

# 义马北露天煤矿工作帮边坡可靠性研究\*

The reliability research on the working slope of North Surface Coal Mine of Yima Coal Administration

王家臣 谭文辉

(中国矿业大学(北京校区), 北京, 100083)

宁柯

(义马矿务局北露天煤矿, 三门峡, 472000)

**文 摘** 基于岩体性质空间变异性研究, 运用 FLAC 数值计算、物理模拟试验、Monte-Carlo-Sarma 法等对义马矿务局北露天煤矿工作帮边坡进行了系统的可靠性研究, 同时对边坡可能形成的渐进破坏方式进行了可靠性分析, 研究结果表明, 边坡的破坏概率是可以接受的, 最可能的破坏方式为从上向下扩展。

**关键词** 边坡, 空间变异, 可靠性, 破坏概率

**中图法分类号** TD 824.7

**作者简介** 王家臣, 男, 1963 年生, 在北京科技大学 1987 年硕士毕业, 1995 年博士后出站, 现为中国矿业大学(北京校区)教授, 主要从事岩石开挖工程的随机分析、放顶煤开采技术和矿业系统工程的教学和科研工作。

Wang Jiachen Tan Wenhui

(Beijing Campus, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083)

Ning Ke

(North Surface Coal Mine of Yima Coal Administration, Sanmenxia, 472000)

**Abstract** Based on the spatial variability of rock mass strength, a reliability analysis on the working slope of North Surface Coal Mine of Yima Coal Administration is systematically performed by means of FLAC numerical software, physical simulation experiment and Monte-Carlo-Sarma technique. At the same time, a probable progressive failure mechanism is studied by reliability method. The failure probability of the slope can be accepted according to the engineering function.

**Key words** slope, spatial variability, reliability, failure probability

## 1 引言

自从 60 年代初以来, 国内外均开展了岩石边坡工程的可靠性研究, 然而直到目前为止, 大部分研究还局限于将工程结构可靠性理论和方法直接应用到岩石边坡工程中, 对岩石边坡自身特点研究的较少, 而且对实际工程的系统研究也较少。本文将岩体强度作为空间随机介质, 运用地质统计学、FLAC 数值计算、物理模拟试验、Monte-Carlo 法等对义马矿务局北露天煤矿工作帮边坡的典型剖面进行了可靠性研究。

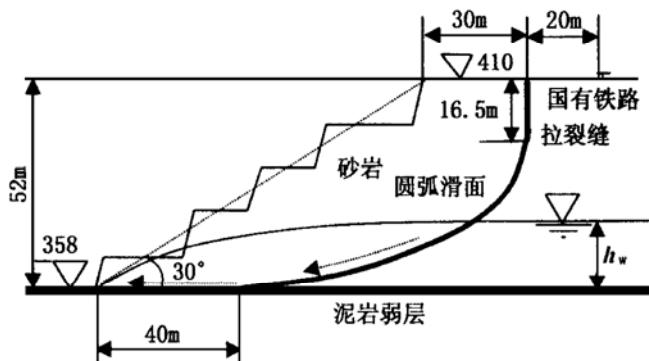


图 1 工作帮典型边坡剖面( $h_w$ —水位线高度)

Fig. 1 Section of the working slope

工作帮边坡位于采矿场的南侧, 最终边坡高度为 33~67 m, 边坡角为 20°~32°, 地表距坡顶线 50~100 m 处有一国有铁路干线通过, 因此正确评价边坡的可靠性无论是对于采矿场下部煤炭的经济回采, 还是保证国有铁路的安全畅通都具有重要意义。工作帮边坡的典型剖面见图 1。

## 2 岩体强度的实测及分析

为了掌握边坡岩体强度的空间变异性, 为可靠性计算提供基础数据, 沿工作帮 390 水平进行了砂岩点荷载强度的测试。测试区域长 100 m, 每隔 1 m 取 1 块试样进行点荷载强度试验, 然后将试验结果按 ISRM 建议方法折算成标准点荷载指数  $I_{s(50)}$ , 见图 2。

砂岩标准点荷载指数  $I_{s(50)}$  的均值为 1.37 MPa, 标准差为 1.01 MPa, 变异系数为 0.7372。总体样本的  $I_{s(50)}$  服从负指数分布, 其概率密度函数可以用下式来表达:

$$f(I_{s(50)}) = 0.7299 \exp(-0.7299 I_{s(50)}) \quad (1)$$

\* 煤炭科学基金资助项目(编号: 96 采 10203)

到稿日期: 1998-12-21

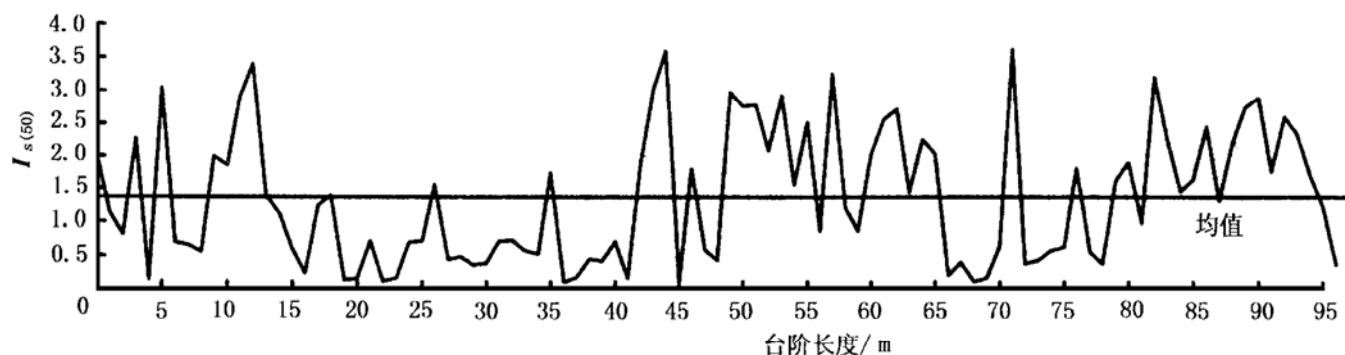
图 2 砂岩标准点荷载指数  $I_{s(50)}$  沿台阶的变化情况

Fig. 2 Variation of standard point load index along slope axis

从图 2 可以看出, 沿台阶轴线方向, 砂岩标准点荷载指数波动较大, 但总体均值不变, 没有产生漂移, 且波动范围稳定, 满足地质统计学的本征假设, 故实验变差函数为

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I_{s(50)}(x_i) - I_{s(50)}(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中  $h$  为取样点的间隔距离, 本研究中  $h = 1 \text{ m}$ ;  $N(h)$  为计算点与后续取样点的数据对数;  $x_i$  为取样点。

选用球状变差函数理论模型拟合实验变差函数<sup>[1]</sup>, 结果见式(3)与图 3。从中可以看出, 在  $h = 0$  处, 函数产生跳跃, 不连续, 其跳跃值  $C(0) = 0.6178$ , 称为块金常数, 它反映了标准点荷载指数的连续性差, 在很短距离内, 可产生大的变化。

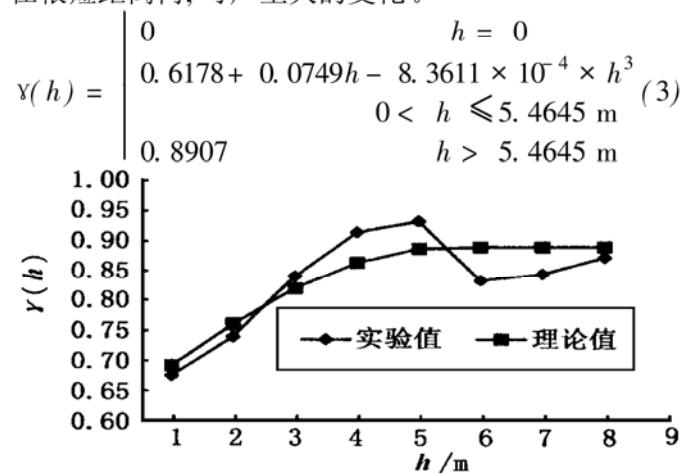


图 3 实验变差函数及理论变差函数图

Fig. 3 Experimental and theoretical variation diagrams of the sandstone

从中得出, 砂岩标准点荷载指数的相关距离为  $5.4645 \text{ m}$ 。根据相关函数模型对边坡可靠性计算结果影响不大的实际情况, 选用三角相关函数模型<sup>[2,3]</sup>, 得出标准点荷载指数的相关函数  $R(h)$ :

$$R(h) = \begin{cases} 1 - \frac{h}{5.4645} & h \leq 5.4645 \text{ m} \\ 0 & h \geq 5.4645 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

在边坡可靠性分析计算区  $200 \text{ m}$  范围内的 390 台阶坡面, 人为设定参照标尺, 垂直台阶坡面摄影, 获取照片, 然后在室内进行台阶坡面上裂隙的水平和垂直间距的统计分析, 它们均服从对数正态分布, 见图 4, 5。

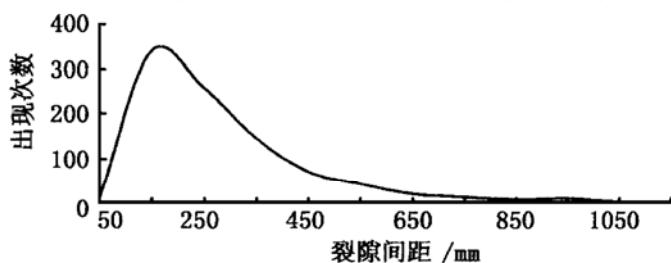


图 4 裂隙的水平间距分布

(均值  $258.39 \text{ mm}$ , 标准差  $224.71 \text{ mm}$ )

Fig. 4 Horizontal space distribution of joints

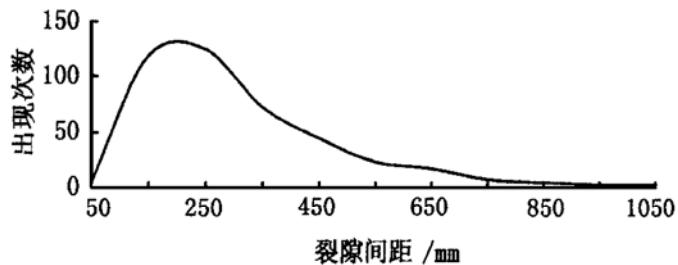
(mean=  $258.39 \text{ mm}$ , standard variance=  $224.7 \text{ mm}^2$ )

图 5 裂隙的垂直间距分布

(均值  $275.25 \text{ mm}$ , 标准差  $187.67 \text{ mm}$ )

Fig. 5 Vertical space distribution of joints

(mean=  $275.25 \text{ mm}$ , standard variance=  $187.67 \text{ mm}^2$ )

根据岩块标准点荷载指数及裂隙间距分布情况, 参照工作帮边坡以前岩体强度研究资料及文献[4]的岩体分类及强度取值原理, 边坡可靠性计算中选取的强度指标见表 1。

表 1 边坡岩体强度参数

Table 1 Strength parameters of slope rock

参数	粘聚力 $c / \text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi / (\text{°})$		相关距离 $a / \text{m}$
	均值	变异系数	均值	变异系数	
砂岩	211.0	0.68	37.1	0.32	5.46
泥岩	37.0	0.53	12.8	0.24	3.56

### 3 整体边坡的可靠性计算

岩体强度按负指数分布, 通过 FLAC 数值计算的 Monte-Carlo 2000 次随机模拟, 计算边坡剖面各单元的破坏概率, 然后将破坏概率最大的单元相连, 确定边坡破坏模式, 如图 1 所示。具体计算过程为, 首先按岩体的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的负指数分布函数, 产生它们各自  $M$  个随机数, 然后将每组随机值输入到 FLAC 计算程序中, 计算边坡剖面各单元的应力状态, 判断各单元破坏与否。待  $M$  组数据计算完成后, 求出每个单元的破坏次数  $N$ , 则该单元的破坏概率为  $N/M$ 。由于计算次数  $M$  对计算结果有一定影响, 但当  $M$  较大时, 其影响程度逐渐减小, 根据该实际边坡计算情况, 当  $M \geq 2000$  时, 计算的相对误差小于 1%, 故选  $M = 2000$ 。随机模拟计算中, 铁路载荷的线集度按均值为 250 kN/m, 标准差为 75 kN/m 的正态分布计算<sup>[5]</sup>。边坡可靠性计算方法为 Sarma 法的 Monte-Carlo 2000 次随机模拟计算, 具体计算过程与 FLAC 数值计算的 Monte-Carlo 随机模拟类似。Sarma 法是 1979 年由美国的 S. K. Sarma 博士提出来的计算任意形状滑动面的边坡稳定计算方法, 该方法可以考虑到滑体内部强度的影响, 目前在岩石边坡计算中广泛应用<sup>[6]</sup>。由于分块对计算结果有较大影响, 甚至出现不合理的应力分布状况。经过调整分块界面和数量, 避免滑块界面出现拉应力, 最终计算剖面的典型滑体分块见图 6。

通过相似材料的模拟试验, 对典型剖面进行了试验研究, 结果与 FLAC 数值模拟结果相同, 同时表明了边坡的渐进破坏过程。即首先在边坡上部产生破坏、形成坡顶拉裂缝, 然后剪切破坏逐渐向下扩展, 最终整体边坡滑动破坏, 见图 7。

由于计算分块的滑面和分界面具有一定的长度  $L$ , 因此, 岩体强度在计算界面和滑面上要进行局部平均处理。岩体强度参数  $Z(x)$  在坐标  $x$  方向上随机变化, 其在长度为  $L$  的线段上的局部平均定义为

$$Z_L(x) = \frac{1}{L} \int_{x-L/2}^{x+L/2} Z(u) du \quad (5)$$

式中  $L$  为坐标  $x$  方向上的局部平均长度, 称为局部平均域, 即滑体小分块滑面和分块界面的长度。

由点荷载强度现场测试及分析可知, 岩体强度的空间变化满足本征假设, 所以  $Z_L(x)$  与起点  $x$  无关, 只与平均域  $L$  有关, 且其均值与  $Z(x)$  均值相同, 即

$$E[Z_L(x)] = E[Z(x)] \quad (6)$$

但局部平均后的方差要发生变化, 根据局部平均域大小、强度的空间相关距离、相关函数等不同, 其方差衰减的程度不同, 一般用下式表示局部平均  $Z_L(x)$  的方

差:

$$\text{Var}[Z_L(x)] = G(L) \text{Var}[Z(x)] \quad (7)$$

$G(L)$  为方差衰减函数, 由下式计算<sup>[2]</sup>:

$$G(L) = \frac{2}{L} \int_0^L (1 - \frac{x}{L}) R(x) dx \quad (8)$$

式中  $R(x)$  是岩体强度的相关函数。

由点荷载强度空间相关函数分析可得, 砂岩的  $I_{s(50)}$  方差衰减函数为

$$G(L) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{16.3935} & L \leq 5.465 \text{ m} \\ \frac{5.4645}{L} (1 - \frac{5.4645}{3L}) & L > 5.465 \text{ m} \end{cases} \quad (9)$$

考虑到岩体强度的空间局部平均处理, 通过 Sarma 法的 Monte-Carlo 2000 次模拟计算, 在无震动和水位线为边坡高度的 1/3 时, 边坡的整体可靠指标  $\beta = 3.563$ , 破坏概率  $P_f = 0.018\%$ 。

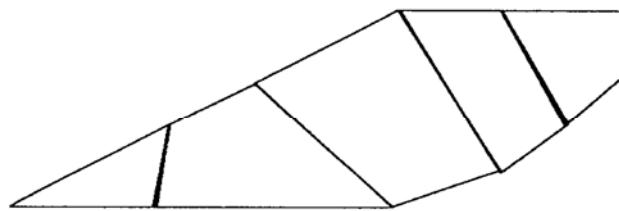


图 6 滑体分块图

Fig. 6 Slice sketch of the sliding mass

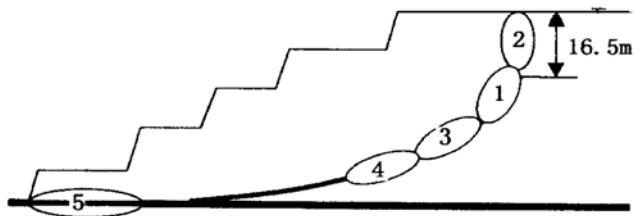


图 7 边坡破坏顺序示意图

Fig. 7 Failure sequence of the slope

### 4 边坡的敏感度分析

#### 4.1 地震烈度分析

根据我国工业与民用建筑抗震设计规范, 地震烈度与地面最大加速度系数的关系<sup>[9]</sup>, 可计算出相应的边坡破坏概率, 见表 2。

表 2 边坡可靠性与地震烈度的关系

Table 2 Relation between slope reliability and seismic intensity

地震裂度	< VI	VII	VIII	IX
地震系数	0	0.1	0.2	0.4
可靠指标 $\beta$	3.563	2.464	1.33	- 0.876
破坏概率 $P_f / \%$	0.018	0.69	9.18	80.95

#### 4.2 水位高度分析

不同水位高度时的边坡可靠性计算结果见表 3。

表 3 边坡可靠性与水位高度的关系( $H$  为边坡高度)

Table 3 Relation of slope reliability with water level elevation  
( $H$  is the hight of slope)

水位高度 $h_w$	0	$1/3H$	$1/2H$	$1H$
可靠指标 $\beta$	3.733	3.563	3.011	2.154
破坏概率 $P_f / \%$	0.01	0.018	0.13	1.6

#### 4.3 边坡渐进破坏的可靠性计算

引入边坡渐进破坏可靠性计算模型<sup>[3, 7, 8]</sup>, 得出边坡的渐进破坏过程, 见图 7。图中的数字反映边坡的破坏顺序, 即边坡的初始破坏在上部, 形成坡顶拉裂缝, 然后向下逐渐扩展, 到一定阶段, 坡脚处开始破裂, 最后上下滑面贯通, 形成边坡整体破坏滑动面。局部破坏首先产生于边坡体上部的原因是由于边坡蠕动变形, 并随着变形增大, 边坡顶部出现拉应力, 产生顶部直立拉裂缝。这一破坏过程在边坡模拟试验和 FLAC 数值计算中已得到证实。

### 5 结果分析与结论

#### 5.1 边坡可接受的破坏概率

对于露天矿边坡而言, 目前还没有统一的可靠性标准, 只能借鉴相关结构工程及前期的少量研究结果, 确定可接受的边坡破坏概率。表 4 是近年来的相关研究成果<sup>[10]</sup>。这些结果差异很大, 这主要与岩石边坡的重要性和岩体质量有关, 在此将其作为选取边坡可接受破坏概率的参考。

表 4 岩石边坡可接受的破坏概率[ $P_f$ ]

Table 4 Failure probability [ $P_f$ ], acceptable for rock slope

来源	Piteau (1977)	Meyerhof (1982)	Priest (1983)	Hantz (1988)
[ $P_f$ ] / %	10	1~ 0.001	20~ 0.3	15~ 30
来源	Hoek (1991)	Genske (1991)	Sandroni (1993)	Wittlestone (1995)
[ $P_f$ ] / %	10~ 15	1~ 0.1	2	0.5

我国露天矿边坡曾经开展的可靠性研究中, 依据 Priest 和 Brown 的建议, 对于重要边坡区段均选取 [ $P_f$ ]  $\leq 0.1\%$  或  $\leq 0.3\%$  作为可接受的破坏概率。美国某大型露天铜矿边坡分析中确定的可接受破坏概率为 3.9%。依据目前情况, 考虑该边坡的重要性, 取 [ $P_f$ ]  $\leq 0.05\%$  (即可靠指标  $\beta = 3.29$ ) 作为边坡可接受的破坏概率。

#### 5.2 实际边坡可靠性评价

计算结果表明, 在 0.05% 的可接受破坏概率以及

无震动、水位为坡高 1/3 的条件下, 计算剖面是可靠的。但考虑到实际边坡的重要性以及破坏始于边坡上部, 因此在开采过程中, 要及时回填坡脚, 形成压坡脚边坡维护工程, 减少整体高边坡的暴露时间, 同时要注重边坡顶面变形观测, 及时维护边坡。

#### 5.3 主要结论

(1) 本研究工作从岩体强度的空间变异性入手, 通过模拟试验、FLAC 概率数值计算、Monte-Carlo Sarma 可靠性分析等, 对工作帮边坡进行了全面的可靠性研究, 说明对实际边坡系统的可靠性理论研究是可以实现的。

(2) 在无震动、边坡水位为坡高的 1/3 条件下, 计算的义马边坡剖面破坏概率为 0.018% (即可靠指标  $\beta = 3.563$ )。根据边坡工程的重要性以及国内外相关工程的可靠性研究结果, 选取可接受的破坏概率为 0.05%, 在这一破坏概率阈值条件下, 边坡计算剖面是可靠的。

(3) 地震、水位对边坡可靠性有很大影响, 边坡初始破坏区位于边坡上部, 因此要有效地降低边坡水位和加强地表变形观测。

### 参 考 文 献

- 王仁铎, 胡光道编. 线性地质统计学. 北京: 地质出版社, 1988. 41~ 45
- 王家臣著. 边坡工程随机分析原理. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 128~ 131
- 王家臣, 骆中洲. 基于岩体强度局部平均的边坡渐进破坏可靠性分析. 中国矿业大学学报, 1995, 24(4): 31~ 35
- Bieniawski. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons Inc., 1989. 99~ 105
- 铁道部第一勘测设计院. 路基. 北京: 中国铁道出版社, 1995. 89~ 92
- 郑永学主编. 矿山岩体力学. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 113~ 116
- 王家臣, 谭文辉. 边坡渐进破坏三维随机分析. 煤炭学报, 1997, 22(1): 27~ 31
- Wang Jiachen. The simulation of the 26th slide of Pingzhuang west surface coal mine. International Journal of Surface Mining and Environment, 1995, 9(3): 125~ 128
- 地震工程概论编写组. 地震工程概论. 北京: 科学出版社, 1985. 128~ 131
- Duzgun, Karpuz. A probabilistic design approach for rock slopes. In: Mine Planning and Equipment Selection 1998. Balkema, Rotterdam, 1998. 179~ 184