

文章编号:0253-9993(2012)S1-0048-05

# 矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析

尹升华<sup>1,2</sup>, 吴爱祥<sup>1</sup>, 李希雯<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:**基于正交极差分析方法对矿柱稳定性影响因素敏感性进行了评价。在分析矿柱荷载、强度、失稳势函数、破坏形式的基础上,总结了影响矿柱稳定性的主要因素;针对矩形矿柱8个主要影响因素:采深、矿房宽度、矿柱宽度、矿柱高度、矿体的单轴抗压强度、上覆岩层的容重、矿柱长度、矿柱长度方向的间距,建立了计算矩形矿柱安全系数的简化公式。以江西某钨矿为例,采用正交极差分析理论,得到该矿矿柱稳定性影响因素的主次顺序为:矿房宽度>矿柱宽度>采深>矿柱高度>矿体的单轴抗压强度>上覆岩层容重,即矿房宽度、矿柱宽度对矿柱稳定性的影响最为显著,并得到了矿房宽度、矿柱宽度与矿柱安全系数间的关系曲线,对采场结构参数进行了优化,矿房宽度值小于21.03 m,矿柱宽度值大于3.718 m。

**关键词:**矿柱;稳定性;影响因素;敏感性;正交极差

**中图分类号:**TD355.1 **文献标志码:**A

## Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability

YIN Sheng-hua<sup>1,2</sup>, WU Ai-xiang<sup>1</sup>, LI Xi-wen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the orthogonal polar difference, sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability was evaluated. Ore pillar load, strength, instability potential function, deformation model were analyzed. The main factors influencing ore pillar stability was put forward. A simplified formula was established to calculate the rectangle ore pillar safety parameter by considering the factors of mining depth, room width, ore pillar width, ore pillar height, uniaxial compressive strength of the ore, weight of the surrounding rock, ore pillar length and interval between pillars along the length direction. Orthogonal polar difference analysis theory was selected to investigate the factors influencing the ore pillar stability in a tungsten mine in Jiangxi Province. The sequence of the factors is listed from the most to least: room width, ore pillar width, mining depth, ore pillar height, ore strength and rock weight. It means that ore pillar stability is seriously influenced by room width and ore pillar, and the relationship curves is obtained. The mining parameters were optimized based on the analysis result. The room width should be less than 21.03 m, while the pillar width should be larger than 3.718 m.

**Key words:** ore pillar; stability; influencing factor; sensitivity; orthogonal polar difference

随着我国地下矿山开采时间的延续和开采范围的不断扩大,不少地下开采矿山的空区数量在不断地增加,其面积往往达到几万、几十万、甚至上百万平方米<sup>[1]</sup>。矿柱是影响采空区稳定状态的重要结构单元,对采空区起支撑作用,矿柱失稳将导致空区顶板

大面积坍塌,甚至造成地表塌陷<sup>[2-4]</sup>,矿柱的稳定性主要受时间效应(流变)、开采扰动(爆破)和应力状态等因素的影响。王金安等<sup>[5]</sup>考虑矿岩的流变特性,建立了矿柱支撑下采空区顶板受流变作用位移控制方程;隋斌等<sup>[6]</sup>通过数值模拟对复杂应力状态下

深部岩柱动态扰动的力学响应进行了研究;罗辉<sup>[7]</sup>和王洪武等<sup>[8]</sup>分别采用动态模糊可靠度对矿柱稳定性进行分析;李江腾等<sup>[9]</sup>针对具有初始几何缺陷的超高矿柱稳定性问题建立了一个简化的力学模型,对具有初始绕度及弹塑性稳定性进行了探讨;王学滨<sup>[10]</sup>利用 FLAC 模拟了非均质粗糙端面矿柱的破坏过程及力学行为;此外,王在泉等<sup>[11]</sup>基于矿柱多为剪切破坏的特征,提出了矿柱抗剪安全系数的概念,研究了数值计算中矿柱失稳的判据;刘沐宇等<sup>[12]</sup>运用点安全系数法和可靠度分析法分别计算了矿柱的点安全系数和可靠指标。人们不仅要分析了解矿柱稳定程度,即求其安全系数,而且有必要分析评价在众多的影响矿柱稳定性的因素中,各因素的影响程度及趋势,即进行敏感性分析。

目前评价各影响因素程度的方法有 2 种:一种是常用的敏感性分析方法,分析时仅变动一个因素取值,而保持其他因素基准值不变,由此逐次求出各影响因素的单位变化值引起的安全系数的增量和影响率(与各因素都取基准值比较)。因此,该方法无法实现同时考虑多个因素条件下的矿柱的稳定性比较与分析;另一种是灰色理论的相关分析方法,据灰色理论的相关分析方法来评价影响的大小,由各因素取值与计算出的安全系数间的关联度大小确定各因素影响的程度,但它只能给出各因素影响的大小顺序,不能给出每一因素变动对安全系数的变化曲线,对工程实例的指导性不强。

本文在分析矿柱稳定性的基础上,综合分析了矿柱稳定性的影响因素,并引入正交极差理论,对各影响因素的敏感性进行比较和分析,并通过实例研究得出了矿房宽度、矿柱宽度与矿柱安全系数间的关系,为矿柱稳定性影响因素敏感性提出一种新的分析方法。

## 1 矿柱稳定性分析

### 1.1 矿柱载荷

对作用于矿柱上的载荷问题,为正确地估算矿柱所受的载荷,国内外相继提出了一些假设和理论。在这些理论中,矿柱的面积承载理论得到较广泛的应用,该理论认为矿柱所承受的载荷是其所支撑顶板范围内直通地表的上覆岩柱的重力<sup>[13]</sup>,该矿柱的底面积  $S$  为按矿柱分摊的开采面积与矿柱自身面积之和,由此假设,矿柱的平均应力为

$$\sigma_p = \gamma h \left( 1 + \frac{W_o}{W_p} \right) \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为岩石容重;  $h$  为埋藏深度;  $W_o$ ,  $W_p$  分别为矿房和矿柱的宽度。

虽然由于该公式的前提假设,导致其计算结果要比实际载荷高些,但由于该计算公式简单易行,成为通用的矿柱载荷计算公式。

### 1.2 矿柱强度

世界各主要的采矿国家均进行了不少的实验室与现场原位实验,在实验研究与实例调查研究的基础上,结合理论分析,提出了十余种矿柱的强度计算公式,这主要是针对煤矿矿柱的研究结果,对金属矿山特别是对硬岩矿山矿柱的稳定性研究较少。Bieniawski 与 VanHeerden 对南非 Witbank 煤柱宽高比为 0.5 ~ 34 的 66 个煤柱试件进行了大规模的原位测试,得出的煤柱强度计算公式为

$$S_p = S_1 \left[ 0.64 + 0.36 \left( \frac{W_p}{h} \right)^\alpha \right] \quad (2)$$

式中,  $S_1$  为矿岩的强度参数,需根据矿柱布设方式而定;  $\alpha$  为常数,取值根据矿柱的宽高比值而定,当宽高比大于 5 时,  $\alpha = 1.4$ ,而当宽高比小于 5 时,  $\alpha = 1.0$ 。

### 1.3 矿柱失稳势函数

矿柱自回采形成直至屈服是一个渐进破坏的过程,从矿柱中垂直应力分布来看,“马鞍型”是稳定矿柱的应力分布特征,“平台型”应力分布是矿柱由稳定向失稳的标志,“拱形”则是矿柱失稳的特征<sup>[14]</sup>,在临界状态下矿柱宽度计算公式为

$$b_k = \frac{\gamma h b L + (L - 2r_p) r_p \sigma_{z1} \times 10^5}{\sigma_{z1} \times 10^5 (L - 2r_p) - \gamma h L} \quad (3)$$

式中,  $b$  为开采宽度;  $L$  为开采长度;  $r_p$  为矿柱破坏宽度;  $\sigma_{z1}$  为矿柱极限应力。

矿柱失稳主要是矿柱裂隙含量的变化触发,促使矿柱由稳定状态转化到失稳破裂状态,从而造成顶板垮塌,因此,以矿柱破坏宽度为状态变量,将式(3)整理可得:

$$r_p^2 + \xi r_p - \delta \sigma_{z1} + \psi = 0 \quad (4)$$

式中,  $\xi = \frac{1}{2}(L - b_k) \times 10^5$ ;  $\delta = \frac{1}{2} \frac{b_k}{\sigma_{z1}}$ ;  $\psi = \frac{1}{2}(b_k + b_k \gamma h L + b \gamma h L)$ 。

### 1.4 矿柱破坏形式

矿柱对采矿所引起荷载的整体响应取决于该矿柱的绝对或相对大小、矿柱岩体的地质构造和围岩对矿柱所施加的表面约束特性。图 1 为矿柱变形形状的主要模式,大多数的矿柱破坏的主要形式是矿柱表面的剥落、剪切破坏和与软弱夹层、节理等构造有关的破坏类型。图 1(a) 表示矿柱表面向采空区的碎裂;图 1(b) 表示对于规则节理矿岩和低宽高比的矿柱时剪切破坏;图 1(c) 表示矿柱的内部劈裂或横向膨胀和桶形破坏;图 1(d), (e) 表示沿地质结构面的

滑移与溃曲破坏。

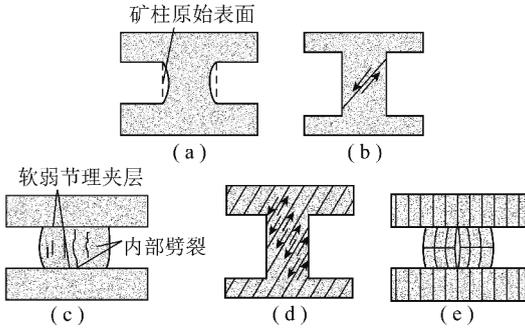


图1 矿柱变形形状的主要模式

Fig. 1 Main deformation features of ore pillar

### 1.5 矿柱稳定性影响因素

影响矿柱稳定性的因素较多,在进行矿柱稳定性分析计算时所考虑的影响因素主要有如下几项:①矿柱受载荷的大小;②矿柱的宽高比。矿柱宽高比大的矿柱稳定性好,常常以宽高比作为矿柱设计的主要指标;③矿房的尺寸与矿柱尺寸。矿房尺寸与矿柱分布应相互协调,矿柱的分布及其尺寸宜保持均匀一致,否则尺寸小的或支护面积大的矿柱,可能先期破坏而将载荷转嫁于相邻矿柱,造成大面积垮塌;④构造因素,对空场及矿柱中的结构面调查分析;⑤矿体自身的强度,包括单轴抗拉强度和单轴抗压强度。

## 2 安全系数计算方法

根据前述矿柱稳定性影响因素分析结果,在对矩形矿柱稳定性影响因素进行敏感性分析时,通常需要考虑8项因素:①采深( $H$ );②矿房宽度( $W_o$ );③矿柱宽度( $W_p$ );④矿柱高度( $h$ );⑤矿体的单轴抗压强度( $\sigma_c$ );⑥上覆岩层容重( $\gamma$ );⑦矿柱长度( $L_p$ );⑧矿柱长度方向的间距( $L_o$ )。

计算矩形矿柱安全系数的基本公式为

$$K = \frac{\sigma_c [0.64 + 0.36(W_p/h)]^\alpha}{\gamma H (1 + W_o/W_p)(1 + L_o/L_p)} \quad (5)$$

当矿柱的形状为方形时,矿柱长度与矿柱宽度相同,矿柱长度方向的间距与矿房宽度相同,于是,计算方形矿柱安全系数的公式可简化为

$$K = \frac{\sigma_c [0.64 + 0.36(W_p/h)]^\alpha}{\gamma H (1 + W_o/W_p)^2} \quad (6)$$

## 3 正交极差分析理论

正交设计方法是利用正交表科学地安排与分析多因素实验的方法,其特点是完成试验要求所需的实验次数少,数据点的分布很均匀,可用相应的极差分析方法、方差分析方法、回归分析方法等对试验结果进行分析,得出有价值的结论<sup>[15]</sup>。

试验时,因试验因子每个都在变化,无法判定因素影响的主次,只有利用极差分析才能找出因素的主次。所谓极差,是指每个因素的、不同水平的、试验结果间的最大差值。设因子个数为 $N$ ,序号为 $j, j=1, 2, \dots, N$ ;每个因子水平数为 $M$ ,水平序号为 $r, r=1, 2, \dots, M$ ,同一因子同一水平只能作 $M$ 次试验。为对应于各因素相应水平值由极限平衡法计算出的安全系数; $K_r = I_j \sim VII_j$ 为 $j$ 因子分别在同一 $r$ 水平下 $K_a$ 值之和的平均值( $I \sim VII$ ),它反映因子该水平效应的大小。将同一因子各水平效应逐一进行比较,即可找出最佳和最差水平,从而求出极差:

$$R_j = \max K_r - \min K_r \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

将各因素的极差进行比较,由极差大小顺序便可判别各因子的影响主次。再由各因子在不同水平的 $K_r$ 值作因子水平与安全系数的关系曲线,可得出因子水平的影响趋势以及有的放矢采取措施,从而能判明各因子产生的系统响应。

## 4 实例分析

江西某钨矿床为矽卡岩型白钨矿床,具有储量大,矿石品位高,矿体厚度大,倾角缓,矿体及顶底板围岩稳固,矿体分布范围广,连续性好,矿体及围岩含水率低,开采技术条件好等特点。但多年全面开花式地开发,缺乏整体规划,导致东区采空区杂乱,采空区面积较大又未做处理等问题,都给生产安全留下了重大隐患。该矿已经形成大规模的复杂采空区,空区呈多层分布、高大且连通,2006年底空区量已达150万 $m^3$ ,并且以每年近20万 $m^3$ 的速度递增,导致地压灾害日趋严重,采空区内矿柱安全状况岌岌可危。根据岩石类型(mi值)、岩体分级RMR值、岩体结构面发育程度GSI值、岩石单轴抗压强度指标和相关的特征参数,采用软件Roclab对4类主要岩石进行力学参数的工程处理(表1)。

根据采矿工艺的要求、矿体的赋存条件及影响因素,将影响矿柱稳定性的6个主要因素的各水平值控制在适当范围内,试验中每个因素取5个水平(表2)。

各因素在不同水平的值,若按一固定增加或减少顺序以一定步长变化,做试验时易产生系统的顺序偏差,为克服这种偏差,在取值范围内,部分影响因素采用随机序列构造试验的水平取值。表2中有6个因素,每个因素5个水平值,选用 $L_{25}(5^6)$ 正交表,按式(6)计算矿柱安全系数。试验方案及结果分析见表3。

按照极差大小,确定矿柱稳定性影响因素的主次顺序为:矿房宽度>矿柱宽度>采深>矿柱高度>矿岩强度>上覆岩层容重,即矿房宽度、矿柱宽度对矿柱稳定性的影响最为显著,采深、矿柱高度次之,矿岩的

表 1 主要岩体力学参数

Table 1 Main mechanical parameters

岩性	块体密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
灰岩	2.75	23.71	0.29	37.82	0.88	1.86	41.42
大理岩	2.80	20.55	0.25	28.71	0.64	2.65	38.36
角岩	3.25	33.50	0.16	125.50	2.66	5.59	42.50
花岗岩	2.62	27.55	0.17	125.09	1.63	5.42	44.87

表 2 矿柱稳定性计算试验因素方案

Table 2 Experimental scheme for the calculation of factors influencing ore pillar stability

水平	采深/m	矿柱高度/m	矿房宽度/m	矿柱宽度/m	矿岩强度/MPa	上覆岩层密度/( $t \cdot m^{-3}$ )
1	40	35	8	3	90	2.85
2	105	27	12	5	70	2.65
3	170	19	16	7	130	2.80
4	235	11	20	9	110	2.70
5	300	3	24	11	50	2.75

表 3 矿柱稳定性计算方案与结果分析

Table 3 Calculation scheme and result analysis of the ore pillar stability

试验号	采深	矿柱高度	矿房宽度	矿柱宽度	矿岩强度	上覆岩层容重	稳定性系数	试验号	采深	矿柱高度	矿房宽度	矿柱宽度	矿岩强度	上覆岩层容重	稳定性系数
1	1	1	1	1	1	1	3.939	17	4	2	5	3	1	4	0.530
2	1	2	2	2	2	2	4.037	18	4	3	1	4	2	5	2.461
3	1	3	3	3	3	3	8.307	19	4	4	2	5	3	1	4.440
4	1	4	4	4	4	4	9.168	20	4	5	3	1	4	2	0.440
5	1	5	5	5	5	5	8.800	21	5	1	5	4	3	2	0.891
6	2	1	2	3	4	5	3.682	22	5	2	1	5	4	3	3.453
7	2	2	3	4	5	1	1.646	23	5	3	2	1	5	4	0.172
8	2	3	4	5	1	2	3.663	24	5	4	3	2	1	5	0.497
9	2	4	5	1	2	3	0.217	25	5	5	4	3	2	1	0.814
10	2	5	1	2	3	4	8.411	K1	4.888	1.898	6.850	1.018	2.835	2.167	
11	3	1	3	5	2	4	1.906	K2	3.358	2.350	3.524	2.360	2.559	4.037	
12	3	2	4	1	3	5	0.322	K3	2.702	2.841	2.233	3.161	4.147	2.340	
13	3	3	5	2	4	1	0.496	K4	2.126	3.448	1.616	4.028	3.461	3.632	
14	3	4	1	3	5	2	2.470	K5	1.798	4.474	1.165	4.452	2.187	2.715	
15	3	5	2	4	1	3	5.973	极差 R	3.090	2.576	5.680	3.434	1.960	1.870	
16	4	1	4	2	5	3	0.210	因素主次	$W_o > W_p > H > h > \sigma_c > \gamma$						

强度和上覆岩层容重对矿柱稳定性的影响极差  $R < 2$ , 相对较弱。

根据正交极差分析可知,矿柱安全系数值的大小与采深、矿房宽度、矿柱高度和容重间成负相关关系,即随采深、矿房宽度、矿柱高度和容重的增加而降低;矿柱的安全系数与矿柱宽度和矿岩强度成正相关的关系,即随它们的增加而增加。绘制对矿柱稳定性影响较大的因素矿房宽度和矿柱宽度与矿柱安全系数间的关系曲线(图 2),为了满足矿柱稳定许用安全系数  $K=1.5$  的要求,采场结构参数须满足如下条件:矿

房宽度值小于 21.03 m,矿柱宽度值大于 3.718 m。

## 5 结 论

(1)矿柱稳定性是影响地下采空区稳定状态的重要结构单元,影响矿柱稳定性的因素主要包括采深、矿房宽度、矿柱宽度、矿柱高度、矿体的单轴抗压强度、上覆岩层的容重、矿柱长度、矿柱长度方向的间距。

(2)综合考虑了影响矿柱稳定性的各项主要因素,提出并简化了方形矿柱安全系数计算方法,并提

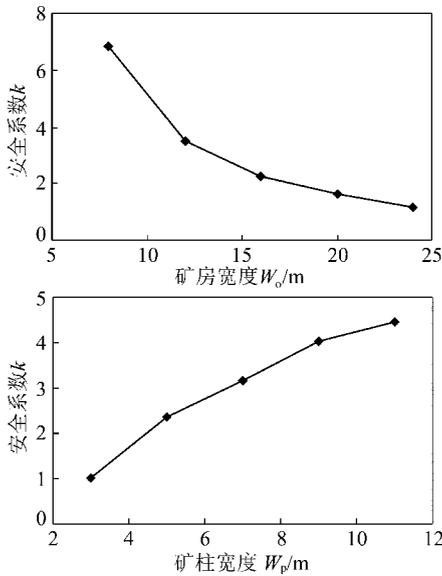


图2 矿房、矿柱宽度与安全系数间的关系曲线

Fig. 2 Relationship between the room width, ore pillar width and safety parameter

出采用正交极差分析理论对矿柱稳定性影响因素进行敏感性分析。

(3)通过江西某钨矿矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析结果表明,正交极差分析理论能较好地分析各个因素与矿柱稳定性系数之间的关系,并获得了许可安全系数条件下矿房极限宽度值和矿柱临界尺寸。

## 参考文献:

[1] 饶运章,柴 炜,黄奔文. ANSYS 数值计算在紫金山金铜矿矿柱稳定性分析中的应用[J]. 黄金, 2008, 29(7): 23-26.  
Rao Yunzhang, Chai Wei, Huang Benwen. ANSYS numerical calculation of ore pillar stability in Zijinshan Gold-copper Mine[J]. Gold, 2008, 29(7): 23-26.

[2] 李江腾. 硬岩矿柱失稳及时间相依性研究[D]. 长沙:中南大学, 2005.

[3] 陈佩佩,刘鸿泉,张刚艳. 海下综放开采防水安全煤岩柱厚度的确定[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 875-880.  
Chen Peipei, Liu Hongquan, Zhang Gangyan. Determination of water proof rock pillar height with the top coal caving under sea[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 875-880.

[4] 唐春安,乔 河,徐小荷,等. 矿柱破坏过程及其声发射规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3): 266-269.  
Tang Chun'an, Qiao He, Xu Xiaohu, et al. Numerical simulation on pillar failure and associated acoustic emissions[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(3): 266-269.

[5] 王金安,李大钟,马海涛. 采空区矿柱-顶板体系流变力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 577-582.  
Wang Jin'an, Li Dazhong, Ma Haitao. Study of rheological mechanical model of pillar-roof system in mined-out area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 577-582.

[6] 隋 斌,朱维申,李树忱. 深部岩柱在动态扰动下力学响应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2501-2505.  
Sui Bin, Zhu Weishen, Li Shuchen. Simulation of mechanical response of deep rock pillar triggered by dynamic disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2501-2505.

[7] 罗 辉,杨仕教,陶干强,等. 基于 FEM-ANN-MCS 动态模糊可靠度的矿柱稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 551-554.  
Luo Hui, Yang Shijiao, Tao Ganqiang, et al. Stability analysis of ore pillar and application using concept of dynamic fuzzy reliability based on Finite Element Method-Artificial Neural Network-Monte Carlo Simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 551-554.

[8] 王洪武,吴爱祥,杨仕教,等. 基于正交有限元的矿柱动态模糊可靠性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 97-110.  
Wang Hongwu, Wu Aixiang, Yang Shijiao, et al. Analysis of ore pillar and application using concept of dynamic fuzzy reliability based on orthogonal finite element method[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 97-110.

[9] 李江腾,曹 平. 初始几何缺陷对超高矿柱稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4185-4189.  
Li Jiangteng, Cao Ping. Effect of initial geometrical imperfections on stability of ultrahigh pillar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4185-4189.

[10] 王学滨. 具有初始随机材料缺陷的矿柱渐进破坏模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 176-200.  
Wang Xuebin. Numerical simulation of progressive failure in mine pillars having initially random material imperfections[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(2): 176-200.

[11] 王在泉,李华峰. 矿柱抗剪安全系数的数值计算方法及分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 277-280.  
Wang Zaiquan, Li Huaifeng. Numerical calculation method for shear safety coefficient of mine pillar[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(2): 277-280.

[12] 刘沐宇,徐长佑. 地下采空区矿柱稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2000, 20(1): 19-22.  
Liu Muyu, Xu Changyou. Stability analysis of pillars in mined-out area[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(1): 19-22.

[13] 廖文景. 石膏矿采空区积水对矿柱稳定性的影响分析[J]. 采矿技术, 2009, 9(3): 52-53.  
Liao Wenjing. Analysis the effect of water in mined-out area on the ore pillar stability in the gypsum mine[J]. Mining Technology, 2009, 9(3): 52-53.

[14] 郭建军,冀源东,杨玉泉. 矿柱失稳突变学机理及对夏甸金矿矿柱稳定性分析[J]. 黄金, 2008, 29(11): 24-28.  
Guo Jianjun, Dou Yuandong, Yang Yuquan. Study on mutation theory of pillar instability and analysis on pillar stability of Xiadian Gold Mine[J]. Gold, 2008, 29(11): 24-28.

[15] 李爱兵. 边坡稳定性影响因素敏感度的正交极差分析方法[J]. 勘察科学技术, 1995(4): 28-31.  
Li Aibing. Orthogonal polar difference analysis method of the sensitivity of the influencing factors for slope stability[J]. Site Investigation Science and Technology, 1995(4): 28-31.