

[文章编号] 1004- 0609(2001) 04- 0671- 05

临时矿壁结构的可靠性^①

邓 建¹, 古德生², 李夕兵²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中南大学 资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083)

[摘 要] 临时矿壁的稳定性直接影响无间柱连续采矿技术的贫化率和损失率, 进而决定该试验技术的成败。采用确定性分析法分析采矿结构的稳定性, 由临时矿壁的力学分析建立临时矿壁的抗倾覆条件极限状态方程和强度条件极限状态方程, 进行临时矿壁稳定可靠性分析, 得出对实际工程有参考价值的结论。

[关键词] 无间柱连续采矿; 临时矿壁; 可靠性分析; 抗倾覆

[中图分类号] TD 853

[文献标识码] A

无间柱连续采矿法将矿体划分为阶段, 再将阶段划分为矿段, 并以矿段为回采单元, 矿段间不留间柱。采用下向平行深孔侧向崩矿(矿段中部拉切割槽)和无二次破碎水平的组合式振动机出矿的底部结构, 用分节式振动运输列车运搬矿石, 形成采场出矿、运矿连续作业线。崩矿过程中靠充填空区一侧留临时隔离矿壁, 待本矿段出矿工作行将结束时再进行一次崩落, 强采强出, 并跟随快速充填。采切、回采和充填作业在 3 个相邻块段间平行进行, 相互衔接, 分别转移, 采矿工作面在阶段上连续推进^[1, 2]。因此, 临时矿壁对一分区充填体的稳定性具有重要的保护作用, 临时矿壁的稳定性直接影响该采矿技术的贫化率和损失率, 进而决定试验技术的成败。

采矿结构的稳定性分析一般是采用确定性分析法^[3~5]。作者在确定性分析法的基础上, 从临时矿壁的力学分析入手, 建立临时矿壁的抗倾覆条件极限状态方程和强度条件极限状态方程, 进行临时矿壁稳定可靠性分析与设计。

1 临时矿壁的力学分析

地下工程结构的力学分析是进行稳定可靠性分析的基础。图 1 为临时矿壁受力示意图, 图中 F_1 表示一分区充填体所施加的力, 它随深度线性增加, F_2 表示凿岩峒室临时点柱作用力, G 为临时矿壁的重力。各种力分别计算如下:

1) 一分区充填体所施加的力 F_1

一分区充填体施加在临时矿壁上的力是充填体

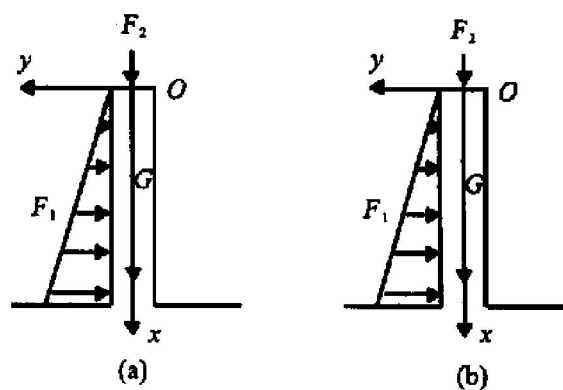


图 1 临时矿壁受力示意图

Fig. 1 Mechanical analysis of temporary ore wall
(a) —Anti-overturn analysis; (b) —Strength analysis

的对外侧向压力。对于充填体的对外侧向压力, 大多都是借用土力学中朗金(Rankine)土压力理论, 即假定有一挡墙, 墙背竖直、光滑, 填土面水平, 也就是墙背与介质间无摩擦力。这显然与实际情况有出入。在计算一分区充填体施加在临时矿壁上的力时, 在库仑(Coulomb)理论的基础上, 可计入充填体面超载、充填体粘聚力、充填体与矿壁间的粘聚力等的影响, 其总主动侧压力的表达式为

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_a \quad (1)$$

式中

$$K_a = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cos^2 \Psi} \{ [\cos(\alpha - \beta) \cos(\alpha + \delta) + \sin(\phi - \beta) \sin(\phi + \delta)] K_q + 2K_2 \cos \phi \cdot \sin \Psi + K_1 \sin(\alpha + \Psi - \beta) \cos \Psi + K_0 \sin(\beta - \phi) \cos \Psi - 2 \sqrt{G_1 G_2} \} \quad (2)$$

$$K_q = \frac{1}{\cos \alpha} \left[1 + \frac{2q}{\gamma h} \zeta - \frac{h_0}{h^2} \left(h_0 + \frac{2q}{\gamma} \right) \zeta^2 \right];$$

$$K_0 = \frac{h_0^2}{h^2} \left(1 + \frac{2q}{\gamma h_0} \right) \frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} \zeta;$$

$$K_1 = \frac{2c}{\gamma h \cos(\alpha - \beta)} \left[1 - \frac{h_0}{h} \zeta \right];$$

$$K_2 = \frac{2c}{\gamma h} \left[1 - \frac{h_0}{h} \zeta \right];$$

$$\zeta = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos(\alpha - \beta)};$$

$$h_0 = \frac{2c}{\gamma} \frac{\cos \alpha \cos \phi}{1 + \sin(\alpha - \phi)};$$

$$G_1 = K_q \sin(\delta + \phi) \cos(\delta + \alpha) + K_2 \cos \phi + \cos \psi [K_1 \cos \delta - K_0 \cos(\alpha + \delta)];$$

$$G_2 = K_q \cos(\alpha - \beta) \sin(\phi - \beta) + K_2 \cos \phi;$$

$$\psi = \alpha + \delta + \phi - \beta;$$

式中 K_a —充填体总主动侧压力系数; α —矿柱背与竖直线的夹角($^\circ$); β —充填体面的倾角($^\circ$); δ —充填体与矿柱材料间的外摩擦角($^\circ$); ϕ —充填体内摩擦角($^\circ$); γ —充填体的单位体重; q —充填体面均布超载(kPa); h_0 —充填体表面裂缝深度(m); h —墙(矿柱)高度(m); c —充填体的粘聚力或充填体与矿柱背间的粘聚力(kPa)。

充填体主动侧压力沿墙高的压力分布强度, 可通过 F_1 对 z 取导数而得到:

$$\frac{dF_1}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{2} \gamma z^2 K_a \right) = \gamma z K_a$$

可见, 充填体主动侧压力强度沿墙(矿柱)高成三角形线性分布, 充填体总主动侧压力合力的作用点在离墙底 $h/3$ 处, 方向与墙面的法线成 δ 角。

2) 凿岩峒室临时点柱所施加的力 F_2

凿岩峒室临时点柱对临时矿壁所施加的力 F_2 很难用解析式来求解, 作者采用数值模型的方法来计算。分为抗倾覆可靠性分析和强度可靠性分析两种情况:

①在临时矿壁抗倾覆可靠性分析中, F_2 简化为集中载荷, 如图 1(a) 所示。

$$F_2 = \gamma_y A \quad (3)$$

式中 γ_y —临时点柱内的垂直应力; A —临时点柱水平截面积。

利用建立的无间柱连续采矿法三维数值模型^[6], 可以求得临时点柱内的垂直应力 γ_y 。

②在临时矿壁强度可靠性分析中, F_2 简化为均布载荷, 如图 1(b) 所示。根据圣维南原理, 可得沿临时矿壁均匀分布的载荷:

$$F_2 = \gamma_y A / A_1 \quad (4)$$

式中 A_1 —临时矿壁水平截面积, 其余符号意义

同前。

3) 临时矿壁的重力 G

单位厚度临时矿壁的重力 G 为

$$G = \gamma_b H W \quad (5)$$

式中 γ_b —临时矿壁矿石的单位体重; H —临时矿壁的垂直高度; W —临时矿壁的宽度。

2 临时矿壁的极限状态方程

1) 抗倾覆条件极限状态方程 $g_1(x)$

假设抗倾覆力矩 $M_K = G \cdot (W/2) + F_2 \cdot (W/$

2), 倾覆力矩 $M_q = F_1 \cdot H/3$; 抗倾覆极限条件为 $M_K \geq M_q$, 对应的抗倾覆条件极限状态方程为

$$\begin{aligned} g_1(x) &= G \cdot W/2 + F_2 \cdot W/2 - F_1 \cdot H/3 \\ &= (\gamma_b H W + \gamma_y A) \cdot (W/2) - \\ &\quad (1/2) \gamma H^2 K_a \cdot H/3 \end{aligned} \quad (6)$$

式中符号意义同前。

抗倾覆安全系数为

$$k_A = M_K / M_q = (G \cdot W/2 + F_2 \cdot W/2) / (F_1 \cdot H/3) \quad (7)$$

2) 强度条件极限状态方程 $g_2(x)$

把临时矿壁视为矩形截面柱, 除承受重力外, 左侧承受随深度线性增加的充填体静压力作用, 上端承受临时点柱的均布线载荷作用。在计算临时点柱应力时, 把二者迭加。

对于临时矿壁承受重力和左侧承受随深度线性增加的充填体静压力作用的情况, 可假设应力函数 $\varphi_1 = Ax^3y^3 + Bxy^5 + Cx^3y + Dxy^3 + Ex^3 + Fxy$, 式中 A, B, C, D, E 和 F 是待定系数, 系数应满足 $A = -\frac{5}{3}B$ 。

在顶端的边界条件为 $\int_{(W/2)}^{(W/2)} (\tau_{1xy})_{x=0} dy = 0$ 。

在这里, 体力分量 $x = \gamma_b g, y = 0$ 。

由应力函数

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{\gamma}{3W^3} x^3 y^3 - \frac{\gamma}{5W^3} x y^5 - \frac{\gamma}{4W} x^3 y + \frac{\gamma}{10W} x y^3 \\ &\quad - \frac{\gamma}{12} x^3 - \frac{\gamma W}{80} x y \end{aligned}$$

可得应力分量的表达式

$$\sigma_{1x} = \frac{2\gamma}{W^3} x^3 y + \frac{\gamma}{W^3} \left(\frac{3}{5} W^3 - 4y^2 \right) xy - \gamma_b x$$

$$\sigma_{1y} = \left(2 \frac{\gamma}{W^3} - \frac{3\gamma}{2h} - \frac{1}{2} \right) \gamma_b x$$

$$\tau_{1xy} = -\frac{3\gamma}{W^3} x^2 \left(y^2 - \frac{W^2}{4} \right) + \frac{\gamma}{W^3} \left(y^4 - \frac{W^4}{16} \right) -$$

$$\frac{3\gamma}{10W}(y^2-\frac{W^2}{4})$$

对于临时矿壁上端承受临时点柱的均布线载荷作用,可假设应力函数 $\varphi_2=k_y^2$, 式中 k 为待定系数,得应力分量

$$\sigma_{2x}=F_2; \sigma_{2y}=0; \tau_{2xy}=0$$

因此,临时矿壁垂直方向荷载效应 $S=\sigma_{2x}+\sigma_{1x}$, 抗力为临时矿壁材料的单轴抗压强度极限 $R=\sigma_c$ 。强度极限条件为 $R\geq S$, 对应的强度条件极限状态方程为

$$g_2(x)=R-S=\sigma_c-(\sigma_{2x}+\sigma_{1x})=\sigma_c-[\sigma_y A/A_1+\frac{2\gamma}{W^3}x^3y+\frac{\gamma}{W^3}(\frac{3}{5}W^3-4y^2)xy-\gamma_b x] \tag{8}$$

强度安全系数为

$$k_S=R/S=\sigma_c/(\sigma_{2x}+\sigma_{1x}) \tag{9}$$

影响临时点柱稳定的因素如点柱结构尺寸、荷载、爆破地震、点柱材料的物理力学性质等,都是随机变量。其中临时矿壁矿石的单位体重 γ_b 、抗压强度 σ_c 和一分区充填体的单位体重 γ 等随机变量的影响最为显著,参考相关文献[7, 8], 均视其为正态分布随机变量。在临时点柱稳定可靠性分析中,忽略其它影响因素变异的影响。计算中所取矿岩物理力学参数见表 1 所示。

3 临时矿壁抗倾覆可靠性综合分析

临时矿壁的预留宽度对无间柱连续采矿法临时矿壁的稳定性具有重要影响。在不同的矿壁宽度条件下,用安全系数法可计算抗倾覆安全系数。同时,把矿石的单位体重 γ_b 、抗压强度 σ_c 和一分区充填体的单位体重 γ 等视为随机变量,在给定均值(临时矿壁 $\gamma_b=0.0328\text{ MN/m}^3$, 充填体 $\gamma=0.0221\text{ MN/m}^3$)和变异系数(临时矿壁 $V_{\gamma_b}=0.1$, 充填体 $V_{\gamma}=0.1$)条件下,运用可靠性分析程序,计算抗倾覆极限状态方程的可靠指标,如表 2 所示。分析表 2 数据可得出如下结论:

1) 抗倾覆可靠指标和抗倾覆安全系数都与临

时矿壁宽度有相同的变化趋势:随着矿壁宽度的增加,抗倾覆可靠指标和抗倾覆安全系数均呈近似的线性增长。但在宽度大于 5.5 m 以后,抗倾覆可靠指标随宽度的增加迅速增加。

2) 因目前采矿工程中可靠性研究的文献很少,更谈不上统一的采矿结构的设计可靠指标。这里借用建筑结构构件承载能力极限状态的设计可靠指标,脆性破坏三级标准至少在 3.2 以上。故从表 2 看出,临时矿壁的设计宽度至少要 5 m。这也与挡土墙理论非常吻合。按照挡土墙理论,抗倾覆的安全系数应大于 1.5,从表 2 看出,临时矿壁的设计宽度也至少应大于 5 m。从而说明本文建立的极限状态方程和开发的可靠性分析程序正确而且实用。

随机变量变异系数的变化与临时矿壁的稳定状况有密切关系。临时矿壁稳定可靠性分析综合图是在给定随机变量变异系数的变化范围下,作出的可靠性分析综合图(如图 2)。

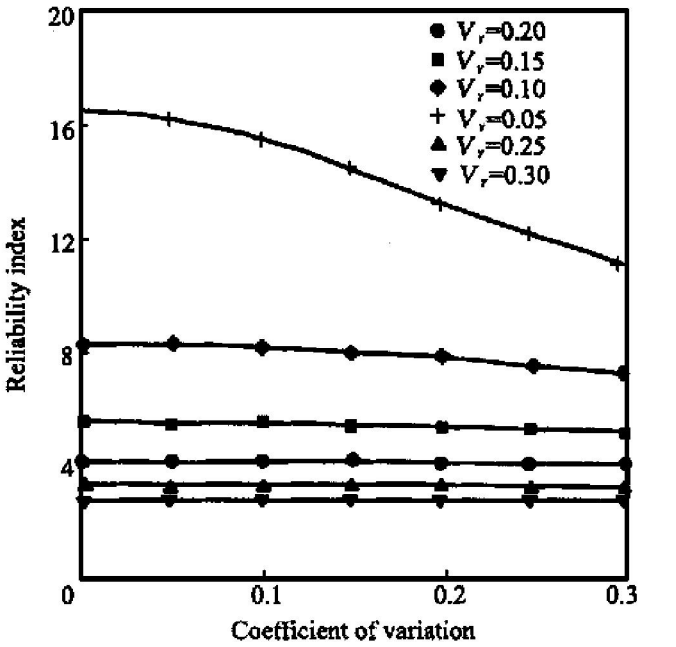


图 2 临时矿壁抗倾覆可靠性分析综合图
Fig. 2 General reliability analysis on ore wall's anti-overturn condition

由图 2 可以看出:

1) 在临时矿壁矿石变异系数 V_{γ_b} 较小时,临时

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rocks and orebody

Items	Compressive strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Poisson' s ratio	Cohesion / MPa	Angle of internal friction/ (°)	Bulk volumic mass/ (kg•m ⁻³)
Hanging wall	38.00	1.20	8	0.16	0.60	53	2.80
Foot wall	28.50	2.30	21	0.26	2.16	50	2.80
Orebody	60.00	5.60	65	0.31	4.30	51	4.04
Backfilling	3.50	0.50	1	0.30	0.65	35	2.21

表 2 矿壁宽度与安全系数和可靠指标的关系

Table 2 Relationships between wall's width and safety factor or reliability index

Width /m	Safety factor		Reliability index	
	Anti overturn analysis	Strength analysis	Anti overturn analysis	Strength analysis
3.0	0.957	0.831	0.229	0.121
3.5	1.127	1.007	0.685	0.523
4.0	1.300	1.126	1.663	1.439
4.5	1.476	1.370	2.718	2.498
5.0	1.656	1.554	3.870	3.076
5.5	1.838	1.621	5.142	3.840
6.0	2.023	1.823	6.563	5.324
6.5	2.212	1.912	8.173	7.187

矿壁可靠指标 β 随充填体容重变异系数 V_Y 的变化相当敏感。例如 $V_{yb} = 0$ 时, $2.7 \leq \beta \leq 16.7$ 。而当 V_{yb} 较大时 β 随 V_Y 只在较小范围内变化。说明 V_Y 和 V_{yb} 小时, 其值变化对 β 的影响显著。

2) 在试验矿山地质采矿条件下, 临时矿壁抗倾覆可靠指标 β 可能在 $2.64 \leq \beta \leq 16.7$ 之间, 而脆性破坏三级标准至少在 3.2 以上, 因此, 如果变异系数控制不好, 比如一分区充填体容重变异系数 V_Y 在 0.3 以上, 或者临时矿壁刚好留在矿石变异系数 V_{yb} 较大的地方, 临时矿壁可能出现破坏情况。

4 临时矿壁强度稳定可靠性综合分析

与以上临时矿壁抗倾覆稳定可靠性综合分析相类似, 临时矿壁强度稳定可靠性综合分析是在不同的矿壁宽度条件下, 用安全系数法计算强度安全系数; 同时, 把矿石的单位体重 γ_b 、抗压强度 σ_c 和一分区充填体的单位体重 γ 等视为随机变量, 在给定均值(临时矿壁容重 $\gamma_b = 0.0328 \text{ MN/m}^3$, 充填体容重 $\gamma = 0.0221 \text{ MN/m}^3$) 和变异系数(临时矿壁 $V_{yb} = 0.1$, 充填体 $V_Y = 0.1$) 条件下, 运用可靠性分析低阶矩法程序, 计算强度极限状态方程的可靠指标, 结果如表 2 所示。由表 2 可以看出:

1) 临时矿壁强度可靠指标和强度安全系数都与临时矿壁宽度有相同的变化趋势: 随着矿壁宽度的增加, 可靠指标和安全系数均呈近似的线性增长。这与矿壁宽度与抗倾覆安全系数和可靠指标的关系相类似。

2) 临时矿壁强度可靠指标和强度安全系数都比相应的抗倾覆可靠指标和安全系数小。根据建筑

结构构件承载能力极限状态的设计可靠指标, 脆性破坏三级标准至少在 3.2 以上。从表 2 看出, 临时矿壁的设计宽度至少 5.5 m, 最好是 6.0 m。这要大于抗倾覆条件的设计宽度。说明临时矿壁的破坏是由于临时矿壁矿石强度条件引起的, 其次才是临时矿壁的倾覆破坏。也可以说临时矿壁的破坏首先是由于其矿石强度不够引起, 紧接着是倾覆破坏。这对于临时矿壁的设计具有重要意义。它表明临时矿壁绝对不能设计在有软弱夹层的矿石中, 因为软弱夹层的强度很低, 会严重影响临时矿壁的稳定性的。

5 结论

1) 随着矿壁宽度的增加, 可靠指标和安全系数均呈近似的线性增长。这对抗倾覆条件和强度条件都适用。

2) 临时矿壁强度可靠指标和强度安全系数都比相应的抗倾覆可靠指标和安全系数小, 临时矿壁的破坏是由于临时矿壁矿石强度条件引起的, 其次才是临时矿壁的倾覆破坏。也可以说临时矿壁的破坏首先是由于其矿石强度不够引起, 紧接着是倾覆破坏。

3) 临时矿壁的设计宽度至少要 5.5 m, 此时强度可靠指标为 3.840, 抗倾覆可靠指标为 5.142。矿山开采实践证实, 按此设计, 临时矿壁在开采过程中既保持了稳定性, 又符合无间柱连续采矿法的生产和技术要求。

[REFERENCES]

- [1] GU De-sheng(古德生), DENG Jian(邓建), LI Xi-bing(李夕兵). 无间柱连续采矿的岩石力学优化 [J]. Journal of Central South University of Technology(中南工业大学学报), 1999, 30(5): 441-444.
- [2] GU De-sheng(古德生), XU Lun-wu(许伦武), LUO Dian-ping(罗典平), et al. 地下金属矿山采矿连续工艺 [J]. China Mining Magazine(中国矿业), 1992, 1(2): 49-52.
- [3] Brown E T. Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics [M]. London: Allen and Unwin, 1987. 1-10.
- [4] LIU Ke-ren(刘可任). Foundation of Backfill Theory(充填理论基础) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987. 145-181.
- [5] WU Ai-xiang(吴爱祥), HU Hua(胡华), YU Jian(于健). 湘西金矿深部采场稳定性计算机模拟分析 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有

- 色金属学报), 1998, 8(4): 734– 738.
- [6] DENG Jian(邓 建). 地下岩体工程可靠性分析理论与应用研究 [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999.
- [7] Everts H. Reliability of hoek-brown estimates of rock mass properties and their impact on design [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(1): 63– 68.
- [8] XU Jianping (徐 建 平), HU Hourtian (胡 厚 田), ZHANG Ansong(张安松). 边坡岩体物理力学参数的统计特征研究 [J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering(岩石力学与工程学报), 1999, 18(4): 382– 386.

Reliability analysis of temporary ore wall structure in non-pillar continuous mining

DENG Jian¹, GU De-sheng², LI Xi-bing²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University,
Shanghai 200092, P. R. China;

2. College of Resource, Environment and Civil Engineering, Central South University,
Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] The temporary ore wall exerts the direct control of the dilution rate and loss rate for non-pillar continuous mining method, and then it is decided that whether this experimental mining method is successful or not. The deterministic methods are generally used in stability analysis of mining structures. Based on deterministic methods, anti-overturn limit state equation and strength limit state equation were established through a thorough mechanical analysis of temporary ore wall. The reliability analysis of this ore wall was conducted, and a few conclusions which were proved useful to mining engineering were obtained.

[Key words] non-pillar continuous mining; temporary ore wall; reliability analysis; anti-overturn

(编辑 吴家泉)