文章编号: 1674-8085(2018)04-0071-05

基于极限平衡法和 FLAC^{3D} 软件的高陡 边坡稳定性分析

*刘加冬1,路洪斌1,王雨波2

(1. 河海大学文天学院, 安徽, 马鞍山 243031; 2. 马鞍山矿山研究院, 安徽, 马鞍山 243004)

摘 要: 某露天矿山设计终了边坡高度 278~350m, 坡角 42~48°, 属于典型高陡边坡。开采过程中出现了出现
裂缝、下挫等现象。为了确保该矿山的安全生产,结合其地质资料及边坡的现状,本次选取了 6 个典型剖面,采
用极限平衡法和 FLAC^{3D}数值模拟软件,对该露天边坡进行稳定性分析,为后续边坡安全管理提供建议。
关键词: 露天矿;边坡;极限平衡法; FLAC^{3D};稳定性分析
中图分类号: TU43
文献标识码: A
DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2018.04.012

ANALYSIS ON STABILITY OF HIGH AND STEEP SLOPE BY LIMIT EQUILIBRIUM METHOD AND FLAC^{3D} SOFTWARE

^{*}LIU Jia-dong¹, LU Hong-bin¹, WANG Yu-bo²

(1. Hehai Environment Wentian college, Ma'anshan, Anhui 243031; 2. Mine Research institute of Ma'anshan, Ma'anshan, Anhui 243004)

Abstract: The end slope of an open-pit mine has a height of 278 ~ 350 m and a slope angle of 42 ~ 48°, which belongs to a typical high and steep slope. Combining with the geological survey data and the current situation of the open slope, six typical slopes are selected for slope stability analysis by using limit equilibrium method and $FLAC^{3D}$ numerical simulation software in order to ensure the safe production of the mine. It comprehensively evaluates the stability of the open-pit slope to provide suggestions for slope safety management.

Key words: open-pit mine; slope; limit equilibrium method; FLAC^{3D}; reliability analysis

随着矿产资源的不断开发,浅层矿产资源日 益减少,深凹露天矿成为世界上露天矿山的发展 趋势^[1]。对于深凹露天矿山,坡角越大,回收的 资源越多,但与此同时形成的高陡边坡稳定性和 安全性越来越差^[1-4],高陡边坡将成为安全隐患。 因此,应充分调查边坡的组成、地下水、降雨等 情况,根据边坡岩体结构的特点,对形成的终 了边坡进行稳定性分析,为后续边坡的管理提 供建议。

1 工程概况

某矿山设计采场上口尺寸 1300 m×1000 m, 下口尺寸东侧底 120 m×60 m、西侧底 260 m×60 m, 每级台阶高度为 12 m,并段后 24 m,台阶坡面角 70~75°,平台宽 6~10 m,终了边坡高度 278~350 m, 终了设计总体边坡角度 42~48°,属于典型高陡 边坡。

矿区内出露的覆盖层主要分布有闪长岩、斜

收稿日期: 2018-03-19; 修改日期: 2018-06-11

作者简介: *刘加冬(1982-), 女,四川德阳人,讲师,主要从事岩土安全研究(E-mail:43493767@qq.com); 路洪斌(1982-),男,辽宁铁岭人,高级工程师,主要从事矿山安全评价(E-mail:176855347@qq.com); 王雨波(1987-),男,四川人,中级工程师,主要从事岩土工程研究(E-mail:550010122@qq.com).

长花岗岩和燕山期花岗岩等。闪长岩呈串珠状南 北向展布,为矿体的主要围岩。斜长花岗岩在矿 区广泛分布,构成露天采场北部山体,灰白色, 中粗粒不等粒结构,块状构造。矿区脉岩以闪长 玢岩脉最为发育,在矿区内呈南北向展布,灰~ 灰绿色,斑状结构,岩质为交织结构。绿泥石化、 绢云母化、碳酸盐化蚀变强烈。

矿区内断裂构造极其发育,按断裂与成矿的 关系可分为控矿构造和成矿后构造两种。控矿构 造表现为一个帚状构造系统,南部收敛,北部撒 开。南部收敛部分,表现为近南北向或北西向压 扭性断裂构造。北部撒开部分,表现为一系列北 西向排列的扭性断裂裂隙带。断裂主要走向 340~335°,倾向北东,倾角70~75°,是矿区的主 要容矿构造。成矿后构造主要是断裂构造。一种 为近东西向断裂,东倾,倾角60~80°,造成矿带 错断。另一种为走向北东,东倾,倾角65~70°,



造成矿体错断。矿区内有五条断层,其中三大断 层 F₁、F₂、F₃交汇于 I-2 区,受其影响,该区岩 体极为破碎,存在小型蚀变破碎带。

2 边坡稳定性分析

采场边坡主要由变质杂岩、斜长花岗岩、闪 长岩组成的岩质边坡,属重要工程、边坡高度和 边坡重要性均为一级。影响采场边坡稳定性的主 要因素为地层岩性、断层、地下水、结构面组合 关系、地层完整性、降雨及人类工程活动。

在矿山开采过程中,采场+590 m~+650 m 台 阶出现裂缝、下挫等破坏现象(见图 1),造成部 分地段压矿,严重影响了矿山的正常生产,且有 可能影响终了边坡的稳定。为了确保边坡安全靠 帮,了解终了边坡的安全状况,为此对该露天采 场边坡进行稳定性分析。



图 1 边坡局部发生破坏现象 Fig.1 The local failure of slope

2.1 稳定分析计算方法

根据该露天矿采场边坡的实际问题,本次分析采用极限平衡法和FLAC^{3D}数值模拟软件。

极限平衡法是目前使用最广泛的一种定量分 析方法,它将滑动趋势范围内的边坡岩土体分为 一个个小条块,通过块体的平衡条件来建立整个 边坡的静力平衡方程,从而求解安全系数^[5]。因 考虑条块间力的假定条件及软弱面形状的不同, 极限平衡法又分很多种计算方法,GEOSLOPE 软 件中采用的极限平衡分析方法有:普通条分法、 Bishop 法、简化 Janbu 法、Spencer 简化法、 Morgenstern-Price 法、Sarma 法、美国陆军工程 师团法以及有限法等。本文主要采用 Bishop 法、 简化 Janbu 法、Morgenstern-Price 法,其中 Bishop 法是基于圆弧滑动面的边坡稳定性分析法, Janbu 法和 Morgenstern-Price 法是基于直线和曲线组成 的非圆弧滑面的边坡稳定性分析法。

FLAC是1986年由美国Itasca公司开发。其

基本原理和算法与离散元法相似,但它应用了节 点位移连续的条件,可以对连续介质进行大变形 分析,并具有很强的前处理功能和后处理功能, 特别适合于岩土工程问题分析,广泛应用于边坡、 基础、坝体、隧道、地下采场、硐室等问题的数 值模拟分析。FLAC 中包括 11 种材料本构模型, 本次模拟采用 Mohr-Coulomb 模型。

对组成边坡的岩体岩性、断层空间展布特征、断 层软弱物质及其力学特征,矿体与矿体、矿体与 岩层、岩层与岩层之间的接触性质,深部岩体的 破碎程度情况等进行调查,通过密度实验、三轴 压缩实验、单轴变形实验等,确定岩土体力学性 能参数^[2-4],如表 1。

为了尽可能准确地分析边坡的稳定性,必须

2.2 影响边坡稳定性的主要因素

表 1 岩体的力学性能参数 Table 1 The mechanical parameters of rock mass

地层名称	容重γ(KN/m ³)	粘聚力 c(Kpa)	摩擦角φ(°)	弹性模量 E (MPa)	泊松比
花岗岩风化壳	25	133	35	66.47	0.21
斜长花岗岩	26	285	39	97.80	0.23
闪长岩	27.4	268	38.5	47.30	0.25
破碎带	18.5	11.6	35.8	3.76	0.30

该矿区地下水水位及地下水溢出点均较高, 对边坡稳定性影响很大,需计算采场边坡渗流场, 用于边坡渗流场和重力场的耦合稳定性分析。

该边坡所在区新构造运动表现为差异不大的 整体缓慢上升。地壳处在稳定的弱震环境,地震 基本烈度为VI度,采用拟静力法进行边坡稳定性 分析,取地震综合振动影响系数为0.0125。

2.3 以六个典型剖面进行边坡稳定性分析

为了全面掌握该露天采场整个边坡区域的稳 定性情况,力求使评价结果准确可靠,对采场边 坡 I-1、I-2、II 三个地质分区里的 A~F 六个具有 代表性剖面进行计算,其结果见表 2。

从表 2 计算结果可知,终了边坡 A~D 及 F 剖面采用拟静力法模拟在地震、渗流、重力三场 作用工况下边坡的稳定性,Bishop 法、简化 Janbu 法、Morgenstern-Price 法计算的稳定性系数 F_S 均 >1.15,均满足自然边坡安全系数的要求,开采 结束加强监测即可。E 剖面采用 Bishop 法、简化 Janbu 法、Morgenstern-Price 法计算的稳定性系数 分别为 1.113、1.032、1.075 均<1.15,不能满足 自然边坡安全系数 F_S >1.15 的要求,可见 E 剖面 边坡稳定性相对较差。

	表 2	各剖面的稳定性系数
Table 2	The st	ability coefficient of each profile

计算剖面	计算方法	稳定性系数	计算剖面	计算方法	稳定性系数
A 剖面	Bishop 法	1.267	D 剖面	Bishop 法	1.317
	简化 Janbu 法	1.182		简化 Janbu 法	1.155
	Morgenstern-Price 法	1.247		Morgenstern-Price 法	1.282
B 剖面	Bishop 法	1.227	E剖面	Bishop 法	1.113
	简化 Janbu 法	1.153		Janbu 法	1.032
	Morgenstern-Price 法	1.186		Morgenstern-Price 法	1.075
C 剖面	Bishop 法	1.334	F剖面	Bishop 法	1.572
	简化 Janbu 法	1.241		简化 Janbu 法	1.407
	Morgenstern-Price 法	1.301		Morgenstern-Price 法	1.499

2.4 FLAC^{3D}数值模拟

根据极限平衡法分析可知,危险性最大的剖

面是 E 剖面,如图 2 所示。本文主要对 E 剖面进 行数值模拟。



Fig.2 The E section



图 3 E (Y=10m) 剖面位移矢量图 Fig.3 The displacement vector of E (Y=10m) section



图 5 E 剖面 SIG1(Pa)主应力等值线图 Fig.5 The first principal stress contour of E section



图 7 E 剖面 X 方向应力等值线图 Fig.7 The X - direction stress contour of E section

在 ANSYS 中对 E 剖面进行三维建模,并用 solid45 实体单元对模型进行网格剖分,即计算模 型网格划分、地质界面建立是在 ANSYS 中完成 的。将 ANSYS 剖分并网格优化后的三维数字模 型导入到 FLAC^{3D}中,通过 FLAC^{3D}中的 fl_iso 渗 流模型,计算并生成露天采场边坡渗流场,最后 进行渗流场-重力场耦合的三维应力应变分析,模 拟结果如图 3~图 8:



图 4 E 剖面剪应变增量云图 Fig.4 The Shearing strain increment of E section



图 6 E 剖面 SIG3(Pa)主应力等值线图 Fig.6 The third principal stress contour of E section



图 8 E 剖面总 Z 方向应力等值线图 Fig.8 The X - direction stress contour of E section

图 3~图 8 分别为 E 剖面边坡 Y=10 m 位移 矢量图、剪应变增量云图、第一主应力等值线图、 第三主应力等值线图、X 方向应力等值线、Z 方 向等值线图(FLAC^{3D}中以拉应力为正,压应力 为负,故第一应主力云图对应其显示的 SMIN 云 图,第三主应力云图对应其显示的 SMAX 云图), 从图中可以得到以下结论:

1)由 E 剖面 Y=10 m 位移矢量图可知在 +494 m 平台至+470 m 平台坡面的位移矢量指向 露天采场内,可以推测露天采场终了边坡可能沿 此处产生破坏。

2)由E剖面边坡总体剪应变增量云图可知, 露天采场边坡坡体内剪应变增量较大区域,基本 为地下水浸润线以下的边坡体内断层、蚀变破碎 带。这说明该露天采场终了边坡的稳定性主要受 采场内地下水、断层、蚀变破碎带的影响较大, 极有可能沿断层、破碎带的岩土分界面发生剪切 滑动的现象。

3) 从 E 剖面的主应力等值线图、X、Z 方向 应力等值线图来看,主应力等值线既不平滑,也 不相互平行,不少区域出现突变,这些应力发生 突变、应力发生集中现象的区域主要集中在边坡 坡体内断层、蚀变破碎带。

2.5 建议

现场调查发现,E 剖面的终了边坡有三条断 层在此交汇,其中+566 m 平台至+470 m 平台受 此影响岩体极为破碎,呈散体状结构,稳定性较 差。由极限平衡法和 FLAC^{3D} 数值模拟软件分析 可知,E 剖面原设计边坡部分区域可能发生破坏, 建议如下:

 1) 在+566 m 平台至+470 m 平台,增加平台 宽度,降低最终坡角,由原来的 41.6°降低为 39°, 采用 Bishop 法、简化 Janbu 法、Morgenstern-Price 法计算的稳定性系数分别为 1.246、1.153、1.214, 满足自然边坡安全系数 Fs>1.15 的要求。

2) 鉴于此断面断层发育, 岩体破碎, 应采取 护帮控制爆破技术, 减轻爆破震动对边坡的危害, 并在 E 剖面+470 m 平台设置 32 根断面尺寸为 2.0×1.5 m的预应力锚索抗滑桩进行加固处理,桩体嵌入稳固滑床下 8.0 m。

3)由稳定性计算分析结果可以看出地下水对 边坡稳定性影响较大,因此在边坡加固、护坡工 程中,必须做好地下水的疏导措施。

4) 建立边坡位移观测系统,观测边坡岩体的 位移情况,分析位移变化规律,及时掌握滑体及 边坡动态,预报滑体及边坡岩体的位移险情。

3 结束语

充分了解该矿山的地层岩性、断层、地下水、结构面组合关系、地层完整性、降雨及人类工程活动是边坡稳定性分析的前提。

2)采用极限平衡法和 FLAC^{3D} 数值模拟软件同时对该高陡边坡的稳定性进行分析,不仅可以计算出各剖面边坡的安全系数,还可以分析边坡的应力应变情况,避免单一计算方法存在的缺陷。

3)通过 FLAC^{3D} 数值模拟软件的分析,可 以了解边坡潜在的破坏区域,为边坡的安全管理 提供建议。

参考文献:

- [1] 杨天鸿,张峰春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5): 1437-1451.
- [2] 刘加冬,路洪斌,王雨波.蒙特卡在露天矿边坡可靠 性分析中的应用[J].金属矿山,2013,8(446):147-149.
- [3] 秦秀山,张达,曹辉. 露天采场高陡边坡监测技术研 究现状与发展趋势[J].中国矿业,2017,26(3):107-111.
- [4] 路洪斌,刘加冬,王雨波.露天矿边坡稳定性分析及 边坡结构参数的优化[J].化工矿物与加工,2015,3 (10):32-34.
- [5] 张承功,林友. 都龙曼家寨矿段露天边坡稳定性探讨[J]. 云南冶金,2016,3(45):1-5.