

DOI: 10.11779/CJGE202110013

# 基于二阶功准则的 NPR 锚索支护效果研究

胡杰<sup>1,2</sup>, 何满潮<sup>2</sup>, 李兆华<sup>1</sup>, 冯吉利<sup>2</sup>, 肖勇杰<sup>1</sup>

(1. 阳光学院土木工程学院, 福建 福州 350015; 2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** NPR 锚索因其具有恒定工作阻力和较大变形量的特性, 已广泛应用于巷道的加固和监测预警中。为了研究 NPR 锚索在露天矿山边坡中的支护效果, 首先基于有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 中的锚索单元开发出 NPR 锚索单元, 并通过数值拉伸试验验证了 NPR 锚索比普通锚索具有更优异的吸能特性; 之后引入二阶功作为边坡稳定性评价准则, 并将其植入显式动力学算法中, 详细讨论了其合理性和可靠性; 最后, 以浩尧尔忽洞金矿西采场北帮开挖诱发的滑坡为研究对象, 对现有普通矿用锚索和 NPR 锚索支护体系下的边坡稳定性进行对比分析。根据数值模拟结果可知, NPR 锚索支护体系下的边坡稳定性明显优于普通矿用锚索。

**关键词:** NPR 锚索; 安全系数; 边坡稳定性; 二阶功; 失稳准则

**中图分类号:** TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)10-1870-08

**作者简介:** 胡杰(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟方面研究工作。E-mail: hi\_hujie@163.com。

## Anchorage effect of NPR cable based on second-order work criterion

HU Jie<sup>1,2</sup>, HE Man-chao<sup>2</sup>, LI Zhao-hua<sup>1</sup>, FENG Ji-li<sup>2</sup>, XIAO Yong-jie<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Yango University, Fuzhou 350015, China; 2. China University of Mining and Technology (Beijing), State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Due to the characteristics of constant working resistance and steady large deformation, the NPR cable has been widely applied in monitoring and reinforcement of a large number of roadways. In order to study the anchorage effect of NPR cables in open-pit slope, firstly, the NPR cable element is developed based on the cable element in the finite difference software FLAC<sup>3D</sup>, and it is proved by the tensile tests that the NPR cable has better energy absorbing capacity than the traditional one. Secondly, the second-order work criterion is then implemented, and the rationality and advantages of the second order work criterion as a safety factor in explicit numerical algorithm are discussed. Finally, the rock slope induced by the excavation at the north side of the west stope in Haoyaoerhudong Opencast Gold Ore is taken as the research object, and the stability of rock slope under the existing traditional mine cable support system and NPR cable support system is compared and analyzed. According to the numerical results, the global second-order work and kinetic energy of each loading step have the opposite variation tendency, and the slope stability of NPR cable support system is obviously better than that of the traditional mine cable.

**Key words:** NPR cable; safety factor; stability of rock slope; second-order work; instability criterion

## 0 引言

中国北方露天矿山陆续进入深部开采阶段, 岩脉、断层纵横交错, 形成了复杂多变的地质条件, 加之矿山作业产生的频繁爆破震动, 使得滑坡、泥石流等地质灾害更为严重, 极大阻碍了矿山可持续安全生产<sup>[1]</sup>。边坡工程和采矿工程中常利用锚杆(索)对地质体进行人工加固以保证其稳定性<sup>[2-4]</sup>。吸能锚索是具有高承载力、大变形能力的理想支护设备<sup>[5-6]</sup>, 例如: the Cone bolt<sup>[7]</sup>, the Garford Solid Dynamic Bolt (GSDB)<sup>[8]</sup>, the D bolt<sup>[5, 9]</sup>等。He 等<sup>[2, 10]</sup>研发的具有能量吸收特性的恒阻大变形锚索(NPR 锚索), 具有高强度、高韧性和高延伸率的优良特性, 恒阻大变形锚索的超常力学特

性源于锚索内部具有负泊松比(negative poisson's ratio, NPR)结构效应的特殊复合装置。因此, 该类锚杆/索也被称为“NPR 锚杆/索”。该锚索在外荷载作用下能保证最大 2000 mm 的变形量而不破断, 已广泛应用于巷道加固<sup>[11-12]</sup>。

NPR 锚索由恒阻器、高强度钢绞线和恒阻体构成, 如图 1, 钢绞线为主要承载结构, 近端连接恒阻体, 远

基金项目: 国家重大研发计划重点专项项目(2016YFC0600901); 国家自然科学基金项目(41172116, U1261212); 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1718)

收稿日期: 2020-08-11

\*通信作者(E-mail: 472697969@qq.com)

端由垫片和锚头固定,当钢绞线所受拉拔力达到其强度的 80%~90%时,恒阻体将在恒阻器内滑移,恒阻体的尾端直径略大于套管内壁直径,恒阻体的贯入将伴随着套管径向膨胀,达到产生恒定阻力的效果<sup>[13-14]</sup>。基于大量的室内试验<sup>[15-16]</sup>、理论分析<sup>[2, 17]</sup>、数值模拟试验<sup>[16]</sup>以及现场实例<sup>[18-19]</sup>,NPR 锚索的恒定阻力和大变形特性得到可靠验证。

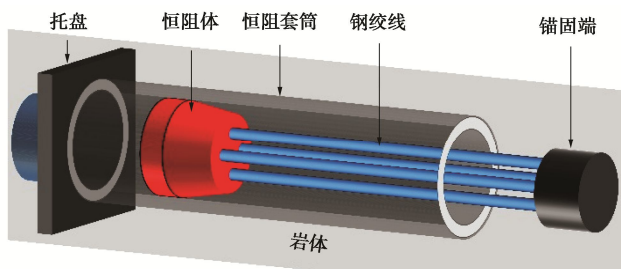


图 1 NPR 锚索结构示意图

Fig. 1 Components of NPR cables

岩质边坡的稳定性通常取决于边坡倾角、岩体类型和构造,以及地质不连续面产状等因素<sup>[18]</sup>。目前,边坡主要采用极限平衡方法和强度折减法作为稳定性分析方法,这些方法讨论的是边坡的平衡和失衡,将边坡开始滑动的状态称为极限平衡状态。Adhikar 等<sup>[20]</sup>通过对比试验结果发现,当节理摩擦角较低时极限平衡法将过度高估边坡的破坏荷载。极限平衡分析方法往往假设岩土材料破坏时各点均满足塑性极限破坏准则,忽略了岩土材料的非相关性,通常将高估破坏应力水平。杨有成等<sup>[21]</sup>证明了数值模型边界范围、网格的疏密以及收敛准则等因素会影响强度折减法的结果。

二阶功破坏准则可描述颗粒材料所有的物理分岔失稳现象,而且塑性极限破坏准则是二阶功破坏准则的特殊形式。因此,根据 Prunier 的建议,二阶功可作为评价边坡稳定性的准则<sup>[22]</sup>。基于二阶功的失稳判别准则最早由 Hill 提出<sup>[23]</sup>,Merrien 等<sup>[24]</sup>、Nicot 等<sup>[25-28]</sup>使用二阶功对岩土材料的分岔破坏从理论,试验和数值分析的角度进行了系统的研究;黄茂松等<sup>[29]</sup>使用二阶功分析了海底人工堆积松砂边坡的稳定性;吕玺琳等<sup>[30]</sup>使用二阶功对饱和土体静态液化失稳进行了研究。吕玺琳等<sup>[31]</sup>基于二阶功准则建立了分散性失稳和应变局部化失稳的理论判别准则,对  $K_0$  固结不排水加载条件下饱和砂土的失稳特性进行了理论研究。刘洋等<sup>[32]</sup>基于离散元数值方法采用二阶功准则分析了砂土试样在不同剪应力下 CSD 试验中发生的 I 型和 II 型两种失稳模式。Li 等<sup>[33]</sup>基于二阶功发展了非饱和土的固液转化模型,并以此对深圳光明新区特大滑坡进行了机理研究<sup>[34]</sup>;王立忠等<sup>[35]</sup>将二阶功引入有限元方

法中来求解地基承载力问题,能较好地预测地基潜在失稳区域,可以判定结构的局部稳定性和整体稳定性。此外,二阶功也被用作岩体节理和岩质边坡的失稳破坏准则<sup>[24]</sup>。因此,相比于基于强度折减法的安全系数,二阶功具有不受人为参数影响,可用于大变形数值计算以及动力分析等优势。

本文主要研究内容如下:基于 FLAC<sup>3D</sup> 自带的锚索单元开发出具有恒定阻力和大变形能力的 NPR 锚索单元,并通过拉拔试验进行了数值验证;首次将二阶功植入有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>,并对其在显式算法中的有效性进行讨论;以二阶功作为判定边坡稳定性的准则,对比分析 NPR 锚索和普通矿用锚索支护体系在露天矿山边坡的锚固效果。

## 1 变粒径建模方法

### 1.1 NPR 锚索本构方程

根据前人研究<sup>[16]</sup>,NPR 锚索是一种高强度、高韧性和高延伸率的吸能锚索。当 NPR 锚索上所受荷载不大于恒阻值时,主要通过常规锚索材料的弹性变形来抵抗外加荷载;当 NPR 锚索上所受荷载达到恒阻值时,恒阻体将在恒阻套筒内滑移,此时利用恒阻器径向膨胀产生的恒定阻力来抵抗外加荷载。通过这种自适应性调节原理,实现了新型能量吸收锚索最大变形量可达 2000 mm 而不发生破断的独特功能<sup>[14-16]</sup>。

$$F = \begin{cases} KU & (F \leq F_{CR\_force}, U < U_{NPR\_tolerance}) \\ F_{CR\_force} & (F > F_{CR\_force}, U \leq U_{NPR\_tolerance}) \\ KU & (F \leq F_{NPR\_strength}, U > U_{NPR\_tolerance}) \\ 0 & (F > F_{NPR\_strength}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $K$  为锚索刚度;  $U$  为锚索变形量;  $F_{CR\_force}$  为 NPR 锚索的恒阻力;  $U_{NPR\_tolerance}$  为 NPR 锚索的最大容忍变形量;  $F_{NPR\_strength}$  为 NPR 锚索的强度。

式(1)为 NPR 锚索本构方程,本文在 FLAC<sup>3D</sup> 现有的 Cable 单元基础上<sup>[18]</sup>,通过 fish 语言二次开发 NPR 锚索单元来实现该特性。

### 1.2 NPR 锚索单元实现流程及原理

图 2 为 NPR 锚索单元实现流程图。按 FLAC<sup>3D</sup> 现有规则设定 Cable 单元模型参数后,进入运算主程序进行计算求解。

计算进入 NPR 锚索单元模块:

(1) 通过比较主程序计算结果中的 NPR 锚索单元轴力与 NPR 锚索恒阻值  $F_{CR\_force}$  大小,判断锚索是否达到恒阻值,若未达到恒阻值,则锚索仍处于弹性阶段。

(2) 在 NPR 锚索已达恒阻值基础上,考察锚索

变形量是否达最大容忍变形量  $U_{NPR\_tolerance}$ ，若锚索的变形量未达到最大容忍变形量，则 NPR 锚索的轴力为恒阻值。

(3) 若锚索的变形量达到最大容忍变形量，则判断锚索轴力与 NPR 锚索的强度  $F_{NPR\_strength}$  大小，轴力大于 NPR 锚索的强度后，锚索破断。

该程序的核心是：当 NPR 锚索满足  $F \leq F_{CR\_force}$  和  $U \leq U_{NPR\_tolerance}$  时，NPR Cable 锚索单元能实现 NPR 锚索恒阻大变形的力学特性。

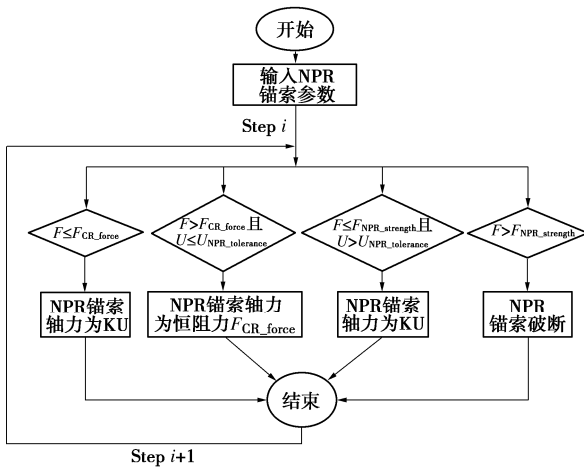


图 2 NPR 锚索单元实现流程

Fig. 2 Implementation of NPR Cable element

1.3 试验验证

本次研究通过单根锚索的拉拔数值试验对 NPR 锚索单元进行验证，并对比了 NPR 锚索和普通矿用锚索的力学特性。两种锚索的横截面积均为  $0.2238 \text{ m}^2$ ，杨氏模量为  $205 \text{ GPa}$ ，长度为  $27 \text{ m}$ ，强度均为  $1500 \text{ kN}$ ，NPR 锚索的变形量设为  $1000 \text{ mm}$ 。拉拔试验模型见图 3，锚索单元两端的节点与六面体单元固接。锚索一端固定，另一端以恒定速度  $20 \text{ mm/min}$  拉伸，直至锚索破断。

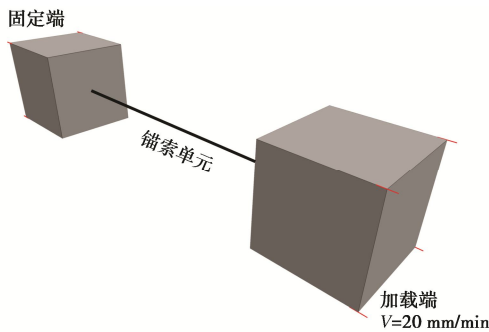


图 3 锚索拉伸试验模型

Fig. 3 Tensile test model of cables

图 4 为两种锚索的拉伸荷载 - 位移曲线。对于普通矿用锚索，当拉伸荷载达到锚索强度后，锚索随即破断。而 NPR 锚索的载荷 - 位移曲线分为 3 个阶段，

首先是弹性阶段 (OA 阶段)，锚索荷载随位移线性增加；其次是恒阻阶段 (AB 阶段)，当锚索拉伸荷载达到恒阻值  $850 \text{ kN}$  后，NPR 锚索的恒阻体将在恒阻套管内壁滑移，进入恒阻大变形阶段，此时锚索能提供恒定锚固力并且锚索能产生  $1000 \text{ mm}$  的变形量；最后是破断阶段 (CD 阶段)，一旦 NPR 锚索的变形量超过设计值时，锚索依靠索体自身强度可承受荷载  $1500 \text{ kN}$ ，荷载超过锚索强度后轴力降为 0，锚索破断。

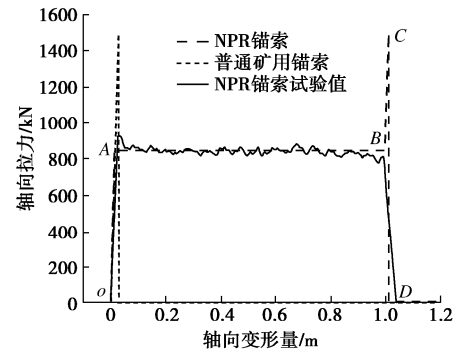


图 4 锚索拉伸荷载 - 变形量曲线

Fig. 4 Tensile force-axial deformation curves of traditional and NPR cables

2 二阶功破坏准则

二阶功表达式<sup>[36-37]</sup>为

$$d^2w = d\sigma d\epsilon \dots (\forall d\epsilon \neq 0) \quad (2)$$

式中， $d^2w$  为二阶功， $d\sigma$  为有效应力增量， $d\epsilon$  为相应的应变增量。

为了提高二阶功曲线的可读性，将二阶功  $d^2w$  无量纲化：

$$d^2w^n = \frac{d^2w}{\|d\sigma\| \|d\epsilon\|} \quad (3)$$

式中， $\|d\sigma\|$ ， $\|d\epsilon\|$  分别为应力增量和应变增量的范数， $d^2w^n$  的值的范围为  $-1 \sim 1$ 。需要说明的是，为了保证计算效率，本次研究仅计算加载方向的无量纲二阶功。

根据应力 - 应变分析方法，二阶功不大于 0 是失稳破坏的充要条件，若任意加载方向的二阶功均为正，则材料处于严格意义上的稳定；若某个加载方向上的二阶功为负，则材料处于潜在失稳状态；若当前加载方向上二阶功为负，则破坏发生。为了求解边值问题，在研究区域内对每个单元的局部二阶功累加可得研究区域整体二阶功，无量纲化<sup>[8]</sup>后得

$$D^2W_n = \frac{\sum_i^n d^2w_i \cdot V_i}{\int_V \|d\sigma_i\| \|d\epsilon_i\| dV_i} \quad (4)$$

式中，下表  $i$  为代表单元， $n$  表示单元个数。 $D^2W_n \leq 0$  表示材料破坏。

岩土材料失稳破坏与系统动能突增密切相关, 此时系统由准静态向动态转化。二阶功降为负值时材料动能将突增, 意味着此时破坏产生<sup>[36-37]</sup>。

运动方程为

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{b} = \rho \ddot{\boldsymbol{u}} \quad (5)$$

式中,  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力,  $\boldsymbol{b}$  为重力,  $\ddot{\boldsymbol{u}}$  为加速度,  $\rho$  为密度并假定为常数。

将上式对时间求导并左右两侧同乘以速度一阶导  $\dot{\boldsymbol{u}}$ , 得

$$(\operatorname{div} \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \dot{\boldsymbol{b}}) \dot{\boldsymbol{u}} = \rho \dot{\boldsymbol{u}} \ddot{\boldsymbol{u}} \quad (6)$$

式中,  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$  为应力变化率。

由动能表达式  $E_c = \frac{1}{2} \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2$ , 二阶导为

$$\ddot{E}_c = \frac{1}{2} \rho \|\ddot{\boldsymbol{u}}\|^2 + \rho \dot{\boldsymbol{u}} \ddot{\boldsymbol{u}} = \rho (\dot{\boldsymbol{u}} \ddot{\boldsymbol{u}}) \quad (7)$$

得

$$\operatorname{div}(\dot{\boldsymbol{\sigma}} \dot{\boldsymbol{u}}) - \dot{\boldsymbol{\sigma}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \dot{\boldsymbol{b}} \dot{\boldsymbol{u}} = \ddot{E}_c - \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 \quad (8)$$

式中,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$  为应变变化率,  $\ddot{E}_c$  为动能的二阶变化率。

二阶功表达式为

$$\frac{d^2 \boldsymbol{w}}{\Delta t^2} = \dot{\boldsymbol{\sigma}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (9)$$

其与动能的关系为

$$\frac{d^2 \boldsymbol{w}}{\Delta t^2} = \operatorname{div}(\dot{\boldsymbol{\sigma}} \dot{\boldsymbol{u}}) + \dot{\boldsymbol{b}} \dot{\boldsymbol{u}} - \ddot{E}_c + \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 \quad (10)$$

式中,  $\Delta t$  为时间步。

极短时间  $\Delta t$  内的动能可简单表示为

$$\Delta E(\Delta t) = E(t + \Delta t) - E(t) \quad (11)$$

$E(t)$  表示  $t$  时刻的动能,  $E(t + \Delta t)$  表示  $t + \Delta t$  时刻的动能。动能增量的泰勒展开式表示如下:

$$E(t + \Delta t) - E(t) = \dot{E}(t) \Delta t + \frac{\ddot{E}(t)}{2} (\Delta t)^2 + o(\Delta t)^3, \dots, \forall \Delta t \quad (12)$$

将式 (10) 代入式 (12), 舍去高阶项得

$$E(t + \Delta t) - E(t) \approx \dot{E}(t) \Delta t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \left[ \operatorname{div}(\dot{\boldsymbol{\sigma}} \dot{\boldsymbol{u}}) + \dot{\boldsymbol{b}} \dot{\boldsymbol{u}} - \frac{d^2 \boldsymbol{w}}{\Delta t^2} + \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 \right] \quad (13)$$

上式在体积  $V_0$  上积分, 得

$$\int_{V_0} [E(t + \Delta t) - E(t)] dV_0 \approx \int_{V_0} \dot{E}(t) \Delta t dV_0 + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \int_{V_0} (\operatorname{div}(\dot{\boldsymbol{\sigma}} \dot{\boldsymbol{u}}) + \dot{\boldsymbol{b}} \dot{\boldsymbol{u}}) dV_0 - \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \left( \int_{V_0} \frac{d^2 \boldsymbol{w}}{\Delta t^2} dV_0 + \int_{V_0} \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 dV_0 \right) \quad (14)$$

对于使用显式算法的 FLAC<sup>3D</sup> 计算软件, 一次加载后需经过若干迭代步, 当系统不平衡力 (或系统动能) 降低为一个足够小的值后计算收敛, 即可认为在

此次加载下系统达到平衡状态; 若无法收敛, 则认为系统破坏。每次加载后的迭代计算中, 体力增量和外力增量均为零, 即故  $\int_{V_0} (\operatorname{div}(\dot{\boldsymbol{\sigma}} \dot{\boldsymbol{u}}) + \dot{\boldsymbol{b}} \dot{\boldsymbol{u}}) dV_0 = 0$ , 则式 (12) 可改写为

$$\int_{V_0} [E(t + \Delta t) - E(t)] dV_0 \approx \int_{V_0} \dot{E}(t) \Delta t dV_0 + \left( -\frac{1}{2} (\Delta t)^2 \left( \int_{V_0} \frac{d^2 \boldsymbol{w}}{\Delta t^2} dV_0 + \int_{V_0} \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 dV_0 \right) \right) \quad (15)$$

积分后得

$$\Delta E(\Delta t) = E(t + \Delta t) - E(t) \approx -\frac{1}{2} d^2 \boldsymbol{w} + \dot{E}(t) \Delta t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 \quad (16)$$

计算达到收敛前, 任一迭代步的系统动能增量  $\dot{E}(t) \Delta t$  必不为零, 故惯性项  $\frac{1}{2} (\Delta t)^2 \rho \|\dot{\boldsymbol{u}}\|^2 > 0$ 。根据之前的研究<sup>[25, 27-28]</sup>, 动能增加, 则二阶功降低; 根据公式 (16), 在任一迭代步, 只要当前动能增量  $\dot{E}(t) \Delta t > 0$ , 且二阶功  $d^2 \boldsymbol{w} < 0$ , 则下一迭代步动能增量必然也大于零。即计算趋向于不收敛, 系统失稳破坏。故在任一加载条件下, 二阶功的最小值对应系统动能最大值, 可取为该加载条件下系统最保守的安全系数。

### 3 岩质滑坡模型

#### 3.1 岩质边坡介绍

本次研究以内蒙古太平矿业浩尧尔忽洞金矿西采场北帮边坡为例, 北帮边坡具有高度大, 边坡角大, 强风化层厚, 风化岩石破碎, 坚固性差等特点。周边生产开挖、爆破影响了其岩体的强度和完整性, 最终造成露天采场边坡的失稳。

图 5 为边坡研究区域。边坡治理中采用 800 kN 矿用锚杆和 1500 kN 锚索的加固方式, 锚杆 (索) 布置参见图 6, I<sub>1</sub> 区东布置间隔为 3 m 的矿用锚杆, 总计 60 根锚杆, I<sub>1</sub> 区西布置间隔为 4 m 的锚索, 总共 39 根, I<sub>2</sub> 区布置间隔 3.5 m 的锚索, 总共 102 根锚索。研究区域共布置锚索 141 根, 锚杆 60 根, 锚杆 (索) 的力学参数见表 1。



图 5 边坡研究区域

Fig. 5 Research area of rock slope

表 1 锚杆(索)物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for bolts and cables

| 锚固类别   | 强度/kN | 杨氏模量/GPa | 长度/m | 预应力/kN | 横截面/m <sup>2</sup>     | 恒阻力/kN | 变形量/mm |
|--------|-------|----------|------|--------|------------------------|--------|--------|
| NPR 锚索 | 1500  | 205      | 27   | 750    | 0.2238                 | 850    | 1000   |
| 矿用锚索   | 1500  | 205      | 27   | 750    | 0.2238                 | —      | —      |
| 矿用锚杆   | 800   | 205      | 8    | 0      | $0.373 \times 10^{-3}$ | —      | —      |

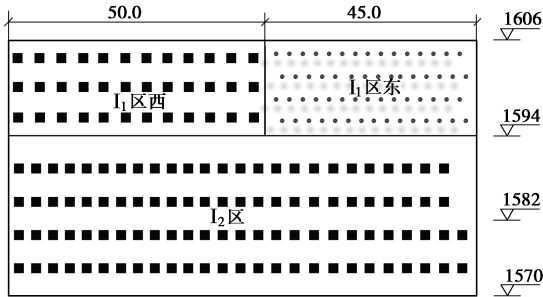


图 6 锚杆(索)布置图

Fig. 6 Distribution of bolts and cables

3.2 数值模型介绍

地质材料稳定性问题通常采用解析法和数值法求解,前者效率高而后者更准确。本文利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 研究不同支护体系下的岩质滑坡问题,如图 7,根据实际边坡形态建立了若干个沿坡面平台,边坡角约为 43°,坡高 129 m,坡顶长 74 m。为了提高计算精度,避免边界效应,模型的长度和厚度分别设为 326 m 和 95 m。边坡数值模型底部三向位移约束,模型侧面法线方向位移约束。边坡岩体的实际物理力学参数见表 2,考虑计算成本,将实际采场开挖作业简化为 3 步分层开挖,层高均为 12 m。图 8 是数值模型锚索(杆)布置图,各锚索(杆)位置与实际支护工程中完全相同。本次模拟对边坡初始状态及 3 次开挖后,共 4 个工况下的边坡稳定性进行分析。自重应力均分为 10000 步施加,之后进行若干迭代步,判断计算是否收敛。

本文采用对比分析方法,根据《破碎片岩特大型深凹金矿边坡稳定性综合技术研究鉴定报告(2013年)》确定边坡实际物理力学参数,见表 2,选择考虑抗拉强度的莫尔-库仑理想弹塑性模型<sup>[18]</sup>来研究同一岩质边坡在普通矿用锚索和 NPR 锚索两种支护体系下的稳定性。锚杆(索)的力学参数见表 1。通过将普通锚索替换为具有恒阻大变形特性的 NPR 锚索(锚杆的位置和数量不变)来对比分析相同条件下两种锚索的锚固效果。

表 2 边坡岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of involved rockmass

| 类型    | $\rho$<br>/(kg·cm <sup>-3</sup> ) | $E$<br>/GPa | $\nu$ | $c$<br>/MPa | $\varphi$<br>/(°) | TS<br>/MPa |
|-------|-----------------------------------|-------------|-------|-------------|-------------------|------------|
| Ⅲ级片岩  | 2.7                               | 4.54        | 0.25  | 0.40        | 35                | 0.12       |
| Ⅳ级片岩  | 2.5                               | 4.11        | 0.30  | 0.15        | 28                | 0.10       |
| Ⅳa级片岩 | 2.5                               | 4.11        | 0.30  | 0.15        | 28                | 0.10       |
| 片岩破碎带 | 2.4                               | 2.50        | 0.35  | 0.02        | 18                | 0.10       |
| 开挖区   | 2.5                               | 4.11        | 0.30  | 0.15        | 28                | 0.10       |

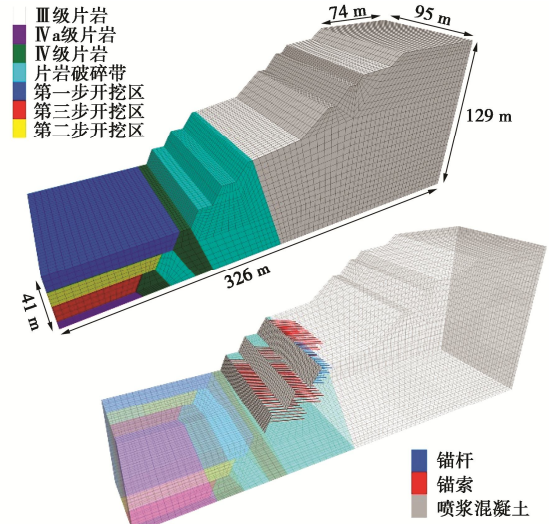
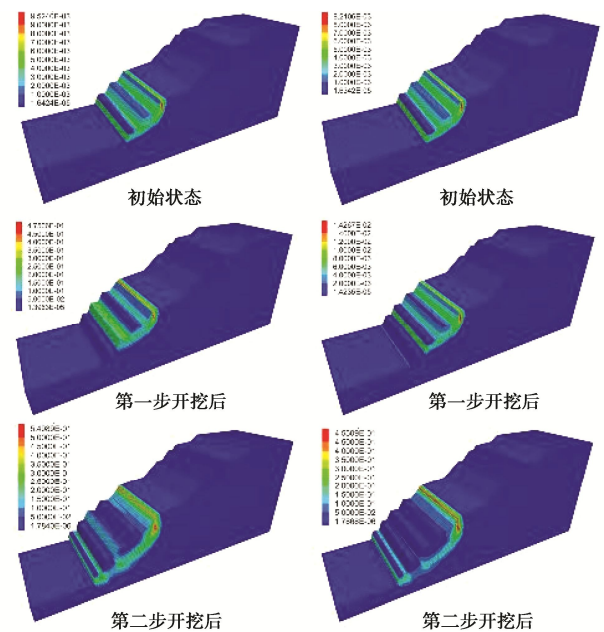


图 7 岩质边坡三维地质模型及锚杆(索)布置图

Fig. 7 Geometric model for rock slope in 3D and distribution of bolts and cables

3.3 结果与分析

图 8 (a), (b) 分别为普通矿用锚索和 NPR 锚索支护条件下, 4 种工况下的边坡最大剪应变云图。对比分析发现,随着边坡开挖作业的进行,边坡的最大剪应变逐步增加,最大剪应变带具有逐渐贯通的趋势,其最大剪应变也逐渐增大。同一工况下,普通矿用锚索支护体系下的边坡具有更明显的剪应变贯通带,而 NPR 锚索锚固条件下的边坡最大剪应变更小,剪应变带贯通不明显,可以定性地认为 NPR 的恒阻大变形特性有效地阻止了边坡的进一步变形。



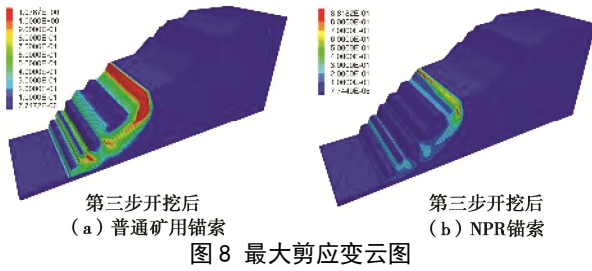
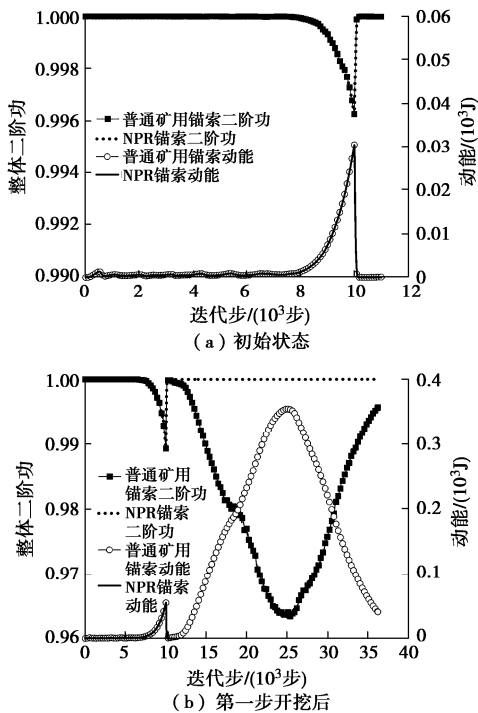


图 8 最大剪应变云图

Fig. 8 Contours of maximum shear strain

图 9 是传统矿用锚索和 NPR 锚索锚固条件下, 4 种工况边坡的整体二阶功和动能对比图, 对比分析可知, 整体二阶功和动能负相关, 动能增加时整体二阶功降低。初始状态下, 矿用锚索和 NPR 锚索的整体二阶功和动能曲线走势基本重合。从整体二阶功的值可知, 自重应力加载完成后, 边坡整体迅速趋向平衡状态, 此时动能降为 0; 第一步开挖结束后, 两种锚固条件下的整体二阶功和动能具有显著差异, 自重应力施加完后, 矿用锚索的整体二阶功呈现先下降后上升趋势, 动能在整体二阶功最小处达到峰值, 而 NPR 锚索的整体二阶功迅速增加至 1, 达到稳定状态, 由此可知, NPR 锚索对限制边坡动能发展, 进而对边坡稳定性的增强起到了重要作用; 第二步开挖结束后, 两种锚索的最大动能相比前一步均有明显提高, 对比而言, NPR 锚索锚固条件下, 边坡的动能更小, 整体更为稳定; 第三步开挖结束后, 普通矿用锚索的整体二阶功为负且系统动能增量为正, 意味着锚固失效, 边坡失稳, 而 NPR 锚固条件下的边坡整体二阶功仍为正值, 此时边坡仍处于稳定状态, 说明 NPR 锚索能提高边坡稳定性。



(b) 第一步开挖后

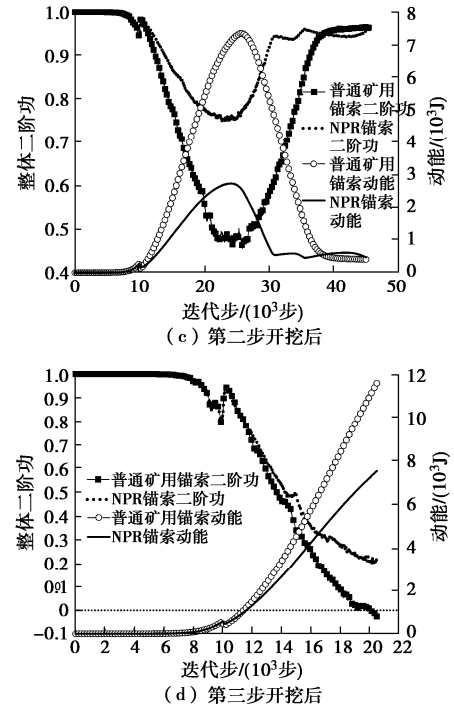


图 9 4 种工况下整体二阶功和动能对比图

Fig. 9 Comparison between global second-order work and kinetic energy of rock slope under 4 working conditions

图 10 为 NPR 锚索和普通矿用锚索支护体系下, 4 种工况下的整体二阶功最小值对比图, 由上文推导可知, 二阶功最小处对应系统最大动能, 即系统处于最不稳定状态。随着边坡开挖深度的增加, 两种锚固系统的边坡整体二阶功均呈现下降趋势, 说明随着开挖作业的进行, 边坡动能持续增加, 其稳定性受到影响。在同一开挖深度条件下, NPR 锚固系统的整体二阶功均要大于普通矿用锚索锚固系统, 尤其对于第三步开挖作业后, 普通矿用锚索锚固条件下的整体二阶功降至负值, 此时该支护体系下边坡已失稳破坏, 而 NPR 锚固系统仍能保持边坡的稳定性, 说明 NPR 锚索锚固对提高边坡稳定性有显著效果。

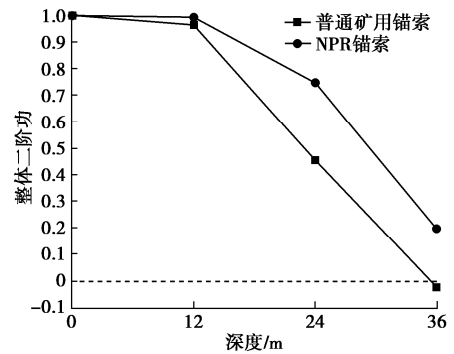


图 10 传统矿用锚索及 NPR 锚索加固下边坡的整体二阶功对比图

Fig. 10 Comparison of global second-order work of rock slope reinforced by traditional and NPR cables

## 4 结 论

(1) 本文开发了 NPR 锚索单元, 通过单根锚索数值拉拔试验验证了 NPR 锚索单元具有恒阻大变形的特性。

(2) 证明了同时满足二阶功为负值和动能增量为正时, 即可判定材料失稳破坏。二阶功具有不受人为参数影响, 可用于大变形数值计算以及动力分析等优势。

(3) 将二阶功植入有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 中, 通过对比普通矿用锚索和 NPR 锚索支护体系下边坡的整体二阶功和动能, 结果表明二阶功可作为安全系数用于评价边坡稳定性, 同时证明了 NPR 锚索支护体系的优越性。

### 参考文献:

- [1] 何满潮. 露天矿高边坡工程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991. (HE Man-chao. High Slope Engineering in Open-Pit Mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [2] HE M C, GONG W L, WANG J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **67**: 29 - 42.
- [3] 吕 谦, 陶志刚, 李兆华, 等. 恒阻大变形锚索弹塑性力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(4): 792 - 800. (LÜ Qian, TAO Zhi-gang, LI Zhao-hua, et al. Elasto-plastic analysis of large deformation cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(4): 792 - 800. (in Chinese))
- [4] CAI Y, ESAKI T, JIANG Y. A rock bolt and rock mass interaction model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**(7): 1055 - 1067.
- [5] LI C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**(3): 396 - 404.
- [6] ORTLEPP W D, READ J J. Yieldable rock bolts for shock loading and grouted bolts for faster rock stabilization[J]. Mining Engineering, 1970, **60**(3): 12 - 17.
- [7] ST-PIERRE L, HASSANI F P, RADZISZEWSKI P H, et al. Development of a dynamic model for a cone bolt[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, **46**(1): 107 - 114.
- [8] CHARETTE F, PLOUFFE M. A new rock bolt concept for under ground excavations under high stress conditions[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, 2008, Johannesburg.
- [9] LI C C. Field observations of rock bolts in high stress rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, **43**(4): 491 - 496.
- [10] HE M, SOUSA L R E. Experiments on rock burst and its control[C]// Australasian Ground Control in Mining Conference, 2014, Sidney.
- [11] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1081 - 1090. (HE Man-chao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1081 - 1090. (in Chinese))
- [12] HE M, TAO Z, ZHANG B. Application of remote monitoring technology in landslides in the Luoshan mining area[J]. Mining Science and Technology, 2009, **19**(5): 609 - 614.
- [13] 何满潮, 李 晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(8): 1513 - 1529. (HE Man-chao, LI Chen, GONG Wei-li, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(8): 1513 - 1529. (in Chinese))
- [14] 何满潮, 郭志飏. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1297 - 1308. (HE Man-chao, GUO Zhi-biao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1297 - 1308. (in Chinese))
- [15] SUN X M, ZHANG Y, WANG D, et al. Mechanical properties and supporting effect of CRLD bolts under static pull test conditions[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2017, **24**(1): 1 - 9.
- [16] HE M, LI C, GONG W, et al. Dynamic tests for a Constant-Resistance-Large-Deformation bolt using a modified SHTB system[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, **64**(5): 103 - 116.
- [17] Itasca. FLAC3D User Manual, Version 6.0[J]. Itasca Consulting Group Inc., USA 2017.
- [18] LI Z H, JIANG Y J, TAO Z G, et al. Monitoring prediction of a rockslide in an open-pit mine and numerical analysis using a material instability criterion[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(3): 2041 - 2053.
- [19] 陶志刚, 李海鹏, 孙光林, 等. 基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 3032 - 3040. (TAO Zhi-gang, LI Hai-peng, SUN Guang-lin,

- et al. Development of monitoring and early warning system for landslides based on constant resistance and large deformation anchor cable and its application[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2015, **36**(10): 3032 - 3040. (in Chinese))
- [20] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, **40**(4): 349 - 362.
- [21] 杨有成, 李 群, 陈新泽, 等. 对强度折减法若干问题的讨论[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(4): 1103 - 1106. (YANG You-cheng, LI Qun, CHEN Xin-ze, et al. Discussion on strength reduction using FLAC[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2008, **29**(4): 1103 - 1106. (in Chinese))
- [22] PRUNIER F, CHOMETTE B, BRUN M, et al. Designing geotechnical structures with a proper stability criterion as a safety factor[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **71**(5): 98-114.
- [23] HILL R. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1958, **6**(3): 236 - 249.
- [24] MERRIEN-SOUKATCHOFF V, DURIEZ J, GASC-BARBIER M, et al. Mechanical Stability Analyses of Fractured Rock Slopes[M]// *Rockfall Engineering*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 2013: 67 - 112.
- [25] NICOT F, LERBET J, DARVE F. Second-order work criterion: from material point to boundary value problems[J]. *Acta Mechanica*, 2017, **228**(7): 2483 - 2498.
- [26] NICOT F, SIBILLE L, DONZE F, et al. From microscopic to macroscopic second-order work in granular assemblies[J]. *Mechanics of Materials*, 2007, **39**(7): 664 - 684.
- [27] NICOT F, HADDA N, BOURRIER F, et al. Inertia effects as a possible missing link between micro and macro second-order work in granular media[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, **49**(10): 1252 - 1258.
- [28] NICOT F, DARVE F, KHOA H D V. Bifurcation and second-order work in geomaterials[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, **31**(8): 1007 - 1032.
- [29] 黄茂松, 曲 颢, 吕玺琳. 基于状态相关本构模型的松砂静态液化失稳数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(7): 1479 - 1487. (HUANG Mao-song, QU Xie, LÜ Xi-lin. Instability and static liquefaction analysis of loose sands with a state-dependent constitutive model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2014, **33**(7): 1479 - 1487. (in Chinese))
- [30] 吕玺琳, 赖海波, 黄茂松. 饱和土体静态液化失稳理论预测[J]. *岩土力学*, 2014(5): 1329 - 1333, 1339. (LÜ Xi-lin, LAI Hai-bo, HUANG Mao-song. Theoretically predicting instability of static liquefaction of saturated soils[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2014(5): 1329 - 1333, 1339. (in Chinese))
- [31] 吕玺琳, 钱建固, 黄茂松. 不排水加载条件下  $K_0$  固结饱和砂土失稳预测[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(6): 1010 - 1015. (LÜ Xi-lin, QIAN Jian-gu, HUANG Mao-song. Prediction of instability of  $K_0$ -consolidated saturated sands under undrained loading conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(6): 1010 - 1015. (in Chinese))
- [32] 刘 洋, 樊 猛, 晏洲毅. 常偏应力剪切条件下砂土失稳模式的离散元模拟[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(3): 467 - 475. (LIU Yang, FAN Meng, YAN Zhou-yi. DEM simulation of instability mode in sand under constant shear drained conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(3): 467 - 475. (in Chinese))
- [33] LI Z, DUFOUR F, DARVE F. Hydro-elasto-plastic modelling with a solid/fluid transition[J]. *Computers & Geotechnics*, 2016, **75**(2): 69 - 79.
- [34] LI Z H, JIANG Y J, LV Q, et al. Consistent modeling of a catastrophic flowslide at the Shenzhen landfill using a hydro-elasto-plastic model with solid-fluid transition[J]. *Acta Geotechnica*, 2018, **13**(6): 1451 - 1466.
- [35] 王立忠, 舒 恒. Hill 稳定条件在有限元法计算地基承载力中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 1): 3122 - 3131. (WANG Li-zhong, SHU Heng. Application of hill's stability condition to bearing capacity computation of foundation with finite element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2010, **29**(7): 3122 - 3131. (in Chinese))
- [36] NICOT F, DAOUADJI A, LAOUAFA F, et al. Second-order work, kinetic energy and diffuse failure in granular materials[J]. *Granular Matter*, 2011, **13**(1): 19 - 28.
- [37] NICOT F, DARVE F. Failure in rate-independent granular materials as a bifurcation toward a dynamic regime[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, **29**(1): 136 - 154.