某新建矿山开采对两侧电力塔基稳定性影响分析研究*

孙春辉[1,2]，李爱兵[1,2]，马增[1,2]，王旭[1,2]，何环莎[1,2]，李万里[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012）

摘要：某新建露天矿山两侧约300 m范围分布有邑劝乙线及金中直流输电线路塔基，矿山边坡开挖可能会导致电力塔基倾倒、下沉，或因滚石碰撞损坏塔基。采用赤平投影、极限平衡法、有限元数值模拟方法，从定性与定量角度，分析了露天采场边坡开挖的扰动范围、边坡的稳定性及坡顶滚石对电力塔基的影响。结果表明，露天采场边坡开挖至最终境界时，边坡处于稳定状态；采场两侧临近电力塔基扰动范围距离为69.2～192.9 m，且位于最小安全系数对应的潜在边坡滑动面范围之外；矿区坡顶滚石多滚落至周边山坳处，露天采场两侧的电力塔基位置较高且附近无滚石，该新建矿山的开采不会对采场两侧的电力塔基造成影响。

关键词：露天矿山；边坡开挖；边坡稳定性；电力塔基
中图分类号：TD325 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)04-0121-08

Analysis of the Influence of Mining at a New Mine on the Stability of Power Tower Foundations on Both Sides

SUN Chunhui[1,2], *LI Aibing*[1,2], *MA Zeng*[1,2], *WANG Xu*[1,2], *HE Huansha*[1,2], *LI Wanli*[1,2]
(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: A newly built open-pit mine has power tower foundations of Yiquanyi Line and Jinzhong DC transmission lines distributed within about 300 m on both sides, and slope excavation of the mine may cause the power tower foundations to topple, sink, or be damaged by rockfall impact. Stereographic projection, limit equilibrium method and finite element numerical simulation methods were adopted, and the disturbance range caused by open-pit slope excavation, slope stability and the impact of rockfalls at the slope top on power tower foundations were analyzed from qualitative and quantitative perspectives. The results show that when the open-pit slope is excavated to the final boundary, the slope is in a stable state. The distances from the power tower foundations adjacent to both sides of the stope to the disturbance range are 69.2-192.9 m, and the tower foundations are outside the scope of potential slope sliding surfaces corresponding to the minimum safety factor. The rockfalls at the slope top of the mining area mostly roll into the surrounding depressions. The power tower foundations on both sides of the open-pit stope are located at a high position and there are no rockfalls nearby. The mining of the new open-pit mine will not cause impacts on the power tower foundations on both sides of the stope.

Key words: Open-pit mine, Slope excavation, Slope stability, Power tower foundation

0 引言

矿产资源多分布在山地、丘陵地带，其开采方式主要分为露天与地下开采[1]。露天矿山开采工艺又分为爆破开采与机械开采，爆破开采可能会对周边环境造成一定影响，为确保安全，通常规定矿区爆破警戒线300 m范围内不得存在任何构筑物[2-3]。高压输电线路作为电力输送载体，常布置于山区、平原等人迹罕至的区域。在矿产资源开发过程中，部分新建露天矿山的矿权范围与高压输电线路的距离接近爆破警戒值，且随着采深增加，原岩扰动加剧，地应力二次平衡会导致周边山体产生位移，此时露天矿山开采活动可能会对电力塔基的稳定造成一定影响，进而威胁输电线路的安全运行。

* **收稿日期**：2025-05-22
作者简介：孙春辉(1994—)，男，河南南阳人，硕士，工程师，主要从事矿山岩石力学及矿山安全、地质灾害治理研究。E-mail: bksunchunhui@163.com

新建露天矿山边坡生产剥离时,封闭圈以上爆破开采易形成以爆区为中心的爆破飞石抛掷圈,沿山体向四周滚落,对电力塔基可能会形成滚石冲击伤害;封闭圈以下生产爆破时,露天采场边坡会阻隔大部分爆破飞石抛掷出矿区范围,对周边环境影响较小[4]。露天矿山的持续开采作业会扩大对周边山体的扰动范围,而科学维护露天采场边坡的稳定性是约束该扰动的有效途径[5]。因此,研究露天矿山开采活动对电力塔基稳定性影响时,需从采场边坡稳定及其扰动范围出发,并结合封闭圈以上形成的滚石角度进行分析论证。

露天采场边坡稳定性通常从定性与定量角度进行分析研究,冯德润[6]基于赤平投影及强度折减数值模拟方法对某矿山进行了边坡稳定性研究。张诏飞等[7]以刚果(金)某露天矿边坡滑坡监测为例,采用 FLAC3D 数值模拟软件及真实孔径雷达监测技术手段,对边坡稳定性和监测预警进行了研究。刘杨等[8]根据岩组优势结构面与边坡组合关系定性分析了边坡破坏模式,并采用极限平衡法定量计算了不同破坏模式下的边坡稳定性。滚石轨迹具有不确定性,大多数学者采用数值模拟分析方法预测滚石影响范围。张亚辉等[9]通过二维 Rocfall 动态数值模拟软件计算了滚石的最终滚动距离。刘鹏飞[10]以牛顿运动定律及能量守恒定律为依据,建立了滚石的运动轨迹模型,并模拟计算了滚石运动距离、速度及动能。宗朝正等[11]在对危岩和滚石发育分布特征精细地质调查的基础上,采用数值模拟软件预测了滚石运动轨迹。当高压线路周边存在威胁电力塔基稳定性的不利因素时,学者们也开展了相关研究。毕振东等[12]采用数值模拟软件分析了铁矿开采对高压线路塔基变形的影响,结果表明,整个开采过程中对塔基变形及位移影响甚微。赵阳等[13]采用理论分析与计算、现场实时监测等研究方法,对浅埋煤层开采引起地表移动变形规律及电塔塔基稳定性进行了研究,建立了采动高压电塔移动变形计算式。孙德宁[14]采用概率积分法预测了高压线塔基地表移动变形,并对受采动影响的塔基进行了分析和评估。

基于上述研究,本文以某新建露天矿山开采矿权范围与两侧电力塔基距离接近爆破警戒线的实际案例为研究对象,采用赤平投影法、极限平衡法、数值模拟等方法,从露天开采边坡稳定性及滚石角度分析研究其对电力塔基的影响。

1 工况概况

某矿山是以石灰岩为矿体的新建矿山,地处滇东高原中低山区,属碳酸盐岩溶地貌,总体地势中间高、四周低,山脉呈北东—南西向延伸,四周多为平缓的冲沟及山间平地,矿区中部望香台最高海拔+2 341 m,矿区北东外围落水洞村最低海拔+2 037 m,相对高差 304 m,岩石大部分裸露,矿区现状为原始地貌,根据现场踏勘,矿区周边未发现滑塌、边坡出水情况,植被覆盖良好,矿区水文地质条件简单、工程地质条件中等、环境地质条件中等。根据勘探报告及现场踏勘结果,矿区周边岩性较为简单,主要工程地质岩组分为灰岩、玄武岩两类。

矿区两侧约 300 m 范围有邑劝甲线、邑劝乙线、金中直流线、永仁富宁线 4 条高压线路通过,矿区与高压线路位置关系如图 1 所示。

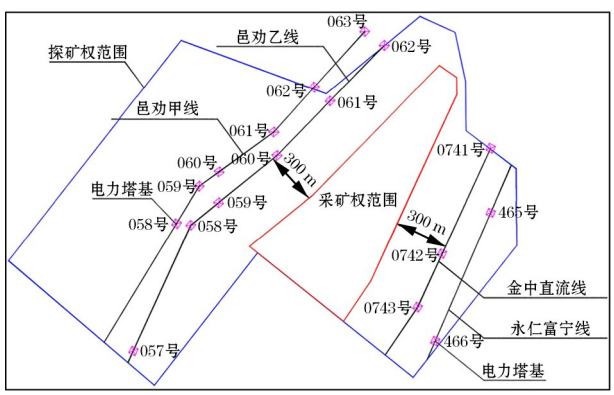


图 1 矿区与高压线路位置关系

Fig.1 Location relationship between mining area and high voltage line

2 基于极限平衡法与数值模拟的电力塔基影响分析

2.1 赤平投影分析

结构面与坡面的组合关系,可能会导致边坡产生不同形式的破坏,可采用赤平投影的方法,对边坡稳定性进行初步定性分析。矿山采用露天开采方式,根据岩层与采场境界边坡线的走向关系,采场东南帮、西南帮、西北帮分别为顺层、切向、反向边坡。通过现场工程地质调查分析,矿区内共发育有 3 组优势结构面,各帮边坡及优势结构面产状统计结果见表 1。

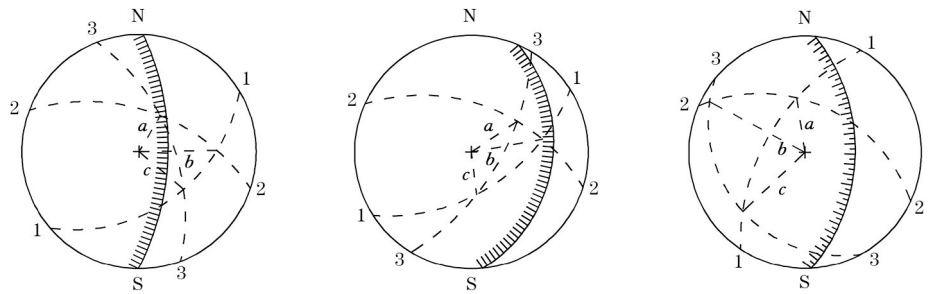
表 1　采场各边坡及优势结构面产状统计结果

Table 1　Statistical results of occurrence of each slope and dominant structural plane in stope

边坡	边坡类型	边坡产状	优势结构面产状
东南帮	顺层边坡	295°∠45°	J1:170°∠70°
西南帮	切向边坡	38°∠50°	J2:100°∠55°
西北帮	反向边坡	120°∠50°	J3:300°∠45°

依据《边坡工程勘察规范》(YS/T 5230—2019)[15]，当边坡发育有 3 组优势结构面时，可采用图解法定性判断边坡稳定状态，可将边坡状态分为不稳定型、基本稳定型、稳定型三类，判定依据如图 2 所示。图 2 中 1、2、3 为结构面，a、b、c 为结构面组合交线。

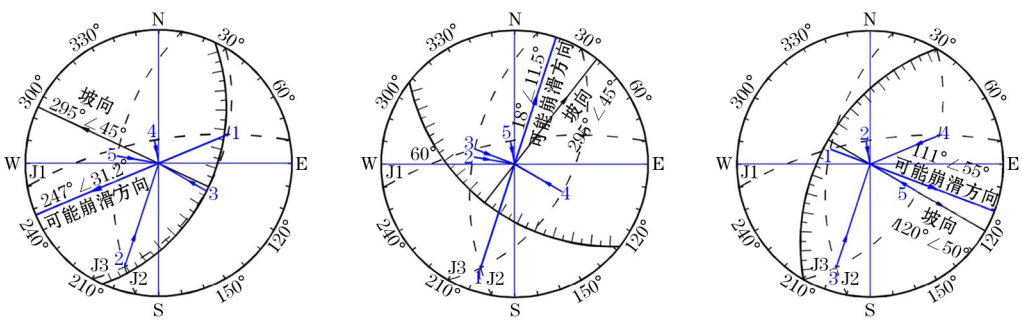
根据赤平投影结果(见图 3)，各结构面除 J2、J3 倾向分别与西北帮、东南帮边坡基本一致外，与其他采场边坡均呈大角度相交，且 J2、J3 结构面倾角均分别不小于西北帮、东南帮边坡角，故各结构面对最终边坡无单独控制作用。根据《边坡工程勘察规范》(YS/T 5230—2019)[15]，采场东南帮、西北帮边坡处于基本稳定状态，西南帮边坡处于不稳定状态。在爆破、地震等不利工况下，东南帮、西南帮、西北帮边坡可能分别沿着 J1 与 J3、J2 与 J3、J1 与 J2 组合交割线 247°∠31.2°、18°∠11.5°、111°∠55°方向发生楔形体破坏，引发滚石危害。



(a) 不稳定型　(b) 基本稳定型　(c) 稳定型

图 2　赤平投影分析边坡状态的判定依依据

Fig.2　Judgment basis of slope state by stereographic projection analysis



(a) 东南帮　(b) 西南帮　(c) 西北帮

图 3　露天采场各边坡与结构面赤平投影结果

Fig.3　Stereographic projection results of slopes and structural plane in open-pit mine

2.2　极限平衡法分析

2.2.1　参数确定

(1) 地下水位高程。根据区域水文地质调查，矿区地下水主要接受大气降雨的补给，其径流和排泄主要受地形地貌条件控制，总体向南东径流，最终向牛栏江排泄。结合观测水位及区域水文地质单元与富水块段，确定矿区内的地下水位高程为+2 060 m。

(2) 地震影响系数。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)[16]，地震烈度为六度及以上地区可采用拟静力法计算地震作用效应，矿区所在区域抗震设防烈度为Ⅸ度，设计基本地震加速度值为 0.40g，通过计算可得地震影响系数为 0.1。

(3) 爆破振动影响系数。在岩体爆破过程中，炸药爆炸后产生的爆轰波的能量随着传播距离的增加逐步衰减，并由冲击波转化为应力波及地震波，本矿山为新建矿山，未进行过爆破测振，结合类似矿山工程经验，爆破振动影响系数可取 0.056。

(4) 许用安全系数。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)[16]，该矿山露天采场境界最高边坡为 240 m，位于 100～300 m 区间，属

中边坡,边坡危害等级为Ⅱ级,边坡安全等级划分为Ⅱ级,确定3种工况下的许用安全系数[K]分别为:

工况一:自重+地下水[K]=1.23;工况二:自重+地下水+爆破振动荷载[K]=1.18;工况三:自重+地下水+地震荷载[K]=1.13。

若剖面计算所得到的安全系数 K 满足:$K>[K]$时,边坡稳定;$1<K<[K]$时,边坡基本稳定;$K<1$时,边坡不稳定。

(5) 岩体计算参数。岩体是由岩石与结构面组成的地质结构体,合适的岩体力学参数是保证计算分析结果可靠性的重要条件。采用GSI分类方法[17]对室内各岩组岩石力学试验参数进行工程化处理,得出用于计算的岩体参数,见表2。

表2　各岩组岩体力学参数取值

Table 2　The value of mechanical parameters of rock mass in each rock group

岩体	容重 γ/(kN/m³)	黏聚力 c/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
灰岩	26.2	6.270	32	1.871	6 288	0.27
玄武岩	27.8	1.127	36	2.801	9 076	0.16

(6) 电力塔基荷载参数。矿区两侧输电线路电力塔基平均质量为35 374.4 kg,每个塔基底部有4个水泥台底座,每个水泥台尺寸为2.4 m×2.4 m,极限平衡法及有限元数值模拟计算时,换算成荷载为63.40 kPa。

2.2.2　计算模型

为分析矿区露天采场边坡稳定性对电力塔基的影响,本次研究根据边坡走向情况、两侧输电线路电力塔基与采场边坡的位置关系、区域地质条件等资料,并结合现场调查结果,共布置4个典型剖面(剖面A至剖面D)建立计算模型,各剖面均穿过电力塔基,边坡岩性以灰岩和玄武岩为主,典型剖面布置及工程地质剖面图(以剖面A为例)分别如图4和图5所示。

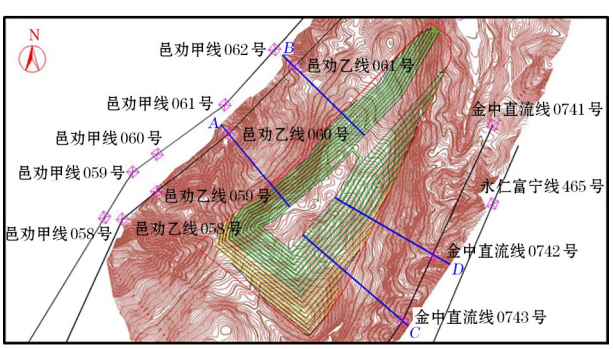


图4　典型剖面布置

Fig.4　Typical section layout

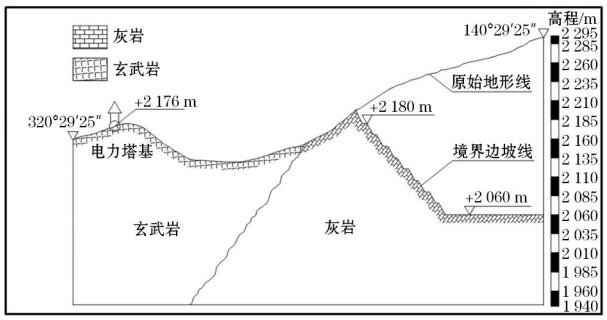


图5　工程地质剖面图(以剖面A为例)

Fig.5　Engineering geological profile (example of profile A)

2.2.3　计算结果

安全系数可定量反映边坡的稳定性状态,当边坡处于稳定状态时,将会减少对周边山体的扰动影响。对矿区采场境界边坡稳定性进行计算时,将电力塔基荷载63.40 kPa加载至剖面,再计算采场境界边坡的安全系数,3种工况条件下边坡安全系数计算结果见表3,工况三条件下安全系数计算结果(以剖面A为例)如图6所示。

表3　边坡安全系数计算结果

Table 3　Calculation results of slope safety factor

剖面编号	边坡安全系数			工况三条件下滑动弧产出位置/m
	工况一	工况二	工况三	
A	2.127	1.974	1.865	33.5
B	1.830	1.699	1.600	46.6
C	2.140	1.949	1.817	53.1
D	2.296	2.092	1.950	37.4

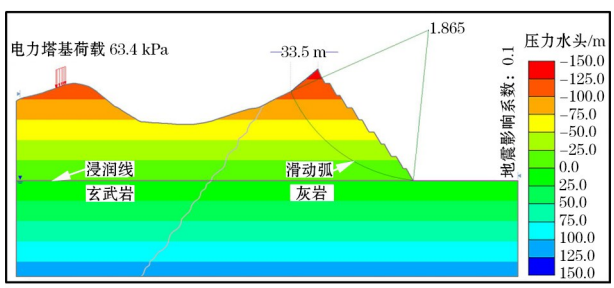


图6　工况三条件下安全系数计算结果(以剖面A为例)

Fig.6　Calculation results of safety factor under condition three (example of profile A)

由表3及图6可知:(1)地下水位浸润线均位于潜在滑动弧外侧,地下水对边坡稳定性基本无影响;(2)在3种工况条件下,各剖面计算得出的边坡安全系数均满足规范要求且具有较高的安全储备,露天采场边坡稳定性状况良好;(3)与工况一相比,工况二条件下安全系数降低幅度为7.16%～8.93%,工

况三条件下安全系数降低幅度为 12.32%～15.09%,且工况三条件下,边坡安全系数最小,故地震是影响边坡的最不利工况;(4)边坡稳定性计算分析的最小安全系数对应的潜在滑动面位于各剖面坡顶 33.5～53.1 m 范围内,潜在滑动面远离电力塔基。

2.3 数值模拟分析

基于极限平衡法的计算结果表明,露天采场边坡在开挖至最终境界时,其潜在滑动面均远离两侧电力塔基。为进一步定量评估采场边坡开挖对电力塔基的扰动影响,需采用数值模拟方法开展深入研究:首先,通过位移场分析确定采动影响的时空演化规律及扰动边界;其次,基于最小主应力场特征,评估采场开挖卸荷作用对电力塔基岩体抗拉稳定性的影响机制。分析程序采用岩土工程分析软件 Phase2 8.0,该软件专用于地下或地表边坡工程开挖中的应力和位移的二维有限元分析。

2.3.1 位移云图

露天采场边坡开挖引起的周边山体位移场可划分为扰动区域和原岩未扰动区域,其中位移量大于零的区域为扰动区域,位移量为零的区域为原岩未扰动区域。

根据有限元数值模拟计算结果,边坡开挖诱发的周边山体位移场呈现明显的空间分布特征:(1)采场边坡区域位移量最大,沿电力塔基方向位移量呈衰减趋势,最终收敛至零;(2)电力塔基处位移量为零,这表明该区域处于原岩应力状态,未受开采扰动影响。位移计算结果如图 7 所示。

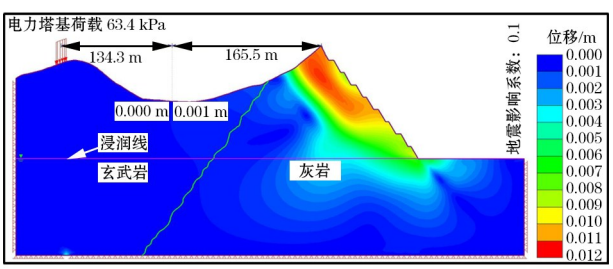


图 7 位移计算结果(以剖面 *A* 为例)

Fig.7 Displacement calculation results (example of profile *A*)

基于露天采场边坡开挖位移场分布规律,为准确圈定采场开挖形成的扰动区域,对整个矿区补充计算剖面 *E*、*F*、*G*、*H*、*I*、*J*(见图 8)。

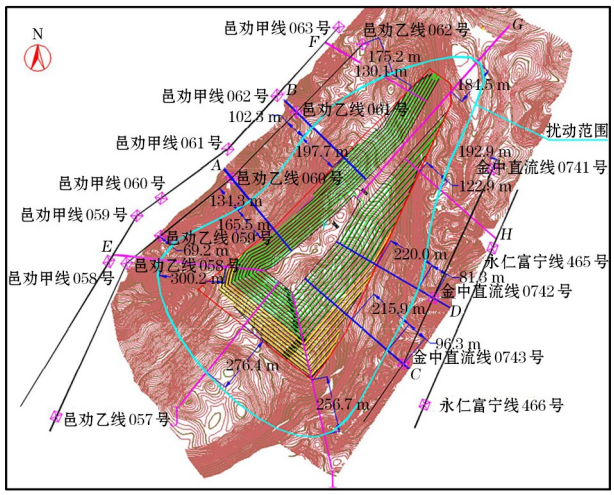


图 8 露天采场边坡开挖扰动区域

Fig.8 Excavation disturbance area of open-pit slope

有限元计算结果表明,各剖面位移场影响范围为 122.9～300.2 m(见表 4),将各剖面影响范围投影至平面坐标系,最终实现采场边坡开挖扰动区域的空间圈定(见图 8)。目前矿区与两侧电力塔基最短距离约为 300 m,临近电力塔基至扰动范围距离为 69.2～192.9 m,存在一定安全距离,电力塔基位于原岩未扰动区域。

表 4 各剖面有限元计算的扰动范围

Table 4 Disturbance range of finite element calculation for each profile

剖面编号	扰动范围/m	临近电力塔基至扰动范围距离/m
A	165.5	134.3
B	197.7	102.3
C	215.9	96.3
D	220.1	81.3
E	300.2	69.2
F	130.1	175.2
G	184.5	—
H	122.9	192.9
I	256.7	—
J	276.4	—

2.3.2 主应力云图

边坡主应力分布及其发展影响着边坡的破坏形式,随着采场边坡的开挖,围岩的应力不断重新分布并形成局部范围内的应力集中。其中,岩体抗压能力远大于抗拉能力,岩体易发生局部拉破坏。根据最小主应力计算结果(见图 9):(1)拉应力呈“千层饼”状分布,符合地应力自上到下逐步增大的分布规律;(2)随着矿区边坡开挖至最终境界,电力塔基处

围岩最小主应力为 0～500 kPa,小于玄武岩与灰岩岩体峰值抗拉强度(2 801 kPa、1 871 kPa),电力塔基底部围岩不会产生拉破坏,处于稳定状态。

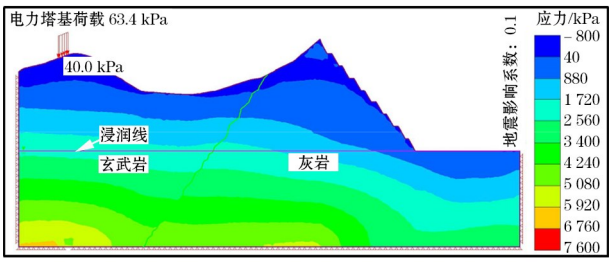


图 9 最小主应力计算结果(以剖面 A 为例)

Fig.9 Calculation results of minimum principal stress (example of profile A)

综上所述,基于极限平衡法与有限元数值模拟分析可知,露天采场边坡开挖至最终境界时,边坡处于稳定状态,潜在滑动面均远离电力塔基,结合位移与最小主应力分析可知,电力塔基位于扰动区域外。

3 坡顶滚石对电力塔基的影响分析

3.1 假定条件

滚石是指边坡表层岩体脱离母岩后,在自重作用下以滚动、弹跳等方式沿斜坡向下快速运动的地质现象,通常在坡度减缓区域或遭遇阻挡物时终止运动。滚石运动轨迹具有随机不确定性,模拟滚石运动需假定如下条件:

(1) 假设边坡只有自然滚落的石块,滚石滚动时假定为具有一定质量的正方形刚性小球,模拟过程中,每个滚石不会碎裂;

(2) 忽略地表植被影响,采用 3DMine 矿业专用软件生成用于计算分析的地表三维模型,同时,假定电力塔基为实际高度的圆柱体;

(3) 考虑周边山体植被摩擦因数对滚石运动的影响,不考虑空气阻力对其影响;

(4) 考虑滚石能量损失主要由坡面摩擦引起,采用恢复系数量化能量损失,忽略运动过程中其他能量损失。

3.2 初始参数

滚石在赋予初始速度条件下,即产生运动,在恢复系数作用下,滚石速度逐渐降为零,滚石停止运动。在运动过程中,每个时间节点,滚石运动均可分解为法向速度与切向速度的表现形式:

$$V_{NA}=R_N V_{NB} \tag{1}$$

$$V_{TA}=R_T V_{TB} \tag{2}$$

式中:V_{NB}、V_{TB}分别为滚石碰撞前沿法向与切向速度,m/s;V_{NA}、V_{TA}分别为滚石碰撞后沿法向与切向速度,m/s;R_N、R_T 分别为法向与切向恢复系数,取 0～1。

滚石恢复系数多与地形地貌及地表岩体坚硬程度相关,地表越坚硬,植被覆盖越少,滚石恢复系数越大。吕庆等[18]、曾启强等[19]研究表明,滚石碰撞的法向恢复系数为 0.2～0.5,切向恢复系数为 0.4～0.9。表 5、表 6 分别为法向和切向恢复系数的取值。

表 5 法向恢复系数取值

Table 5 The value of normal restitution coefficient

坡面特征	法向恢复系数 R_N
光滑而坚硬的表面和铺砌面(如人行道或光滑的基岩面)	0.37～0.42
多数为基岩和砾岩区的斜面	0.33～0.37
硬土边坡	0.30～0.33
软土边坡	0.28～0.30

表 6 切向恢复系数取值

Table 6 The value of tangential restitution coefficient

坡面特征	法向恢复系数 R_T
光滑而坚硬的表面和铺砌面(如人行道或光滑的基岩面)	0.87～0.92
多数为基岩和无植被覆盖的斜坡	0.83～0.87
多数为有少数植被的斜坡	0.82～0.85
植被覆盖的斜坡和有稀少植被覆盖的土质边坡	0.80～0.83
灌木林覆盖的土质边坡	0.78～0.82

矿区属于新建矿山,周边为原始地貌,属灌木丛覆盖的硬土边坡,结合表 5、表 6 推荐值,最终选取滚石的法向与切向恢复系数分别为 0.32,0.80,滚石的初始速度为 0,分析时系统设定的滚石质量为 100 kg,每次随机模拟的滚石数为 50 个,根据边坡形状沿矿区境界较陡区域设置一圈滚石。采用 Trajec3D 滚石模拟仿真软件对封闭圈以上的滚石灾害进行研究,论证采场边坡上部滚石是否会对电力塔基造成影响。

3.3 模拟结果

考虑到矿区滚石会因岩体节理面相互切割及山顶爆破后碎石多以块状形式存在,模拟计算时考虑滚石的形状为正方体。计算滚石对邑劝乙线及金中直流线输电线路电力塔基影响时,采用 3DMine 构建地表地形模型,并导入 Trajec3D 软件中,最终计算出滚石运动轨迹,图中显示绿色的小块体即为模拟滚石(颜色标识见电子版),绿色圆柱代表电力塔基的位置(见图 10 和图 11)。

由图 10 和图 11 可得，通过在露天采场境界范围内山顶较陡区域处多次加载滚石，模拟结果显示，大部分滚石滚落至山坳处，电力塔基位置较高且附近无滚石，故露天采场边坡开挖产生的滚石不会对邑劝乙线及金中直流线输电线路电力塔基造成影响。

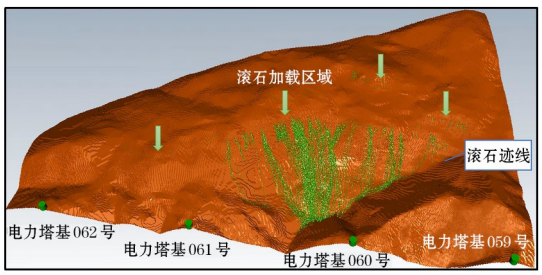


图 10　邑劝乙线一侧滚石滚落迹线图

Fig.10　Rockfall falling trajectory map on one side of Yiquanyi Line

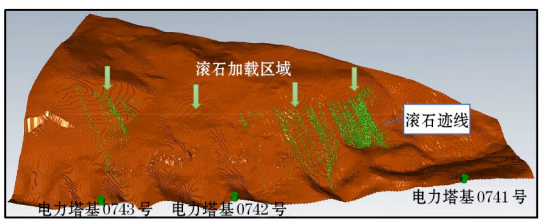


图 11　金中直流线一侧滚石滚落迹线图

Fig.11　Rockfall falling trajectory map on one side of Jinzhong DC Line

4　结论

本文在采用赤平投影、极限平衡法分析边坡稳定性的基础上，采用数值模拟分析得到了露天采场边坡开挖扰动范围，并结合三维滚石模拟分析结果，从定性与定量角度分析某新建露天矿山对两侧输电线路电力塔基的影响，得出的主要结论如下。

(1) 根据赤平投影定性分析结果，露天采场边坡发育的优势结构面对最终边坡无单独控制作用，采场边坡处于基本稳定至不稳定状态，在爆破、地震等不利工况条件下，边坡可能会发生楔形体破坏，产生滚石。

(2) 极限平衡法计算结果表明，在 3 种工况条件下露天采场边坡安全系数均满足规范要求，边坡处于稳定状态，最小安全系数对应的潜在滑动面位于各剖面坡顶 33.5～53.1 m 范围内，潜在滑动面远离电力塔基。

(3) 有限元数值模拟研究结果显示，各剖面位移场影响范围为 122.9～300.2 m，矿区两侧临近电力塔基至扰动范围距离为 69.2～192.9 m，存在一定安全距离，电力塔基位于原岩未扰动区域。

(4) 滚石三维模拟结果显示，大部分滚石滚落至山坳处，电力塔基位置较高且附近无滚石，故露天采场边坡开挖山顶滚石不会对邑劝乙线及金中直流线输电线路电力塔基造成影响。

(5) 综合分析表明，在现有开采方案和设计参数下，矿山正常开采活动对邻近输电线路电力塔基的稳定性影响可忽略，电力塔基处于安全状态。为保障长期运营安全，建议在矿山开采运营期对临近塔基区域实施位移变形监测。

参考文献(References)：

[1]　王连成，邵安林，曲福明，等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报，2025，47(5)：971-983.
WANG Liancheng, SHAO Anlin, QU Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2025, 47(5): 971-983.

[2]　齐炎，黄崇杰，匡勇，等.非爆破开采工艺在某大型铝土矿中的应用研究[J].有色冶金设计与研究，2024，45(5)：17-20.
QI Yan, HUANG Chongjie, KUANG Yong, et al. Practical research on the application of non-blasting mining technology in a large bauxite mine[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2024, 45(5): 17-20.

[3]　张杰，邱贤阳，田志刚，等.地下矿山上向扇形中深孔爆破爆堆控制技术研究[J].矿业研究与开发，2024，44(10)：58-64.
ZHANG Jie, QIU Xianyang, TIAN Zhigang, et al. Research on the control technology of explosive piles of upward fan-shaped deep hole blasting in underground mines [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(10): 58-64.

[4]　魏东.裂隙岩体台阶爆破破坏机制研究[D].武汉：武汉大学，2021.
WEI Dong. Study on failure mechanism of bench blasting in fractured rock mass[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.

[5]　李鹏.不同荷载作用下露天矿山边坡稳定性研究[J].矿产勘查，2024，15(增刊 1)：127-131.
LI Peng. Research on slope stability of open pit mines under different load actions [J]. Mineral Exploration, 2024, 15(Suppl.1): 127-131.

[6]　冯德润.基于赤平投影-强度折减法的露天矿边坡稳定性研究[J].有色金属(矿山部分)，2021，73(5)：52-57+62.
FENG Derun. Research on slope stability of open-pit mine based on stereographic projection-strength reduction method [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(5): 52-57+62.

[7] 张诏飞,席伟.基于 FLAC3D-RAR 的边坡稳定性分析和监测预警[J].矿业研究与开发,2023,43(5):63-68.
ZHANG Zhaofei, XI Wei. Slope stability analysis, monitoring and early warning based on FLAC3D-RAR[J]. Mining Research and Development,2023,43(5):63-68.

[8] 刘杨,王海军,张长锁,等.基于赤平投影分析的露天矿高边坡台阶坡面角优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):83-90.
LIU Yang, WANG Haijun, ZHANG Changsuo, et al. Study on optimization of bench slope angle of high slope in open-pit mine based on stereographic projection analysis[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):83-90.

[9] 张亚辉,张孟喜,陈强,等.典型松散体边坡滚石运动距离的运动学分析[J].上海大学学报(自然科学版),2017,23(6):949-960.
ZHANG Yahui, ZHANG Mengxi, CHEN Qiang, et al. Kinematics analysis for calculating distance of rockfalls on typical loose media slope[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science),2017,23(6):949-960.

[10] 刘鹏飞.边坡滚石灾害的作用机理与防治措施研究[J].土工基础,2023,37(3):335-338.
LIU Pengfei. Mechanism and prevention measures of rock fall hazards[J]. Soil Engineering and Foundation,2023,37(3):335-338.

[11] 宗朝正,吉锋,陈利鑫.基于 Rockfall Analyst 的滚石运动参数反演及三维轨迹分析[J].地质灾害与环境保护,2024,35(4):1-5.
ZONG Chaozheng, JI Feng, CHEN Lixin. Parameter backanalysis and 3D trajectory analysis of rolling stone motion based on rockfall analyst[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2024,35(4):1-5.

[12] 毕振东,崔宇鹏,夏鹏,等.铁矿开采对高压线路塔基变形影响数值模拟研究[J].山西建筑,2017,43(10):77-79.
BI Zhendong, CUI Yupeng, XIA Peng, et al. Numerical simulation research on the impact of iron mine mining upon high-voltage tower foundation deformation [J]. Shanxi Architecture,2017,43(10):77-79.

[13] 赵阳,陈俊凝,韦启蒙.浅埋煤层采动地表移动变形规律及电塔塔基稳定性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):121-127.
ZHAO Yang, CHEN Junning, WEI Qimeng. Study on surface movement and deformation law of shallow coal seam and stability of electrical tower foundation [J]. Mining Research and Development,2023,43(2):121-127.

[14] 孙德宁.采动影响下高压线塔基可调式基础改造加固技术研究[J].煤矿现代化,2024,33(1):52-55+60.
SUN Dening. Research on reinforcement technology of adjustable foundation of high voltage line tower foundation under the influence of mining[J]. Coal Mine Modernization,2024,33(1):52-55+60.

[15] 中华人民共和国工业和信息化部.边坡工程勘察规范:YS/T 5230—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.非煤露天矿边坡工程技术规范:GB 51016—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

[17] 王可意,余同日,张晓雄,等.GSI 值定量化与岩体力学参数的确定[J].河北工程大学学报(自然科学版),2022,39(1):46-51.
WANG Keyi, YU Tongri, ZHANG Xiaoxiong, et al. Quantification of GSI value and determination of rock mechanics parameters[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2022,39(1):46-51.

[18] 吕庆,孙红月,翟三扣,等.边坡滚石运动的计算模型[J].自然灾害学报,2003(2):79-84.
LYU Qing, SUN Hongyue, ZHAI Sankou, et al. Evaluation models of rockfall trajectory [J]. Journal of Natural Disasters,2003(2):79-84.

[19] 曾启强,王立朝,刘伟,等.广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探[J].水文地质工程地质,2023,50(5):159-168.
ZENG Qiqiang, WANG Lichao, LIU Wei, et al. Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2023,50(5):159-168.