

# 基于PLS的下向进路多参数优化方法

尚雪义<sup>1</sup>, 李夕兵<sup>1</sup>, 王泽伟<sup>1</sup>, 彭康<sup>2</sup>

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044

**摘要** 为研究下向进路稳定性与多参数间的关系, 提出采用正交数值模拟试验法和偏最小二乘法分析下向进路稳定性影响因素, 并运用安全系数法和可靠度分析优化下向进路多参数, 进而开展工业试验。结果表明: 1) 影响下向进路稳定性因素依次为: 承载层厚度>进路宽度>进路高度>进路侧帮弹模>承载层弹模>充填体泊松比, 且前3个因素影响效果显著; 2) 偏最小二乘法分析对承载层拉应力的拟合和预测效果良好, 误差控制在15%以内; 3) 可靠度分析优化下向进路多参数较安全系数法更为合理, 可实现下向进路安全高效经济开采。工业试验效果良好, 表明偏最小二乘法优化下向进路多参数具有很好的理论及实践意义。

**关键词** 下向进路; 正交试验; 偏最小二乘; 安全系数; 可靠度分析

**中图分类号** TD852

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.011

## Multiparameter optimization method for downward drift mining based on PLS

SHANG Xueyi<sup>1</sup>, LI Xibing<sup>1</sup>, WANG Zewei<sup>1</sup>, PENG Kang<sup>2</sup>

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** To study the relationship between multiple parameters and stability of downward drift, orthogonal simulation and partial least squares regression were used to analyze factors affecting the stability of downward drift. Safety coefficient and reliability analysis were applied to optimize these parameters. On the basis of that, an industrial test was conducted. The results show that: 1) The factors affecting tensile stress of the loading layer in a descending sequence in terms of significance are thickness of the loading layer, drift width, drift height, two-sided elastic modulus of the drift, elastic modulus of the loading layer and Poisson ratio of the backfill, and the first three factors are more effective than the others. 2) Satisfactory fitness and forecast were obtained through partial least squares regression with errors controlled within 15%. 3) The reliability analysis is more reasonable than the safety coefficient method in optimizing multiple parameters, which can achieve safer, more efficient and economical downward drift exploitation. The satisfactory results of industrial test indicate that partial least squares regression has theoretical and practical values in optimizing multiple parameters for downward drift mining.

**Keywords** downward drift; orthogonal test; partial least squares; safety coefficient; reliability analysis

随着无轨自行设备在地下金属矿山的推广应用, 下向进路胶结充填采矿法以其回收率高、贫化损失小、回采强度大等显著优势, 进入现代化采矿技术之列<sup>[1]</sup>。下向进路采矿法成败的关键在于承载层的稳定性<sup>[2]</sup>, 而承载层的稳定性由承

载层厚度、进路宽度、进路高度、充填体泊松比、进路侧帮弹模和承载层弹模决定<sup>[3]</sup>, 若多参数设计保守则会造成资源浪费, 反之则会在存在安全隐患, 为此需要建立一种承载层稳定性综合评价方法, 以实现下向进路安全高效经济开采。目

收稿日期: 2014-06-27; 修回日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272304)

作者简介: 尚雪义, 博士研究生, 研究方向为采矿与岩石力学, 电子信箱: 1261996062@qq.com; 李夕兵(通信作者), 教授, 研究方向为岩石破裂与岩石动力学, 电子信箱: xbli@mail.csu.edu.cn

引用格式: 尚雪义, 李夕兵, 王泽伟, 等. 基于PLS的下向进路多参数优化方法[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 63-69.

前,针对下向进路稳定性的研究主要有弹性力学分析<sup>[4,5]</sup>、安全系数法<sup>[6]</sup>、可靠度分析<sup>[2,3]</sup>、相似模型试验<sup>[7]</sup>和数值模拟<sup>[8]</sup>等。弹性力学分析得到了下向进路薄“板”和简支“梁”理论模型;安全系数法和可靠度分析对下向进路稳定性进行了定量评价;相似模型试验和数值模拟研究了承载层应力变形大小及其变化规律。但弹性力学模型对下向进路做了大量简化,且由其推导出的方程分析下向进路稳定性相当复杂;安全系数法和可靠度分析未对多参数进行优化;相似模型试验不仅周期长,而且成本高。此外,这些方法难以分析各参数对下向进路稳定性影响的具体大小,为此需建立多参数与稳定性之间的简明关系,为下向进路多参数设计与优化提供便利。

常规的最小二乘法多元线性回归在分析变量间多重相关性问题时存在一定的局限性,而神经网络等方法虽在回归精度上有些优势,却在模型对应关系的解释上不够明确<sup>[9]</sup>。偏最小二乘(PLS)回归集成分、典型相关分析和多元回归分析于一体,是一种多因变量对多自变量间的多重多元线性回归,能够解决多参数、非稳态、紧耦合等复杂问题,特别能够有效解决多元线性回归无法解决的自变量之间的多重相关性和小样本等问题<sup>[10,11]</sup>。本研究尝试利用PLS找到下向进路多参数与稳定性的联系,再对下向进路多参数进行优化设计。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

山东黄金集团有限公司玲珑金矿是中国最大的黄金矿山之一<sup>[12,13]</sup>,由位于玲珑金矿的玲珑主矿区和位于焦家断裂带的灵山分矿2部分组成。灵山分矿1#主矿体受断裂蚀变带控制,走向NE30°~60°,倾向SE,倾角54°~86°,平均厚度8.87 m,平均品位4.96 g/t。矿石类型为碎裂状黄铁矿化绢英岩化钾化花岗岩,裂隙发育,稳固性差;矿体上盘断层泥、糜棱岩发育,易脱落,局部掉块现象严重;矿体下盘直接围岩均为钾化花岗岩,间接围岩为黑云母花岗岩,中等稳固。目前矿山选用机械化盘区C料分级尾砂下向进路充填采矿法,该方法采用多进路回采方式、下盘脉外斜坡道+分段运输平巷采准系统、无轨设备凿岩出矿、C料分级尾砂胶结充填及长锚杆护顶+层间吊筋技术,采矿工艺水平先进,而与之相适应的进路开采参数及其稳定性亟待分析和优化。

### 1.2 力学参数和地应力规律

通过对灵山矿区岩体工程地质调查、上下盘岩石取样测试及充填体强度实验,再参照岩体质量分级标准对矿岩参数进行折减,得到灵山矿区矿岩和充填体力学参数(表1)。

根据文献[14],矿区地应力分布规律为

$$\begin{cases} \sigma_{h,\max} = 0.4612 + 0.0588H \\ \sigma_{h,\min} = -0.4346 + 0.0286H \\ \sigma_v = -0.4683 + 0.0316H \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{h,\max}$ 、 $\sigma_{h,\min}$ 和 $\sigma_v$ 分别为最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力,MPa; $H$ 为测点埋深,m。

表1 矿岩和充填体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the ore rock and backfill

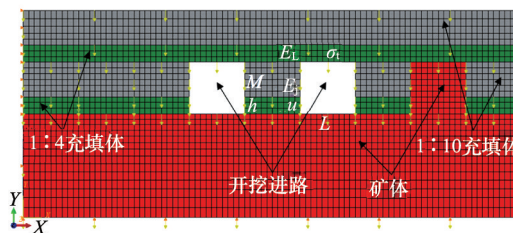
类型	弹性模量/ GPa	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏结力/ MPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
上盘	12.54	2.56	0.22	33	1.4	46	2.6
矿体	8.72	2.68	0.23	32	1.2	34	2.3
下盘	15.36	2.60	0.20	34	2.0	58	3.5
1:4充填体	0.11	1.76	0.25	38	0.29	2.80	0.42
1:10充填体	0.07	1.70	0.25	40	0.10	1.02	0.15

## 2 正交数值模拟试验

正交试验是一种高效处理多因素优化问题的科学计算方法,它利用标准化正交表安排试验方案,并对结果进行计算分析,实现通过较少的试验次数找到较好的生产方案,且正交试验方案可作为偏最小二乘回归样本。

### 2.1 数值模型

范文录等<sup>[15]</sup>研究表明,可选用承载层下表面最大拉应力作为下向进路稳定性的判据:若承载层拉应力超过其抗拉强度,则认为充填体发生失稳破坏。本研究采用有限元数值分析软件Abaqus模拟计算正交试验下承载层最大拉应力,进路沿矿体走向时由上盘向下盘连续回采,垂直矿体走向时“隔一采一”。孙恒虎等<sup>[15]</sup>研究表明,“隔一采一”且进路两侧为充填体时承载层最易破坏,由此建立进路断面平面应变有限元模型如图1所示。选用摩尔-库伦本构模型,并假设材料为理想弹塑性体,有限元模型两侧面固定水平位移,下表面固定竖直位移,采用3个分析步进行:第一步,施加地应力(取埋深600 m),形成开挖前的初始应力状态;第二步,间隔开挖进路;第三步,充填开挖进路,开挖矿柱。



$h$ —承载层厚度; $L$ —进路宽度; $M$ —进路高度; $u$ —充填体泊松比;  
 $E_1$ —进路侧帮弹模; $E_2$ —承载层弹模

图1 进路断面有限元计算模型

Fig. 1 Finite element calculation model of cross-section of the drift

### 2.2 试验结果分析

结合文献[3],选取承载层厚度 $h$ 、进路宽度 $L$ 、进路高度 $M$ 、充填体泊松比 $u$ 、进路侧帮弹模 $E_2$ 和承载层弹模 $E_1$ 作为正

交数值模拟的随机变量。通过现场调查及室内充填实验,得到进路稳定性随机变量概率特征值,见表2。

表2 随机变量概率特征值

Table 2 Statistical characteristic values of primary random variables

参数	分布概型	均值	均方差	变异系数
$h$	正态	1.05 m	0.137	0.13
$L$	正态	3.08 m	0.123	0.04
$M$	正态	3.05 m	0.146	0.05
$u$	正态	0.25	0.015	0.06
$E_j$	正态	0.07 GPa	0.018	0.23
$E_l$	正态	0.11 GPa	0.029	0.26
$\sigma_{l,max}$	对数正态	0.42 MPa	0.080	0.19

注:  $\sigma_{l,max}$  指1:4充填体抗拉强度概率分布。

结合正交试验设计有关知识<sup>[16]</sup>,将 $h$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $u$ 、 $E_j$ 、 $E_l$ 视为正交设计的6个因素,每个因素选取3水平设计正交试验。由文献[2]知随机变量最大水平值(或最小值)与随机变量均值之差取随机变量均方差的1.5~2.0倍为宜,各随机参数应选择相同的倍数,故本研究选取随机变量均方差2.0倍作为设计依据,由此得到 $L_{18}(3^6)$ 正交试验表,试验方案及结果见表3。

表3 正交模拟试验参数及模拟结果

Table 3 Parameters and simulation results of the orthogonal simulation test

序号	$h/m$	$L/m$	$M/m$	$u$	$E_j/GPa$	$E_l/GPa$	$\sigma_l/MPa$
1	0.78	2.54	2.76	0.22	0.03	0.05	0.2950
2	0.78	3.08	3.05	0.25	0.07	0.11	0.4373
3	0.78	3.62	3.34	0.28	0.11	0.17	0.6141
4	1.05	2.54	2.76	0.25	0.07	0.17	0.1780
5	1.05	3.08	3.05	0.28	0.11	0.05	0.3460
6	1.05	3.62	3.34	0.22	0.03	0.11	0.3397
7	1.32	2.54	3.05	0.22	0.11	0.11	0.1687
8	1.32	3.08	3.34	0.25	0.03	0.17	0.1780
9	1.32	3.62	2.76	0.28	0.07	0.05	0.2507
10	0.78	2.54	3.34	0.28	0.07	0.11	0.3728
11	0.78	3.08	2.76	0.22	0.11	0.17	0.3905
12	0.78	3.62	3.05	0.25	0.03	0.05	0.5476
13	1.05	2.54	3.05	0.28	0.03	0.17	0.1747
14	1.05	3.08	3.34	0.22	0.07	0.05	0.3524
15	1.05	3.62	2.76	0.25	0.11	0.11	0.3318
16	1.32	2.54	3.34	0.25	0.11	0.05	0.2210
17	1.32	3.08	2.76	0.28	0.03	0.11	0.1537
18	1.32	3.62	3.05	0.22	0.07	0.17	0.2282

注:  $\sigma_l$  指数值模拟时1:4充填体内最大拉应力。

采用SPSS软件对正交试验结果进行分析,得到承载层拉应力方差分析表(表4)。由表4可知,整个模型的承载层拉应力 $F$ 统计值为18.544,概率 $P$ 为0.002,说明此模型方差分析非常显著。承载层厚度、进路宽度和进路高度3个因素的 $P$ 值都小于0.05,说明 $h$ 、 $L$ 、 $M$ 对承载层拉应力影响效果显著;而充填体泊松比、进路侧帮弹模和承载层弹模3个因素的 $P$ 值都大于0.05,说明 $u$ 、 $E_j$ 、 $E_l$ 对承载层拉应力的影响较小;比较离差 $F$ 值得到影响承载层拉应力的因素次序为: $h>L>M>E_j>E_l>u$ 。

表4 承载层拉应力方差分析

Table 4 Variance analysis for tensile stress of the loading layer

因素	III型平方和	自由度	均方差	$F$ 值	概率水平 $P$
校正模型	0.289 <sup>a</sup>	12	0.024	18.544	0.002
$h$	0.182	2	0.091	69.828	0.000
$L$	0.068	2	0.034	26.061	0.002
$M$	0.020	2	0.010	7.502	0.031
$u$	0.002	2	0.001	0.714	0.533
$E_j$	0.013	2	0.006	4.868	0.067
$E_l$	0.006	2	0.003	2.292	0.197
误差	0.007	5	0.001		
总和	2.026	18			

由正交试验分析可知,承载层拉应力受承载层厚度、进路宽度和高度影响较大,而受充填体泊松比、进路侧帮弹模和承载层弹模影响较小,该结论对下向进路多参数优化具有一定的指导意义。而正交试验未对各参数的具体影响值作出评价,且不能对不同参数下承载层拉应力进行定量计算,为此建立基于偏最小二乘法的下向进路多参数模型,对下向进路进行定量分析及优化。

### 3 基于偏最小二乘法(PLS)的下向进路多参数优化

#### 3.1 单因变量偏最小二乘法原理

结合文献[10],设有因变量 $\{y\}$ 和 $p$ 个自变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ ,选取 $n$ 个样本点构成自变量与因变量的矩阵 $X=[x_1, x_2, \dots, x_p]_{n \times p}$ ,  $x_j \in R^n$ 和 $Y=[y]$ ,  $y \in R^n$ 。分别在 $X$ 与 $Y$ 中提取出成分 $t_1$ 和 $u_1$ ( $t_1$ 为 $x_1, x_2, \dots, x_p$ 的线形组合, $u_1$ 为 $y_1, y_2, \dots, y_q$ 的线形组合)。为了回归分析的需要,在提取上述两个成分时要求:

- 1)  $t_1$ 和 $u_1$ 应尽可能大地携带他们各自数据表中的变异信息;
- 2)  $t_1$ 与 $u_1$ 的相关程度能够达到最大。

在第一个成分 $t_1$ 被提取后,偏最小二乘回归分别实施 $X$ 对 $t_1$ 的回归以及 $Y$ 对 $t_1$ 的回归。如果回归方程已经达到满意的精度,则算法终止;否则,将利用 $X$ 被 $t_1$ 解释后的残余信息以及 $Y$ 被 $t_1$ 解释后的残余信息进行第二轮的成分提取。如此

往复,直到能达到一个较满意的精度为止。若最终对  $X$  共提取了  $m$  个成分  $(t_1, t_2, \dots, t_m)$ , 偏最小二乘回归将通过实施  $Y$  对  $(t_1, t_2, \dots, t_m)$  的回归, 然后再表达成  $Y$  关于原变量  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  的回归方程。

对于建模所需提取的成分个数  $m$ , 通过交叉有效性检验方法确定。记第  $i$  个样本点的真实值为  $y_i$ , 拟合值为  $\hat{y}_{h(i)}$ , 预测值为  $\hat{y}_{hi}$ , 定义  $y$  的拟合误差平方和  $PRESS_h$  和预测误差平方和  $SS_h$  为

$$PRESS_h = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{h(i)})^2 \quad (2)$$

$$SS_h = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{hi})^2 \quad (3)$$

一般说来, 总有  $PRESS_h$  大于  $SS_h$ , 而  $SS_h$  则总是小于  $SS_{h-1}$ 。如果  $h$  个成分回归方程的含扰动误差能在一定程度上小于  $(h-1)$  个成分回归方程的拟合误差, 则认为增加 1 个成分  $t_h$  会使预测的精度明显提高。设定  $(PRESS_h/SS_{h-1}) \leq 0.95^2$  时增加成分  $t_h$  有明显改善作用, 应继续提取成分; 反之则认为增加新的成分  $t_h$  对减少方程的预测误差无明显改善作用, 模型已达到精度要求, 应停止提取主成分的计算。

偏最小二乘回归分析 Matlab 编程流程如图 2 所示。图 2 中  $X, Y$  分别为自变量和因变量矩阵;  $E_0, F_0$  分别为  $X, Y$  的标准化矩阵;  $E_1, E_2, \dots, E_{m-1}$  为残差矩阵;  $B, C$  分别为系数矩阵和常数项矩阵。

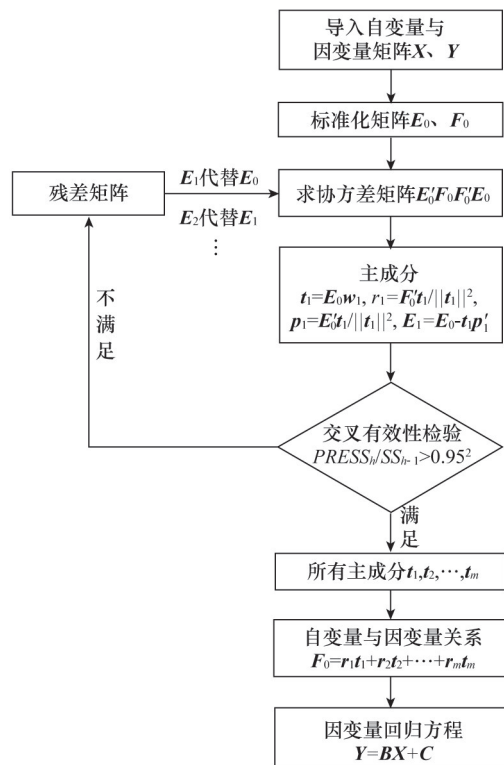


图 2 PLS 回归分析主要流程

Fig. 2 Flow chart of partial least squares regression analysis

### 3.2 多参数 PLS 回归结果

以随机变量承载层厚度  $h$ 、进路宽度  $L$ 、进路高度  $M$ 、充填体泊松比  $u$ 、进路侧帮弹模  $E_j$  和承载层弹模  $E_L$  作为回归分析的自变量, 以承载层拉应力作为因变量, 建立下向进路稳定性分析偏最小二乘法评价模型:

$$\hat{\sigma}_i = f(h, L, M, u, E_j, E_L) \quad (4)$$

式中,  $\hat{\sigma}_i$  为承载层拉应力拟合值。

取表 3 中前 12 组数据作为回归分析基本数据, 后 6 组数据作为检验数据。由 SPSS 分析前 12 组数据得各自变量间相关系数 (表 5)。相关系数在 0 与  $\pm 1$  之间变化, 且越靠近  $\pm 1$  相关性越大, 越不适合采用普通的最小二乘法<sup>[10]</sup>, 从表 5 可看出, 最大相关系数达到  $-0.588$ , 说明自变量之间存在较严重的多重相关性, 故本研究选用偏最小二乘法进行多元线性回归。

表 5 变量相关系数矩阵表

Table 5 Correlation coefficient matrix of variables

	$h$	$L$	$M$	$u$	$E_j$	$E_L$
$h$	1.000	$-1 \times 10^{-13}$	$-1 \times 10^{-13}$	$-1 \times 10^{-13}$	$-1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13}$
$L$	$-1 \times 10^{-13}$	1.000	-0.197	-0.197	0.114	0.114
$M$	$-1 \times 10^{-13}$	-0.197	1.000	-0.322	0.282	-0.388
$u$	$-1 \times 10^{-13}$	-0.197	-0.322	1.000	-0.588	0.282
$E_j$	$-1 \times 10^{-13}$	0.114	0.282	-0.588	1.000	-0.357
$E_L$	$1 \times 10^{-13}$	0.114	-0.388	0.282	-0.357	1.000

运用 Matlab 编程提取成分, 并计算交叉有效性, 结果见表 6。可知  $(PRESS_2/SS_1) = 1.2056 > 0.95^2$ , 故  $t_2$  对承载层拉应力无明显改善作用, 所以只提取一个成分  $t_1$  做偏最小二乘回归, 拟合方程的预测性能最佳。

表 6 交叉有效性判别

Table 6 Discrimination of cross validity

$h$	$PRESS$	$SS$	$PRESS_h/SS_{h-1}$	临界值
1	106806	96596.3	—	$0.95^2$
2	116453	93721.7	1.2056	$0.95^2$

自变量的成分  $t_1$  与因变量的成分  $u_1$  的关系如图 3 所示, 可以观察到  $t_1$  和  $u_1$  存在明显的线性关系, 说明采用偏最小二乘回归方法建立因变量关于自变量的线性模型是合理的。

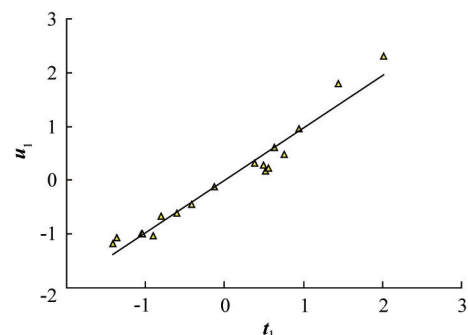


图 3  $t_1$  与  $u_1$  平面图

Fig. 3 Scatter diagram for  $t_1$  and  $u_1$

由图4可以看出,各变量对承载层拉应力影响次序为: $h>L>M>E_j>E_L>u$ ,其结果与正交试验结果吻合。

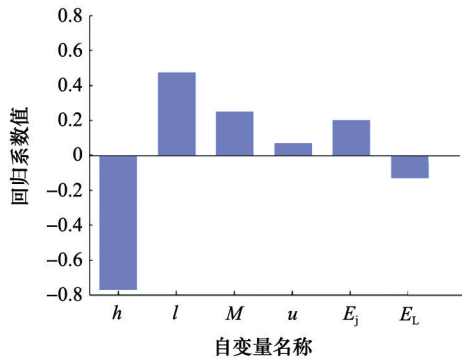


图4 回归系数直方图

Fig. 4 Histogram of regression coefficients

运用 Matlab 对图 2 编程,得到承载层拉应力拟合表达式:

$$\hat{\sigma}_t = -0.179 - 0.450h + 0.139L + 0.137M + 0.382u + 0.799E_j - 0.346E_L \quad (5)$$

由式(5)对前 12 组数据和后 6 组预测数据进行计算得到拟合值  $\hat{\sigma}_t$ ,以正交试验序号为横坐标,以数值模拟值、偏最小二乘法和最小二乘法拟合值为纵坐标,绘制承载层拉应力回归方程预测图(图5)。

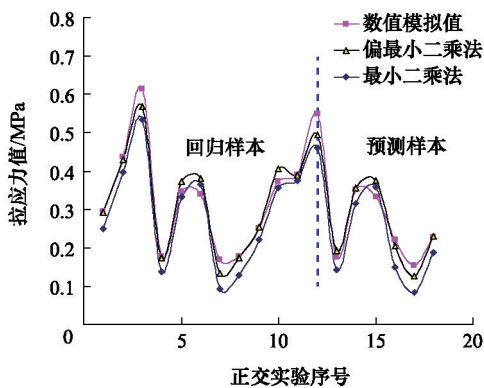


图5 承载层拉应力回归方程预测

Fig. 5 Prediction diagram for regression equation about tensile stress of the loading layer

由图5可知,偏最小二乘法回归和预测效果整体优于最小二乘法,很好地克服了各参数间的多重相关性,且除7号和17号点误差为21.9%和17.9%外,其余点误差均在15%以内,最小误差仅为0.29%,说明拟合效果很好,可达到工程设计要求。

### 3.3 下向进路多参数优化

下向进路稳定性受  $h, L, M, E_j, E_L, u$  多参数影响,而后三者由充填配比决定,人为改变性小,且由正交试验和偏最小二乘法回归分析知其对承载层拉应力影响较小,故本研究只从改变承载层厚度、进路宽度和进路高度对下向进路参数进行优化。

#### 3.3.1 安全系数法

下向进路承载层的稳定是进路回采的关键,因此承载层所受拉应力需留有一定的安全储备,为此引入下向进路稳定性的安全系数判别式<sup>[6]</sup>:

$$\eta = \sigma_{t,max} / \hat{\sigma}_t \quad (6)$$

式中,  $\eta$  为安全系数;  $\sigma_{t,max}$  为承载层所能承受的最大拉应力,取平均值 0.42 MPa。

根据地下矿山安全开采经验,安全系数应在 1.6~1.8 以上<sup>[7]</sup>,考虑到灵山矿区矿岩极破碎,取  $\eta > 1.8$  作为稳定条件评价标准。取表 2 中随机变量均值作为数据来源,采用控制变量法对式(6)在不同承载层厚度、进路宽度和进路高度下的安全系数进行研究,得到各因素与承载层安全系数的关系如图 6 所示。由图 6 可知:1) 原有进路参数  $h=1.05$  m、 $L=3.08$  m、 $M=3.05$  m 对应的安全系数仅为 1.36,远低于设计要求值,下向进路参数需要进行优化;2) 只优化 1 个参数时,  $h > 1.22$  m、 $L < 2.44$  m 或  $M < 2.49$  m 可满足安全系数稳定性要求。

#### 3.3.2 可靠度分析

下向进路  $h, L, M, E_j, E_L, u$  等参数工程实际值呈现一定的分布特征,故可考虑采用可靠度分析。为此由式(5)建立下向进路稳定性关于承载层拉应力的极限状态方程式(7):当  $z > 0$  时,承载层稳定;  $z < 0$  时,承载层破坏;  $z = 0$  时,承载层处于临界状态。

$$z = g(h, L, M, u, E_j, E_L) = \sigma_{t,max} - \hat{\sigma}_t = \sigma_{t,max} - (-0.179 - 0.450h + 0.139L + 0.137M + 0.382u + 0.799E_j - 0.346E_L) \quad (7)$$

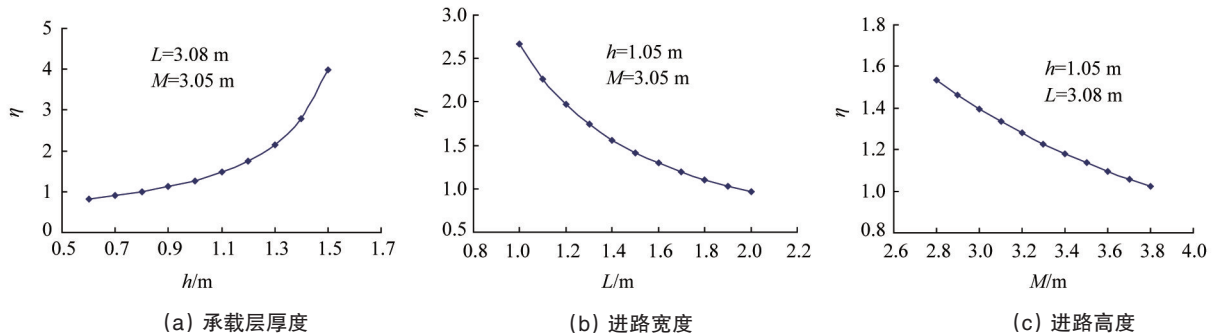


图6 各因素对承载层安全系数的影响

Fig. 6 Impact of various factors on safety coefficient of the loading layer

下向进路胶结充填采矿业承载层稳定性可靠度概率达到90%时,即可满足井下生产的要求<sup>[1]</sup>,因此确定承载层稳定性可靠度概率为90%。采用蒙特卡罗法原理编程对表2中各因素进行控制变量优化分析,得到各因素与可靠度概率关系如图7所示。由图7可知:1)原有进路参数  $h \sim N(1.05, 0.137^2)$ 、

$L \sim N(3.08, 0.27^2)$ 、 $M \sim N(3.05, 0.146^2)$  对应的可靠度概率为0.8421,低于可靠度概率要求值;2)当只改变1个变量时, $h > 1.14$  m、 $L < 2.88$  m或 $M < 2.87$  m可满足稳定性可靠度概率。

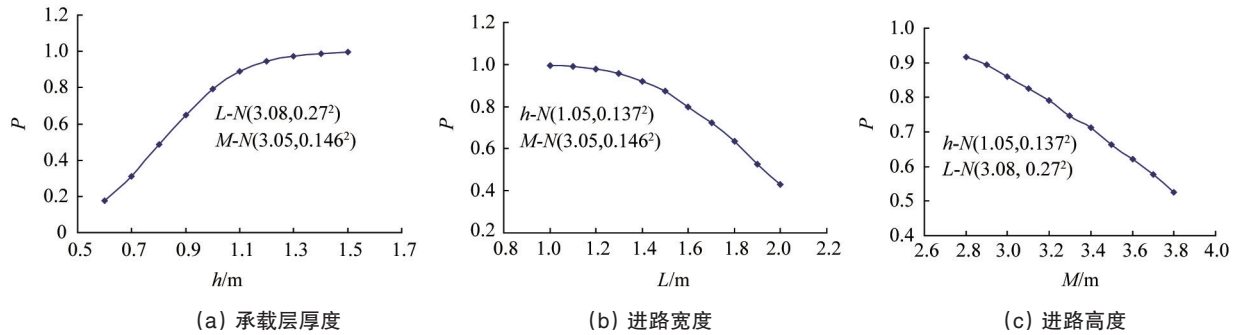


图7 各因素对承载层安全系数的影响

Fig. 7 Impact of various factors on reliability of the loading layer

### 3.3.3 下向进路多参数优化

对控制变量下安全系数法和可靠度分析临界值进行分析得到表7。由表7可知,安全系数法进路宽度和高度临界值均低于可靠度分析临界值,而承载层厚度临界值高于可靠度分析临界值,可见安全系数法偏于保守,可靠度分析可实现下向进路安全高效经济开采。

表7 下向进路参数临界值

Table 7 Critical values of parameters of downward drift

方法	$h/m$	$L/m$	$M/m$
安全系数法	1.22	2.44	2.49
可靠度分析	1.14	2.88	2.87

灵山矿区原进路断面( $L=3.08$  m、 $M=3.05$  m)偏小,结合进路宽度对下向进路稳定影响较大,而进路高度对下向进路稳定性影响较小的结论,可采用减小进路宽度、增加进路高度来扩大断面,即“小宽度、大高度”的思路优化进路断面。结合生产经验,推荐进路宽度减小为 $L=3.0$  m,进路高度提高至 $M=3.6$  m,假定表2中其他参数不变,研究不同承载层厚度下的可靠度概率,得到承载层厚度 $h=1.3$  m( $P=0.92$ )时最为经济合理。

### 3.4 工业性试验

选取灵山矿区-590-1#盘区作为工业试验场地,回采进路宽度3.0 m、高度3.6 m,采用灰砂比1:4、质量分数70%的料浆进行打底充填1.3 m,剩余高度采用灰砂比1:10、质量分数70%的料浆进行普通充填和接顶充填。

在1线和2线间选取A、B、C、D、E 5个断面(图8),采用SWJ-IV隧道收敛计测得假顶中点累积位移随时间变化曲线(图9)。由图9可知,假顶位移随时间增长而增长,且5个监测点位移均有收敛的趋势,假顶中点60 d的累积最大位移为

51.5 mm,每天最大位移量3.41 mm,平均位移量1.38 mm,变形量小且未出现突变值,由此得到工业试验是安全的,同时表明偏最小二乘法回归分析及优化下向进路多参数是可行的。

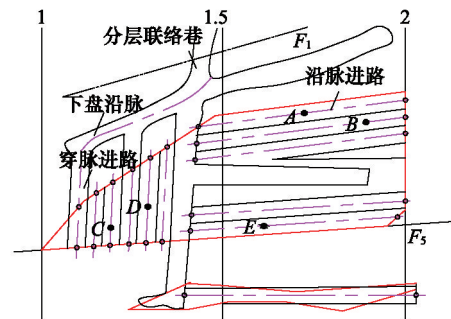


图8 收敛计测量断面位置平面

Fig. 8 Planar view of cross-section measurement using a convergence meter

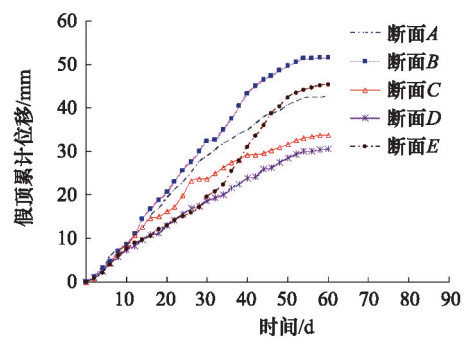


图9 假顶中点累积位移沉降曲线

Fig. 9 Cumulative displacement curves of the midpoint of artificial roof

## 4 结论

采用正交数值模拟试验和偏最小二乘多元线性回归分析及优化下向进路多参数,结果表明:

1) 承载层厚度、进路宽度和进路高度对下向进路稳定性影响效果显著,而充填体泊松比、进路侧帮弹模和承载层弹模对承载层拉应力的影响较小,且影响大小依次为: $h>L>M>E_p>E_s>u$ 。

2) 偏最小二乘法回归分析得到承载层拉应力回归方程,其回归效果与预测效果良好,并很好地克服了参数间的多重相关性。

3) 可靠度分析优化下向进路多参数较安全系数法更为合理,且应遵循“小宽度、大高度”的优化思想,可实现下向进路安全高效经济开采。

4) 下向进路法工业试验中承载层稳定性良好,表明偏最小二乘法回归分析及优化下向进路多参数具有很好的可靠性。

### 参考文献 (References)

- [1] 韩斌, 吴爱祥, 邓建, 等. 基于可靠度理论的下向进路胶结充填技术分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(3): 583-587.  
Han Bin, Wu Aixiang, Deng Jian, et al. Backfill technical analysis based on reliability theory in the underhand drift cut-and-filling stoping [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2006, 37(3): 583-587.
- [2] 韩斌. 金川二矿区充填体可靠度分析与1<sup>#</sup>矿体回采地压控制优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.  
Han Bin. Study on backfill reliability analysis and ground control optimization on 1<sup>#</sup> ore-body in Jinchuan No. 2 mine area[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [3] 范文录, 李夕兵, 周子龙. 基于可靠度理论的钢筋混凝土假顶强度确定与配筋设计研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(4): 30-35.  
Fan Wenlu, Li Xibing, Zhou Zilong. Strength determination for reinforced concrete false roof and reinforcement design based on reliability theory[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(4): 30-35.
- [4] 顾伟, 张立亚, 谭志祥, 等. 基于弹性薄板模型的开放式充填顶板稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 886-891.  
Gu Wei, Zhang Liya, Tan Zhixiang, et al. Study on roof stability of open backfilling based on elastic plate model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 886-891.
- [5] O'Hearn B, Swan G. The use of models in sill mat design at Falconbridge [C]//Innovations in Mining Backfill Technology: Proceedings of the 4th International Symposium on Mining with Backfill. Brookfield, USA: A A Balkema Publishers, 1989: 139-146.
- [6] 赵彬. 焦家金矿尾砂固结材料配比试验及工艺改造方案研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
Zhao Bin. Study of tailing-cemented materials proportion and backfilling technology transformation[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [7] Yamaguchi U, Yamatomi J. An experimental study to investigate the effect of backfill for the ground stability[C]//Innovations in Mining Backfill Technology: Proceedings of the 4th International Symposium on Mining with Backfill. Brookfield, USA: A A Balkema Publishers, 1989: 71-80.
- [8] 刘强, 许新启, 桑守勤. 下向充填法充填程度与采场稳定性数值模拟[J]. 有色金属, 2000, 52(1): 17-21.  
Liu Qiang, Xu Xinqi, Sang Shouqin. Numerical simulation on stability of underhand cut-and-fill method with different filling extent[J]. Nonferrous Metal, 2000, 52(1): 17-21.
- [9] 姚林, 阳建宏, 徐金梧, 等. 基于偏最小二乘回归模型的带钢热镀锌质量监控方法[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(6): 627-631.  
Yao Lin, Yang Jianhong, Xu Jinwu, et al. Quality monitoring method of strip hot-dip galvanizing based on partial least squares regression[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(6): 627-631.
- [10] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
Wang Huiwen. Partial least squares method and applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [11] Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: A basic tool of chemometrics[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2): 109-130.
- [12] 王玉白, 张宪堂, 李树忱. 玲珑金矿深部应力分析及岩爆防治措施研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增1): 1401-1404.  
Wang Yubai, Zhang Xiantang, Li Shuzhen. Analysis of deep rock stress and prevention methods of rock burst in Linglong gold mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Suppl 1): 1401-1404.
- [13] 蔡美峰, 孔留安, 李长洪, 等. 玲珑金矿主运巷塌陷治理区稳定性动态综合监测与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 886-894.  
Cai Meifeng, Kong Liu'an, Li Changhong, et al. Dynamic comprehensive monitoring and assessment of stability of collapsed area after supporting in main transport roadway in Linglong gold mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 886-894.
- [14] 蔡美峰, 刘卫东, 李远. 玲珑金矿深部地应力测量及矿区地应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 227-233.  
Cai Meifeng, Liu Weidong, Li Yuan. In-situ stress measurement at deep position of Linglong gold mine and distribution law of in-situ stress field in mine area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 227-233.
- [15] 孙恒虎, 刘文永, 黄玉诚, 等. 高水固结充填采矿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
Sun Henghu, Liu Wenyong, Huang Yucheng, et al. Mining technology backfilled by high-water solidified material[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [16] 陈亚力, 裴亚峰, 刘诚. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Chen Yali, Qiu Yazheng, Liu Cheng. Probability and mathematical statistics[M]. Beijing: Sciences Press, 2008.
- [17] 陈玉民, 李夕兵. 海底大型金属矿床安全高效开采技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.  
Chen Yumin, Li Xibing. Research on technology of efficient and safe mining in large-undersea metal deposit[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

(责任编辑 王媛媛)