

# 露天采场高陡岩质边坡典型地段稳定性分析

肖云,周春梅,吴燕玲,李先福\*

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**对大冶铁矿东露天采场高陡岩质边坡狮子山F<sub>9</sub>断裂带西侧的稳定性进行了研究.总结分析该地段工程概况、边坡地层岩性、岩石变形破坏模式、岩体结构特征,并运用ANSYS数值建模法验算该边坡的稳定性,结果表明,在天然状态和饱水情况下该剖面均处于欠稳定状态.

**关键词:**露天采场高陡边坡;数值模拟;有限元强度折减;稳定性评价;大冶铁矿

**中图分类号:**TD854.6 **文献标识码:**A

## 0 引言

大冶铁矿对岩石力学及边坡稳定研究一直特别重视.中国科学院岩土力学研究所与武钢矿业公司对大冶铁矿东露天采场狮子山北帮A区按照不同高程的边坡进行了边坡稳定性分析<sup>[1]</sup>,在-60 m高程主要采用三维刚体极限平衡计算分析该区段边坡的稳定性.任高峰等<sup>[2]</sup>对大冶铁矿东露天转地下开采进行了数值模拟研究,运用三维有限元计算软件讨论首采段开挖后的次生应力分布规律.张亮<sup>[3]</sup>等针对大冶铁矿狮子山岩质边坡工程地质条件,采用极限平衡理论3种不同的分析方法进行了稳定性计算和CSMR法对边坡进行岩体质量评价.李辉等<sup>[4]</sup>对大冶铁矿东露天采场象鼻山采区拟开采的挂帮矿进行稳定性分析,认为挂帮矿的开采会诱发古滑坡体的再次失稳,提出利用预留矿石挡墙控制边坡变形与稳定的开采方案.鉴于前人研究,武汉工程大学2006年以来<sup>[7]</sup>,调查了矿山区地质构造背景、矿区典型边坡岩体结构面(包括断裂构造、节理构造)特征、岩体结构特征、岩体变形破坏的主要形式,将大冶东露天采场划分为6个区,分别为滑坡区、极不稳定区、不稳定区、总体稳定局部不稳定区、稳定区、极稳定区,并初步建立了大冶铁矿东露天采场高陡边坡危险性评价指标体系.

本文是在研究大冶铁矿东露天采场高陡岩质

边坡典型地段狮子山F<sub>9</sub>断裂带西侧工程地质特征的基础上,运用数值模拟的方法对高陡边坡进行稳定性分析.

## 1 工程概况

湖北大冶铁矿东露天采场铁矿区为咸宁—大冶盆地内的丘陵区,采场是由象鼻山、狮子山、尖林山三个矿体组成.其中西部的象鼻山最高标高228 m,中部的狮子山最高标高276 m,东部的尖林山最高标高250 m,封闭圈标高为72 m.采场总体走向NW300°,东西长达2 200 m,南北宽达550 m,坑底面积为8 150 m<sup>2</sup>.

东露天采场内的地质构造复杂,断层节理发育,随着铁矿数十年的开采,在狮子山象鼻山一带形成了坑底标高-180 m,整体边坡角43°~45°,最大坡高444 m,国内外罕见的裂隙岩质高陡边坡.其上发育的一系列独具特色的工程动力地质遗迹,成为了大冶国家矿山公园的核心景区.自1972年以来,采场北坡内发生大小不等的崩塌、滑坡地质灾害达20多次,不稳定坡段长度达到970 m,直接威胁到大冶铁矿东采场坑底部及紧邻露天边坡采矿的开采人员设备的安全,因此选取了大冶铁矿东露天采场狮子山F<sub>9</sub>断裂带西侧闪长岩边坡作为典型地段研究区域,分析该区高陡岩质边坡的岩石变形破坏模式、岩体结构特征,研究其稳定性.

收稿日期:2008-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874080),武汉工程大学青年基金资助项目(Q200805)

作者简介:肖云(1979-),女,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向:防灾减灾工程.

\*通信联系人:李先福,男,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向:地质环境与灾害评价.

## 2 东露天采场高陡岩质边坡典型坡段岩体稳定性分析

### 2.1 岩体结构特征

狮子山  $F_9$  断裂带西侧区域内出露的是中等风化的花岗闪长岩、强蚀变绿泥石化透辉石闪长岩、弱蚀变透辉石闪长岩以及弱蚀变高岭土绿泥石闪长岩。野外调查表明,该地段岩体的主要结构面是极为发育的断层和节理,它们将闪长岩体切割成碎裂结构(图1)。区域性节理  $J_1$  位于狮子山北帮  $F_8$  断裂带西侧 20 m 处,几乎横切整个闪长岩边坡,出露长度近 223 m;节理总体走向近南北向,倾向西,上部倾角  $43^\circ$ ,下部倾角  $37^\circ$ 。该节理带内被花岗闪长质碎裂岩充填,宽约 10 厘米,两壁平直,是影响上盘岩块不稳定的主要结构面。 $J_2$  位于狮子山北帮  $F_8$  断裂带西侧 50 m 处,几乎横切整个闪长岩边坡,出露长度近 215 m,总体走向近南北向,倾向西,倾角近直立。 $J_3$ 、 $J_2$  与尖山北帮  $F_9$  断裂带斜切,出露长度近 180 m,总体走向近南北向,倾向西,倾角  $75^\circ$ 。该节理面上部靠近  $F_9$  断裂处较平直光滑,下部靠近  $J_2$  处较破碎,破碎带宽约 1 m。 $F_9$  断裂带斜切尖山北帮闪长岩体,延长 500 m 以上,走向  $290^\circ$ ,倾向南西,倾角  $70^\circ$ 。该断裂面沿走向、倾向呈波状弯曲,断裂带是由碎裂岩、构造透视镜体和片理构成的强化带,宽 2~5 m。断层下盘为节理化闪长岩,呈块状结构。上盘岩性为绿泥石高岭土化闪长岩,其内主要发育 2 组密集的破裂面,一组大体顺坡向展布,产状  $200^\circ \angle 78^\circ$ ;另一组产状  $320^\circ \angle 75^\circ$ ;它们将蚀变闪长岩体切割成碎裂结构,并引起多次较大规模的崩滑。

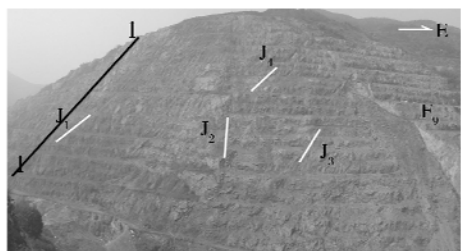


图1 狮子山  $F_9$  断裂带西侧闪长岩体结构特征

Fig. 1 Structure character of diorite in west side of Lion Mountain  $F_9$  Fault

注:图中白线  $J_x$  为区域性节理,1-1 为选取的地质剖面

### 2.2 岩体变形破坏分析

狮子山  $F_9$  断裂带西侧崩塌、滑坡地质灾害频繁发生,岩体的变形破坏主要是地面塌陷和崩塌。

**a. 地面塌陷。**塌陷区位于上图狮子山  $F_9$  断裂带西侧边坡的坡脚处,堆积主要是土石,由于受地

下采空区和爆破的影响,塌陷面积约  $300 \text{ m}^2$ 。其北侧区岩体边坡的整体坡度大于  $35^\circ$ ,岩性为中等风化的碎裂岩化花岗岩,因此可能会导致边坡失稳。

**b. 崩塌。**主要位于狮子山  $F_9$  断裂带上盘,该地段崩积物的规模不大,体积小于  $1000 \text{ m}^3$ ,其物质成分是碎裂结构的花岗闪长岩,坡脚处崩落呈倒石堆。

## 3 $F_9$ 断裂带西侧岩质边坡稳定性计算

### 3.1 有限元计算本构模型

岩质边坡的稳定性主要由岩体结构面的强度控制,本文主要是运用 ANSYS 数值模拟验算该边坡的稳定性,根据有限元强度折减计算边坡的稳定性系数。

**3.1.1 有限元强度折减法原理** 所谓强度折减,就是在理想弹塑性有限元计算中将边坡岩土体抗剪切强度参数逐渐降低直到边坡达到破坏为止,即将边坡强度参数粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  同时除以一个折减系数  $F_s$ ,得到一组新的  $c'$  和  $\phi'$  值,然后作为一组新的材料参数输入,当计算不收敛时,得到破坏滑动面(塑性应变和位移突变的地带),同时得到边坡的强度储备稳定性系数  $F_s$ ,有限元强度折减法计算岩质边坡稳定性原理与传统极限平衡法本质一致,但其更符合实际。

$$c' = \frac{c}{F_s} \quad \tan \phi' = \frac{\tan \phi}{F_s}$$

**3.1.2 屈服准则的选用** 稳定性系数大小与程序采用的屈服准则密切相关,不同的准则得出不同的稳定性系数。目前流行的大型有限元软件 ANSYS,以及美国 MSC 公司的 MARC、PATRAN、NASTRAN 均采用了非线性弹塑性德鲁克—普拉格 (Drucker-Prager) 模型,Drucker-Prager 模型是在 Mohr Coulomb 模型和塑性力学中著名的 Mises 模型基础上扩展和推广而得。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式(1)中: $I_1, J_2$  分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量。 $\alpha, k$  分别为与岩土材料内摩擦角  $\phi$  和内聚力  $c$  有关的常数。

其中,  $I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$  为应力第一不变量;

$$J_2 = \frac{1}{2} s_i s_i = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$$

为应力偏量第二不变量; $\alpha, K$  为仅与岩土体内摩

擦角  $\phi$  和粘结力  $c$  有关的实验常数:

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad K = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}$$

Drucker Prager 模型计入了中间主应力的影响,克服了 Mohr-Coulomb 模型的主要弱点,在国内外岩土力学与工程的数值计算分析中获得了广泛的应用。

在 D P 屈服准则中引入强度折减系数  $\omega$ ,此时屈服准则可表示为:

$$F = \frac{\alpha}{\omega} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k}{\omega} \quad (2)$$

式(2)中:  $\omega$  为达到极限平衡状态时的稳定性系数。

### 3.2 几何模型与边界条件

在对狮子山  $F_0$  断裂带西侧闪长岩高陡岩质边坡的工程地质特征,岩体的变形破坏和岩体结构特征等进行研究后,选取图 1 中 I-I 地质剖面,对其稳定性进行数值模拟计算。

该剖面的实际坡高 347.17 m,宽 711.86 m (如图 2)。为了避免计算时边界条件对坡体应力应变求解的影响,将计算范围取为高 680 m,宽 1 390 m。边界条件选取位移边界条件,左右方向位移  $x$  方向固定,  $y$  方向自由,上下方向地表自由,

底边  $x$ 、 $y$  方向固定。计算采用的软件为美国 ANSYS 公司的大型有限元计算程序 ANSYS8.1,滑坡按照平面应变问题处理,岩土体采用 PLANE42 单元模拟,有限元共网格划分 3996 个单元,2094 个节点。

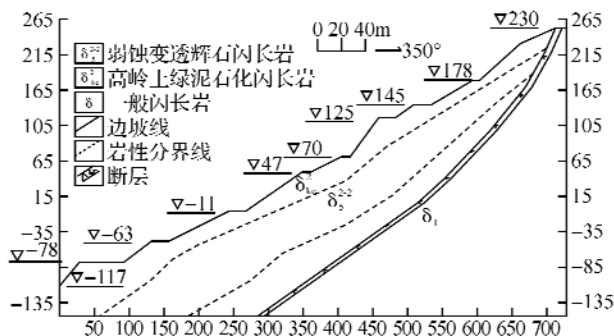


图 2 I-I 工程地质剖面图(位置见图 1)

Fig. 2 I-I engineering geological section

### 3.3 岩体参数的取值及有限元强度折减法数值模拟分析

计算时采取 2D 实体结构单元来模拟,结构面中无填充物,为硬性结构面,对其采用无厚度接触单元来模拟。根据野外勘察岩体结构特征,参照文献[5][6]中提供的岩体力学参数,综合得出天然与饱水状态下的岩体力学性质参数(表 1)。

表 1 边坡岩体力学指标及参数选用表

Table 1 Rock mechanics indexes and parameters

岩体	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$C$ / MPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )	泊松比	弹性模量/ MPa	稳定性 系数
一般闪长岩 $\delta_1$	24	0.5	40	0.28	$2 \times 10^4$	
弱蚀变透辉石闪长岩 $\delta_2$	24	0.2	35	0.28	$2 \times 10^4$	
弱蚀变高岭土绿泥石化闪长岩 $\delta_{kc}$	24	0.21	18	0.28	$2 \times 10^4$	
断层(天然/饱水)	20	0.03/0.15	18/15	0.22	$0.7 \times 10^4$	1.19/1.06

当折减系数  $F_s \geq 1.19$  时,有限元计算不收敛,即天然状态下边坡的稳定性系数为 1.19;对饱和水状态下坡体的岩体力学参数进行折减,当折减系数  $F_s = 1.06$  时,坡体达到极限平衡状态,故饱水状态下边坡的稳定性系数为 1.06。根据矿山边坡安全等级规范,该边坡 I-I 剖面在饱水状态下处于稳定~欠稳定状态,故应长期监测坡体的位移变化,下雨天应密切观察边坡体上的宏观变形迹象,一旦有变化异常的宏观变形及异常反映,应及时通知有关部门做好应急救援,并减少诱发滑坡发生的外界因素(如地下开采、爆破),采取合理的防止措施。

图 3~6 中,对饱水状态下坡体的岩体力学参数进行折减,当折减系数为 1.06 时,整个边坡的最大主应力从顶端到底端贯通。 $x$  方向在坡脚的地方位移最大,原因一方面是由于自重应力在坡脚较

集中,另一方面是由于地面塌陷,应力回弹导致坡面向临空面发生位移。 $xy$  方向剪应力在坡面高程 115~145 m 较集中,主要分布在平台与坡面的转角处。剪应力未贯通整个坡面。 $xy$  方向塑性剪应变主要分布在坡面高程 70 m 到坡顶之间,边坡滑移的可能性较大。

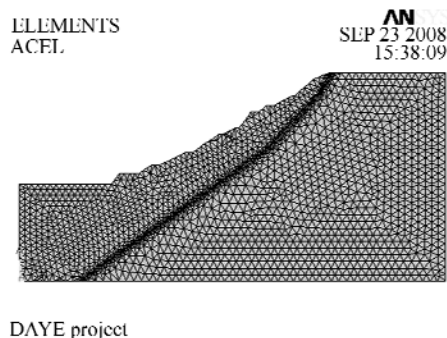


图 3 网格划分模型

Fig. 3 Mesh models

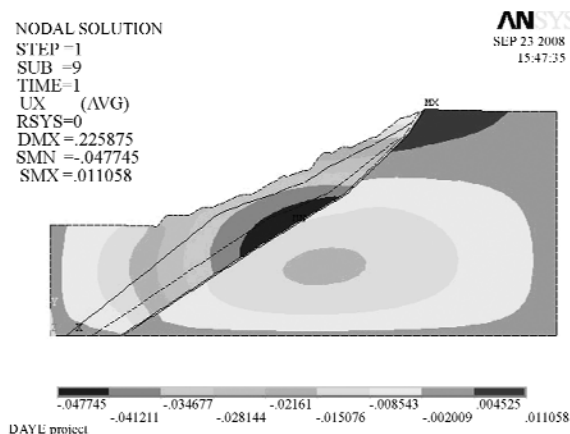
图4  $x$  方向位移图

Fig. 4 X-Component displacement diagram

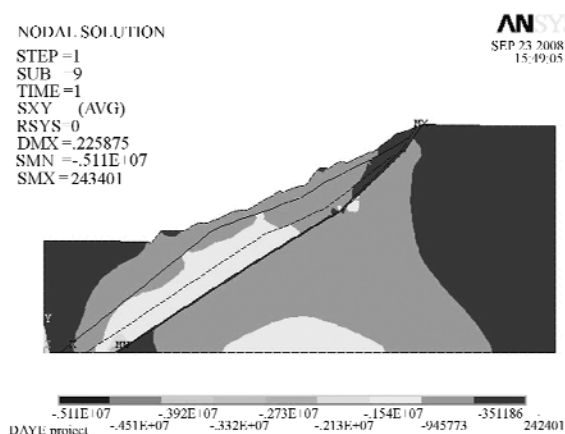
图5  $xy$  方向剪应力云图

Fig. 5 XY Shear stress nephogram

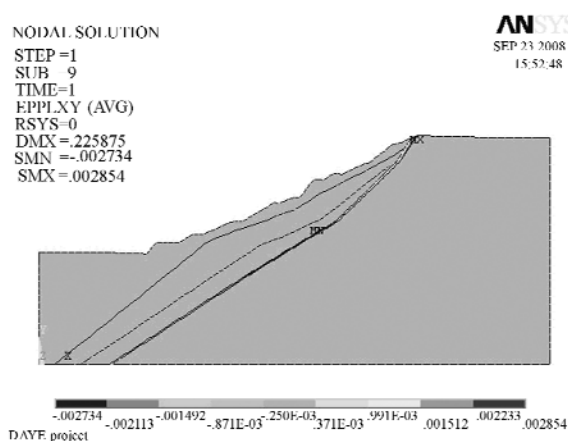
图6  $xy$  方向塑性剪应变云图

Fig. 6 XY Shear plastic strain nephogram

## 4 结 语

a. 狮子山 F<sub>9</sub> 断裂带西侧区域内出露的是中等风化的强蚀变绿泥石化透辉石闪长岩,弱蚀变透辉石闪长岩,以及弱蚀变高岭土绿泥石闪长岩。岩体结构总体上属于碎裂结构,主要结构面是极为发育的节理,边界断层和区内的小断层,断层带内物质呈松散的角砾状,整体稳定性较差。

b. 通过对典型地段剖面的数值模拟,结果显示天然状态下该边坡的稳定性系数  $F_s$  为 1.19,饱和水状态下  $F_s = 1.06$  时,坡体达到极限平衡状态。根据矿山边坡安全等级规范,该边坡 I-I 剖面在天然状态下和饱水状态下均处于稳定~欠稳定状态,应进行长期的变形监测。

致谢:

本文得到了武汉工程大学大冶铁矿边坡研究课题组的大力支持和武钢矿业公司科技处大冶铁矿领导的指导和帮助,属集体科研成果,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 葛修润. 武钢大冶铁矿狮子山北帮 A 区—120 m 以上边坡稳定性研究及加固工程总结报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [2] 任高峰, 张世雄, 彭涛. 大冶铁矿东露天转地下开采数值模拟研究[J]. 化工矿物与加工, 2006, (2): 20-23.
- [3] 张亮, 周传波, 郭廖武, 等. 大冶铁矿狮子山岩质边坡稳定性评价[J]. 金属矿山, 2008(3): 46-49.
- [4] 李辉, 邓建辉. 滑坡体下挂帮矿开采方案与分析[N]. 岩石力学与工程学报, 2006, (5): 986-990.
- [5] 中国科学院岩土力学研究所. 大冶铁矿狮子山北帮 A 区尖 F<sub>9</sub> 断层上盘—60 m~—96 m 边坡稳定性和滑坡防治研究[R]. 武汉: 中科院武汉岩土所, 1995.
- [6] 许东俊, 陈从新, 徐宜保, 等. 大冶铁矿东露天采场边坡岩体力学参数研究[J]. 岩土力学, 1999, (12): 69-74.
- [7] 李先福. 大冶东露天采场高陡边坡自动监测与应急系统[R]. 武汉: 武汉工程大学, 2007.

(下转第 41 页)