滑石赋存软岩边坡稳定性分析与水泥土换填治理技术研究*

孙春辉[1,2,3],李爱兵[1,3],蒋豪[1,2],牛小明[1,3,4],何环莎[1,4],田学军[1,4]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
4.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对某露天铜钴矿M坑东帮滑石赋存软岩边坡的局部失稳问题,综合运用工程地质勘察、三维数值模拟(FLAC3D)与极限平衡分析(Slide 2D/3D)等方法,对滑石边坡稳定性进行了研究分析,揭示了边坡失稳机理并提出了相应的治理方案。研究结果表明:M坑东帮边坡整体处于稳定状态,但+1 335~+1 380 m滑石出露段边坡处于不稳定状态。滑石层强度低、遇水泥化,是控制性软弱夹层,其与围岩交界面抗剪强度显著降低,构成潜在滑动面,导致滑石边坡呈现"深部剪切-浅部拉张"破坏模式。据此,提出并实施了"7%水泥土换填+钢塑土工格栅+坡脚盲沟排水"的综合治理方案。现场近一年监测显示,边坡位移变化曲线整体平稳,治理效果显著,构建的"失稳机理分析—稳定性量化评价—治理方案设计—效果监测反馈"治理技术方法,可为类似滑石等含软弱夹层的边坡治理提供理论依据与工程借鉴。

关键词:滑石赋存软岩边坡;边坡稳定性;极限平衡法;水泥土换填;边坡治理;数值模拟

中图分类号:TD854.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0167-09

Stability Analysis of Talc-Bearing Soft Rock Slope and Study on Cement-Treated Soil Replacement Treatment Technology

Sun Chunhui[1,2,3], *Li Aibing*[1,3], *Jiang Hao*[1,2], *Niu Xiaoming*[1,3,4], *He Huansha*[1,4], *Tian Xuejun*[1,4]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Mine Geological Disaster Prevention and Control & Environmental Reconstruction, Changsha, Hunan 410012, China;
4.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To address the local instability problem of the talc-bearing soft rock slope on the east side of the M Pit in an open-pit copper-cobalt mine, engineering geological investigation, three-dimensional numerical simulation (FLAC3D), and limit equilibrium analysis (Slide 2D/3D) were comprehensively employed to investigate and analyze the stability of the talc-bearing slope. The slope instability mechanism was revealed and a corresponding treatment scheme was proposed. The research results indicate that the east slope of the M Pit is in a stable state as a whole, but the slope section with talc exposure at +1 335 m to +1 380 m is in an unstable state. The talc layer has low strength and is prone to slaking upon contact with water, constituting a dominant weak interlayer. The shear strength of its interface with the surrounding rock decreases significantly, forming a potential sliding surface and leading to a deep shear-shallow tension failure mode of the talc-bearing slope. Accordingly, a comprehensive treatment scheme of "7% cement-treated soil replacement + steel-plastic geogrid + blind ditch drainage at the slope toe" was proposed and implemented. Nearly one year of on-site monitoring shows that the slope displacement curve is generally stable and the treatment effect is remarkable. The established treatment technology framework of "instability mechanism analysis - quantitative stability evaluation - treatment scheme design - treatment effect monitoring feedback" can provide a theoretical basis and engineering reference for the treatment of slopes containing weak interlayers such as talc.

Key words: Talc-bearing soft rock slope, Slope stability, Limit equilibrium method, Cement-treated soil replacement, Slope treatment, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-12-18
基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ05)
作者简介:孙春辉(1994—),男,河南南阳人,硕士研究生,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

0 引言

露天矿山边坡按岩体坚硬程度可分为硬岩边坡与软岩边坡。国际岩石力学学会将单轴抗压强度为0.5～25 MPa的岩石定义为软岩,其具有强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量膨胀黏土矿物的特征[1-3]。滑石是一种层状硅酸盐矿物,质地松软,遇水泥化,莫氏硬度等级为1[4-5]。当其伴生有蒙脱石时,工程地质特性更趋复杂,在地下水或降雨条件下,该不良地层会发生软化及膨胀现象,导致边坡开裂-垮塌。常用于硬岩边坡加固的锚索、抗滑桩等主动支护治理措施,对于具有软岩特征的边坡难以直接适用。尤其在滑石等极软岩、遇水易泥化的特殊地层中,锚固力难以有效建立,抗滑桩施工亦面临成孔困难与侧摩阻力不足等问题。

边坡治理方案应以稳定性研究为基础,以保证方案的合理性与可靠性。金爱兵等[6]针对平朔东露天矿南帮含软弱夹层问题,在极限平衡法和离散单元法研究结果的基础上,提出可采用削坡卸载及碎石反压坡脚治理措施。邵尼华等[7]基于对露天采场边坡稳定性的研究,综合采取了优化整体边坡结构与加固局部失稳区域的治理方案,成功治理了敖包锌矿失稳边坡。王东等[8]针对采场南帮软岩边坡变形破坏区,提出了内排压帮的治理措施。张乐等[9]基于边坡开挖时空效应与结构协同工作原理,采用锚索抗滑桩技术手段及分步张拉施工顺序,治理了平乐互通含软弱夹层的边坡。潘长胜等[10]根据极限平衡法和数值模拟法研究结果,采用削坡减载、锚杆加固及布设截排水沟等措施,对南京市幕府山某山体滑坡边坡进行了加固治理。贺云等[11]在研究了软弱夹层对整体边坡稳定性影响的基础上,提出了基于压脚原理的放缓边坡角的治理方案。崔松军等[12]采用数值模拟方法分析了滑坡体稳定性,结合机理研究结果与规范要求,提出了削坡卸载治理措施。聂正[13]以赤壁南山含软弱夹层石灰岩露天矿边坡为研究对象,基于极限平衡法及数值模拟法,分析了含软弱夹层边坡的失稳特性,制定了"削坡减载+锚杆支护"的方案。魏宸昌等[14]通过现场工程地质调查和极限平衡分析,研究了潜滑带的形成因素和过程,制定了大直径抗滑桩治理方案。Wang等[15]基于工程地质调查、室内试验和数值模拟方法,对某露天矿含弱夹层缓倾蠕滑型边坡治理进行了研究,提出了以水泥为胶结剂、采用钻孔搅拌工艺就地加固原状土体的局部治理方案。

综上所述,既有边坡治理多集中于外部加固技术,而通过材料改良(如采用水泥土)来主动强化含软弱夹层边坡自身抗滑能力的研究与应用尚显不足。本文以某露天铜钴矿M坑东帮滑石赋存软岩边坡局部垮塌实际案例为研究对象,采用数值模拟与极限平衡分析等方法,分析含滑石边坡的稳定性,并提出治理方案。

1 工程概况

某露天铜钴矿采场分为D坑与M坑,矿区出露地层主要为第四系、新近系及罗安群地层,其中罗安群为本区的主要地层,原岩为白云岩、页岩、黏土岩、砂岩等(见图1),开采技术条件复杂。矿方在剥离M坑东帮+1 335～+1 380 m边坡时揭露出滑石,根据工程地质勘察成果:M坑东帮出露基岩主要为RGS、CMN2软岩岩组,两岩组在空间上互层,其中RGS岩组以白云质粉砂岩等极软岩为主,CMN2岩组以滑石及强风化白云岩为主,呈现散体状结构特征;滑石与亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石伴生,具有吸水膨胀、失水收缩、多裂隙性及超固结性等特点,边坡开挖扰动易造成局部甚至大范围垮塌;滑石本身强度较低,手捏可碎,表面光滑,遇水极易泥化,岩体力学性质极差。M坑东帮含滑石边坡多发生单台阶垮塌,表面可见擦痕、胀缩裂隙,如图2所示。

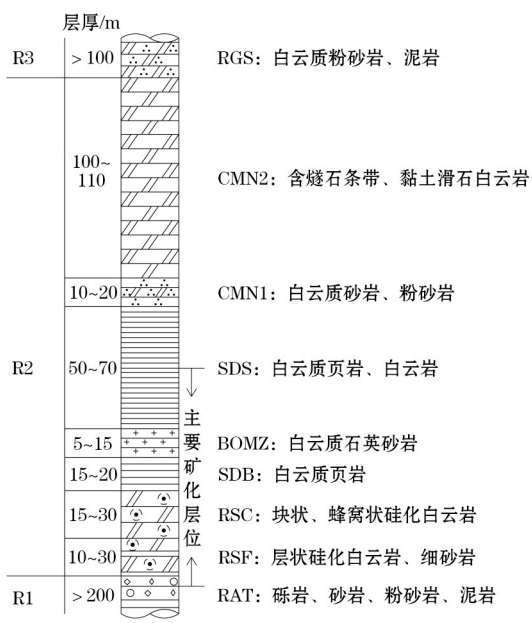


图1 罗安群地层柱状图

Fig.1 Stratigraphic column of the Roan Group

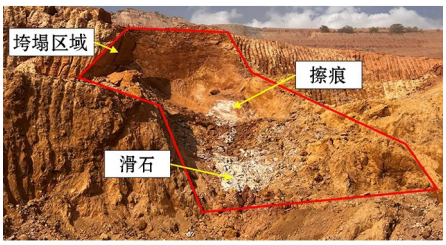


图 2　M 坑东帮含滑石边坡垮塌现状

Fig.2　Failure condition of the talc-bearing slope on the east side of the M Pit

2　含滑石边坡稳定性分析

2.1　失稳机理分析

为系统揭示 M 坑东帮含滑石边坡的失稳机理，本研究在工程地质勘察、室内试验及滑石特性分析基础上，首先分析边坡失稳的浅层与表观诱因，进而采用 FLAC3D 软件开展三维数值模拟，从内部应力场、位移场、剪应变增量及塑性区演化规律等方面阐释失稳机制。

边坡失稳的浅层与表观诱因主要包括以下 3 个方面。

(1) 岩体力学性质较差。边坡主要地层为散体结构的 RGS 与 CMN2 软岩，其中 CMN2 岩组含滑石，滑石表面光滑、硬度低，导致其与 RGS 地层交界面抗剪强度显著降低，易沿界面发生滑动，诱发失稳。

(2) 地下水与降雨的润滑与软化作用。CMN2 为强含水层，垮塌面常呈湿润状态，岩体因滑石与蒙脱石、伊利石伴生而具备弱至强膨胀潜势。在旱雨季分明、蒸发强烈(年均蒸发量 1 860 mm)的气候条件下，岩体反复胀缩产生大量裂隙，加之滑石遇水泥化，共同加剧滑动面软化与边坡失稳。

(3) 生产爆破扰动影响。矿方每日进行一次生产爆破，爆炸应力波会在岩体中形成爆破裂隙并扩展原有结构面，导致岩体结构损伤与强度衰减，进而引发含滑石边坡掉块与垮塌。

为深入探究 M 坑东帮含滑石边坡失稳诱因的作用机制，本研究通过 3D Mine、Rhino 与 FLAC3D 的多软件耦合建模，并应用 Kubrix 与 Griddle 插件进行网格划分，构建了反映实际地质特征的三维数值模拟计算模型，如图 3 所示。

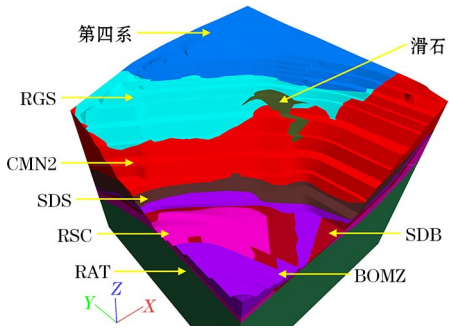


图 3　M 坑东帮含滑石边坡三维数值模拟计算模型

Fig.3　Three-dimensional numerical simulation model of the talc-bearing slopeon the east side of the M Pit

基于 M 坑东帮含滑石边坡三维数值模拟计算结果(见图 4)，对应力场、位移场、剪应变增量及塑性区的综合分析表明，该边坡变形破坏机制主要受滑石层空间分布与力学性质控制，具体规律如下。

(1) 应力场分布特征：根据 FLAC3D 力学约定(拉应力为正、压应力为负)，模型最小主应力在垂直方向上呈层状分布，符合地应力一般规律。受软岩强度较低影响，在局部岩层交界面及滑石台阶坡面附近发育有量值为 0～5 MPa 的拉应力区。该拉应力区构成潜在局部失稳隐患，在持续外部扰动下易诱发边坡垮塌。

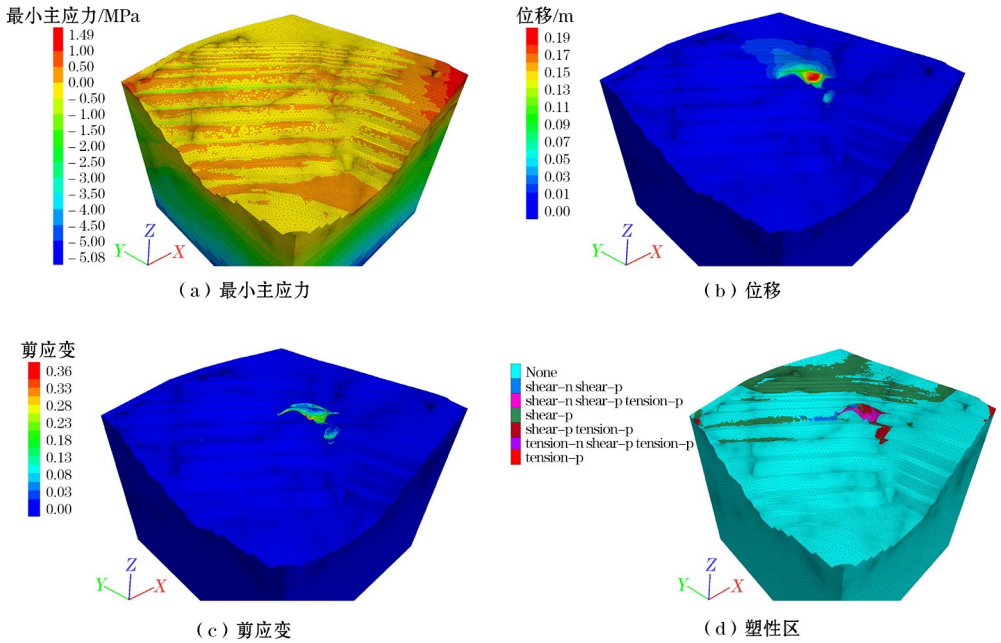
(2) 位移场演化规律：边坡位移主要表现为朝向采场临空面及垂直方向的复合运动。其中，+1 335～+1 380 m 含滑石区域边坡位移最为显著，最大值约为 0.19 m，表明该区域为变形集中带。

(3) 剪应变集中特征：剪应变增量空间分布与滑石层赋存状态密切相关。显著剪应变集中主要发育于+1 335～+1 380 m 滑石层与 CMN2 岩层交界带，形成主剪切变形区，此区是该边坡潜在滑移面和整体稳定性的关键控制部位。

(4) 塑性区发育模式：在+1 335～+1 380 m 边坡中，滑石作为软弱夹层集中发育大规模剪切塑性区，归因于该界面处的应力集中效应，同时坡面因卸荷作用形成拉张塑性区。其形成机理在于：边坡开挖后，自重应力在坡体内部重新分布，滑石层所在深部区域仍以压应力状态为主，塑性破坏主要受抗剪强度控制，而滑石层抗剪强度显著低于围岩，导致剪应力沿其界面优先集中并发生剪切屈服；相对而言，坡面浅部岩体因卸荷作用最小主应力显著降低，局部区域由压应力状态转化为拉应力状态，在深部剪切变形牵引及整体变形协调作用下，诱发坡面岩

体发生拉张屈服,从而在塑性区表观特征上表现为“深部剪切-浅部拉张”的复合破坏特征。

综上所述,M 坑东帮含滑石边坡的失稳主要受滑石软弱夹层的空间分布与边坡开挖作用控制,滑石是导致该段边坡失稳垮塌的主要地质因素,在同时受外界扰动因素多重耦合影响下,最终导致滑石出露边坡失稳。数值模拟分析表明,含滑石边坡的破坏机制表现为典型的“深部剪切-浅部拉张”复合模式,其中滑石层所在的+1 335～+1 380 m 标高段位移最为集中,最大累计位移达 0.19 m。



(a) 最小主应力 (b) 位移

(c) 剪应变 (d) 塑性区

图 4 M 坑东帮含滑石边坡三维数值计算结果云图

Fig.4 Contours of three-dimensional numerical calculation results for the talc-bearing slope on the east side of the M Pit

2.2 极限平衡法分析

2.2.1 计算基本条件

(1) 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,某露天铜钴矿场地抗震设防烈度为Ⅵ度,地震动峰值加速度值取 0.05g,计算可得地震影响系数为 0.012 5。

(2) 爆破影响系数。为量化生产爆破对边坡稳定性的动力效应,本研究采用 NUBOX-6016 爆破振动监测仪对现场生产爆破进行了工业试验,并基于获取的实测数据,依据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)[16] 所推荐的公式(1)至公式(3)进行拟合分析。结果表明,质点峰值振动速度与爆心距之间呈现良好的指数衰减关系。经计算分析,最终确定爆破振动影响系数取值为 0.037。

$$v=k\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

$$a=2\pi f v \tag{2}$$

$$K_c=\frac{\beta a}{g} \tag{3}$$

式中:v 为质点峰值振动速度,cm/s;Q 为单段最大药量,kg;R 为测点至爆源中心的距离,m;k、α 为与场地地质条件、爆破方式等相关的衰减参数;f 为爆破振动频率,Hz;a 为爆破振动加速度,cm/s^2;β 为爆破动力折算系数;g 为重力加速度,cm/s^2;K_c 为爆破振动影响系数。

(3) 地下水及降雨。根据 M 坑东帮含滑石边坡工程地质勘察成果及矿山长期地下水位与降雨量监测数据,可知该区域的稳定地下水位为+1 230 m,日最大降雨量为 173 mm。

(4) 各工况下许用安全系数。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)[16],M 坑东帮开采到界最终边坡高度约 240 m,位于 100～300 m 区间,属于中边坡,边坡危害及安全等级均为Ⅰ级,则工况一(自重+地下水)、工况二(自重+地下水+爆破振动)、工况三(自重+地下水+地震)、工况四(自重+地下水+降雨)许用安全系数分别为 1.25,1.20,1.15,1.18。

(5) 研究剖面位置。为分析某铜钴矿露天采场 M 坑东帮含滑石边坡的稳定性,本研究基于边坡走向与滑石分布特征,遵循剖面垂直边坡走向的原则,布

设了 4 个剖面以建立边坡稳定性计算模型，见图 5。

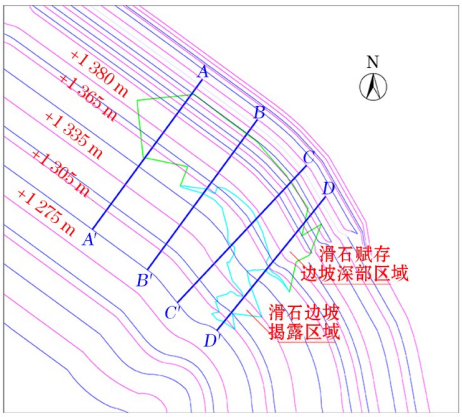


图 5　M 坑东帮含滑石边坡计算剖面布置

Fig.5　Layout of computational profiles for the talc-bearing slope on the east side of the M Pit

2.2.2　二维分析结果

为系统评估 M 坑东帮含滑石边坡的稳定性，本研究依据钻孔资料建立了地质模型，并基于室内力学试验成果及极限平衡理论，采用 Rocscience 公司的 Slide 2D 软件开展稳定性分析。计算采用自动搜索模式，并以安全系数作为评价指标，确定边坡的最小安全系数及其相应临界滑动面。

根据边坡稳定性计算结果（见表 1 与图 6 至图 7），可得出以下结论：

（1）在 4 种工况条件下，$A—A'$ 与 $B—B'$ 剖面的边坡安全系数均满足规范要求，而 $C—C'$ 与 $D—D'$ 剖面的安全系数低于许用值，表明这两处边坡处于不稳定状态；

（2）通过自动搜索得到的潜在最危险滑动面主要分布在＋1 335～＋1 380 m 含滑石区域边坡；

（3）以工况一（基准工况）条件下的安全系数为基准，工况二条件下安全系数降幅约为 5.67%～27.81%（颜色标识见电子版），工况三条件下降幅约为 2.15%～18.98%，工况四条件下降幅约为 0.61%～28.05%，表明爆破与降雨对 M 坑东帮含滑石边坡稳定性影响较大。

表 1　不同工况下各剖面边坡安全系数

Table 1　Slope safety factors for each profile under different conditions

剖面编号	不同工况下边坡安全系数			
	工况一	工况二	工况三	工况四
$A—A'$	1.340	1.238	1.304	1.247
$B—B'$	1.489	1.384	1.452	1.342
$C—C'$	0.652	0.615	0.638	0.648
$D—D'$	0.827	0.597	0.670	0.595

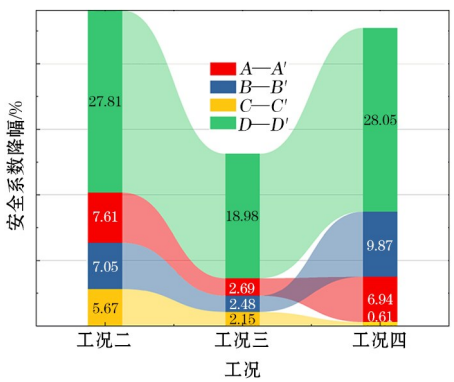


图 6　其余工况下边坡安全系数相对工况一的降幅

Fig.6　Reductions in slope safety factors under other conditions relative to Condition 1

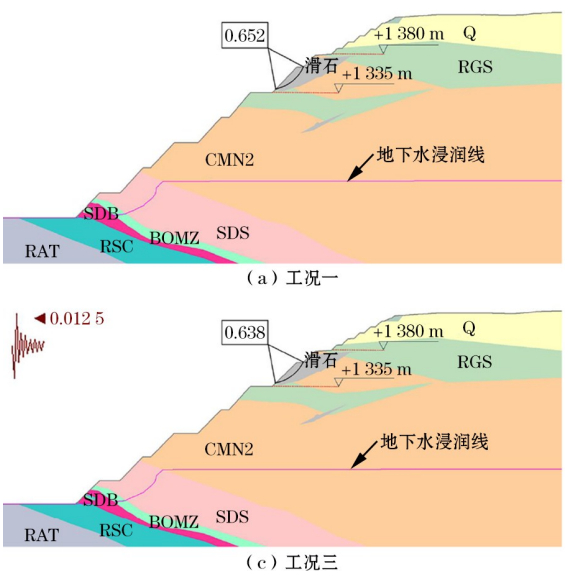


图 7　M 坑东帮含滑石边坡安全系数计算结果云图（以 $C—C'$ 剖面为例）

Fig.7　Contours of calculated safety factors for the talc-bearing slope on the east side of the M Pit (taking profile $C—C'$ as an example)

2.2.3 三维分析结果

Slide 3D 是一款基于极限平衡理论的三维边坡稳定性分析软件,能够实现对土质与岩质边坡三维潜在滑动面的安全系数计算,并以三维形式直观呈现全局最危险滑动面及其对应的安全系数。该软件通过集成二维剖面分析与三维整体分析,实现了两种方法间的相互验证,从而显著提升了计算结果的可靠性。本研究基于 3D Mine 软件构建的三维地质模型,在 Slide 3D 软件中通过对模型进行网格划分、几何优化与校正,建立了 M 坑东帮含滑石边坡的数值计算模型,并在工况一条件下执行三维滑动面自动搜索,最终确定了该边坡在三维状态下的最小安全系数。

根据三维极限平衡法稳定性计算结果(见图 8 至图 10),M 坑东帮边坡的整体稳定性及局部破坏特征得以量化表征,具体结论如下:

(1) M 坑东帮整体边坡安全系数为 1.315,满足规范要求,表明整体边坡处于稳定状态;

(2) 滑石区边坡局部安全系数仅为 0.835,低于许用标准,潜在滑动面范围为+1 335～+1 380 m,滑体厚度约 11.0 m,表明滑石层为控制性不稳定因素,构成了整体边坡稳定状态下的局部破坏关键失稳区域;

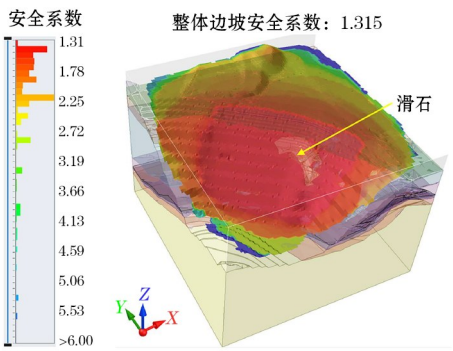


图 8 M 坑东帮含滑石边坡整体安全系数计算结果云图

Fig.8 Contours of calculated overall safety factors for the talc-bearing slope on the east side of the M Pit

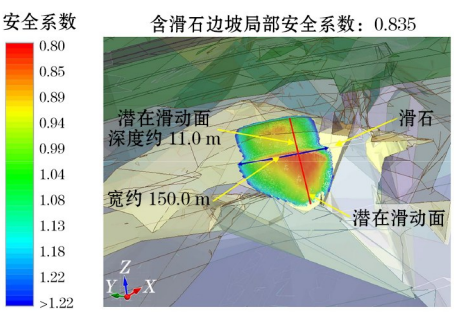


图 9 M 坑东帮含滑石边坡局部安全系数计算结果云图

Fig.9 Contours of calculated local safety factors for the talc-bearing slope on the east side of the M Pit

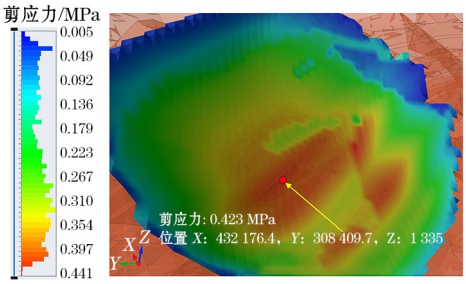


图 10 M 坑东帮含滑石边坡最大下滑力计算结果云图

Fig.10 Contours of calculated maximum sliding force for the talc-bearing slope on the east side of the M Pit

(3) 边坡最大下滑力集中于+1 335 m 平台,约 0.423 MPa,危险区域主要分布在+1 335～+1 380 m 滑石边坡段,沿坡面延伸约 150.0 m,与二维分析结论一致,两者结合可作为确定边坡加固与治理范围的依据。

3 治理技术方案

根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)[16]要求:边坡及滑体治理工程设计,应综合选用削坡卸载、疏排水和工程加固方法。并宜优先选用削坡卸载、疏排水方法。对于一般边坡,工程加固宜优先选用锚杆加固。本文前述研究中,M 坑东帮边坡整体稳定,但局部+1 335～+1 380 m 含滑石边坡为显著薄弱区,滑出位置、滑体厚度及治理区域相对明确。滑石岩性较差,具有表面光滑、遇水泥化特性,属于边坡软弱夹层,根据工程地质勘察单位膨胀率试验结果,边坡地表以下 3 m 滑石层膨胀率最大,对于含膨胀土的边坡,采用“换填加固+疏排水”技术手段是最有效的治理措施。

M 坑东帮滑石主要赋存于中部边坡,采用换填加固技术对滑石边坡进行治理时,须遵循以下原则:换填材料应具备较高的强度与良好的工程稳定性,且易就地取材,同时不应显著增加下部边坡的下滑荷载,避免换填结构对下部边坡作业区造成安全风险。在道路工程、基坑支护及水利堤坝等多个领域中,水泥土常作为一种经济有效的软弱地基改良技术被广泛使用[17-19]。水泥土是水泥和土以及其他组分按适当比例配合、拌制并经硬化而成的材料,在压实和养生后形成的无机结合料,具有良好的整体性,治理区域滑石周边主要为 RGS 软弱岩组,采用水泥土换填滑石软弱层后能够更好地与周围土体结合成为一个整体稳定结构。

基于上述研究成果及《水泥土配合比设计规程》

(JGJ/T 233—2011)[20]要求，本工程采用7%水泥土对+1 335～+1 380 m边坡滑石进行换填处理。具体治理方案如下。

(1) 滑石边坡开挖至设计面后，于+1 365 m、+1 335 m平台坡脚处设置坡度为3%的排水盲沟，与平台排水沟相连。盲沟成型后，在其底部及侧壁铺设防渗土工膜，顶部覆盖反滤土工布，形成排水-防渗系统。

(2) 换填所用7%水泥土采用现场拌合工艺制备，材料来源包括开挖产生的原有不含滑石的RGS岩土及从排土场新取素土，按配比与水泥通过搅拌罐进行机械拌合，确保水泥与土体充分混合，水泥浆均匀包裹土颗粒。

(3) 施工时，先进行测量放样，划定2 m×2 m水泥土拌合网格，拌合均匀的水泥土由自卸车运输至作业面，摊铺平整后，使用振动压路机分层碾压，压实度控制不低于96%。为提升结构整体抗剪性，在每层水泥土碾压密实并检测合格后，在填筑体垂直方向上每隔2 m通长铺设一层DW-C型钢塑土工格栅，其纵向极限抗拉强度均≥100 kN/m，横向极限抗拉强度≥50 kN/m。铺设时格栅的主强度方向垂直于坡面走向，相邻格栅卷材搭接长度不小于300 mm，采用扎丝绑扎连接。钢塑土工格栅作为高抗拉加筋材料嵌入水泥土换填体中，在剪切变形发展过程中，通过筋-土界面摩阻与咬合作用形成协同受力机制，使部分剪应力由土体转移至格栅承担，从而改变了换填体的受力路径。同时，格栅在三维空间内对水泥土形成侧向约束效应，显著限制其剪切位移与拉张变形，进而提高换填结构整体的抗剪刚度与极限承载能力。M坑东帮含滑石边坡治理工程剖面、治理工程流程及现场施工照片如图11至图13所示。

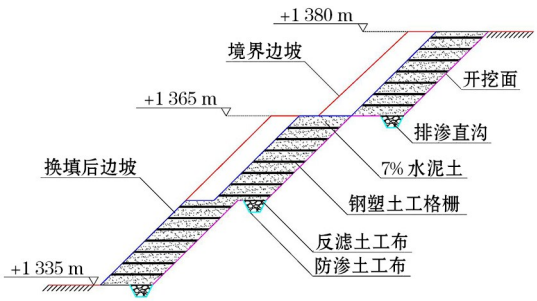


图11　M坑东帮+1 335～+1 380 m含滑石边坡治理工程剖面

Fig.11　Profile of the treatment engineering for the talc-bearing slope at +1335 - +1380 m on the east side of the M Pit

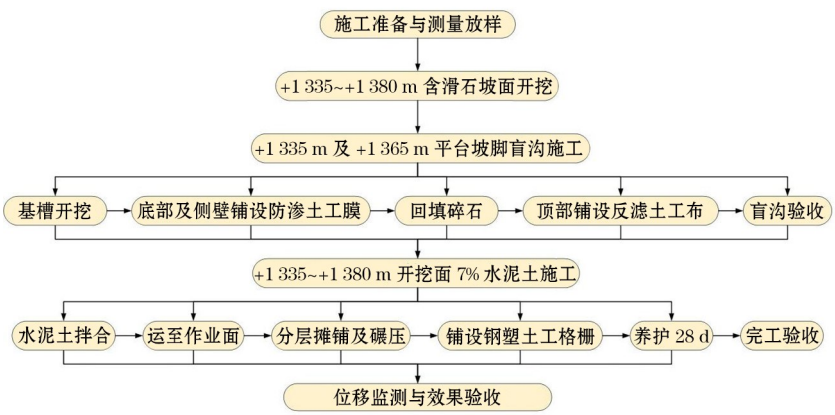


图12　M坑东帮+1 335～+1 380 m含滑石边坡治理工程流程

Fig.12　Flowchart of the treatment engineering for the talc-bearing slope at +1 335 - +1 380 m on the east side of the M Pit

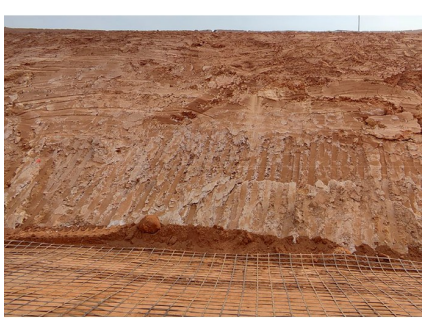


图13　施工现场

Fig.13　Construction site

M坑东帮+1 335～+1 380 m滑石软弱边坡采用水泥土材料换填治理并完成28 d养护后，换填区水泥土表面已充分硬化，敲击时发出类似岩石断裂的清脆声响，表明换填后岩体整体强度显著提升。为进一步评估治理效果，矿方采用澳大利亚SSR-XT型真实孔径三维雷达对施工区域进行了近一年的持续位移监测。监测数据显示：边坡位移历时曲线除强降雨或日常爆破振动引起的个别异常波动外，整体变化平缓，边坡处于稳定状态(见图14)。综上表明，采用水泥土换填技术处理矿山滑石软弱

夹层边坡,在技术上是可行的,治理效果良好。

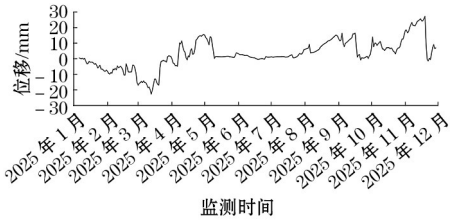


图 14 治理后边坡位移监测曲线(2025 年)

Fig.14 Slope displacement monitoring curve after treatment (2025)

4 结论

针对某露天铜钴矿 M 坑东帮滑石赋存软岩边坡的失稳问题,本文通过数值模拟与极限平衡法分析明确了其失稳机理与稳定性状态,确定了治理范围,据此制定了"7%水泥土换填+钢塑土工格栅+坡脚盲沟排水"治理方案。现场实施效果与长达一年的监测结果表明,该方案有效控制了边坡变形,治理效果显著。主要结论如下。

(1) 现场踏勘及数值模拟分析结果表明,滑石软弱夹层是控制边坡失稳的关键地质因素,其低强度、易泥化的特性导致与围岩交界面抗剪强度显著降低,构成潜在滑动面,边坡破坏呈现"深部剪切-浅部拉张"复合模式,潜在滑动区主要集中在+1 335～+1 380 m 含滑石边坡。

(2) 根据极限平衡法计算结果,M 坑东帮整体边坡稳定,+1 335～+1 380 m 含滑石边坡局部不稳定,治理区域主要为+1 335～+1 380 m 滑石边坡段。同时,在降雨(工况四)及爆破振动(工况二)工况下,边坡安全系数降幅分别为 0.61%～28.05%和 5.67%～27.81%,其中降雨工况降幅最大可达 28.05%,表明降雨及爆破振动是诱发滑石边坡失稳的重要外部因素,通过降雨软化及润滑、爆破动力损伤,进一步降低了含滑石边坡的抗滑能力。

(3) 针对滑石遇水泥化、强度极低的特点,创新性地将 7%水泥土分层换填改良技术引入矿山滑石软弱夹层边坡治理中,并结合坡脚盲沟排水与钢塑土工格栅,形成复合加固体系。治理完成养护 28 d 后,换填体强度显著提升,现场敲击声清脆,宏观力学性能改善明显。

(4) 基于 SSR-XT 型真实孔径雷达开展的近一年位移监测显示,边坡位移曲线整体平缓,仅在外界强扰动下出现短暂波动,表明治理后边坡处于稳定状态。该结果从工程实测角度验证了水泥土换填技术在此类地质条件下的适用性与有效性。

(5) 本研究构建的"失稳机理分析—稳定性量化评价—治理方案设计—效果监测反馈"治理技术方法,可为类似滑石等含软弱夹层的边坡治理提供理论依据与工程借鉴。

参考文献(References):

[1] 王一凯.陕南某软岩边坡稳定性及支护数值模拟研究[D].西安:长安大学,2023.
Wang Yikai. Numerical simulation study on stability and support of a soft rock slope in southern Shaanxi Province [D]. Xi'an:Chang'an University,2023.

[2] 毛永祥.小龙潭露天矿东帮滑塌区边坡综合治理研究[D].昆明:昆明理工大学,2024.
Mao Yongxiang. Research on comprehensive slope treatment of the East Slope landslide area in Xiaolongtan Open-Pit Mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2024.

[3] 李志强.伊敏露天矿渗流作用下软岩边坡稳定性研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
Li Zhiqiang. Study on the stability of soft rock slope under seepage in Yimin Open-Pit Mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2024.

[4] 曹易恒,尹贤刚,李向东,等.极软弱破碎滑石矿下向分层壁式充填采矿法[J].矿业研究与开发,2021,41(4):18-21.
Cao Yiheng, Yin Xian'gang, Li Xiangdong, et al. Downward slicing and wall filling mining method of extremely soft broken talc ore[J]. Mining Research and Development, 2021,41(4):18-21.

[5] 刘宏,董明华,席大勇,等.刚果(金)SCM 铜钴矿滑石成因及对边坡稳定的影响[J].矿业工程,2023,21(2):15-18.
Liu Hong, Dong Minghua, Xi Dayong, et al. Genesis of talc from SCM copper cobalt mine in the Democratic Republic of the Congo and its impact on slope stability[J]. Mining Engineering,2023,21(2):15-18.

[6] 金爱兵,刘长月.含软弱夹层边坡治理及边坡稳定性分析[J].露天采矿技术,2016,31(11):11-15.
Jin Aibing, Liu Changyue. Treatment and stability analysis of slopes with weak interlayers [J]. Opencast Mining Technology,2016,31(11):11-15.

[7] 邵尼华,潘懿,阮琰文.高寒地区露天边坡稳定性分析及边坡治理技术研究[J].矿业研究与开发,2019,39(11):1-5.
Shao Nihua, Pan Yi, Ruan Yanwen. Stability analysis and slope treatment technology of open-pit slope in alpine region [J]. Mining Research and Development,2019,39(11):1-5.

[8] 王东,姜聚宇,韩新平,等.三道岭露天煤矿逆倾软岩边坡变形破坏治理方案研究[J].安全与环境学报,2019,19(5):1587-1594.
Wang Dong, Jiang Juyu, Han Xinping, et al. Treatment scheme of the counter-tilt soft rock slope in the Sandaoling open-pit coal mine with its deformation and damage[J]. Journal of Safety and Environment,2019,19(5):1587-1594.

[9] 张乐,冯君,武小菲,等.基于变形控制的含软弱夹层顺层边坡治理[J].地质灾害与环境保护,2021,32(4):94-101.

Zhang Le, Feng Jun, Wu Xiaofei, et al. Treatment of bedding slope with weak interlayer based on deformation control[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2021,32(4):94-101.

[10] 潘长胜,孙少锐,喻永祥,等.南京市幕府山某边坡稳定性评价及治理措施研究[J].矿业研究与开发,2021,41(2):29-33.
Pan Changsheng, Sun Shaorui, Yu Yongxiang, et al. Study on the stability evaluation and treatment measures of a slope at the Mufu Mountain in Nanjing[J]. Mining Research and Development,2021,41(2):29-33.

[11] 贺云,李爱兵,虎万杰.含软弱夹层露采边坡稳定性分析与治理方案研究[J].采矿技术,2022,22(1):54-57+61.
He Yun, Li Aibing, Hu Wanjie. Stability analysis and remediation scheme of open-pit slopes with weak interlayers [J]. Mining Technology,2022,22(1):54-57+61.

[12] 崔松军,王飞飞,郭其林,等.露天采场多台阶滑坡机理与治理方案研究[J].矿业研究与开发,2022,42(5):65-69.
Cui Songjun, Wang Feifei, Guo Qilin, et al. Study on mechanism and treatment scheme of multi-bench landslide in open pit[J]. Mining Research and Development,2022,42(5):65-69.

[13] 聂正.含软弱夹层岩质边坡降雨入渗条件下稳定性分析及抗滑措施研究[D].武汉:武汉工程大学,2024.
Nie Zheng. Analysis of stability and anti-slide measures for weak interlayered rock slope under rainfall infiltration conditions[D]. Wuhan:Wuhan Institute of Technology,2024.

[14] 魏宸昌,马增,张忠光,等.大直径抗滑桩在矿山边坡治理中的应用[J].矿业研究与开发,2025,45(2):132-138.
Wei Chenchang, Ma Zeng, Zhang Zhongguang, et al. Application of large-diameter anti-slide pile in mine slope treatment[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):132-138.

[15] Wang Xiaojie, Wang Guihe, Wang Meimei, et al. Study of the deformation and instability characteristics and treatment of gentle tilt-creeping open-pit mine slopes containing weak interlayers[J]. Applied Sciences,2025,15(18):9960.

[16] GB 51016—2014 非煤露天矿边坡工程技术规范[S].

[17] 刘维正,刘弟民,雷陈鹏,等.软土地区加芯搅拌桩竖向承载与破坏模式分析[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(10):4235-4249.
Liu Weizheng, Liu Dimin, Lei Chenpeng, et al. Investigation on vertical bearing capacity and failure modes of concrete core mixing pile in soft soil area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2025,56(10):4235-4249.

[18] 张超哲,刘松玉,章定文,等.考虑水泥土软化特性的劲性复合桩加固路基破坏机理与稳定性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(6):2346-2358.
Zhang Chaozhe, Liu Songyu, Zhang Dingwen, et al. Research on stability and failure characteristics of an embankment improved with SDM columns considering softening behaviors of cemented-soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2025,56(6):2346-2358.

[19] 杨涵晞,王梦洁,夏梦灿,等.交通荷载下漫灌区水泥土桩复合地基的动力特性[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(5):117-128.
Yang Hanxi, Wang Mengjie, Xia Mengcan, et al. Dynamic characteristics of cement-soil pile composite foundation in flood irrigation area under traffic load[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2025,45(5):117-128.

[20] JGJ/T 233—2011 水泥土配合比设计规程[S].