基于响应曲面的采场结构参数优化方法与敏感性分析*

甘德清[1,2,3,4],孟岐[1,2,3,4],刘志义[1,2,3,4],路燕泽[1,2,3,4,5]

(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
2.华北理工大学 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山市 063210;
3.华北理工大学 河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山市 063210;
4.华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北 唐山市 063210;
5.河北钢铁集团沙河中关铁矿有限公司, 河北 邢台市 054100)

摘要:为解决采场结构参数取值不合理导致的顶板失稳或生产能力不足等难题,以河北省某矿为背景,对采场结构参数进行优化,并对其参数敏感性进行了分析。首先,进行岩体质量调查,并采用具有稳定概率的拓展Mathews稳定图法初步确定了采场的宽度和长度区间。然后,利用FLAC3D数值模拟探究了采场顶板最大沉降量随结构参数变化的变形规律,结合响应面法构建了采场顶板沉降量预测模型,探明了影响采场顶板沉降的自身因素敏感性及其交互作用关系。最后,综合考虑生产安全与矿块大小,对采场进行了采场结构参数优化,并进行工业试验验证结果合理性。结果表明:该矿岩体整体评级为Ⅴ级,岩体质量很差;采场顶板沉降量对各参数敏感程度从高到低依次为采场宽度、采场长度、采场高度;该矿体最佳采场结构参数为宽12 m、长36 m、高60 m,采用该结构参数进行回采,采空区轮廓较为平整,能够保持稳定。研究结果可为选取合理的采场结构参数、正确协调采场安全与生产能力提供理论依据。

关键词:采场结构参数;敏感性分析;响应面法;Mathews稳定图法;数值模拟

中图分类号:TD325;TD852 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)03-0031-10

Optimization Method and Sensitivity Analysis of Stope Structure Parameters Based on Response Surface

GAN Deqing[1,2,3,4], *MENG Qi*[1,2,3,4], *LIU Zhiyi*[1,2,3,4], *LU Yanze*[1,2,3,4,5]

(1.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
2.Collaborative Innovation Center of Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
3.Green Intelligent Mining Technology Innovation Center of Hebei Province, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
4.Hebei Province Key Laboratory of Mining Development and Security Technology, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
5.Shahe Zhongguan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Xingtai, Hebei 054100, China)

Abstract: To solve the problem of roof instability or insufficient production capacity caused by unreasonable values of stope structure parameters, an iron ore mine in Hebei Province was selected as the background to optimize the stope structure parameters and analyze their sensitivity. Firstly, a rock mass quality investigation was conducted and the extended Mathews stability chart method with stable probability was used to preliminarily determine the width and length range of the stope. Then, FLAC3D numerical simulation was used to explore the deformation law of the maximum displacement of the stope roof with the variation of structure parameters. Combined with response surface method, a prediction model for the displacement of the stope roof was constructed, and the sensitivity of the single factor affecting the displacement of the stope roof and their

* **收稿日期**:2024-05-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204134);河北省中央引导地方科技专项项目(236Z4105G);河北省自然科学基金资助项目(E2021209127)
作者简介:甘德清(1962—),男,河北抚宁人,博士,教授,博士生导师,主要从事采矿工艺方面的教学与研究工作。E-mail:gdqheut@163.com
通信作者:刘志义(1987—),男,山西朔州人,博士,副教授,主要从事采矿工艺方面的教学与研究工作。E-mail:ncst-lzy@ncst.edu.cn

interaction relationship were explored. Finally, considering safety and block size, the stope structure parameters were optimized, and industrial experiments were conducted to verify the rationality of the results. The results indicate that the overall rating of the ore body is grade Ⅴ, and the rock mass quality is very poor. The sensitivity of the roof displacement of the stope to various parameters, from high to low, is as follows: stope width, stope length, and stope height. The optimal stope structure parameters for this ore body are a width of 12 m, a length of 36 m, and a height of 60 m. When using the structure parameters for recovery, the contour of the goaf is relatively flat and stable. The research results can provide theoretical basis for selecting reasonable stope structure parameters and correctly coordinating stope safety and production capacity.

Key words: Stope structure parameter, Sensitivity analysis, Response surface method, Mathews stability chart method, Numerical simulation

0 引言

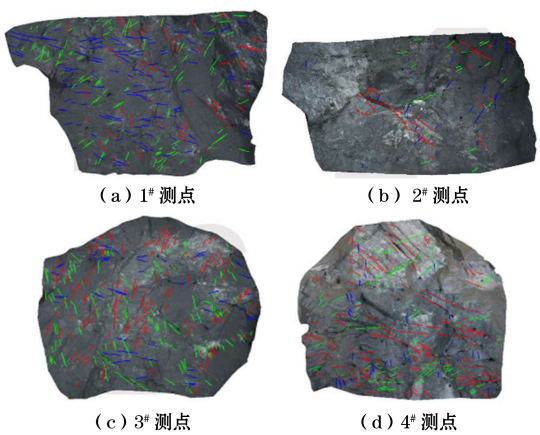
近年来,爆破技术与机械设备迅速发展,采场规模逐渐扩大[1-3],随之暴露的安全问题也逐渐增多,比较突出的是顶板冒落、垮塌现象,合理控制采场的结构参数是保证矿山安全高效开采的前提。采场结构参数是影响顶板安全的主要因素,采场结构参数选择过小时,掘进与切割循环次数增加,一次爆破量减小,出矿效率降低;采场结构参数选择过大时,采场工作面容易失稳,带来安全隐患,同时为处理工作面安全问题而采取的支护措施等也会导致生产能力降低。因此,提高生产能力需要考虑采场安全问题,确定合理的结构参数,尽可能提高单次作业效率。

针对采场结构参数的确定,许多学者开展了相应研究[4-10]。黄德镛等[11]通过正交试验设计了16种采场结构参数,基于FLAC3D进行了稳定性分析,并建立了综合评判模型,得到了最优采场结构参数。柴红等[12]以山东半岛某地下矿井为例,基于Mathews稳定图法确定了采场宽度范围,后利用FLAC3D数值模拟软件对采场参数取值进行了进一步分析,得到了采场最优宽度。刘钦等[13]利用数值模拟方法建立了采场结构参数优化目标函数与矿体水平厚度、矿柱截面尺寸和矿柱跨度等因素的神经网络模型,采用混沌优化方法,得出了不同开采技术条件下的采场最优结构参数。张国联等[14]通过室内相似模拟试验,得到了最优的采场结构参数。陈顺满等[15]基于响应面法和指标满意度法,研究了采场高度、矿柱直径、矿柱排距和矿柱间距对破碎围岩条件下矿柱最大拉应力、最大压应力和矿石回收率的影响规律,发现整体满意度随采场高度的增加而降低,随矿柱直径、矿柱间距和矿柱排距的增大呈现出先增大后减小的趋势。虽然上述学者通过数值计算和相似试验等实现了确定合理结构参数的目的,但对于采场稳定性对采场结构参数自身的敏感性研究较少。此外,响应面法已在充填体配比优化设计、地下硐室可靠性分析和采场结构参数优化中得到了广泛应用[16-19]。因此,本文以河北省某矿北区矿体为研究对象,采用数值模拟分析采场顶板沉降随采场长度、宽度、高度的变化规律,并采用响应曲面对沉降规律进行函数拟合,进而研究采场顶板沉降对各结构参数的敏感性特征。

1 岩体质量评价

1.1 岩体结构面信息获取

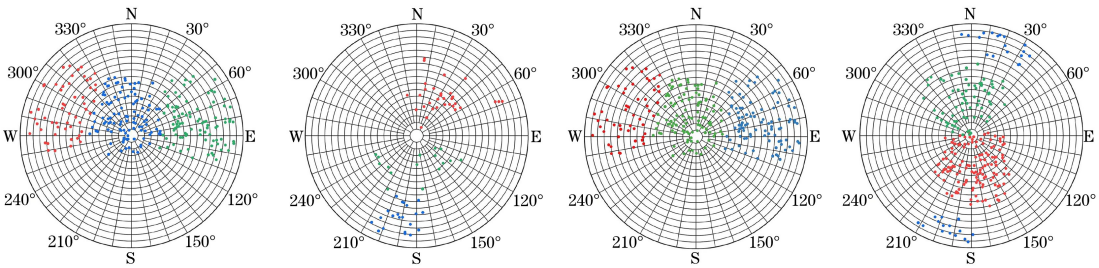
为获取该矿体整体稳定性情况,使用结构面数字识别系统ShapeMetriX 3D对不同区域典型的采场凿岩巷道暴露岩体进行结构面信息扫描,标号为1#～4#测点。利用三维重构技术建立岩体表面三维模型,得到各测点节理面空间分布情况,如图1所示。根据结构面的空间展布及分组情况,绘制各测点赤平极射投影,如图2所示。根据赤平极射投影图可以确定每组结构面的整体分布情况,各测点优势结构面产状信息见表1。



(a) 1#测点 (b) 2#测点 (c) 3#测点 (d) 4#测点

图1 各测点节理面空间分布

Fig.1 Spatial distribution of joint surface at each measuring point



(a) 1# 测点 (b) 2# 测点 (c) 3# 测点 (d) 4# 测点

图 2 各测点赤平极射投影

Fig.2 Polar projection of each measuring point

表 1 结构面参数

Table 1 Parameters of structural plane

测点	倾向/(°)	倾角/(°)	线密度/(条/m)	体密度/(条/m³)	节理
1#	112.20	60.70	2.325 2	8.82	很发育
2#	211.14	37.36	2.288 5	5.12	发育
3#	132.21	66.79	3.551 3	9.52	很发育
4#	353.48	23.62	4.458 6	9.21	很发育

1.2 岩体地质力学分类

根据地质力学分类标准,RMR 指标值及分类结果见表 2。评分值由高到低依次为:4# 测点、1# 测点、3# 测点、2# 测点,且各测点处岩体均属于Ⅴ级(岩体质量很差),表明该矿体整体稳定性较差。

表 2 RMR 指标及分级结果

Table 2 RMR indexes and grading results

测点	评分值	分级	岩体质量
1#	19.1	Ⅴ	很差
2#	15.9	Ⅴ	很差
3#	18.9	Ⅴ	很差
4#	19.8	Ⅴ	很差

2 基于拓展的 Mathews 稳定图法的采场结构参数确定

2.1 拓展的 Mathews 稳定图法

Mawdesley 通过引入基于极大似然估计的 Logit 模型,对 Mathews 稳定图法进行了拓展,拓展的 Mathews 稳定图法[20]由 2 个变量和 1 个指标组成,即岩体稳定性指数 N、水力半径 S 和稳定概率 $f(z)$,稳定-破坏概率可被 $f(z)$量化(例如,图 3 中绿色线表示该条线上的点所代表的采场有 60%的概率稳定,40%的概率会破坏,0%的概率会垮塌,颜色标识见电子版),大大降低了人为主观性,因而更适用于厚大矿体等矿体形态变化较小的采场参数初步设计与评价。本研究基于 Mawdesley 提出的 Logit 模型,依据式(1)、式(2)对稳定概率分别为 95%、90%、80%、70%、60%、50%、20%、5%的情况进行拟合,各拟合方程见表 3,拟合稳定图如图 3 所示。

$$z=2.960\ 3+0.792\ 8\ln N-1.442\ 7\ln S \quad (1)$$

$$f(z)=\frac{1}{1+e^{-z}} \quad (2)$$

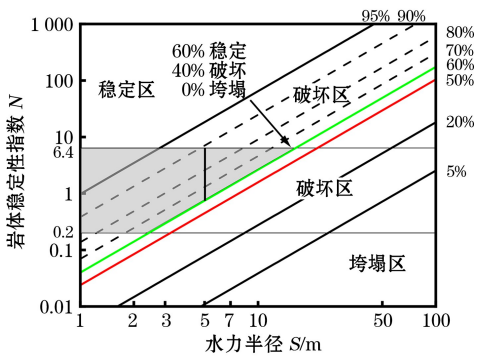


图 3 拓展的 Mathews 稳定图

Fig.3 Extended Mathews stability chart

表 3 稳定概率拟合方程

Table 3 Fitting equations for stability probability

稳定概率/%	拟合方程
95	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-0.020\ 0$
90	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-0.962\ 5$
80	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-1.985\ 4$
70	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-2.665\ 2$
60	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-3.222\ 5$
50	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-3.734\ 0$
20	$\ln N=1.819\ 752\ 77\ln S-7.448\ 0$
5	$\ln N=1.819\ 7527\ 7\ln S-5.482\ 6$

2.2 相关参数确定

2.2.1 稳定性指数 N

稳定性指数 N 的计算公式如下：

$$N=QABC \tag{3}$$

式中：Q 为岩体质量指数；A 为应力系数，由单轴抗压强度与诱导应力的比值确定，区间为 0.1～1；B 为节理产状调整系数，由采场面倾角与主要节理组的倾角之差确定，区间为 0.2～0.8；C 为设计采场暴露面方位修正系数，可以通过经验公式进行估算，$C=8-6\cos\alpha$，α 为暴露面与水平面的夹角。

根据 RMR 法和 Q 法的围岩分类等级岩体描述，该矿体对应 Q 法岩体等级为Ⅵ级，对应 Q 值区间为 1～4；单轴抗压强度与采场中线诱导应力比值大于 10，A 取值为 1；节理产状调整系数 B 由赤平投影（见图 2）可得，考虑矿体不同区域破碎程度不同，为满足大部分区域需要，本次计算取全部区间 0.2～0.8；该矿体为缓倾斜厚大矿体，暴露面为水平，C 取值为 2。

2.2.2 采场水力半径 S

采场水力半径 S 能够综合反映采场的形状和尺寸。在井下开采中，任何暴露面均可近似认为是一个长方形，即可以定义采场水力半径 S 为：

$$S=\frac{L\cdot w}{2(L+w)} \tag{4}$$

式中：w 为暴露面宽度，m；L 为暴露面长度，m。

2.3 不同结构参数采场顶板稳定性分析

将上述各参数取值代入式(3)，计算得到 N 的取值范围为 0.4～6.4。考虑采场顶板已采取了一定的支护措施，结合图 3 可知，为减小少部分岩体质量较好的矿体对采场稳定性造成错误判断，导致较差岩体采场失稳，本次以 0%垮塌为边界条件，采场水力半径取 2.4～5 m（即不考虑图 3 中部分三角阴影区域），则不同跨度的采场最大允许暴露长度随水力半径 S 的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可知，当以 0%垮塌为边界，采场宽度为 9～11 m 时，采场的稳定性由采场宽度主导，采场最大允许暴露长度取 75 m；当采场宽度分别为 12 m、13 m、14 m、15 m 时，采场最大允许暴露长度分别为 60 m、45 m、35 m、30 m；当采场宽度为 15～18 m 时，采场最大允许暴露长度变化不大，约为 22 m。

根据拓展的 Mathews 稳定图，当以 0%垮塌为边界时，初步选取采场宽度为 9～15 m，采场长度为 10～60 m。

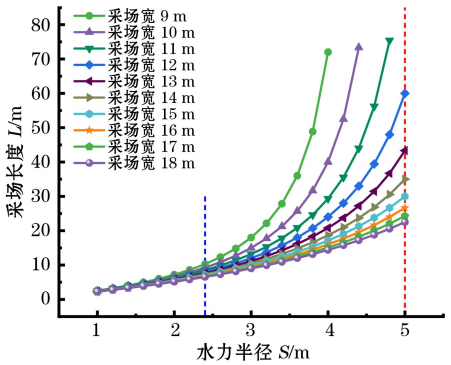


图 4 不同采场宽度下允许暴露长度与顶板水力半径的关系

Fig.4 Relationship between allowed exposure length and roof hydraulic radius under different mining widths

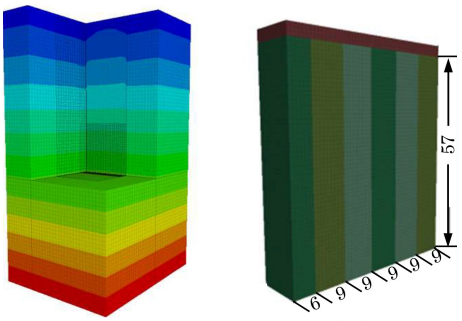
3 基于数值模拟与响应面法的顶板沉降量预测与敏感性分析

本研究基于单矿房开挖，对采场结构参数的敏感性进行分析。由岩体稳定性位移判据可知，当岩体沉降量为 20～50 mm 时，岩体可以保持稳定；当岩体沉降量为 50～100 mm 时，岩体可能出现不稳定的情况。考虑实际开挖过程中，其他矿房的开挖活动及其他复杂环境会对该矿房产生影响，本次位移判据统一设定为 50 mm。当沉降量远小于 50 mm 时，采场结构参数通常较小，生产能力低，可能无法满足产能需求；当沉降量远大于 50 mm 时，实际开挖中可能会出现失稳现象，存在一定的安全隐患。定义顶板等效位移 $ED=|50-D_z|$，其中，D_z 为顶板竖向位移量，ED 值越小，表明采场结构参数实际应用效果越好，依据 ED 值进一步确定采场高度区间。

3.1 数值模拟分析

3.1.1 数值模型

选用 FLAC3D 内置建模，该矿山地质结构属块状结构，采用标准正方形网格，网格渐变稀疏。模型尺寸为长 140 m，宽 180 m，高 300 m。模型底面和侧面施加法向位移约束，顶部施加均布荷载模拟上覆岩层自重应力，数值模型示意如图 5 所示。该矿体为缓倾斜极厚矿体且该盘区整体位于矿体中，近盘区围岩均为矿体，因此，模型整体按矿体参数赋值。结合前期力学试验和地应力测量数据对数值模型进行力学参数反演，根据修正后的 Hoek-Brown 强度准则计算矿体力学参数，见表 4。



(a) 数值模型　　(b) 采矿工艺示意(单位:m)

图 5　数值模型示意

Fig.5　Schematics of numerical model

表 4　矿体力学参数

Table 4　Mechanic parameters of ore body

密度/(kg/m³)	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
3 900	4.26	4.31	50.7	19.7	0.22

3.1.2　采场高度区间确定

为确定采场高度,进行开挖模拟数值计算。当采场长度和宽度均取中间值时,不同采场高度下开挖顶板等效位移如图 6 所示。随着采场高度增大,*ED* 值呈先减小后增大最后趋于平缓的趋势,*ED* 值最低点位于采场高度为 15～45 m 时。当采场长度、宽度一定时,采场高度由 45 m 增加至 60 m,由于"采场形状"改变,应力集中由顶板转移至侧帮,顶板沉降量变化很小。因此,确定采场高度区间为 15～45 m。

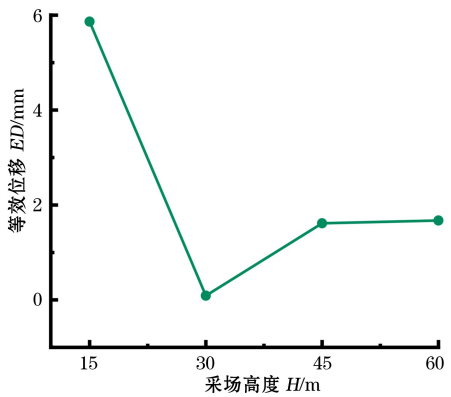


图 6　*ED* 值随采场高度变化曲线

Fig.6　Curve of *ED* variation with mining height

3.1.3　数值模拟方案及结果

按照采矿工艺挖掘凿岩巷道、切割巷道、切割天井等,并依照矿山实际爆破进尺(9 m)进行开采模拟,如图 5(b)所示。前期模拟测试结果显示,采场顶板沉降量大于侧帮位移量。因此,本研究通过改变采场结构参数,重点对顶板最大沉降量进行研究,并设计正交试验,试验方案和计算结果见表 5。

表 5　正交试验设计及数值模拟结果

Table 5　Schemes of orthogonal test and results of numerical simulation

编号	采场宽度 W/m	采场高度 H/m	采场长度 L/m	顶板沉降量/mm	ED/mm
1	9	15	36	35.885	14.115
2	9	30	18	32.978	17.022
3	9	45	36	40.779	9.221
4	9	30	54	48.413	1.587
5	12	30	36	49.911	0.089
6	12	45	54	57.903	7.903
7	12	15	54	47.072	2.928
8	12	15	18	38.522	11.478
9	12	45	18	38.520	11.480
10	15	30	54	61.732	11.732
11	15	45	36	55.574	5.574
12	15	30	18	46.333	3.667
13	15	15	36	51.719	1.719

3.2　顶板沉降量预测模型

3.2.1　预测模型构建

为减少数值计算量,构建顶板沉降量预测模型,以预测区间内其余参数对应的顶板沉降量。本研究采用响应面法构建顶板变形量预测模型,响应面法能够解决复杂非线性优化问题,其基本原理是通过一系列确定性试验,采用多项式函数,通过合理地选取试样点及迭代方式,保证多项式函数能够在稳定概率上收敛于实际稳定概率,其实质是用近似函数效果代替实际函数效果[15]。

根据顶板沉降量数值模拟结果,采用响应面法构建的基于采场长度、宽度、高度对顶板最大沉降量预测的响应函数见式(5)。

$$D = -0.004\,954L^2 - 0.132\,43H^2 - 0.124\,444W^2 + 0.010\,031HL - 0.000\,167WL - 0.005\,772WH + 0.465\,854L + 0.665\,917H + 5.553\,46W - 25.724\,75 \tag{5}$$

3.2.2　预测模型相关性分析

通过式(6)计算响应面拟合相关系数 R^2 为 0.996 4,不同结构参数中顶板沉降模拟值与预测值对比如图 7 所示。预测点与实际点均分布于 $y=x$ 附近,表明预测模型有良好的拟合度,能够满足实际工程预测的需求。

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i^* - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{6}$$

式中,S_R 为回归平方和;S_T 为总离差平方和;y_i^*、y_i

分别为第 i 组试验结果实测值、预测值;$\bar{y}$ 为所有试验结果平均值;n 为样本容量,即试验数量。

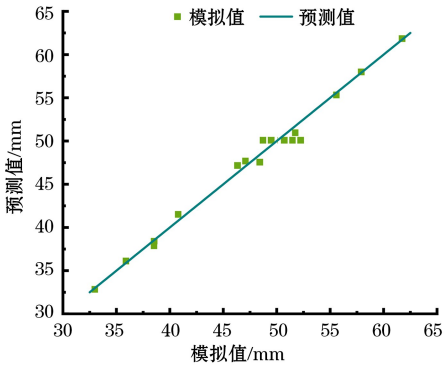


图 7 顶板沉降量预测值与模拟值对比

Fig.7 Comparison between predicted and simulated displacement of roof

P 值用于衡量最终考察值的显著程度,当 $P<0.05$ 时,为显著;当 $P<0.000\ 1$ 时,为非常显著。对响应面拟合方程进行方差分析,结果见表 6。整体模型 P 值小于 0.000 1,表明回归模型非常显著,预测结果贴近实际。

表 6 预测模型相关性指标

Table 6 Correlation indicators of the prediction model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	978.16	9	108.68	214.43	<0.000 1
W	410.45	1	410.45	809.8	<0.000 1
H	47.91	1	47.91	94.53	<0.000 1
L	431.7	1	431.7	851.7	<0.000 1
WH	0.269 9	1	0.269 9	0.532 5	0.489 3
WL	0.000 3	1	0.000 3	0.000 6	0.980 5
HL	29.34	1	29.34	57.88	0.000 1
W^2	5.28	1	5.28	10.42	0.014 5
H^2	37.38	1	37.38	73.76	<0.000 1
L^2	10.85	1	10.85	21.40	0.002 4
残差	3.55	7	0.506 9	—	—
失拟项	3.55	4	1.18	—	—
纯误差	0.000	4	0.000	—	—

3.3 采场结构参数敏感性分析

3.3.1 采场顶板沉降量单因素分析

由表 6 可知,预测模型中顶板沉降量对采场长度、宽度、高度均具有非常显著的相关性,其他因素为中值固定不变时,对各单因素进行分析,结果如图 8 所示。

图 8(a)为顶板沉降量随采场宽度的变化曲线。由图 8(a)可知,顶板沉降量与采场宽度呈正相关关系,且随采场宽度增大,顶板沉降增量几乎保持不变。图 8(b)为顶板沉降量随采场长度的变化曲线,与采场宽度类似,顶板沉降量与采场长度呈正相关关系,且随采场长度增大,顶板沉降增量变化与宽度相同,几乎保持不变。图 8(c)为顶板沉降随采场高度变化曲线,可以看出,顶板沉降量随采场高度增大呈先增大后减小的趋势。

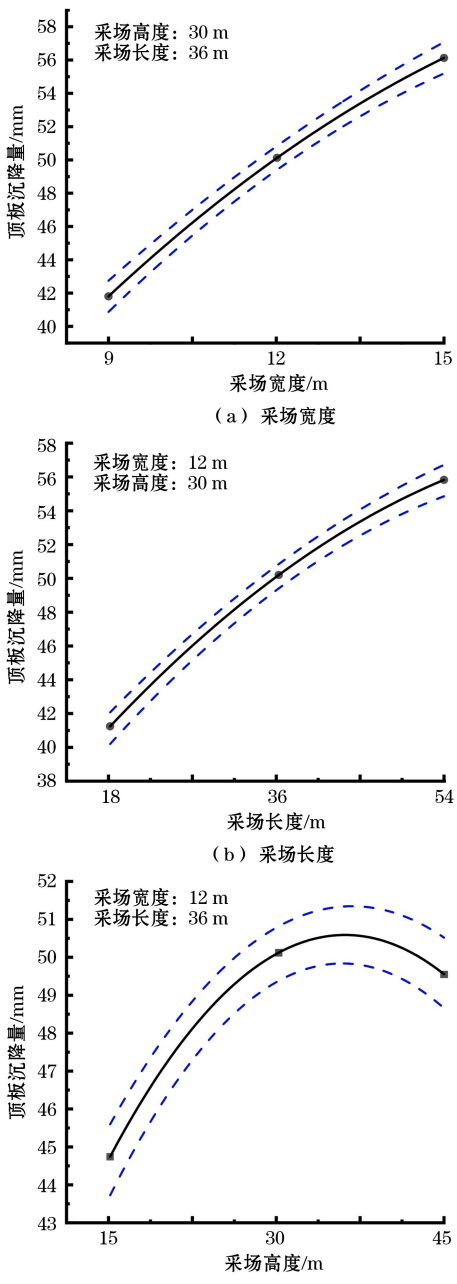


图 8 顶板沉降量单因素分析

Fig.8 Single factor analysis of roof displacement

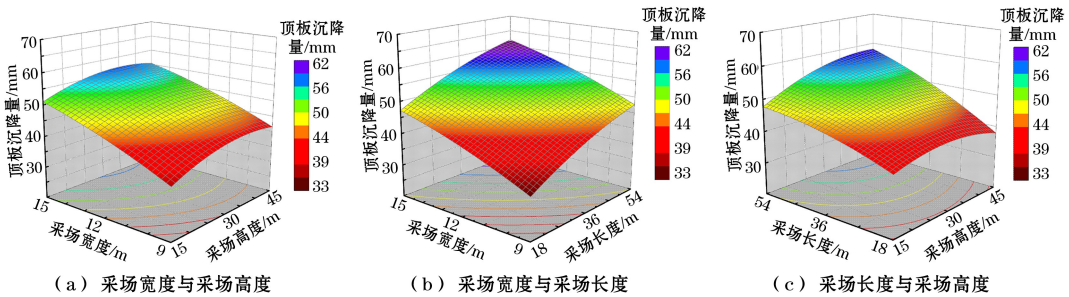
3.3.2 采场顶板沉降量双因素交互作用分析

图 9(a)、图 10(a)为采场长度为 36 m 时,采场宽度与采场高度对顶板沉降量的交互影响。响应面

投影线集中在采场宽度、高度较小的区域,表明该范围内顶板沉降量的变化较为显著。等高线为开口向右的抛物线,表明随着采场宽度增加,顶板沉降量也随之增加。采场高度由 15 m 增加至 30 m 时,顶板沉降量显著增加,采场高度与采场宽度之间存在一定的交互作用。此时,采场顶板沉降量受采场高度、宽度交互作用的共同影响,且对采场宽度变化更为敏感。当采场高度由 30 m 增加至 60 m 时,顶板沉降量变化不明显。此时,顶板沉降量由采场宽度主导,对采场高度变化不再敏感。同时,当采场高度超过 40 m 时,由于采场形状系数变化较大,部分应力转移至采场两帮,顶板沉降量出现下降趋势。以上结果表明,顶板沉降量对采场宽度的敏感程度高于对采场高度的敏感程度,且随着采场高度的增加,顶板沉降量对于采场高度的敏感程度逐渐降低。

图 9(b)、图 10(b)为采场高度为 30 m 时,采场宽度和采场长度对顶板沉降量的交互影响。响应面投影线在两轴的分布较均匀,等高线为向右上开口的圆弧,说明采场宽度与采场长度对顶板沉降量的影响相近,且采场长度越长、宽度越宽,顶板沉降量越大。由于采场的长度区间跨度远大于采场宽度区间跨度,因此顶板最大沉降量对采场宽度变化更为敏感。

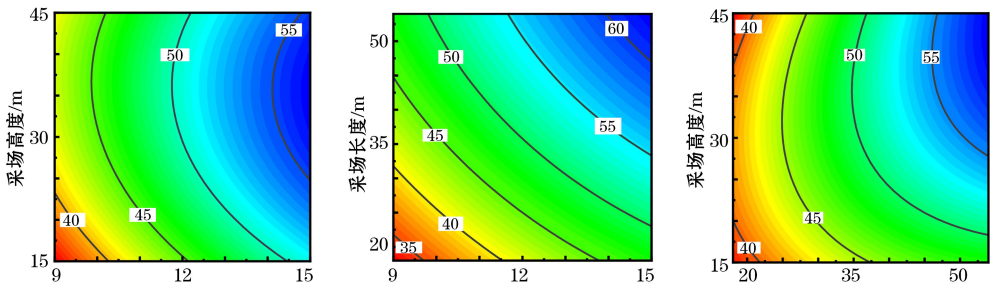
图 9(c)、图 10(c)为采场宽度为 12 m 时,采场长度与采场高度对顶板最大量的交互影响。响应面投影线集中在采场长度一侧,结合等高线图可知:在采场宽度为中值时,顶板沉降对采场高度的敏感程度呈上升趋势,对采场长度的敏感程度呈下降趋势。当采场长度小于 36 m 时,采场长度对顶板沉降的影响起到决定性作用,当采场长度超过 36 m 时,顶板沉降对采场高度的敏感程度逐渐增加,直至超过采场长度。



(a) 采场宽度与采场高度 (b) 采场宽度与采场长度 (c) 采场长度与采场高度

图 9 双因素响应曲面交互作用

Fig.9 Interaction of two-factors response surface



(a) 采场宽度与采场高度 (b) 采场宽度与采场长度 (c) 采场长度与采场高度

图 10 双因素等高线交互作用

Fig.10 Interaction of two-factor contour lines

4 采场结构参数优选

采场结构参数的选择应综合考虑安全和生产能力因素。依据顶板沉降量预测模型对采场宽度分别为 9 m、12 m、15 m,采场长度分别为 18 m、27 m、36 m、45 m、54 m,采场高度分别为 15 m、30 m、45 m、60 m 进行沉降量预测。结合矿块大小,绘制了以沉降量进行颜色映射、以矿块大小进行缩放的三维映射散点图,如图 11 所示(颜色标识见电子版)。采用岩体极限位移判据 50 mm 作为安全指标,选出最大的球体,对应结构参数即为最优参数。因此,确定采场的结构参数为宽 12 m、长 36 m、高 60 m。

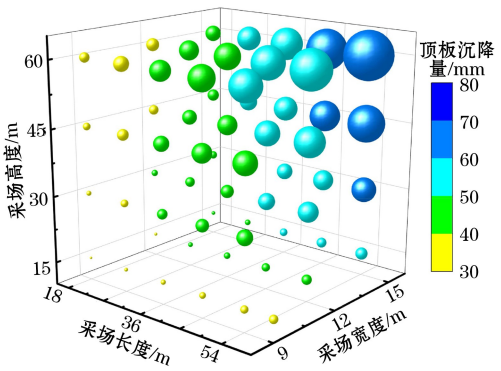


图 11 顶板沉降量与矿块大小关系

Fig.11 Relationship between roof displacement and ore block size

5 工业试验

为验证优化的合理性,将采场结构参数的优化结果进行实际应用。试验采场位于河北省某矿−170～−230 m 水平中段,矿体平均厚度为 150 m,处于矿体厚大部位。结合矿山现有设备情况,确定开采工艺为大直径深空凿岩阶段空场嗣后充填采矿法。试验采场高度为 60 m,长度为 36 m,宽度为 12 m,矿房垂直矿体走向布置,可布置 4 个矿房,穿脉及采场布置情况如图 12 所示。

为明确试验采场稳定性情况,回采完毕后,在对采空区进行充填之前,利用三维激光扫描设备对各采空区边界轮廓进行三维扫描,建立三维模型对实际采空区变形情况进行还原,如图 13 所示。由图 13(a)可以看出,顶板较为平整,无冒落、垮塌等安全问题,稳定性较好;由图 13(b)可以看出,采场侧帮相对顶板而言略有粗糙起伏,但对采场稳定性影响不大。综上,采场高度为 60 m、长度为 36 m、宽度为 12 m 时,采场整体能够保持稳定,说明该采场的结构参数选取较为合理。

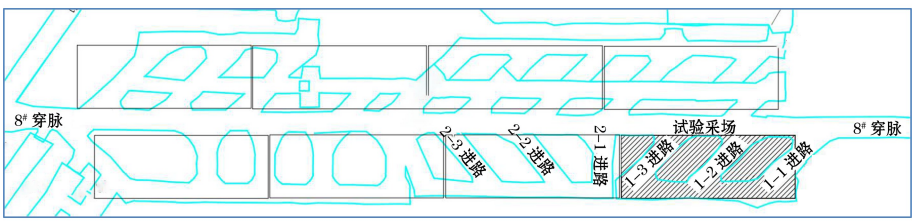
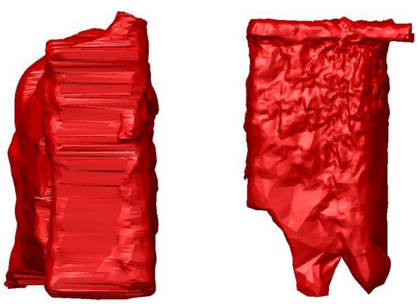


图 12 −230 m 水平开拓系统及矿房布置情况

Fig.12 −230 m horizontal development system and layout of mine rooms



(a) 顶板 (b) 侧帮

图 13 激光扫描采空区三维模型

Fig.13 3D model of goaf scanned by laser

6 结论

(1) 对河北省某矿体进行了岩体质量调查,得出该矿体为Ⅴ级,岩体质量很差,结合拓展的 Mathews 稳定图法,以 60%稳定概率进行计算,得出采场暴露面水力半径为 2.4～5 m。综合考虑矿山采矿工艺及设备,确定采场宽度区间为 9～15 m,采场长度区间为 30～60 m,采场高度区间为 15～45 m。

(2) 采用数值模拟结合响应曲面拟合,构建了未支护条件下采场顶板沉降量预测模型,结合岩体极限位移判据,可判断采场稳定性;通过多因素交互作用分析得出,采场顶板沉降量对结构参数的敏感性从高到低依次为采场宽度、采场长度、采场高度。因此,在面临采场顶板安全问题时,可优先考虑降低采场宽度以保证采场稳定性;在面临生产能力不足时,可以优先考虑增加采场高度来提高矿块大小。

(3) 综合考虑安全和生产能力因素,确定该矿体合理的采场结构参数为宽 12 m、长 36 m、高 60 m,并进行工业试验。试验结果表明,采用该结构参数进行回采,采场稳定性良好,生产能力显著提高。本文构建的采场顶板沉降量预测模型和敏感性分析结果对于通过改变矿房大小来协调采场安全与生产能力具有重要的指导意义。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等.金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山,2021(1):1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine,2021(1):1-13.

[2] 惠安社,李明楼,路增祥,等.我国无底柱分段崩落法结构参数优化研究进展与方向[J].金属矿山,2020(3):1-11.
HUI Anshe, LI Minglou, LU Zengxiang, et al. Study progress and direction of structural parameters optimization of non-pillar sublevel caving method in China[J]. Metal Mine,2020(3):1-11.

[3] 吴昊骏,纪洪广,龚敏,等.我国地下矿山凿岩装备应用现状与凿岩智能化发展方向[J].金属矿山,2021(1):185-201+212.
WU Haojun, JI Hongguang, GONG Min, et al. Present application status of rock drilling equipment in underground mine and the development direction for intelligent rock drilling in China[J]. Metal Mine,2021(1):185-201+212.

[4] 徐帅,安龙,李元辉,等.基于SOM的深埋厚大矿体采场结构参数优化研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):883-888.
XU Shuai, AN Long, LI Yuanhui, et al. SOM-based optimization of stope structural parameters of deep & large-sized orebody[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2015,32(6):883-888.

[5] 朱晨迪,朱胜利,江科,等.某钼矿矿柱回采方案及采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):1-8.
ZHU Chendi, ZHU Shengli, JIANG Ke, et al. Pillar recovery schemeand stope structure parameter optimization of a molybdenum mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):1-8.

[6] 李胜辉,王立杰,刘志义,等.复杂破碎矿体试验采场稳定性分析及结构参数优化[J].金属矿山,2021(8):41-45.
LI Shenghui, WANG Lijie, LIU Zhiyi, et al. Stability analysis and structural parameter optimization of test stope for complex broken ore deposit[J]. Metal Mine,2021(8):41-45.

[7] 路燕泽,郭斌,杨志强,等.复杂采场结构参数数值模拟及采矿方法优化[J].金属矿山,2022(8):69-74.
LU Yanze, GUO Bin, YANG Zhiqiang, et al. Numerical simulation on complex stope structure parameters and optimization on mining method[J]. Metal Mine,2022(8):69-74.

[8] 黄世顶,刘尧,邓红卫,等.基于修正Mathews稳定图法与FLAC3D的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):10-18.
HUANG Shiding, LIU Yao, DENG Hongwei, et al. Optimization of stope structure parameters based on modified mathews stability diagram method and FLAC3D[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):10-18.

[9] 高博,李佳建.上向水平分层充填法采场结构参数优化的数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):19-25.
GAO Bo, LI Jiajian. Numerical simulation study on optimization of stope structure parameters of upward horizontal layered filling mining method[J]. Mining Research and Development,2023,43(8):19-25.

[10] 董志富,翟会超,于永纯,等.大直径深孔落矿嗣后充填采矿工艺采场结构参数数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):1-7.
DONG Zhifu, ZHAI Huichao, YU Yongchun, et al. Study on the numerical simulation of stope structural parameters in large-diameter and deep-hole caving with subsequent filling mining process[J]. Mining Research and Development,2023,43(6):1-7.

[11] 黄德镛,贾子月,吕世玮,等.基于正交设计试验方案的云南某铜矿采场结构参数优化研究[J].有色金属工程,2023,13(4):111-119.
HUANG Deyong, JIA Ziyue, LYU Shiwei, et al. Study on optimization of stope struture parameters of a copper mine in Yunnan based on orthogonal design test scheme[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(4):111-119.

[12] 柴红,郭俊超,杨淑慧,等.缓倾斜厚大矿体采场结构参数优化研究与应用[J].金属矿山,2023(11):142-147.
CHAI Hong, GUO Junchao, YANG Shuhui, et al. Study and application on the optimization of stope structural parameters of gently inclined thick orebody[J]. Metal Mine,2023(11):142-147.

[13] 刘钦,刘志祥,刘爱华,等.金矿采场结构参数混沌优化[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):548-552.
LIU Qin, LIU Zhixiang, LIU Aihua, et al. Chaotic optimization of structural parametersin gold mining field[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(4):548-552.

[14] 张国联,宋健,刘兴国.张家洼铁矿沿脉无底柱分段崩落法结构参数试验研究[J].中国矿业,2005(9):45-48.
ZHANG Guolian, SONG Jian, LIU Xingguo. Experi mental research on structure parameter of non pillar sublevel caving along vein of Zhangjiawa Iron Mine[J]. China Mining Magazine,2005(9):45-48.

[15] 陈顺满,吴爱祥,王贻明,等.基于响应面法的破碎围岩条件下采场结构参数优化研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊1):3499-3508.
CHEN Shunman, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Optimization research on stope structure parameters in broken rock conditions based on the response surface method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(Suppl.1):3499-3508.

[16] 彭康,李夕兵,彭述权,等.基于响应面法的海下框架式采场结构优化选择[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(8):2417-2422.

PENG Kang, LI Xibing, PENG Shuquan, et al. Optimization of frame stope structure parameters based on response surface method in under-sea mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2011,42(8):2417-2422.

[17] 陈建康,朱殿芳,赵文谦,等.基于响应面法的地下洞室结构可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2005(2):351-356.
CHEN Jiankang, ZHU Dianfang, ZHAO Wenqian, et al. Structure reliability analysis of underground cavern based on response surface method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(2):351-356.

[18] 赵国彦,马举,彭康,等.基于响应面法的高寒矿山充填配比优化[J].北京科技大学学报,2013,35(5):559-565.
ZHAO Guoyan, MA Ju, PENG Kang, et al. Mix ratio optimization of alpine mine backfll based on the response surface method[J].Chinese Journal of Engineering,2013,35(5):559-565.

[19] 苏永华,方祖烈,高谦.用响应面方法分析特殊地下岩体空间的可靠性[J].岩石力学与工程学报,2000(1):55-58.
SU Yonghua, FANG Zulie, GAO Qian. The reliability of special underground rock mass space is analyzed by response surface method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000(1):55-58.

[20] MAWDESLEY C, TRUEMAN R, WHITEN W J. Extending the Mathews stability graph for open-stope design [J]. Mining Technology,2001,110(1):27-39.