

# 极限平衡法在露天矿边坡稳定性研究中的应用

贾沛,常玉锋,王欣,胡德华 胡文军

(武汉工程大学环境与城市建设学院,磷资源开发利用教育部工程研究中心,湖北,武汉 430074)

**摘要:**依据安全评价的基本原理,在分析某小型露天非煤矿山边坡设计及其相关参数的基础上,对矿山边坡事故危险性进行了讨论.引入极限平衡定量安全评价方法,对该矿山开采台阶边坡和最终边坡角稳定性进行量化计算,得到在现有设计开采条件下,该矿山边坡的稳定性是安全的.同时计算结果和后期工程施工设计结果一致,符合非煤矿山开采安全规程的控制要求,证明了极限平衡法这一定量安全评价方法在小型露天非煤矿山安全评价中的适用性.根据分析计算结果,针对性的提出了预防小型露天矿山边坡事故的安全对策措施.

**关键词:**边坡事故;非煤矿山;极限平衡法;安全评价;安全对策措施

中图分类号:X936;TD824

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.09.014

## 0 引言

我国非煤矿山安全生产形势相当严峻,事故频发严重制约了我国矿山企业的可持续发展,同时造成了恶劣的社会影响<sup>[1]</sup>.本文根据安全管理原理,针对笔者参与科技服务的某辉长辉绿岩矿的开采设计方案和设计参数,利用极限平衡定量安全评价方法,研究该矿山的边坡稳定性量化计算的问题.

## 1 边坡稳定性分析方法

安全评价是运用安全系统工程的原理和方法,对拟建或已有工程、系统可能存在的危险性及可能产生的后果进行综合评价和预测,并根据可能导致的风险的大小提出相应的安全对策措施,以达到工程系统安全的目的.

安全评价作为系统安全诊断、发掘潜在事故隐患的有效工具,自20世纪60年代开始,发展至今,国内外已开发出100多种方法,各种方法都有一定的适用范围和应用条件.

边坡稳定性计算方法可分为极限平衡法、应力应变法(有限元法及边界元法)以及可靠性分析方法(概率分析方法).极限平衡法根据地质结构面形成滑体的边界条件,对于平面滑动、曲面滑动、楔体滑动等多种滑动模式均有相应的计算公式.通过工程实际数据计算得边坡稳定系数 $F$ ,从而可判断边坡的稳定性.对于小型露天矿山,由于其边坡高度不大,边坡构造也较简单,故多采用极

限平衡定量分析方法研究边坡的稳定性<sup>[2-3]</sup>.

## 2 露天矿山边坡事故危险性分析

### 2.1 矿山开采参数

该辉长辉绿岩矿区行政区划隶属于随州市曾都区万店镇龙头湾村,距离万店镇8 km,矿区有乡镇公路通往万店,与随(州)-殷店公路衔接,交通方便.矿区面积0.062 km<sup>2</sup>,采矿许可证开采标高为+112~+70 m,共有4个拐点圈定.矿体为新鲜的变辉长辉绿岩,呈北西向分布,所圈定的矿体长430 m,宽200 m,矿体平面呈长方形,其中无任何夹石,均可利用.矿山辉长辉绿岩资源储量总量(333类)为4 443 kt,矿山生产规模为100 kt/a,设计服务年限38年.

矿区内水文地质条件和工程地质条件简单,矿体厚度适中,地表覆盖层厚度小,适宜露天开采.设计开采工艺为:公路汽车开拓运输,中深孔爆破,前端机械采装. +110 m以上进行山顶削顶修坡,覆土剥离,从+110 m以下按10 m分台阶开采,由上而下依次形成+100 m, +90 m, +80 m, +70 m水平.推进方向为由南向北.开采矿体及围岩均为致密块状,工程地质条件较好,岩石硬度系数 $f=8$ ,坚固程度为坚固,抗压强度约83.5 MPa,岩石裂隙不发育,矿山边坡稳定性一般较好.设计工作台阶坡面角65°,最终边坡角51°<sup>[4]</sup>.

### 2.2 边坡事故危险性分析

露天开采工作地点的矿岩受上覆矿岩层的重力、现代地壳运动形成的构造应力等影响,在开采

收稿日期:2010-01-09

作者简介:贾沛(1980-),女,湖北武汉人,讲师,硕士.研究方向:建筑安全,安全评价.

之后,矿岩的整体性遭破坏,矿岩各部应力重新分布,物体内部的缺陷,会引起局部的应力集中,采矿边坡的形成。在各种力的作用下,矿岩不可避免地会发生弹性变形、弯曲或破裂,表现为片帮、坍塌、滑坡等危害。

露天采矿边坡的滑坡和垮落,是露天开采的主要危害之一,露天的出入沟和采场边坡在矿岩的自重力和外界其它力的作用下,产生一侧压力,侧压力大于边坡的磨擦阻力,就会造成边坡的滑坡和垮落伤及人员和设备,影响正常生产秩序。同时,边坡长期暴露在自然中,经风吹日晒,边帮岩石在风雨的侵蚀下剥落片帮,或受外力作用滚落到下部采场,形成边坡的片帮和滚石危害,直接威胁到作业人员的安全和设备安全。

边坡失稳,造成事故往往是多种因素综合作用的结果,产生原因主要包括:露天开采和风化作用破坏原始矿岩应力平衡,开采参数选用不合理,矿区的地质构造和岩层物理、力学性质勘探不清,地下水和爆破震动的破坏作用,以及对边坡安全管理不善等<sup>[5-6]</sup>。

### 3 边坡稳定性定量安全评价

#### 3.1 开采台阶边坡稳定性计算

边坡岩体是否沿滑面发生滑动,将取决于岩体沿滑面的下滑力和抗滑力的大小,研究中采用极限平衡法按平面滑动模式探讨终了台阶边坡(当边坡体内有确定位置滑面时)的稳定性<sup>[3]</sup>。

沿滑面的下滑力包括:岩体重力沿滑面方向的分量  $W\sin\beta$ 、张裂隙中地下水静水压力的平行滑面的分力  $V\cos\beta$ 、由爆破震动作用引起的平行于滑面的分力  $K_a W\cos\beta$ 。阻止岩体向下滑动的抗滑力包括:作用在滑面上的总凝聚力  $CL$  与作用在滑面上的摩擦力。后者等于有效正应力与摩擦系数  $\tan\beta$  的积,而有效正应力为岩体重力的法向分力减去地下水的浮托力  $U$ 、张裂隙中地下水的静水压力和爆破震动力的分力 ( $V\sin\beta + K_a W\sin\beta$ )。边坡稳定系数  $F$  为:

$$F = \frac{(W\cos\beta - U - K_a W\sin\beta - V\sin\beta)\tan\phi + CL}{W\sin\beta + K_a W\cos\beta + V\cos\beta} \quad (1)$$

式(1)中:

$F$ ——岩体边坡稳定性系数;

$W$ ——潜在滑动岩体重量,  $W = A\rho$ , kg/m;

$A$ ——潜在滑动岩体截面,  $m^3$ ;

$\rho$ ——岩体的重力密度,  $kg/m^3$ ;

$U$ ——地下水的浮托力, N;

$K_a W\cos\beta$ ——由爆破震动作用引起的平行于滑面的分力, N;

$V\cos\beta$ ——张裂隙中地下水静水压力的平行滑面的分力, N;

$\beta$ ——潜在滑面倾角, ( $^\circ$ );

$C$ ——潜在滑动岩石的内聚力,  $N/m^2$ ;

$L$ ——潜在滑动岩体斜长, m;

$\phi$ ——潜在滑动岩体的内摩擦角, ( $^\circ$ );

$W\sin\beta$ ——岩体重力沿滑面方向的分量, kg。

由于本矿区水文地质条件简单,研究边坡位于当地侵蚀面以上,矿山规模不大,边坡形成较晚,因此暂不考虑水、地震对边坡的影响,所以式(1)简化为:

$$F = \frac{W\cos\beta\tan\phi + CL}{W\sin\beta} = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} + \frac{CL}{W\sin\beta} \quad (2)$$

根据研究矿山工程参数,在设计工作台阶级面角  $65^\circ$  开采条件下:  $\rho = 26 \text{ kN/m}^3$ ,  $W = A\rho = 20 \times 26 = 520 \text{ kN/m}$ ;  $C = 35 \text{ kPa}$ ;  $\phi = 27^\circ$ ;  $\beta = 49^\circ$ ;  $L = 13.3 \text{ m}$ , 得稳定系数  $F = 1.63 > 1.15$ 。所以认为开采台阶边坡是稳定的。

边坡力学平衡受力分析如图1所示。

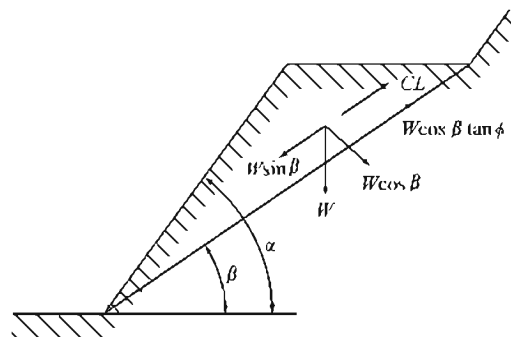


图1 边坡稳定性计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stability calculation for slope hazard

#### 3.2 最终边坡角稳定性验算

依据公式(2)同理可以得到,在  $F = 1.15$  时,最终边坡角  $\alpha = 70^\circ$ 。

按照《金属非金属矿山安全规程》<sup>[7]</sup>规定:露天矿山的最终边坡角不得超过  $60^\circ$ ,或者由设计确定<sup>[4]</sup>。设计最终边坡角计算公式为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{H_1 - H_2}{\sum L + \sum S}\right) \quad (3)$$

式(3)中:

$\sum L = \frac{H_1 - H_2}{\tan\alpha}$ , 台阶坡面水平投影之和, m;

$H_1$ ——终了边坡最高点标高, +110 m;

$H_2$ ——终了边坡最低点标高, +70 m;

$\alpha$ ——台阶坡面角,  $65^\circ$ ;

$\sum S$ ——设计各台阶平台宽度总和, m.

代入数据计算得  $\theta = 51^\circ < 70^\circ$ , 也满足规程的要求, 所以认为开采终了边坡是稳定的.

根据此研究结论矿山后期的开采方案设计采用的最终边坡角  $\theta = 51^\circ$ .

### 3.3 边坡事故安全对策措施

为了在开采过程中始终保持安全生产, 不增加不必要的开支, 不耽误连续开采, 应采取各种措施对边坡事故进行防治. 目前, 本矿山应采用的安全对策措施主要有如下几种:

a. 消坡减载, 减小岩体重力沿滑面方向的分量  $W\sin\beta$ ; 通过改变边坡形状即降低边坡高度或放缓边坡角, 消坡减载; 无法实施消坡减载时, 在不稳定岩体坡脚预留永久性或临时性的岩体支撑, 以求边坡稳定; 同时严禁在边坡上堆积废碴, 以免增加边坡上的荷载.

b. 矿山排水, 减小张裂隙中地下水静水压力的平行滑面的分力  $V\cos\beta$ ; 为消除暴雨季节积水对岩体稳定产生的不利影响, 矿界外围特别是高处设置截水沟, 减少采场的汇水, 并及时排除采场内积水.

c. 边坡控制爆破, 减小由爆破震动作用引起的平行于滑面的分力  $K_n W\cos\beta$ ; 采用边坡控制爆破技术, 减少对岩体震动. 爆破作业结束后及时检查和清除浮石, 未经处理的浮石危险区禁止任何人员作业进入.

d. 强化边坡安全管理, 减少人和环境对边坡稳定性的破坏作用; 严格按照开采设计参数进行采矿作业, 矿山安全员负责采场日常全面安全检查, 并对暴露岩体风化、岩层位移等行为进行监测, 及时消除事故隐患等.

## 4 结 语

本文利用极限平衡法边坡稳定性计算方法对技术服务矿山的边坡稳定性进行定量的安全分析, 得到以下结论:

a. 现有开采条件下, 边坡稳定系数  $F = 1.63 > 1.15$ , 符合边坡设计稳定性要求.

b. 研究得到本矿最终边坡角  $\theta = 51^\circ$ , 不仅满足《金属非金属矿山安全规程》规定露天矿山最终边坡角不得超过  $60^\circ$  的控制要求, 且符合矿山开采实际, 满足矿山工程布置要求.

c. 结合矿山生产实际, 通过边坡事故的危险性分析, 针对性地提出了适量消坡减载、矿山暴雨排水、减少爆破震动、强化边坡维护管理等安全对策措施.

d. 极限平衡法计算简单实用, 特别适用于小型露天矿山边坡稳定性分析, 对于提高企业安全管理水平, 预防采场边坡事故, 提高小型露天矿山边坡设计的可靠性具有较大的指导和实际应用价值.

### 参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理局.《国家安全生产科技发展规划》非煤矿山领域研究报告(2004~2010)[R]. 2003, 12:1-2.
- [2] 梅强, 田斌. 丹水搬洪渠右岸边坡的稳定性分析[J]. 水利科技与经济, 2008(9): 696-699.
- [3] 王明华, 白云, 孙爱祥. 德兴铜矿西源岭410-380边坡变形特征与稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2006(3): 1-3.
- [4] 胡文军. 随州市久利石料有限公司安全预评价报告[R]. 武汉: 武汉同康安全环保科技有限公司, 2009, 3.
- [5] 胡文军, 魏龙, 郭苗, 等. 粤通石灰石矿开采安全技术与安全研究[J]. 西部探矿工程, 2009(4): 230-233.
- [6] 施笋, 鹿建勇, 龙卿吉. 矿山边坡稳定性分析及其工程应用[J]. 安徽工程科技学院学报: 自然科学版, 2006(2): 58-61.
- [7] GB16423-2006 金属非金属矿山安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

(下转第57页)

---

# The effects of magnetic field configuration on the electron parameters of microwave ECR plasma

*SHEN Wu-lin, MA Zhi-bin, TAN Bi-song*

(School of Material Science and Engineering, Key Laboratory of Plasma Chemical and Advanced Materials of Hubei Province, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The electron parameters of a microwave electron cyclotron resonance (ECR) plasma operated in two kinds of magnetic field were measured with Langmuir probe. The effects of magnetic field configuration on the spatial distribution of the electron parameters were investigated. The results indicated that: in divergence magnetic field configuration, the electron temperatures at the axial and edge of cylindrical vacuum are higher than that of intermediate area while it decreases monotonically with increasing radius  $R$  in a mirror magnetic field. The electron density all decline with increasing the radial and axial distance in the divergence and mirror magnetic field configuration, but the decline extent of mirror field is larger than that of divergence field. The gas pressure has more influence on the electron temperature in divergence magnetic field than in mirror magnetic field at the vicinity of resonance surface, while it has same effect on the electron density in both of the magnetic field.

**Key words:** ECR plasma; divergence magnetic field; mirror magnetic field

本文编辑: 龚晓宁

☆

---

(上接第 52 页)

## Application of limit equilibrium method in the research of slope stability of open pit mine

*JIA Pei, CHANG Yu-feng, WANG Xin, HU De-hua, HU We-jun*

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Engineering Research Center for Exploitation and Utilization of Phosphorus Resources, Wuhan 30074, China)

**Abstract:** According to the basic principles of the safety evaluation, and based on the analysis of slope design and its related parameters of a small open-air non-coal mine, slope accident risk of the mine is discussed. With the introduction of quantitative safety evaluation method of limit equilibrium, the slope of bench mining and the stability of final slope angle is calculated quantitatively, which proves that the stability of the mine slope is safe under the condition of the existing design exploitation. At the same time, the result and the future mining design are in the same construction, which accords with control requirements of the non-coal mine safety rules and proves the applicability of limit equilibrium in the safety evaluation of small-scale open-pit mine. According to the result of the analysis and calculation, safety countermeasures aiming at preventing slope accident of small-scale open-pit mine are put forward.

**Key words:** slope accident; non-coal mine; limit equilibrium method; safety evaluation; safety countermeasures

本文编辑: 龚晓宁