析公式见式(4)和式(5)。

$$c=\frac{(p_0+\gamma H_0)/2}{[(F_s-\tan\varphi)\sin2\alpha]^{-1}+r_s H_0/L} \tag{4}$$

$$\sigma_c=2c\tan(45°+\varphi/2) \tag{5}$$

式中：p_0 为充填体顶板均布载荷，kPa；H_0 为滑动楔形体等效高度，$H_0=H-(B\tan\varphi)/2$。

(2)“狭长型”采场。

适用于高宽比较小的采场($H/B<\tan\alpha$)，此时，充填体滑移破坏面与顶壁穿切，解析公式见式(6)和式(7)。

$$c=\frac{(p_0+\gamma H)/2}{2[(F_s-\tan\varphi/\tan\alpha)\sin2\alpha]^{-1}+r_s H/L} \tag{6}$$

$$\sigma_c=2c\tan(45°+\varphi/2) \tag{7}$$

1.2　理论解析参数

1.2.1　充填体物理参数

以赞比亚某铜矿为工程背景，该铜矿采用全尾砂膏体充填，灰砂比为 1∶12，膏体质量浓度为 72%。基于室内充填体理化性能试验，得到膏体充填体物理参数及解析法相关参数见表 1。

表 1　充填体物理参数及解析法相关参数

Table 1　Physical parameters of filling body and related parameters of analytical method

内摩擦角 φ/(°)	容重 γ/(kN/m³)	F_s	r_s
19.2	18.6	1.2	0.5

1.2.2　充填体顶板均布载荷 p_0

采用冒落拱理论计算充填体顶板均布载荷，冒

落拱理论认为充填体只与一定范围内的围岩发生力学作用。因此,本文按照围岩滑移角划分侧壁围岩与充填体作用范围,顶部按自然平衡拱划定岩体与充填体力学作用区域。即充填体侧帮承受来自移动角范围内的侧向压力,顶部承受冒落拱内的竖向压力,围岩压力拱示意如图 3 所示。

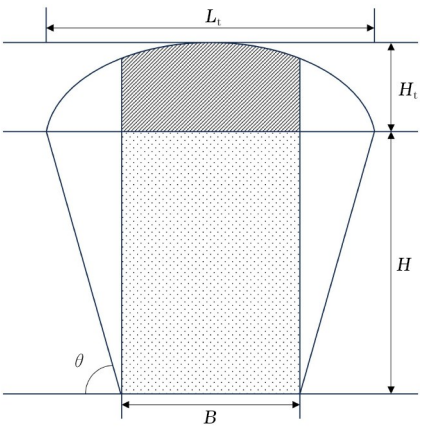


图 3 围岩压力拱示意

Fig.3 Schematic diagram of surrounding rock pressure arch

假设矿体上下盘围岩内摩擦角为 φ_t,$\varphi_t=43.7°$,则上下盘滑移角为 $\theta=45°+\varphi_t/2$。

顶板围岩自然平衡拱的跨度 L_t 为:

$$L_t=B+2H\cot\theta \tag{8}$$

冒落拱高度 H_t 为:

$$H_t=\frac{L_t}{2f}=\frac{\frac{B}{2}+H\cot\theta}{f} \tag{9}$$

式中,f 为顶板围岩普氏系数,$f=12$。

充填体顶部的载荷近似于矩形围岩的重力,即顶部载荷 p_0 的计算公式为:

$$p_0=\gamma_t H_t=\gamma_t\left(\frac{\frac{B}{2}+H\cot\theta}{f}\right) \tag{10}$$

式中,γ_t 为围岩容重,$\gamma_t=2.82\ \mathrm{t/m^3}$。

1.3 正交试验设计

该铜矿根据矿体厚度分别采用房柱充填法(6 m 以下)、分层进路充填法(6～10 m)、预控顶下向中深孔空场嗣后充填法(>12 m)和预控顶上向中深孔空场嗣后充填法(>20 m)。采用两步骤回采,回采过程中遵循“隔一采一”原则。当一步骤采场完成回采与充填后,在一步骤采场两侧回采二步骤采场,揭露一步骤采场内充填体的侧壁,采场暴露面为沿采场走向的长方形(见图 4(a))。二步骤采场回采充填结束后,充填体基本不再被揭露。但回采盘区间柱资源时,部分矿柱采场揭露二步骤采场前壁,采场暴露面垂直采场走向(见图 4(b)。

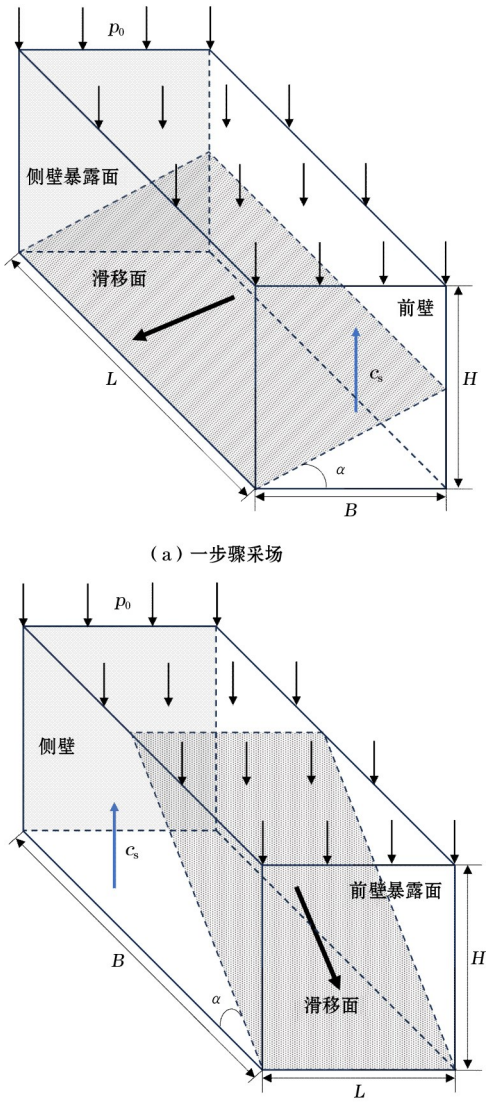


图 4 充填体暴露面

Fig.4 Exposed surface of filling body

为全面分析该铜矿不同采场结构参数条件下的充填体理论强度值,设计了 3 因素 4 水平正交试验,以一步骤采场和二步骤采场充填体抗压强度理论值为指标,采场结构参数及影响水平见表 2。

表 2 正交试验影响因素及水平

Table 2 Influencing factors and levels of orthogonal test

采场类型	因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
一步骤采场	采场长度 L/m	40.0	80.0	120.0	160.0
	采场宽度 B/m	5.0	7.5	10.0	12.5
	采场高度 H/m	5.0	15.0	25.0	35.0
二步骤采场	采场长度 L/m	40.0	80.0	120.0	160.0
	采场宽度 B/m	5.0	7.5	10.0	12.5
	采场高度 H/m	5.0	15.0	25.0	35.0

一步骤充填体和二步骤充填体正交试验设计见表 3 和表 4。

表 3 一步骤采场结构参数正交试验设计

Table 3 Orthogonal test design of structural parameters of one-step stope

组别	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m
G01	40	5.0	5
G02	40	7.5	15
G03	40	10.0	25
G04	40	12.5	35
G05	80	5.0	15
G06	80	7.5	5
G07	80	10.0	35
G08	80	12.5	25
G09	120	5.0	25
G10	120	7.5	35
G11	120	10.0	5
G12	120	12.5	15
G13	160	5.0	35
G14	160	7.5	25
G15	160	10.0	15
G16	160	12.5	5

表 4 二步骤采场结构参数正交试验设计

Table 4 Orthogonal test design of structural parameters of two-step stope

组别	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m
H01	40	5.0	5
H02	80	5.0	15
H03	120	5.0	25
H04	160	5.0	35
H05	40	7.5	15
H06	80	7.5	5
H07	120	7.5	35
H08	160	7.5	25
H09	40	10.0	25
H10	80	10.0	35
H11	120	10.0	5
H12	160	10.0	15
H13	40	12.5	35
H14	80	12.5	25
H15	120	12.5	15
H16	160	12.5	5

2 充填体理论强度解析结果及分析

2.1 充填体强度解析结果

根据 H/B 与 tanα 的关系,一步骤采场正交试验组别 G01、G06、G11、G12、G15、G16 中,H/B 均小于 tanα,充填体的理论强度值根据式(6)和式(7)计算;其余各组 H/B 均大于 tanα,充填体的理论强度值根据式(4)和式(5)计算。二步骤采场中,所有组别 H/L 均小于 tanα,理论强度值均根据式(6)和式(7)计算。将理论解析参数及采场结构参数代入对应解析方程,得到不同采场结构参数的充填体强度解析解,见表 5 和表 6。

表 5 一步骤采场充填体强度理论解析结果

Table 5 Theoretical analysis results of filling body strength in one-step stope

组别	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m	H/B 与 tanα 的关系	解析解
G02	40	7.5	15	$H/B>\tan\alpha$	0.40
G03	40	10.0	25		0.67
G04	40	12.5	35		0.89
G05	80	5.0	15		0.51
G07	80	10.0	35		1.10
G08	80	12.5	25		0.67
G09	120	5.0	25		0.94
G10	120	7.5	35		1.25
G13	160	5.0	35		1.37
G14	160	7.5	25		0.88
G01	40	5.0	5	$H/B<\tan\alpha$	0.14
G06	80	7.5	5		0.15
G11	120	10.0	5		0.16
G12	120	12.5	15		0.42
G15	160	10.0	15		0.41
G16	160	12.5	5		0.17

表 6 二步骤采场充填体强度理论解析结果

Table 6 Theoretical analysis results of filling body strength in two-step stope

组别	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m	H/L 与 tanα 的关系	解析解
H01	40	5.0	5	$H/L<\tan\alpha$	0.11
H02	80	5.0	15		0.20
H03	120	5.0	25		0.25
H04	160	5.0	35		0.27
H05	40	7.5	15		0.25
H06	80	7.5	5		0.13
H07	120	7.5	35		0.36
H08	160	7.5	25		0.31
H09	40	10.0	25		0.37
H10	80	10.0	35		0.43
H11	120	10.0	5		0.14
H12	160	10.0	15		0.28
H13	40	12.5	35		0.49
H14	80	12.5	25		0.41
H15	120	12.5	15		0.31
H16	160	12.5	5		0.15

为推荐更安全、经济的采场结构参数,对正交试验结果进行极差分析,研究采场结构参数对充填体强度的影响排序。

2.2 正交试验极差分析

通过极差法分析正交试验结果,不仅可以明晰充填体理论强度随采场结构参数的变化趋势,还可以分析试验范围内,采场结构参数对充填体理论强度的影响排序。基于此,可以得到最优的采场结构

参数及充填体理论强度。

极差分析结果见表 7。其中 $K_i(i=1,2,3,4)$ 代表同一因素同一水平的指标值之和。$k_i(i=1,2,3,4)$代表同一因素同一水平的指标值之和的平均值;R 为极差,$R=k_{max}-k_{min}$。

表 7 极差分析结果

Table 7 Range analysis results

项	一步骤采场			二步骤采场		
	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m
K_1	2.10	2.96	0.62	1.22	0.83	0.53
K_2	2.43	2.68	1.74	1.17	1.05	1.04
K_3	2.77	2.34	3.16	1.06	1.22	2.91
K_4	2.83	2.15	4.61	1.01	1.36	6.03
k_1	0.53	0.74	0.16	0.31	0.21	0.13
k_2	0.61	0.67	0.44	0.29	0.26	0.26
k_3	0.69	0.59	0.79	0.27	0.31	0.73
k_4	0.71	0.54	1.15	0.25	0.34	1.51
R	0.18	0.20	0.99	0.06	0.13	1.38
影响权重排序	采场高度>采场宽度>采场长度			采场高度>采场宽度>采场长度		

由表 7 可知,一步骤采场中,采场高度极差值最大,为 0.99;采场宽度极差值次之,为 0.20;采场长度极差值最小,为 0.18。二步骤采场中,采场高度极差值最大,为 1.38;采场宽度极差值次之,为 0.13;采场长度极差值最小,为 0.06。因此,无论是一步骤采场还是二步骤采场,采场结构参数影响采场充填体理论强度值的影响权重排序为:采场高度>采场宽度(跨度)>采场长度。建议在回采过程中要严格控制采场空顶高度,避免发生两帮超挖现象。

2.3 充填体强度回归预测模型

利用 SPSS 软件对正交试验结果进行多元非线性回归分析,采用三元幂函数乘积模型构建充填体强度预测模型,见式(11),相关系数取值见表 8。R^2 均大于 0.99,表明预测模型拟合性较高。

$$F=a\times L^b\times B^c\times H^d \tag{11}$$

式中:F 为充填体强度理论值;a,b,c,d 均为回归系数。

表 8 充填体强度预测模型相关系数

Table 8 Correlation coefficient of strength prediction model of filling body

采场	a	b	c	d	R^2
一步骤采场	0.021	0.139	−0.256	1.098	0.996
二步骤采场	0.023	0.530	−0.041	0.528	0.993

3 采场结构参数反演优化

3.1 采场结构参数影响规律

根据表 7 极差分析结果,一步骤采场和二步骤采场中各影响因素对充填体强度的影响规律如图 5 和图 6 所示。

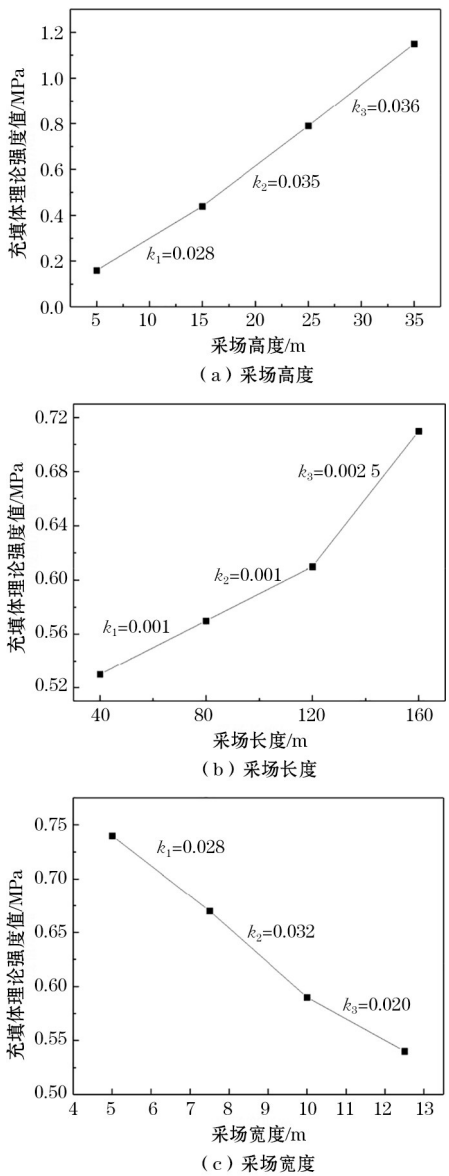
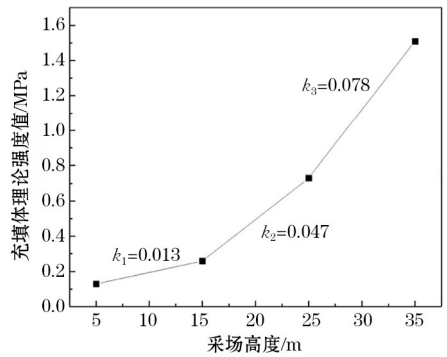


图 5 一步骤采场结构参数与充填体理论强度值的关系

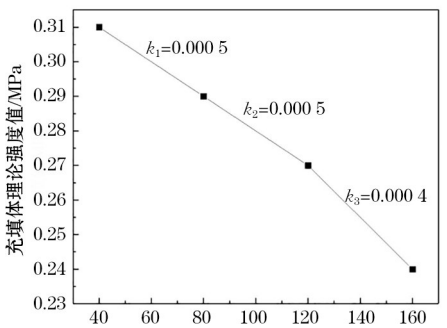
Fig.5 Relationship between stope structural parameters of one-step stope and theoretical strength value of filling body

由图 5 可知,采场充填体理论强度值与一步骤采场的高度和长度呈正相关,即采场高度和采场长度越大,所需的充填体理论强度值也越大;与一步骤采场的采场宽度呈负相关,即所需的充填体理论强

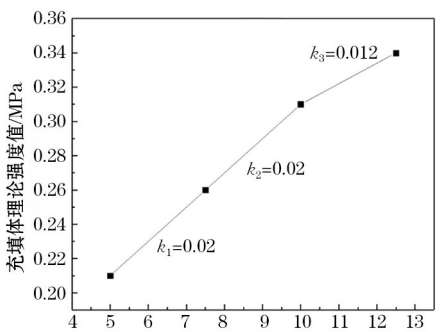
度随着采场跨度的减小而增大。由图 6 可知，采场充填体理论强度值与二步骤采场的高度和宽度呈正相关，与采场长度呈负相关。



（a）采场高度



（b）采场长度



（c）采场宽度

图 6　二步骤采场结构参数与充填体理论强度值的关系

Fig.6　Relationship between stope structural parameters of two-step stope and theoretical strength value of filling body

3.2　采场结构参数优化

目前，该铜矿针对不同结构参数的采场，采用统一的充填体强度设计标准：一步骤采场充填体强度设计为 0.8 MPa，二步骤采场充填体强度设计为 0.5 MPa。经过多年工业应用验证，充填站生产系统可保障充填体质量、满足制备需求。然而，统一强度设计方案未考虑不同采场结构参数的差异性，尺寸较小的采场存在充填体强度盈余情况；而尺寸较大或因回采作业不规范引发超挖现象的大型采场，存在充填体强度不足的情况，在爆破开采扰动下，极易发生充填体失稳破坏。为解决采场结构参数与充填体强度不匹配的问题，本文基于充填体强度预测模型及设计标准，开展采场结构参数优化研究。

3.2.1　采场高度

由图 5(a)和图 6(a)可知，当采场高度＞25 m 时，一步骤采场充填体理论强度值基本大于设计强度值 0.8 MPa，二步骤理论强度值均大于设计强度值 0.5 MPa，此时，需要提高灰砂比和胶凝材料掺量来增强充填体强度。因此，为达到降低充填成本的目的，推荐采场高度为 5～25 m。

3.2.2　采场长度

采场长度对充填体强度的影响较小，理论强度值均小于设计强度。同样选择理论强度值变化波动较小的阶段作为最优采场长度，由图 5(b)和图 6(b)可知，采场长度为 40～120 m 时，理论强度值变化较小。同时，考虑到该铜矿矿体厚大、倾角较缓的矿体赋存条件，采场长度基本大于 80 m。因此，推荐采场长度为 80～120 m。

3.2.3　采场宽度

由图 5(c)和图 6(c)可知，一步骤采场的采场宽度与所需理论强度值呈负相关，二步骤采场的采场宽度与所需理论强度值呈正相关。不同采场宽度的充填体理论强度均小于设计强度，为提供更具工程适用性的参数选择方案，优先选取充填体强度随采场宽度变化波动幅度最小的范围。因此，推荐采场宽度为 9～12.5 m。

3.3　推荐参数合理性验证

综上所述，推荐采场参数为：采场高度 5～25 m，采场宽度 9～12.5 m，采场长度 80～120 m。再次设计正交试验(见表 9)，基于充填体强度预测模型分别计算充填体强度值，并将预测强度值与设计强度值进行对比，验证推荐采场参数的合理性。

表 9　采场参数正交试验设计因素及水平

Table 9　The design factors and levels of orthogonal test of stope parameters

采场类型	因素	水平 1	水平 2	水平 3
一步骤采场	采场长度 L/m	40	80	120
	采场宽度 B/m	9	11	13
	采场高度 H/m	5	15	25
二步骤采场	采场长度 L/m	40	80	120
	采场宽度 B/m	9	11	13
	采场高度 H/m	5	15	25

注：为规范正交试验各水平值，采场跨度 12.5 m 四舍五入为 13 m。

充填体强度理论值验证结果分别见表 10 和表 11。由表 10 和表 11 可知,一步骤采场和二步骤采场充填体强度最大值分别为 0.75 MPa 和 0.40 MPa,均未超过设计强度标准,验证了推荐的采场结构参数的合理性。

表 10 一步骤采场推荐结构参数理论强度预测值

Table 10 Theoretical prediction values of filling body strength for recommended structural parameters of one-step stope

组别	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m	强度预测值/MPa
X01	40	9	5	0.12
X02	40	11	25	0.65
X03	40	13	15	0.36
X04	80	11	15	0.41
X05	80	13	5	0.12
X06	80	9	25	0.75
X07	120	13	25	0.73
X08	120	9	15	0.46
X09	120	11	5	0.13

表 11 二步骤采场推荐结构参数理论强度预测值

Table 11 Theoretical prediction values of filling body strength for recommended structural parameters of two-step stope

组别	采场长度 L/m	采场宽度 B/m	采场高度 H/m	强度预测值/MPa
Y01	40	9	5	0.15
Y02	80	9	25	0.34
Y03	120	9	15	0.25
Y04	80	11	15	0.29
Y05	120	11	5	0.16
Y06	40	11	25	0.39
Y07	120	13	25	0.40
Y08	40	13	15	0.32
Y09	80	13	5	0.18

4 结论

(1) 基于 L-L 强度解析法,借助正交试验及多元非线性回归分析,分别构建了某铜矿不同结构参数下,一步骤采场和二步骤采场的充填体强度预测模型。预测模型均为三元幂函数乘积模型,一步骤采场理论强度预测模型:$F_1 = 0.021L^{0.139}B^{-0.256}H^{1.098}$;二步骤采场理论强度预测模型:$F_2 = 0.023L^{0.530}B^{-0.0.41}H^{0.528}$。

(2) 对采场结构参数的正交试验结果进行极差分析,可以得出,采场结构参数影响充填体理论强度的影响权重排序为:采场高度>采场宽度>采场长度。因此,建议该铜矿在回采过程中要严格控制采场空顶高度,避免发生两帮超挖现象。

(3) 基于充填体强度预测模型及现有采矿工艺要求的充填体强度标准(一步骤采场充填强度设计为 0.8 MPa,二步骤采场充填强度设计为 0.5 MPa),得出推荐的采场结构参数为:采场高度 5~25 m,采场宽度 9~12.5 m,采场长度 80~120 m。将上述采场结构采数用于现场生产,严格按照优化标准管控采场施工规格,杜绝超挖、欠挖等违规施工现象。实践表明,优化后现场因采场结构参数不合理、充填体强度不足所引发的采场垮冒事故已基本杜绝,显著提升了矿山开采的安全性。后续可进一步开展充填体强度配比的优化试验研究,实现充填强度与制备的精细化管理。

参考文献(References):

[1] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J],煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12):4182-4200.

[2] 卢宏建,武晓军,武婕.考虑接触面特性与采充时序的胶结充填体稳定性评价[J].金属矿山,2023(4):1-7.
LU Hongjian, WU Xiaojun, WU Jie. Stability evaluation of cemented backfill based on interface characteristics and excavating-filling sequences[J]. Metal Mine, 2023(4):1-7.

[3] 吴爱祥,姜关照,王贻明.矿山新型充填胶凝材料概述与发展趋势[J].金属矿山,2018(3):1-6.
WU Aixiang, JIANG Guanzhao, WANG Yiming. Review and development trend of new type filling cementing materials in mines[J]. Metal Mine, 2018(3):1-6.

[4] 刘超军,柯丽华,姚团,等.肖家河磷矿碎石胶结充填体强度及变形破坏特征试验研究[J].中国矿业,2023,32(5):124-130+137.
LIU Chaojun, KE Lihua, YAO Nan, et al. Experimental study on strength and deformation failure characteristics of crushed stone cement filling in Xiaojiahe phosphate mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(5):124-130+137.

[5] 陈金刚,许文远,刘志双,等.超细全尾砂胶结充填体强度特性研究[J].中国矿业,2021,30(增刊 2):251-255.
CHEN Jingang, XU Wenyuan, LIU Zhishuang, et al. Study on strength characteristics of cemented backfill with superfine tailings[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(Suppl.2):251-255.

[6] 吴爱祥,沈慧明,姜立春,等.窄长型充填体的拱架效应及其对目标强度的影响[J].中国有色金属学报,2016,26(3):648-653.
WU Aixiang, SHEN Huiming, JIANG Lichun, et al. Arching effect of long-narrow cemented paste backfill body and its effect on target strength[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3):648-653.

[7] 白春红.基于SVM模型的充填体强度与采场稳定性需求智能匹配研究[J].中国矿业,2019,28(11):104-108.
BAI Chunhong. Research on intelligent matching of backfill strength and stope stability demand based on SVM mode[J]. China Mining Magazine,2019,28(11):104-108.

[8] BELEM T, MBONIMPA M. Minimum strength required for resisting to cyclic softening/failure of cemented paste backfill at early age [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Mine Safety Science and Engineering,2016:13-19.

[9] 周乐,许卫军,姚维,等.阶段嗣后充填体稳定性分析与采场结构参数优化[J].中国矿业,2019,28(10):138-141+179.
ZHOU Le, XU Weijun, YAO Wei, et al. Stability analysis of stage backfill and optimization of stope structural parameters[J]. China Mining Magazine,2019,28(10):138-141+179.

[10] 蔺港,孔令刚,詹良通,等.基于太沙基土拱效应考虑基质吸力影响的松动土压力计算模型[J].岩土力学,2015,36(7):2095-2104.
LIN Gang, KONG Linggang, ZHAN Liangtong, et al. An analytical model for loosening earth pressure considering matric suction based on Terzaghi soil arch effect[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(7):2095-2104.

[11] DUNCAN J M, WRIGHT S G. Soil strength and slope stability[M]. Hoboken:John Wiley & Sons,2005.

[12] 李天涛.基于能量耗散的强震岩体震裂损伤特性及其孕灾机理研究[D].成都:成都理工大学,2017.
LI Tiantao. Seisimic damage characteristics of rock based on energy dissipation and disaster-pregnant mechanism of strong earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2017.

[13] 李艳,赵均海,张常光.非饱和土条形地基太沙基极限承载力三剪统一解[J].岩土力学,2015,36(11):3128-3134.
LI Yan, ZHAO Junhai, ZHANG Changguang. Triple-shear unified solution of Terzaghi's ultimate bearing capacity for unsaturated soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(11):3128-3134.

[14] 卢宏建,武晓军,蔡晓盛,等.胶结充填体-围岩组合体剪切强度与破坏特征[J].金属矿山,2023(5):97-103.
LU Hongjian, WU Xiaojun, CAI Xiaosheng, et al. Shear strength and failure characteristics of cemented backfill-rock combination[J]. Metal Mine,2023(5):97-103.

[15] LIU Zhixiang, LAN Ming, XIAO Siyou, et al. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(3):954-959.

[16] MITCHELL R J, OLSEN R S, SMITH J D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill[J]. Canadian Geotechnical Journal,1982,19(1):14-28.

[17] DIRIGE A P E, MCNEARNY R L, THOMPSON D S. The effect of stope inclination and wall rock roughness on backfill free face stability[C]//Proceedings of the 3rd Canada-US Rock Mechanics Symposium. Toronto: CRC Press, 2009:4152.

[18] ZOU S, NADARAJAH N. Optimizing backfill design for ground support and cost saving [C]//the 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Alexandria American Rock Mechanics Association,2006:7-21.

[19] ZHAO Xu, FOURIE A, QI Chongchong. An analytical solution for evaluating the safety of an exposed face in a paste backfill stope incorporating the arching phenomenon [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2019,26(10):1206-1216.

[20] 曾照凯,张义平,王永明.高阶段采场充填体强度及稳定性研究[J].金属矿山,2010(1):31-34.
ZENG Zhaokai, ZHANG Yiping, WANG Yongming. Research on the strength and stability on fill body of high-bench stope[J]. Metal Mine,2010(1):31-34.

[21] LI Li. Generalized solution for mining backfill design[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(3):04014006.

[22] LI Li. Analytical solution for determining the required strength of a side-exposed mine backfill containing a plug [J]. Canadian Geotechnical Journal,2014,51(5):508-519.

[23] LI Li, AUBETIN M. An improved method to assess the required strength of cemented backfill in underground stopes with an open face [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2014,24(4):549-558.

[24] LIU Guangsheng, LI Li, YANG Xiaocong, et al. Required strength estimation of a cemented backfill with the front wall exposed and back wall pressured [J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2018, 9(1): 1-20.