# 地震工况下露天矿排土场稳定性能量突变分析与优化措施*

杨志一

(中铁十九局集团矿业投资有限公司， 北京 100161)

**摘要**:为揭示地震工况下露天矿排土场的能量演化规律,并建立边坡失稳判别依据,将尖点突变理论与露天矿排土场能量理论相结合,构建了以边坡耗散能为状态变量的耗散能突变失稳理论模型。以大苏计钼矿南排土场为工程背景,运用FLAC3D软件分析南排土场4个边坡剖面的耗散能演化规律,并开展突变特征分析,据此对排土场的堆置方案进行优化设计。结果表明:南排土场边坡剖面耗散能特征值大部分小于0,在地震荷载作用下易失稳,模拟结果与现场情况相符;根据边坡耗散能演化特征,提出"加固边坡坡面+堆置优化+监测与预警"的优化方案并应用于南排土场。对优化后的方案进行数值模拟分析与现场监测验证,结果显示,采取优化措施后,边坡的抗变形能力与整体稳定性显著提高。研究结果可为预防排土场边坡失稳提供借鉴。

**关键词**:露天矿排土场;地震工况;能量演化;尖点突变理论;失稳判据;优化措施

**中图分类号**:TD854 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0110-10

**Stability Energy Mutation Analysis and Optimization Measures for Open-Pit Mine Dumps Under Seismic Conditions**

*YANG Zhiyi*

(China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co.,Ltd., Beijing 100161, China)

**Abstract**: To reveal the energy evolution law of open-pit mine dumps under seismic conditions and establish a criterion for slope instability, the cusp catastrophe theory was combined with the energy theory in open-pit mine dumps. This led to the development of a theoretical instability model for dissipated energy catastrophe, using slope dissipated energy as state variable. The south dump of Dasuji Molybdenum Mine was taken as the engineering background. FLAC3D software was used to analyze the evolution patterns of dissipated energy of four slope sections in the south dump and analyze the mutation characteristics. Based on these findings, the stacking scheme of the dump was optimized. The results show that most of the characteristic values of the dissipated energy for the south dump slope section are below zero, and the slope is prone to instability under seismic loading. The simulation results are consistent with the field situations. According to the evolution characteristics of the dissipated energy of the slope, an optimization scheme of "slope reinforcement+stacking optimization+monitoring and early warning" is proposed and applied to the south dump. The numerical simulation analysis and field monitoring verification of the optimized scheme show that the anti-deformation ability and overall stability of the slope are significantly improved after taking the optimization measures. The research results can provide references for the preventing dump slope instability.

**Key words**: Open-pit mine dumps, Seismic conditions, Energy evolution, Cusp catastrophe theory, Instability criterion, Optimization measures

## 0 引言

排土场边坡主要由堆积、排放与堆置的散体物料构成,遇到不良地质条件时易发生变形,产生裂隙。若对排土场边坡治理不当,会导致边坡失稳破坏,发生崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,对矿山安全产生造成严重危害[1-2]。因此,治理排土场边坡,维持其稳定性具有十分重要的意义[3]。在地震工况下,边坡受到地震荷载扰动影响,其稳定性相比正常工况下有较大程度下降,因此需研究地震工况下的边坡稳定性[4-5]。

目前,从岩土体能量演化角度研究边坡失稳机制已得到国内外众多学者的认可。TU等[6]基于能量准则,将强度折减法与边坡演化过程中的能量机

* **收稿日期**:2025-08-17

**作者简介**:杨志一(1983—),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,主要从事矿山管理工作。E-mail:472913489@qq.com

制相结合,提出了边坡能量失稳判据。国鸿圆等[7]从能量守恒的角度出发,结合反倾层状岩质边坡的悬臂梁理论模型,推导出两种板梁失稳计算模型。周子涵等[8-9]运用 FLAC3D 有限元软件,分析了边坡在开挖过程中的能量演化,并结合突变理论,建立了边坡开挖过程中的能量突变判据。胡森等[10]针对传统有限元分析边坡大变形破坏时计算精度低的问题,通过能量原理并结合欧拉-拉格朗算法,揭示了软土边坡失稳全过程的特征。曾庆隆等[11]、李延超等[12]通过理论分析与数值模拟相结合的方法,研究了隔离层安全厚度范围,有效降低了安全事故的发生。李如仁等[13]、梁霁兴等[14]通过室内试验与数值模拟方法,分析了影响边坡排土场稳定性的因素,阐明了边坡排土场失稳原理。王享通等[15]提出了尾矿库稳定性在线监测技术,实现了尾矿库坝体及排洪情况的实时监控。

部分学者对地震工况下边坡稳定性演化规律进行了研究。崔笑等[16]考虑了地震作用的随机性和复杂性,将塑性应变能理论与突变理论相结合,以总塑性应变能突变来作为边坡动力安全系数,计算结果更具客观性。盛建龙等[17]通过数值模拟方法探究了边坡动力响应的主要影响因素,分析了边坡失稳的内在原因。陶志刚等[18]根据边坡岩土体的结构特征,基于模糊数学评价原理,对高陡边坡稳定性进行了综合评价。王荣等[19]结合室内试验结果和边坡失稳崩落距离的影响规律,提出了以边坡高度为评价指标的边坡防护临界阈值。王海龙等[20]以Ⅶ度地震烈度区的边坡为工程背景,通过 Midas-GTS 软件建立有限元分析模型,分析边坡在天然工况和地震工况下的稳定性。结果表明,斜坡在天然工况下基本稳定或稳定,而在地震工况下处于不稳定状态。

然而,现阶段对于地震工况下边坡失稳分析尚未有统一的判别方式,缺少对地震工况下边坡能量机制的定量评价方法。为此,本文基于能量守恒原理,结合突变理论对边坡进行稳定性分析,构建出地震工况下边坡能量失稳判别准则。以大苏计钼矿南排土场边坡为工程背景,分析地震荷载作用下的边坡体能量演化规律与边坡稳定性的内在联系,并基于能量突变判别准则对南排土场边坡进行方案优化。研究结果可为预防边坡排土场边坡失稳提供借鉴。

## 1 突变理论基本原理

突变理论是数学和物理学的一个分支,主要研究连续系统在参数变化时突然出现的结构变化,即从一种稳定状态到另一种稳定状态的转变。突变理论包括 8 种基本突变类型,分别为折叠突变、尖点突变、燕尾突变、蝴蝶突变、棚屋突变、双曲脐点、椭圆脐点、抛物脐点。由于岩土体是一种复杂的非线性系统,其力学行为受到多种因素的影响,且临界状态通常与失稳现象相关,而尖点突变理论能够描述系统在临界点附近的敏感性,即参数的微小变化可能导致系统从稳定状态突然转变为失稳状态,因此运用尖点突变理论分析岩土体从稳定状态转换为失稳状态是可行的[21]。尖点突变理论模型如图 1 所示。

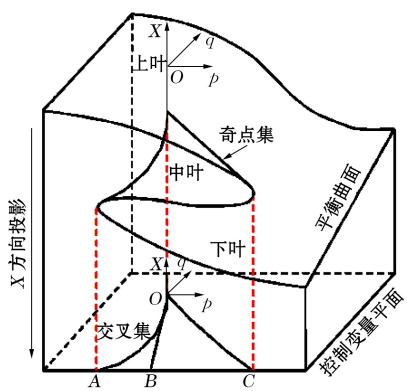



**图 1 尖点突变理论模型**

**Fig.1 Theoretical model of sharp point mutation**

尖点突变理论势函数表达式见式(1):

$$V(x)=x^4+\alpha x^2+\beta x \tag{1}$$

式中,$\alpha$ 与 $\beta$ 为构成三维空间的控制变量。

将式(1)进行一阶及二阶求导,得到尖点突变理论模型的平衡去曲面方程与奇点集方程:

$$V'(x)=4x^3+2\alpha x+\beta=0 \tag{2}$$

$$V''(x)=12x^2+2\alpha=0 \tag{3}$$

联立式(2)与式(3)消去 $x$,可得到尖点突变理论分叉集方程:

$$\Delta=8\alpha^3+27\beta^2 \tag{4}$$

当系统的控制变量 $\alpha$、$\beta$ 满足跨越分叉集方程 $\Delta$ 条件,即当 $\Delta<0$ 时,即可认为系统稳定状态发生了突变,从稳定状态转变为失稳状态,因此将 $\Delta=0$ 作为系统稳定状态的极限平衡点。

## 2 能量突变判别方程

### 2.1 边坡失稳过程的能量原理

边坡失稳过程的能量原理主要涉及到能量的积累、转化和释放,以及这些过程与边坡稳定性之间的关系。边坡失稳是指边坡在重力及其他外力作用下,受其自身内部或外部因素的影响,导致边坡结构的稳定性降低,最终发生滑动、崩塌等现象,其过程遵循能量守恒定律,此过程输入的能量转化为边坡所储存的弹性势能、边坡耗散能以及动能。根据热力学第一定律,此过程的能量守恒方程见式(5):

$$\Delta U=\Delta U_{\mathrm{e}}+\Delta U_{\mathrm{d}}+\Delta U_{\mathrm{k}} \tag{5}$$

式中:$\Delta U$ 为输入边坡的能量;$\Delta U_{\mathrm{e}}$为边坡所存储的弹性势能变化量;$\Delta U_{\mathrm{d}}$为边坡用于变形破坏的耗散能变化量;$\Delta U_{\mathrm{k}}$为边坡动能变化量。

边坡耗散能在宏观上表现为边坡的变形、破坏,以及热能、辐射能等。在对边坡进行稳定性分析时,耗散能主要指边坡变形与破坏所消耗的能量。其中,热能和辐射能等其他形式的能量占比极低,在利用 FLAC3D 软件进行数值模拟时,这些能量形式可忽略不计。因此,式(5)可改写成式(6):

$$\Delta U_{\mathrm{g}}+\Delta U_{\mathrm{a}}=\Delta U_{\mathrm{e}}+\Delta U_{\mathrm{d}}+\Delta U_{\mathrm{k}} \tag{6}$$

式中:$\Delta U_{\mathrm{a}}$为地震输入边坡能量的变化量;$\Delta U_{\mathrm{g}}$为边坡重力势能变化量。

地震输入边坡的能量、重力势能、弹性储能及动能可表示为:

$$\Delta U_{\mathrm{g}}=\rho g h \tag{7}$$

$$\Delta U_{\mathrm{a}}=10^{4.8+1.5M} \tag{8}$$

$$\Delta U_{\mathrm{e}}=\frac{v}{2E}[\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3-2\upsilon(\sigma_1\sigma_2+\sigma_1\sigma_3+\sigma_2\sigma_3)] \tag{9}$$

$$\Delta U_{\mathrm{k}}=\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{10}$$

式中:$\rho$ 为岩土体的密度;$g$ 为重力加速度;$h$ 为高度;$M$ 为震级;$\sigma_1$、$\sigma_2$、$\sigma_3$ 分别为岩土体的第一、第二、第三主应力;$E$ 为弹性模量;$\upsilon$ 为泊松比;$v$ 为岩土体的速度。

根据式(7)至式(10),可求得边坡用于变形破坏的耗散能 $\Delta U_{\mathrm{d}}$,见式(11):

$$\Delta U_{\mathrm{d}}=\rho g h+10^{4.8+1.5M}-\frac{v}{2E}[\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3-2\upsilon(\sigma_1\sigma_2+\sigma_1\sigma_3+\sigma_2\sigma_3)]-\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{11}$$

### 2.2 能量突变判别准则

边坡受到地震荷载作用时,岩体原有的应力平衡被打破,应力场重新分布,导致边坡岩体变形甚至破坏。岩体变形破坏的过程具有非线性与不可逆特性,这一过程可视为岩体能量输入与释放的结果,而岩体的最终破坏表现为系统内部耗散能的突然释放。

根据突变理论,以边坡岩体的总耗散能为状态变量,将耗散能 $\Delta U_{\mathrm{d}}$ 与数值模拟的时间步长进行拟合,构建尖点突变理论标准形式的函数关系式,并推导其分叉集方程,将分叉集是否跨越平衡曲面作为边坡是否失稳的判据,进而从能量演化的角度揭示边坡稳定性的动态演化过程。

设边坡在第 $k$ 次迭代时的总耗散能为 $U_{\mathrm{d}}^{k}$,则 $U_{\mathrm{d}}$ 与迭代次数 $k$ 可表示为:

$$U_{\mathrm{d}}^{k}(k_i)=\sum_{q=1}^{N}U_{\mathrm{d}}^{u}(k_i) \tag{12}$$

式中:$U_{\mathrm{d}}^{u}(k_i)$ 为第 $k$ 次迭代后任意单元的耗散能密度增量;$N$ 为单元总数。

根据岩石力学与工程[22],设 $U_{\mathrm{d}}^{k}(k_i)=f(k)$,对多项式 $U_{\mathrm{d}}^{k}(k_i)$ 进行泰勒展开并截取函数前 5 次项,可得式(13):

$$U_{\mathrm{d}}^{k}(k_i)=f(k)=r_0+r_1k+r_2k^2+r_3k^3+r_4k^4+r_5k^5 \tag{13}$$

式中:$r_0$,$r_1$,$r_2$,$r_3$,$r_4$,$r_5$ 为拟合参数,可基于最小二乘法准则,借助 MATLAB 软件对总耗散能 $f(k)$ 随迭代次数 $k$ 的变化关系进行拟合求解。

对式(13)进行求导可得到式(14):

$$f'(k)=r_1+2r_2k+3r_3k^2+4r_4k^3+5r_5k^4 \tag{14}$$

根据 Tschirnhaus 变换,将式(13)转化为尖点突变理论标准式,见式(15):

$$Q(k)=x^4+ax^2+bx \tag{15}$$

式中,$a$ 与 $b$ 为控制变量。

$$\begin{cases}x=k+\dfrac{r_3}{4r_4}\\ a=\dfrac{r_2}{r_4}-\dfrac{3r_3^2}{8r_4^2}\\ b=\dfrac{r_1}{r_4}-\dfrac{r_2r_3}{2r_4^2}-\dfrac{r_3^2}{8r_4^2}\end{cases} \tag{16}$$

对式(15)两端进行一阶与二阶求导可得到平衡曲面微分方程与奇点集方程,见式(17)。

$$\begin{cases}Q'(k)=4x^3+2ax+b\\ Q''(k)=12x^2+2a\end{cases} \tag{17}$$

令式(17)等于0并联立,可得到尖点突变理论突变特征值Δ表达式,见式(18):

$$\Delta = 8a^3 + 27b^2 \tag{18}$$

根据突变理论,当突变特征值Δ>0时,岩土体处于稳定状态;当突变特征值Δ<0时,岩土体处于失稳状态;当突变特征值Δ=0时,此时稍有一点扰动,岩土体即可转变为失稳状态,因此,将Δ=0时岩土体的稳定状态作为临界安全状态。

## 3 数值模拟

### 3.1 工程背景

内蒙古大苏计钼矿为露天矿,共有4座排土场,分别为东排土场、2#排土场、西南排土场和南排土场(坝前排土场)。其中南排土场边坡位于现有尾矿坝下游,与尾矿坝无缝衔接,属于一级排土场。

根据现场调研结果,目前南排土场最高平台堆放排土物料的边缘及30 m范围内存在多组长裂缝,在遇到不良地质工况下有潜在的滑坡风险,需加强观测和提出相应的防治措施。

为研究排土场的整体安全稳定性状态,依据大苏计钼矿南排土场的实际堆排现状,选取了4处典型边坡剖面进行计算分析,典型边坡剖面选取位置如图2所示,其中排土场的剖面Ⅰ—Ⅰ处堆置高度最大,总堆高为133 m左右;剖面Ⅱ—Ⅱ处台阶高度最大,台阶堆高为39 m,倾角约为33°;剖面Ⅲ—Ⅲ处地表以下为厚度较大的排土物料散体;剖面Ⅳ—Ⅳ处边坡坡底处于沟谷地形内。

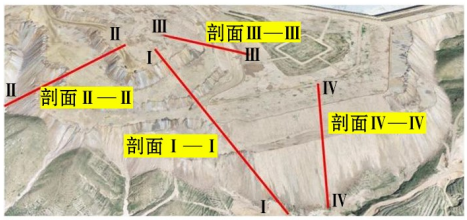



**图2 南排土场边坡典型剖面选取位置**

**Fig.2 Selection location of typical profiles of south dump slope**

根据上述剖面位置,对三维模型进行垂向切割,综合地勘工程地质剖面图,获得排土场Ⅰ—Ⅰ剖面、Ⅱ—Ⅱ剖面、Ⅲ—Ⅲ剖面、Ⅳ—Ⅳ剖面,如图3所示。

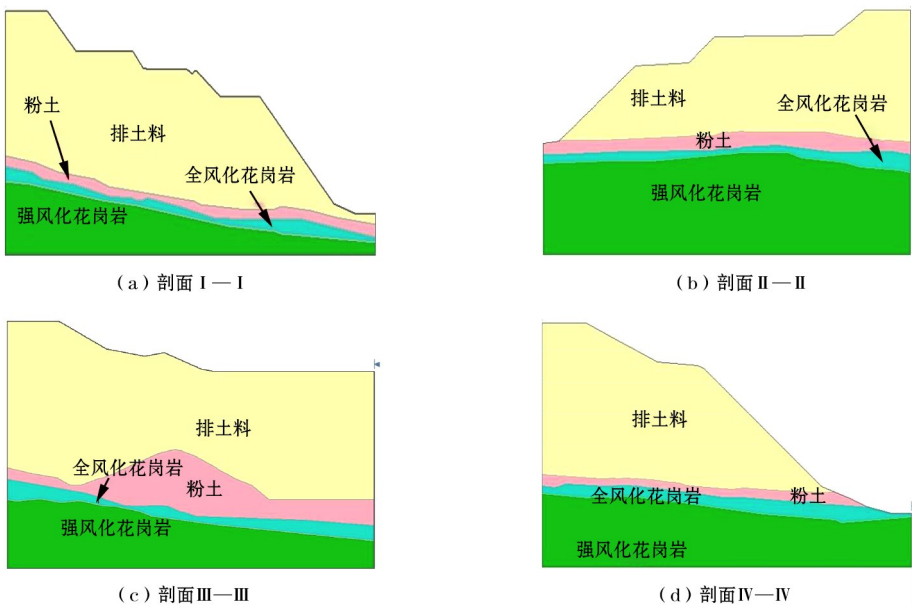



**图3 南排土场典型剖面**

**Fig.3 Typical profiles of the south dump**

### 3.2 数值模型及模拟方案

根据图3的南排土场典型边坡剖面,基于摩尔-库伦准则建立4个边坡剖面的三维模型,如图4所示。其中剖面Ⅰ—Ⅰ三维模型网格数量为25 808,节点数量为25 251;剖面Ⅱ—Ⅱ三维模型网格数量为47 376,节点数量为49 155;剖面Ⅲ—Ⅲ三维模型网格数量为80 198,节点数量为79 429;剖面Ⅳ—Ⅳ三维模型网格数量为34 851,节点数量为35 456。模型顶部为自由面,左右、前后及底部为固定边界。

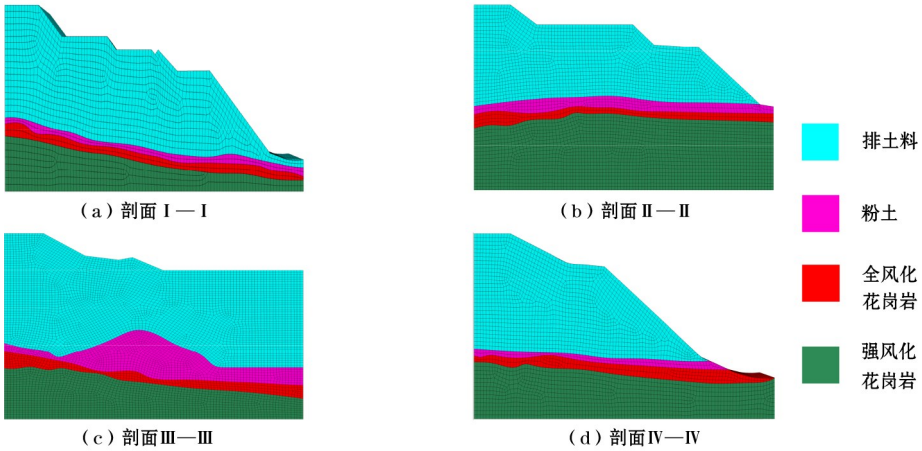



**图 4 数值模型**

**Fig.4 Numerical models**

为确定大苏计钼矿南排土场边坡模拟参数,对南排土场边坡各个岩层进行取样并进行物理力学参数试验,试验结果见表 1。

**表 1 南排土场边坡各岩层物理力学参数**

**Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock stratum in the south dump slope**

| 材料种类 | 容重 $\gamma$/(kN/m$^3$) | 内摩擦角 $\varphi$/(°) | 黏聚力 $c$/kPa |
|---|---|---|---|
| 排料 | 19.0 | 14.8 | 27.8 |
| 粉土 | 17.2 | 10.7 | 22.8 |
| 全风化花岗岩 | 20.0 | 15.0 | 25.0 |
| 强风化花岗岩 | 22.1 | 18.0 | 30.0 |

通过对 4 个典型边坡坡面施加地震荷载,分析地震工况下大苏计钼矿南排土场边坡的稳定性。地震荷载采取排土场多年以来的最大震动荷载,根据现场资料,地震振动峰值加速度取 0.1$g$,地震烈度为 7 度,波形如图 5 所示。

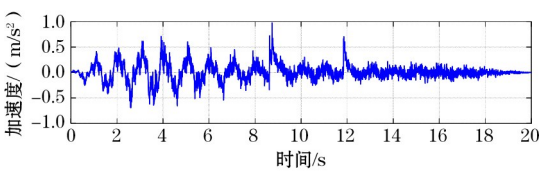



**图 5 地震波形**

**Fig.5 Seismic waveform**

### 3.3 能量突变分析

基于 FLAC3D 中内置的 FISH 语言,将式(15)编入数值计算流程并导出其耗散能数据。根据尖点突变理论建立 4 个边坡剖面的尖点突变理论模型,并计算其耗散能特征值,根据特征值是否大于 0 来判别边坡是否易失稳,计算结果如图 6 所示。

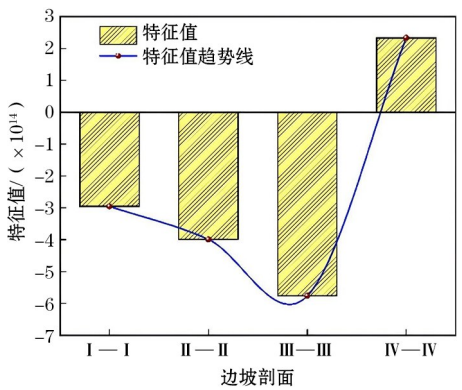



**图 6 耗散能特征值**

**Fig.6 Characteristic values of dissipative energy**

由图 6 可知,Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ边坡剖面耗散能特征值均小于 0,说明Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ边坡坡面在地震及自重荷载的作用下,变形逐渐增大直至破坏。

从耗散能特征值的变化趋势来看,Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ以及Ⅲ—Ⅲ边坡剖面耗散能特征值逐渐减小,说明Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ以及Ⅲ—Ⅲ边坡剖面的破坏越来越严重,这是由于边坡剖面Ⅰ—Ⅰ的堆置高度较高,为 133 m;边坡剖面Ⅱ—Ⅱ台阶高度最大,为 39 m;边坡剖面Ⅲ—Ⅲ的排土物料散体较厚,易受扰动影响而发生失稳破坏。对比 3 个边坡剖面的耗散能特征值可知,边坡耗散能特征值对堆置高度、台阶高度及散体物料厚度的敏感度为:堆置高度<台阶高度<散体物料厚度。

边坡剖面Ⅳ—Ⅳ位于边坡沟谷地形内,在地震及自重荷载的共同作用下仍有较强的承载能力,不易受到扰动而发生失稳破坏,因此,边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的耗散能特征值大于 0,边坡不易受到地震荷载扰

动而发生失稳破坏。

边坡耗散能云图如图 7 所示。由图 7(a)可知,边坡剖面Ⅰ—Ⅰ的耗散能最大值为 $3\times10^3$ kJ;由图 7(b)可知,边坡剖面Ⅱ—Ⅱ的耗散能最大值为 $3.25\times10^3$ kJ;由图 7(c)可知,边坡剖面Ⅲ—Ⅲ的耗散能最大值为 $3.25\times10^3$ kJ。边坡剖面Ⅲ—Ⅲ的耗散能值相对较大,说明该边坡岩体的破坏最为严重。由图 7(d)可知,边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的耗散能最大值为 $2\times10^3$ kJ,促使岩石变形破坏的能量较小,因此,边坡剖面Ⅳ—Ⅳ较为稳定。

对比图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)及图 7(d)可以发现,边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、边坡剖面Ⅱ—Ⅱ及边坡剖面Ⅲ—Ⅲ的耗散在 $2.25\times10^3\sim3.25\times10^3$ kJ 之间,而边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的耗散能则在 $2\times10^3$ kJ 以下,侧面说明边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ的坡面破坏较为严重,而现场情况为边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ与Ⅲ—Ⅲ均出现较大裂隙,边坡剖面Ⅳ—Ⅳ并未发现较为明显的裂隙,模拟结果与现场情况一致。

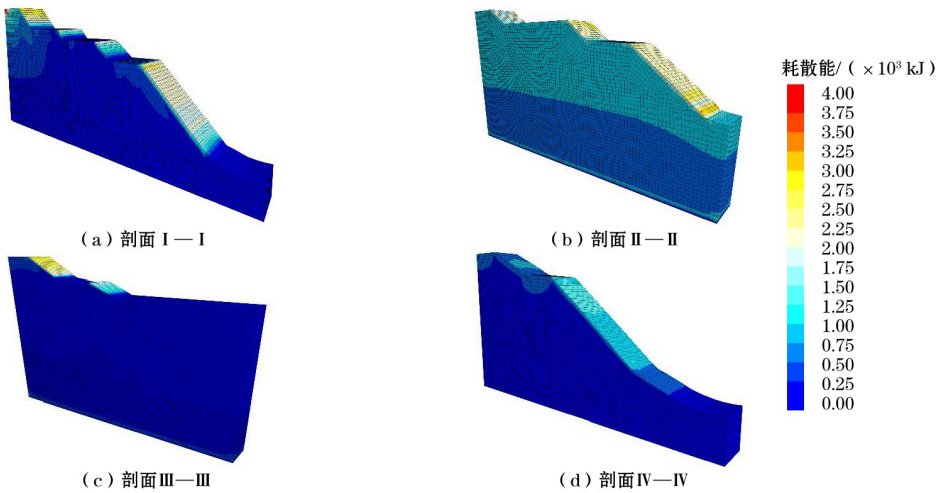



**图 7 边坡耗散能云图**

**Fig.7 Cloud maps of dissipated energy of the slope**

### 3.4 塑性区分析

为分析大苏计钼矿南排土场边坡的破坏范围,绘制南排土场边坡 4 个边坡剖面的塑性区云图,如图 8 所示。

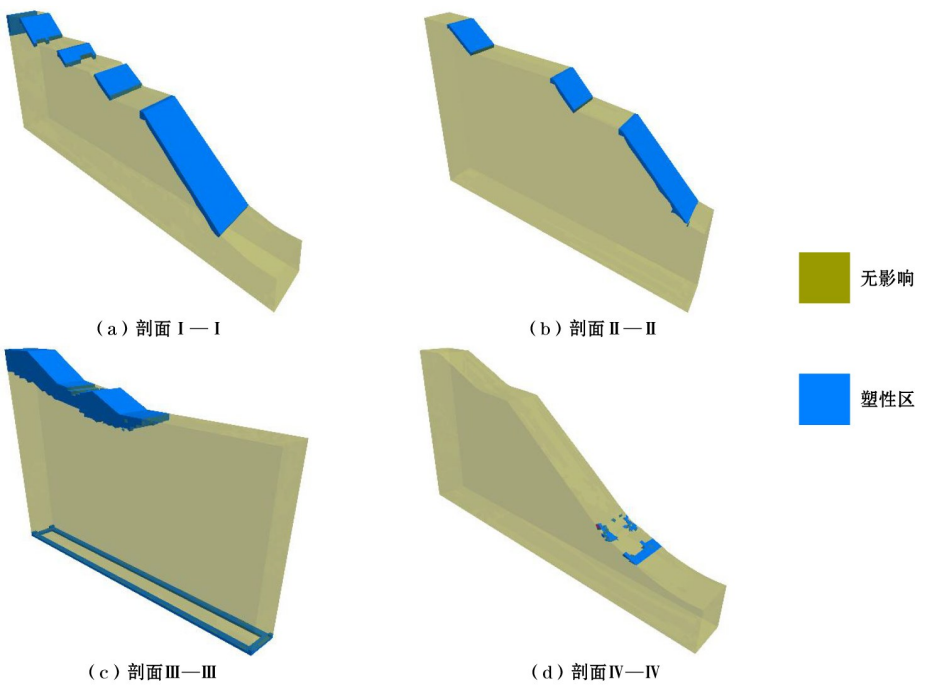



**图 8 边坡塑性区分布云图**

**Fig.8 Plastic zone distribution cloud maps of the south dump slope**

从图 8 中可以看出,边坡塑性区主要分布在坡体表面,说明在地震工况下,边坡的破坏是从坡面开始,逐渐向台阶、深部延伸,最终导致边坡失稳。此外,边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ皆出现了较大范围的塑性区,而剖面Ⅳ—Ⅳ的塑性区范围较小。说明在地震工况下,边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ以及Ⅲ—Ⅲ更易受地震荷载扰动影响而发生失稳破坏。

## 4 排土场参数优化

### 4.1 优化原则

基于耗散能突变理论及南排土场边坡现状,提出以下控制原则。

(1) 加固边坡坡面。由于边坡坡面为散体结构,为改善坡面的物理力学性质,预防边坡在极端环境下发生失稳、滑坡等灾害,根据理论分析结果,针对边坡的坡脚、坡中部及坡顶进行防护加固,预防边坡坡面由于耗散能较大而出现的局部失稳破坏、滑坡等灾害。

(2) 优化排土与堆置方案。针对原有方案不合理而导致排土场边坡存在高耗散能突变与失稳破坏的风险,基于排土场边坡现状,对现有排土与堆置方案进行优化,以降低人为因素导致的边坡破坏风险,避免大范围滑坡灾害的发生。

(3) 监测与预警。为及时监测及预警排土场边坡的灾害,建立南排土场边坡在线监测系统,对表面变形、视频图像、内部变形、应力、地下水、爆破振动、降雨量等数据进行实时监测,同步建立预警机制,确保在重大危险来临前及时发布预警信息。

### 4.2 优化措施

(1) 加固边坡坡面。为避免排土场四周山坡汇水冲刷排土场、排土场自身平台汇水侵蚀边坡,在排土场边坡平台铺设黏土并反复压实,防止地表水渗入台阶内部;同时采用反坡作业方式,将排土场平台修整为 2%～3%的反坡,使平台汇水能自然流向排土场坡脚,避免地表水在排土场边坡台阶处积聚,以此减少泥沙流失量、减轻坡面侵蚀,从根源上抑制泥石流灾害的发生。

(2) 堆置优化。根据地形条件、排土场物料、基建与剥离标高、道路运输系统等多方面因素进行初步分析,从排土场安全稳定的角度考虑,采用逆排方式覆盖多台阶排土和综合式多台阶排土。

(3) 实时监测。对边坡的位移、裂缝等进行实时监测,包括水平位移和垂直位移,监测点连线所形成的监测剖面应设置在重点区域;将裂缝的形状、宽度测绘到监测点平面图上,通过测量裂缝长度、宽度、深度等参数,监测裂缝的变化规律。同时,对边坡面冲刷量和泥石流沟淤积量进行实时监测,并根据历年气候和排土场观测资料,分析计算排土场的滑坡及泥石流淤积量,从而降低泥石流的发生概率。

### 4.3 优化参数

(1) 加固材料。采用喷射混凝土,强度等级为 C25,厚度为 15 cm;分两次喷射。

(2) 泄水孔。孔径为 120 mm,长度为 20 m,间距为 6 m,外倾角度为 10%,采用 PVC 管打孔,外裹土工布方式将坡体内水疏出,PVC 管径为 90 mm,管壁打孔径不小于 30 mm 的滤水孔。

(3) 截排水沟。排水沟的断面为梯形,上宽 0.9 m,底宽0.5 m,设计水沟深度为 0.8 m,用 C25 混凝土浇筑砌筑。

(4) 监测设备。监测设备采用 GNSS,根据排土场边坡情况,坡顶应设置监测点,安装位置距离坡顶线不大于 30 m,水平方向上每 100 m 布置一条测线,竖直方向上每间隔 50 m 布置一个监测点。

### 4.4 优化效果分析

为研究优化后南排土场边坡的稳定性,依托上述优化措施对优化后的排土场边坡开展数值模拟分析,同时基于耗散能突变原理,对边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ、Ⅲ—Ⅲ及边坡剖面Ⅳ—Ⅳ进行耗散能突变分析,耗散能突变特征值如图 9 所示,耗散能分布云图如图 10 所示。

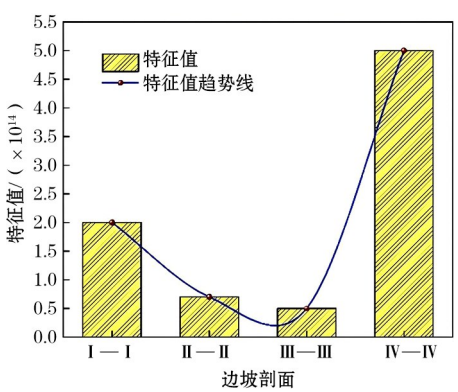



**图 9 优化后边坡耗散能特征值**

**Fig.9 Characteristic values of the dissipated energy of the slope after optimization**

由图 9 可知,4 个排土场边坡坡面在优化后的特征值恒大于 0,说明优化后的排土场边坡在地震荷载作用下均能保持稳定。此外,边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的耗散能特征值最大,剖面Ⅰ—Ⅰ的耗散能特征值其次,说明

边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的优化效果最好。边坡剖面Ⅱ—Ⅱ与边坡剖面Ⅲ—Ⅲ的耗散能特征值相较于剖面Ⅰ—Ⅰ略小,说明边坡剖面Ⅱ—Ⅱ与边坡剖面Ⅲ—Ⅲ在优化后仍需加强监测,以预防滑坡等灾害的发生。

由图 10 可知,相较于优化之前,优化后 4 个边坡剖面的耗散能有明显的降低,表明边坡在优化后,用于发生变形破坏的能量大幅降低,4 个边坡剖面的耗散能基本在 $1.25\times10^3$ kJ 以下,且集中在边坡的坡面位置,进一步说明了所采取的优化措施能显著提高边坡的抗变形能力,维持边坡的整体稳定性。

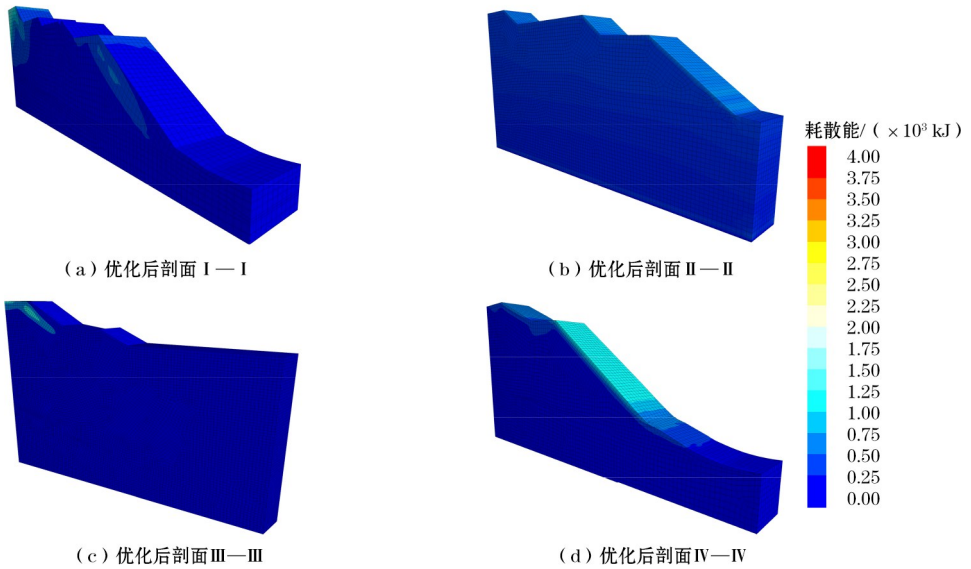



**图 10 优化后边坡耗散能云图**

**Fig.10 Cloud maps of the dissipated energy of the slope after optimization**

### 4.5 现场监测

采用优化方案对边坡排土场进行施工优化,为分析排土场边坡的优化效果,在施工完成后对排土场边坡 4 个典型坡面进行为期 120 d 的现场监测,得到边坡下沉量变化曲线如图 11 所示。

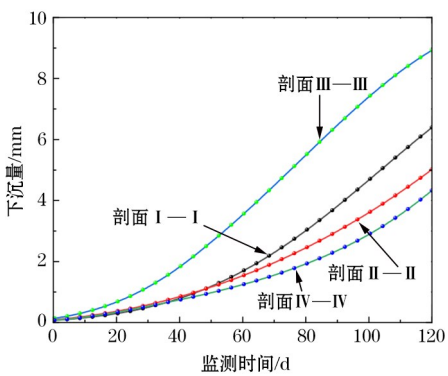



**图 11 4 个典型坡面的边坡下沉量变化曲线**

**Fig.11 Variation curves of slope subsidence of four typical slopes**

从图 11 中可以看出,在为期 120 d 的监测中,南排土场 4 个边坡的下沉量均在 10 mm 以下,表明边坡优化方案有效控制了边坡变形,维持了边坡稳定性。

## 5 结论

(1) 基于能量守恒原理,分析了地震工况下边坡能量演化规律,结合突变理论,构建了地震工况下以边坡耗散能为状态变量的边坡能量突变判别准则。根据边坡耗散能特征值判别边坡是否稳定:当耗散能特征值>0 时,边坡处于稳定状态;当耗散能特征值<0 时,边坡处于失稳状态;当耗散能特征值=0 时,边坡处于临界状态。

(2) 以大苏计钼矿南排土场为工程背景,将边坡能量突变判别准则编程到 FLAC3D 软件中,对南排土场 4 个边坡坡面进行数值模拟研究。结果表明,边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ的耗散能突变特征值均小于 0,耗散能为 $2.25\times10^3\sim3.25\times10^3$ kJ,处于失稳状态;边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的耗散能突变特征值大于 0,耗散能在 $2\times10^3$ kJ 以下,边坡不易受到地震荷载扰动而发生失稳破坏;边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ皆出现较大范围的塑性区,而边坡剖面Ⅳ—Ⅳ的塑性区范围较小,说明在地震工况下,边坡剖面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ及Ⅲ—Ⅲ更易受地震荷载扰动影响而发生失稳破坏。

(3) 基于耗散能突变理论及南排土场边坡现

状,对边坡进行参数优化,提出“加固边坡坡面+堆置优化+监测与预警”的优化方案,并进行能量分析。结果表明,排土场边坡 4 个坡面在优化后的特征值均大于 0,耗散能基本在 $1.25\times10^3$ kJ 以下,说明所采取的优化措施能显著提高边坡的抗变形能力,维持边坡的稳定性;对优化后的排土场边坡进行现场监测,南排土场 4 个边坡的下沉量均在 10 mm 以下,进一步验证了优化方案的有效性。

**参考文献**(References):


[1] 陈鹏,陈鹏飞.露天矿排土场边坡稳定性分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(6):1028-1031.
CHEN Peng, CHEN Pengfei. Slope stability analysis on waste disposal site of opencast [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2010,29(6):1028-1031.

[2] 黄广龙,周建,龚晓南.矿山排土场散体岩土的强度变形特性[J].浙江大学学报(工学版),2000(1):56-61.
HUANG Guanglong, ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Stress-strain and shear strength properties of rock and soil materials of waste pile in open pit mines[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2000(1):56-61.

[3] 王光进,杨春和,张超,等.超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究[J].岩土力学,2011,32(3):905-913+921.
WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Research on particle size grading and slope stability analysis of super-high dumping site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(3):905-913+921.

[4] 冯海洲,蒋关鲁,郭玉丰,等.降雨后地震作用下基覆型边坡动力响应特性的振动台试验研究[J].中国铁道科学,2023,44(3):1-12.
FENG Haizhou, JIANG Guanlu, GUO Yufeng, et al. Shaking table test on dynamic response characteristics of bedrock and overburden layer slope under earthquake after rainfall[J]. China Railway Science,2023,44(3):1-12.

[5] 杨长卫,郭雪岩,刘阳,等.基于振动台试验的含软弱夹层堆积体边坡动力响应规律与失稳破坏现象研究[J].工程科学与技术,2021,53(3):43-52.
YANG Changwei, GUO Xueyan, LIU Yang, et al. Research on dynamic response and instability failure phenomenon of deposit slope with weak interlayer based on shaking table test [J] Engineering Science and Technology,2021,53(3):43-52.

[6] TU Y L, LIU X R, ZHONG Z L, et al. New criteria for defining slope failure using the strength reduction method [J]. Engineering Geology,2016,212:63-71.

[7] 国鸿圆,魏玉峰,王启鸿,等.基于能量演化的反倾层状岩坡多级折断面深度计算模型[J].铁道科学与工程学报,2024,21(5):1876-1885.
GUO Hongyuan, WEI Yufeng, WANG Qihong, et al. Multi-stage fracture depth calculation model of reverse dip rock slope based on energy evolution[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(5):1876-1885.

[8] 周子涵,陈忠辉,师姝瑶,等.基于能量原理的大孤山露天矿西井边坡开挖稳定性动态调控[J].金属矿山,2020(1):130-140.
ZHOU Zihan, CHEN Zhonghui, SHI Shuyao, et al. Dynamic monitoring of the excavation stability of Xijing slope in Dagushan open-pit mine based on energy principle [J]Metal Mine,2020(1):130-140.

[9] 周子涵,陈忠辉,张凌凡,等.基于能量原理的露天矿边坡开挖稳定性突变研究[J].岩土力学,2019,40(12):4881-4889.
ZHOU Zihan, CHEN Zhonghui, ZHANG Lingfan, et al. Energy principle based catastrophe study of slope stability in open-pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (12):4881-4889.

[10] 胡淼,陈学俭,刘勇.基于能量突变准则的边坡大变形有限元分析[J].武汉大学学报:工学版,2022,55(11):1102-1111.
HU Miao, CHEN Xuejian, LIU Yong. A large-deformation finite-element analysis of slope based on energy mutation criterion[J]. Journal of Wuhan University: Engineering and Technology Edition,2022,55(11):1102-1111.

[11] 曾庆隆,雷秀文,杨珏,等.某铁矿露天转地下开采隔离层安全厚度确定研究[J].矿业研究与开发,2025,45(6):50-58.
ZENG Qinglong, LEI Xiuwen, YANG Jue, et al. Determination of safety thickness of isolation layer in an iron mine from open-pit to underground mining [J]. Mining Research and Development,2025,45(6):50-58.

[12] 李延超,王飞飞,姜安民,等.露天转地下开采引起露天边坡变形破坏特征及演化机理研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):72-79.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation failure characteristics and evolution mechanism of open-pit slopes caused by the transition from open-pit to underground mining[J]. Mining Research and Development, 2024,44(7):72-79.

[13] 李如仁,李梦晨,葛永权.InSAR 与数值模拟协同的排土场边坡稳定性分析及形变预测研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):217-227.
LI Ruren, LI Mengchen, GE Yongquan. Slope stability analysis and deformation prediction of dump site by combining SBAS-InSAR and numerical simulation[J]Mining Research and Development,2024,44(6):217-227.

[14] 梁雾兴,刘磊,徐继业,等.排土场边坡渗流特征的降雨模型试验及数值分析[J].矿业研究与开发,2024,44(9):94-102.
LIANG Jixing, LIU Lei, XU Jiye, et al. Rainfall model test and numerical analysis of seepage characteristics of dump slope[J]. Mining Research and Development,2024,44(9): 94-102.

[15] 王亨通,孙世国,王瑞龙.某尾矿库的安全稳定性分析[J].矿业研究与开发,2025,45(3):177-184.
WANG Hengtong, SUN Shiguo, WANG Ruilong. Safety and sabilitty analysis of a tailings pond[J]. Mining Research and Development,2025,45(3):177-184.

[16] 崔笑,张燎军,翟亚飞,等.基于塑性应变能理论的边坡动力稳定性研究[J].人民长江,2020,51(4):180-183+190.
CUI Xiao, ZHANG Liaojun, ZHAI Yafei, et al. Research on dynamic instability mechanism of slopes based on plastic strain energy theory[J]. Yangtze River,2020,51(4):180-183+190.

[17] 盛建龙,严寒冰,胡斌,等.含软弱夹层边坡地震动力响应及变形破坏机制研究[J].金属矿山,2022(12):214-220.
SHENG Jianlong, YAN Hanbing, HU Bin, et al. Study on seismic dynamic response and deformation failure mechanism of slope with weak interlayer[J]. Metal Mine,2022(12):214-220.

[18] 陶志刚,刘珂源,杨晓杰,等.高陡岩质边坡"面—点—面"稳定性综合评价方法:以安太堡露天矿为例[J].金属矿山,2023(11):241-252.
TAO Zhigang, LIU Keyuan, YANG Xiaojie, et al. "Plane-point-plane" stability integrated evaluation method of high and steep rock slope:a case study of Antaibao open-pit mine [J]. Metal Mine,2023(11):241-252.

[19] 王荣,董洁,方怡.地震作用下边坡的崩塌落石距离研究[J].金属矿山,2016(11):21-27.
WANG Rong, DONG Jie, FANG Yi. Collapse distance of rock fall of slope under the earthquake[J]. Metal Mine,2016(11):21-27.

[20] 王海龙,张伟,秦丽杰.基于GTS的地震作用下三官庙滑坡稳定性研究[J].金属矿山,2016(8):138-141.
WANG Hailong, ZHANG Wei, QIN Lijie. Study on the stability of San'guanmiao landslides under earthquake based on GTS[J]. Metal Mine,2016(8):138-141.

[21] 秦四清,张倬元.非线性工程地质学导引[M].成都:西南交通大学出版社,1993.
QIN Siqing, ZHANG Zhuoyuan. Introduction to nonlinear engineering geology [M]. Chengdu: Introduction to Nonlinear Southwest Jiaotong University Press,1993.

[22] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
CAI Meifeng. Rockmechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press,2002.