

基于正交试验的离子型稀土矿边坡稳定性影响因素研究

谢昊翔^{1,2,3} 许威^{1,2,3} 刘国成^{1,2,3}

1 江西省地质局第七地质大队

2 赣州市地质灾害防治重点实验室

3 江西赣南地质矿产集团有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2350

[摘要] 江西赣南地区稀土资源丰富,以离子吸附型稀土矿为主,根据《稀土行业准入条件》:“针对离子型稀土矿的开发,生产工艺的选择应当满足资源与环境的双重保护要求。原地浸矿等先进技术是推荐采用的方式。另一方面,堆浸、池浸等已被国家列入禁止名单的落后选矿工艺,必须严格禁止使用”。然而原地浸矿工艺在稀土开采过程中,存在一个重大安全隐患——山体滑坡。该工艺通过注液管道将浸矿剂注入山体,改变岩土体物理化学性质,降低其抗剪强度,导致局部稳定性下降,进而诱发滑坡。因此,开展稀土矿原地浸矿环境下采场边坡稳定性研究项目可以最大限度地发挥原地浸出法的技术优势,避免浸矿过程中的边坡滑移破坏,有效地防范并降低离子型稀土矿原地浸矿工艺实施期间因山体滑坡引发的人员、财产、资源的损失和环境的破坏,该研究可为稀土矿安全、绿色、经济开采提供重要技术保障。

[关键词] 离子型稀土; 原地浸矿; 滑坡; 正交试验

中图分类号: TD-9 文献标识码: A

Study on the Influencing Factors of Slope Stability of Ion-type Rare Earth Ore Based on Orthogonal Test

Haoxiang Xie^{1,2,3} Wei Xu^{1,2,3} Guocheng Liu^{1,2,3}

1 The Seventh Geological Brigade of Jiangxi Bureau of Geology. LTD

2 Key Laboratory for Geohazard Prevention and Control of Ganzhou City

3 Jiangxi Gannan Geology and Mineral Resources Group Co., Ltd.

[Abstract] The Gan Nan region of Jiangxi Province is rich in rare earth resources, predominantly consisting of ion-exchange rare earth ores. According to the "Rare Earth Industry Access Conditions," the development of ion-type rare earth ores should adopt production processes that meet dual requirements for resource and environmental protection. Advanced technologies such as in-situ leaching are recommended, while outdated methods like heap leaching and pond leaching—listed as prohibited by national regulations—must be strictly banned. However, in-situ leaching poses a significant safety hazard during rare earth mining: landslides. This process injects leaching agents into mountain slopes through pipelines, altering the physical and chemical properties of rock and soil, reducing shear strength, and compromising local stability, thereby triggering landslides. Therefore, conducting research on slope stability in rare earth mine in-situ leaching environments can maximize the technical advantages of this method, prevent slope failures during leaching, and effectively mitigate losses of personnel, property, resources, and environmental damage caused by landslides during the implementation of ion-type rare earth in-situ leaching. This study provides crucial technical support for safe, green, and economical rare earth mining.

[Key words] ion-exchange rare earth; in-situ leaching; landslide; orthogonal test

引言

江西省龙南市某稀土矿区边坡位于丘陵斜坡上,现状下边

坡未进行坡面防护,边坡陡立形成临空面,为边坡破坏提供了有利的地形条件。同时,大气降水或地表水通过覆盖层向下渗透的

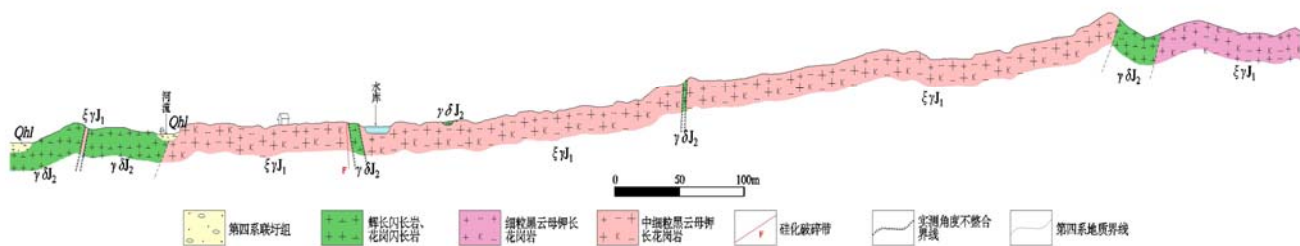


图1 实测剖面图

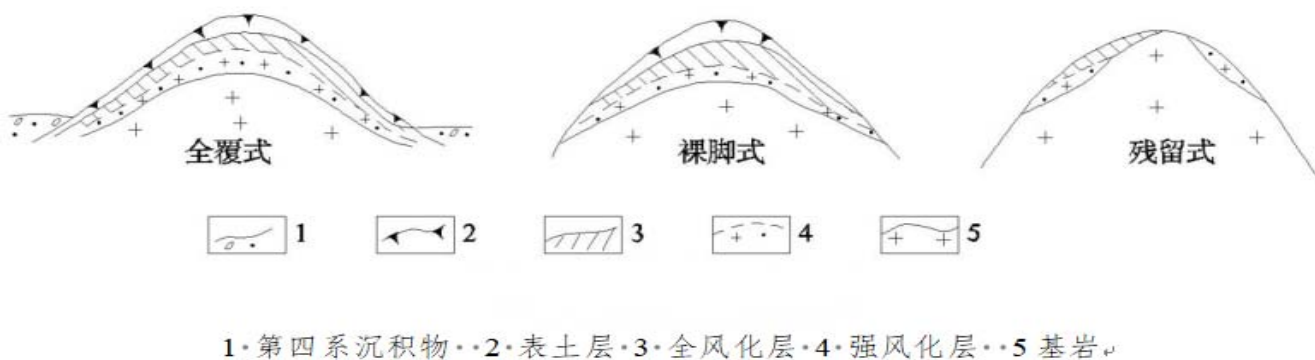


图2 风化壳类型示意图

过程中,会带走细微颗粒^[1],破坏土体结构,降低土层强度^[2],易产生失稳变形,未来采矿方式主要为原地浸矿,在自然斜坡上施工注液孔,通过注液孔将浸矿液注入矿体,在沟谷及山坡坡角开挖矿液收集沟及坑道^[3]。由于浸矿液的注入,导致岩土体中含水量增加,土体自重加大,矿体的浸出导致岩土体的孔隙度加大^[4]。在降雨或浸矿液大量注入等情况下,土体自重加大、内聚力及摩擦力较小,存在滑坡、崩塌的风险^[5]。2011年5月10日,定南县岭北镇猪妈坑稀土矿区内一生产矿块(老屋背)突发山体滑坡,土方约2万立方米,致使上山巡查的3名工人被掩埋窒息死亡。鉴于赣南地区稀土矿滑坡的突发性、隐蔽性和不可重复性的特点,离子型稀土矿采场边坡的稳定性受到多因素耦合影响,主要包括岩土体力学性质^[6]、地质结构^[7]、边坡几何形态(坡高、坡比)、人工作业(如原地浸矿)以及自然环境(如降雨)等。为量化评估各因素对稳定性的影响程度以指导灾害防治,本研究首先系统辨识了关键影响因素,进而采用正交试验设计方法,旨在科学确定上述因素影响边坡稳定性的敏感性排序。本研究使用正交试验方法^[8-10]分析不同影响因素对稀土矿采场边坡安全系数Fs的影响,从而得出不同影响因素对稀土矿采场边坡稳定影响的重要程度。

1 研究区概况

1.1 地质环境背景

江西省龙南市某稀土矿区位于江西省赣州市龙南县,矿区属低山丘陵地貌,总体表现为西低东高,北部山脊总体呈北东向展布,中部山脊总体呈东西向展布,南部山脊总体呈北西向展布,地势起伏较大,海拔标高255.9~499.5m,相对高差50~130m,沟谷多呈“U”型,山形多呈不规则的阔叶状。山体地表植被多以松树、杉树为主,森林覆盖率高。

江西省龙南市某稀土矿自然斜坡主要为岩土质混合斜坡,研究区发育的斜坡在形态上表现为坡高50~130米,坡度25~35°(局部40°)的特征。其坡体结构主要为块状坡。岩体风化程度在垂向上具有明显分异,坡体上部以全风化层为主,向下逐渐过渡为裂隙较发育的基岩,岩体结构保持块状。值得强调的是,该斜坡地层结构完整,未发现控制性的软弱夹层;全风化厚度5~25米,一般5~10米,上部土体一般厚约0~3.0米,个别厚达6米。

根据现场工程勘察,该稀土矿出露地层主要为花岗岩残积层(Q⁴) (一般分布于边坡坡顶)和寨背岩体细-中粒黑云母钾长花岗岩(γβJ₂),见图1。

江西省龙南市某稀土矿区从坡顶到坡脚,矿体厚度随地形变化呈现出有规律的空间分带性。坡顶缓坡区(5°~10°)是矿体最厚的区域;随着坡度向下变陡(20°~30°),厚度在山脊处减小,并在山坡两翼及坡脚处达到最薄。最终,在沟谷附近的

坡脚,由于碎屑堆积层过厚或基岩直接出露,矿体发生尖灭或缺失。

1.2 滑坡特征

矿区内稀土矿尚未开发,区内地质灾害现象以滑坡为主,多出现于人工修路切坡处,规模均较小;未见崩塌、泥石流及地面塌陷等不良地质现象。

原地浸矿诱发边坡滑坡破坏的主要原因有:

1.2.1 注浆作用与渗流通道演变

原地浸矿开始时,浸矿液(通常为硫酸铵溶液)被持续注入边坡表部的第四纪残积土层。该土层以颗粒细碎、结构松散为特征。浸矿液与土体发生复杂的物理化学反应(如离子交换),不仅会分解碳酸盐矿物产生气体,还会侵蚀并带走细小颗粒。这些被剥离的黏土颗粒随液流迁移,最终堵塞全风化矿层中的微裂隙,显著降低地层的渗透性。随着渗透率下降,后续浸矿液难以及时下渗,导致局部液位抬升,并形成表面径流或优先流。这使得表层土体持续吸水,最终达到饱和状态,显著削弱土体的有效应力和抗剪强度。当滑动力超过残余抗滑力时,边坡即发生滑动破坏。

1.2.2 降雨的叠加与诱发作用

在浸矿液已使矿体孔隙接近饱和的基础上,降雨,特别是强降雨,会产生显著的叠加效应。降雨入渗会进一步增大孔隙水压力,并加剧岩土体的软化。中小降雨可能主要影响浅表层,引发规模有限的表层浅滑;而持续性强降雨或暴雨则会导致大量雨水快速入渗,不仅完全饱和和边坡的包气带,还会在相对隔水层上方形成临时饱和带,产生巨大的静水压力和渗透力,从而急剧降低潜在滑面上的抗剪强度,最终诱发大规模深层滑坡。

1.2.3 施工扰动与“穿井”效应

原地浸矿施工的注液井通常深度较浅(约2-4米),此深度范围也是某些地下生物(如鼠、蛇)活动的区域,其洞穴可能连通相邻的注液井。在注液过程中,浸矿液可能通过这些天然的或施工形成的通道优先快速流动,导致井与井之间发生“水力贯通”或“穿井”现象。此外,若注液支管脱落或损坏,会导致溶浸液集中注入单一井点,造成局部过饱和甚至地表溢流。这些问题都会使浸矿液无法均匀扩散,而是在局部区域形成强渗流带或集中饱和区,强烈冲刷和软化土体,显著降低特定区域的抗剪能力,从而引发局部滑坡或成为大规模滑动的触发点。

1.2.4 排水系统效能不足

集液沟(或收液巷道)是回收浸矿母液的关键工程设施。如果其数量不足、布置不合理或维护不善(如被淤塞),会导致矿区排水能力不足。随着注液持续,地下水位将不断抬升,在坡体内形成较高的水头。当溶液水位达到一个临界高度时,一方面会显著增大坡体的下滑力(通过静水压力),另一方面会大幅降低滑带土的抗剪强度(通过孔隙水压力作用和软化效应),极易诱发大规模的推移式滑坡。(见下图)。



图3 福建省宁德市古田县稀土矿点滑坡



图4 广西壮族自治区梧州市苍梧县稀土矿点滑坡

南方离子型稀土矿采场典型滑坡

2 正交试验

2.1 基本概念及原理

正交试验设计法是一种高效的多因素优化方法,其核心在于利用预先设计好的“正交表”来安排试验方案。该方法在多因素敏感性分析中应用广泛,其显著优点是能够从全部可能的水平组合中,选取一批既“均匀分散”又“齐整可比”的代表性试验点,从而以大量减少的试验次数达到与全面试验相近的分析效果。

在本研究涉及的山坡稳定性分析中,重点考察四个关键因素:粘聚力(A)、内摩擦角(B)、边坡坡比(C)和边坡高度(D)被确定为四个研究因子,每个因子均设置三个水平(A1-A3, B1-B3, C1-C3, D1-D3)。该试验为4因子3水平设计,全面试验所需的组合数为81种(3^4),工作量巨大且效率低下。而采用正交试验设计,例如选用L9(3^4)正交表,仅需进行9次试验,即可科学地安排所有因素的水平组合,显著提高研究效率。

2.2 试验设计流程

基于正交表的试验研究主要遵循两大流程:首先,是依据正交性原理科学地设计试验方案;其次,是对试验获得的数据进行深入的数理统计分析。在此框架内,为探明各因素对试验目标的

敏感程度,需执行敏感性分析步骤,即通过计算与比较各因素的贡献率或极差,来判定其影响权重,其步骤如下图5所示^[10]:



图5 正交试验方法步骤图

2.2.1 确定边坡失稳判断标准

安全系数作为边坡稳定性评价中的核心量化指标,其物理意义明确,能够有效表征边坡的抗滑能力与下滑作用之间的平衡关系。因此,本研究选取安全系数作为边坡失稳状态的判别标准。

2.2.2 选择造成边坡稳定性的因子

根据稀土矿采场边坡各层的岩土特性,从影响边坡稳定性的众多因子中,筛选出需要考察的因子。在完成关键影响因子的筛选后,研究需根据采场边坡的实际工程地质条件,为各因子划定具体的取值水平。参数取值区间最大不超过6个水平,最小不低于2个水平。

2.2.3 设计正交表

在实验设计时,选择正交表的依据是研究所需的因子和水平。一个基本要求是,正交表必须能容纳下所有的考察因子。通常,我们遵循“在满足实验安排的前提下,选择最小号的正交表”这一经济性原则。这意味着,因子个数、需要考虑的交互作用项个数以及计划留出的误差估计列(空列)个数的总和,不能大于正交表的列数。从统计学角度看,这一原则等价于要求所有考察项的自由度之和,不大于所选正交表提供的总自由度。

2.2.4 开展试验

在依据前述原则完成试验方案的设计后,本研究即严格依照该方案执行试验操作,并系统性地采集试验数据,为后续的结果分析奠定基础。

2.3 试验结果分析

正交试验设计的基本程序包括试验方案设计及试验结果分析两部分。对试验结果分析通常有两种方法:一种是极值分析法,另一种是方差分析。以下介绍这两种方法。

2.3.1 极值分析法

极值分析法又被称作极差分析法,核心原理:通过计算各因素在同一水平下试验结果的平均值(\bar{R}_{jm})和极差(R_j),进行直观比较。

评价指标是极差 R_j ,计算公式如下:

$$R_j = \max(R_{j1}, R_{j2}, \dots, R_{jm}) - \min(R_{j1}, R_{j2}, \dots, R_{jm}) \quad (式1)$$

式中: R_j 为第j列因子在各行的极大的值与极小的值差值; \bar{R}_{jm} 为第j列因子m行计算结果之和的平均值。

计算水平平均值 \bar{R}_{jm} :对于因素j的某个水平m,将所有包含该水平组合的试验结果相加并求平均值。它反映了该因素在此水平下的平均表现。

极差 R_j 的大小直接反映了因素影响的主次。 R_j 越大,说明该因素的水平变动对结果影响越大,是主要因素; R_j 越小,则是次要因素。

2.3.2 方差分析法

相对于极值分析方法而言,方差分析方法能估计误差大小及各因子对边坡稳定性的影响程度。核心原理:将试验数据的总波动分解为各因素引起的波动和试验误差引起的波动,然后通过构建统计量,进行显著性检验,判断各因素的影响是否在统计上“显著”。

设m为因子水平数,j为正交表列数,n为试验次数,分析步骤如下:

(1) 变差平方和的计算总变差平方和:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \quad (式2)$$

其中 x_i 为($i=1, 2, \dots, n$)时的边坡安全系数 F_s ;各因子变差平方和:

$$SS_m = \frac{1}{n} (K_{1m} - K_{2m})^2 \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (式3)$$

交表设计时如果留有空列,即存在误差变差,此时总变差平方和等于各列因子变差平方和加上误差变差平方和即:

$$SS_T = SS_q + SS_{Tq} \quad (式4)$$

(2) 自由度的计算

总变差平方和自由度等于各因子引起的变差平方和自由度加上误差自由度,即:

$$df_T = df_{off} + df_{we} = n - 1 + m - l = n + m - 2 \quad (式5)$$

(3) 均方差的计算

$$MS_{\text{因子}} = \frac{SS_{\text{因子}}}{DF_{\text{因子}}}, MS_{\text{误差}} = \frac{SS_{\text{误差}}}{DF_{\text{误差}}} \quad (式6)$$

(4) F值的计算构造F统计量,

$$F_{\text{因子}} = \frac{MS_{\text{因子}}}{MS_{\text{误差}}} \quad (式7)$$

以因子A为例,比较F值与分布表中临界值的大小,如果 $F_A > F_{\alpha, df_A, df_e}$ 。则该因子对边坡稳定性有显著影响。F值与临界值差值愈大,则表示该因子对边坡的稳定性影响程度愈大。

3 边坡稳定性分析

3.1 模型及参数选择

本研究聚焦于全风化层的稳定性,其岩土力学参数均源

自室内模拟浸矿试验。该矿区典型离子吸附型稀土矿边坡的坡高一般为35-70米,坡角范围为15°至40°。基于此工程背景,本研究考虑了四个关键参数:全风化层的粘聚力(c)、内摩擦角(ϕ')、边坡比(p)和边坡高度(h)。这些因子的取值区间严格基于矿区实地条件,并划分为高、中、低三个水平。

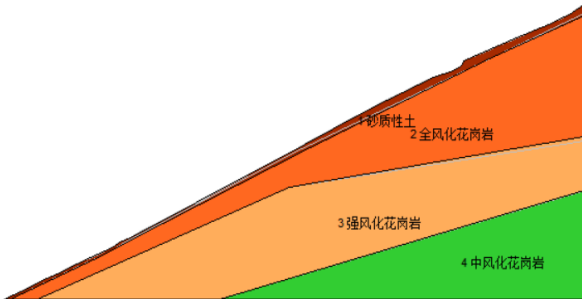


图6 计算模型

根据现场勘查取样测得全风化花岗岩含水率(ω)为22.1~29.7%;孔隙比(e)为0.825~1, 密度为中密;干密度为1.72~1.87 ρ_d , 干密度中等;液限(ω_L)为29.5~40.4%, 液性指数(IL)为0.07~0.36, 塑限(ω_p)为17.9~27.4, 塑性指数(I_p)为10.6~16.6%, 为可塑;压缩系数(a_{1-2})为0.22~0.31MPa⁻¹, 属中等压缩性;粘聚力(c)为15.2~21.9kPa, 内摩擦角(ϕ)为17.8~24.6°。

3.2 结果分析

本研究借助Geo-Studio软件中的SLOPE/W模块进行边坡稳定性计算。该模块采用极限平衡法原理,能够同时满足静力平衡和力矩平衡条件,是岩土工程中边坡稳定性分析的经典数值方法。分析时,可选择Morgenstern-Price法等严格的方法,以确保计算结果的可靠性。

为实现多参数情形的快速评估,本研究将正交试验设计与SLOPE/W数值模拟相结合。具体而言,首先根据矿区实际情况确定了粘聚力(c)、内摩擦角(ϕ)、边坡高度(h)和边坡坡比(p)四个关键因子及其水平,据此构造正交试验表。随后,对正交表中的每一组参数组合,均在SLOPE/W中建立相应的边坡计算模型进行分析。每个模型计算后得到的安全系数(Fs)被作为评价该组参数下边坡稳定性的核心指标。

通过对所有正交试验结果进行极差分析,可以量化各因子的变动对边坡安全系数的影响程度,从而判断其敏感性大小。

因子影响方向:分析结果表明,岩土体的内摩擦角(ϕ)和粘聚力(c)的增大会直接增强边坡的抗滑能力,从而导致安全系数Fs显著提高。这与Mohr-Coulomb强度准则的理论预期完全一致。相反,边坡高度(h)和边坡坡比(p)的增大,通常会增大下滑力或潜在滑弧的深度,导致安全系数Fs呈现显著的降低趋势。

敏感性排序:极差分析得出的各因子敏感性由大到小的顺序为:坡比(p)>粘聚力(c)>内摩擦角(ϕ)>边坡高度(h)。这一结果表明,对于该离子型稀土矿边坡,几何形态的改变(尤其是坡比)对稳定性的控制作用最为敏感,其影响程度甚至超过了岩

土体自身强度参数(c和 ϕ)的变化。

3.3 边坡参数对边坡安全性的影响

在边坡稳定性分析中,安全系数(Fs)是衡量边坡是否处于安全状态的量化指标。各参数的变化通过影响边坡的下滑力与抗滑力,直接改变安全系数的大小。

3.3.1 坡比的影响

本研究通过数值模拟方法,探讨了边坡角度变化对稳定性的影响规律。基于实际矿山地质条件,建立了分析模型,并保持土体物理力学参数不变,仅调整边坡坡度。设计了坡比分别为1:1、1:1.1、1:1.2、1:1.3、1:1.5及1:1.6等多种工况进行计算分析。安全系数与坡比的对应关系表明,边坡稳定性随坡比增大而显著降低,具体表现为坡比从1:1.6变陡至1:1时,安全系数由1.95依次递减为1.81、1.63、1.53、1.38、1.17。这一结果清晰反映出边坡坡角越陡,其失稳风险越高。(如图7)

3.3.2 粘聚力的影响

以分析模型为研究对象,土体性质见参数选择,将赋予矿体的全风化层的粘聚力分别变为25kPa、27kPa、29kPa、31kPa、33kPa、35kPa、37kPa进行有限元的极限平衡分析得出粘聚力对稀土边坡稳定的影响。

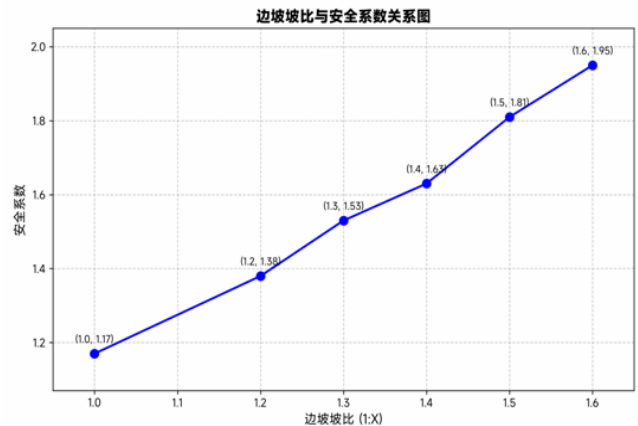


图7 边坡坡比与安全系数关系图

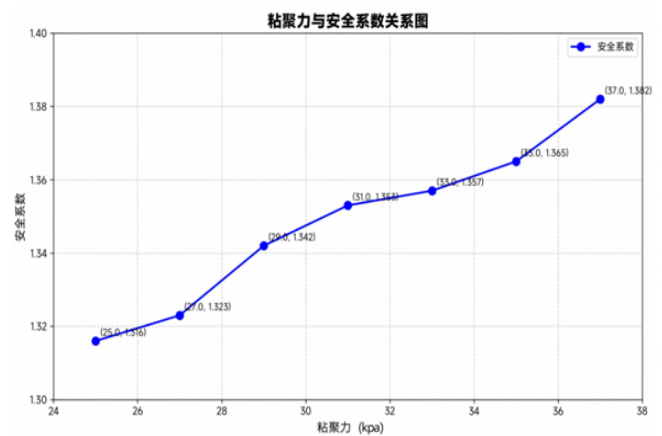


图8 粘聚力与安全系数关系图

为探究粘聚力对离子型稀土矿边坡稳定性的影响,本研究

在已建立的分析模型及确定的土体参数基础上,系统调整了矿体全风化层的粘聚力取值,分别设置为25kPa、27kPa、29kPa、31kPa、33kPa、35kPa及37kPa,并采用有限元极限平衡法进行了系统的计算分析。该方法基于抗滑力与下滑力的力学平衡关系来评估边坡稳定性,其核心是计算潜在滑动面上的安全系数。

计算结果表明,粘聚力(c)是影响稀土矿边坡稳定性的关键内在因素之一。安全系数(Fs)随粘聚力的增大呈现出明显的线性增长趋势。(图8)具体表现为:当粘聚力从25kPa逐步提升至37kPa时,边坡的安全系数随之显著增加。这表明,提高全风化层的粘聚力能够有效增强边坡的抗滑能力。

3.3.3 内摩擦角的影响

本研究通过数值模拟手段,系统探讨了全风化层内摩擦角对离子型稀土矿边坡稳定性的影响。通过精确控制其他参数不变,将内摩擦角在 20.5° 至 23.5° 范围内以 0.5° 为间隔进行取值,并采用极限平衡法计算了各工况下的边坡安全系数,计算结果清晰地揭示了两者的内在关联。

从力学机理上看,内摩擦角的提高直接增强了潜在滑动面上岩土体的抗剪强度(图9),从而显著提升了边坡的整体稳定性。研究同时发现,内摩擦角的变化也会影响潜在滑动面的位置与形态。一般而言,内摩擦角较小时,滑动面倾向于向边坡深部发展;随着内摩擦角增大,滑动面可能逐渐变浅,显示出边坡破坏模式由深层滑动向浅层滑动转化的趋势。

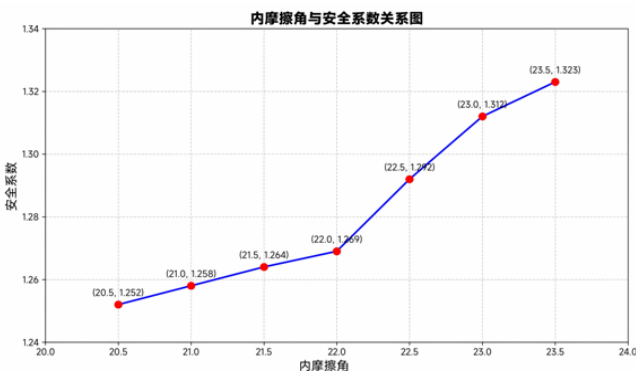


图9 内摩擦角与安全系数关系图

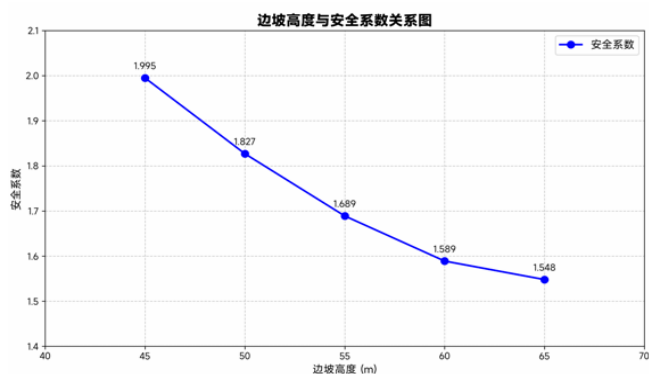


图10 边坡高度与安全系数关系图

3.3.4 坡高的影响

本研究重点探讨了边坡高度对龙南某离子型稀土矿边坡稳定性的影响。基于该矿区边坡高度普遍在35-70米之间的工程背景,研究选取了45米、50米、55米、60米及65米共五个高度级别进行数值模拟分析,旨在揭示边坡高度与稳定性之间的内在规律。

对图10中安全系数与边坡高度关系曲线的分析表明,二者存在明显的负相关性。随着边坡高度从45米($F_s=1.995$)逐步增加至65米($F_s=1.548$),边坡的稳定性持续恶化。值得注意的是,安全系数的下降速率(即高度每增加5米带来的降幅分别为8.42%、7.55%、5.92%和2.58%)并非常数,而是随着坡高的增大逐渐放缓。这种非线性特征暗示,在边坡高度相对较低时(例如45-55米区间),其稳定性对高度变化更为敏感;而当边坡达到一定高度后(例如55-65米区间),虽然安全系数继续降低,但高度增加所带来的边际风险影响有所减小。这一规律对于评估高陡边坡的风险等级和确定安全监测重点具有重要的指导意义。

4 结论

(1)通过正交试验对龙南某稀土矿边坡稳定性的影响因素进行敏感性排序,得出其主次关系为:坡比(I/p)>粘聚力(c)>内摩擦角(ϕ')>坡高(h)。其中,坡比之所以成为最主导的敏感性因子,源于其直接决定了潜在滑动面的形态和坡体的应力分布。相较于主要通过提供抗剪强度来维持稳定的岩土参数(c 、 ϕ'),几何条件的改变(坡比)对稳定性的控制作用更为直接和显著。

(2)通过对龙南某离子型稀土矿采场边坡稳定性的数值模拟与参数分析,本研究系统探讨了不同影响因素的独立作用效应。研究表明,边坡稳定性与坡比(I/p)和坡高(h)之间存在显著的负相关关系,即坡体越陡峭、高度越大,其安全系数(F_s)越低,失稳风险相应增高。反之,表征岩土体抗剪强度的关键参数——粘聚力(c)与内摩擦角(ϕ)则与边坡稳定性呈正相关,二者的提升能有效增强坡体的抗滑能力。

江西省地质局科研项目:江西赣南花岗岩地区地质灾害临界降雨量阈值研究(项目编号:PM-2024000021)。

【参考文献】

- [1]邱宇辰.不同细颗粒含量离子型稀土矿浸矿湿润锋运移规律及入渗模型优化[D].江西理工大学,2025.
- [2]郭钟群,唐韬,周尖荣,等.化学溶浸作用下离子型稀土矿的力学性能变化规律研究[J].稀土,2025,46(04):62-78.
- [3]陈雯敬.离子型稀土矿原地浸矿诱发滑坡机理及稳定性研究[D].江西理工大学,2025.
- [4]周凌波,康世杰,赵翰林,等.离子型稀土矿浸出过程中细颗粒对孔隙结构的影响:三维CT分析[J/OL].中国稀土学报,1-15 [2025-12-19].<https://link.cnki.net/urlid/11.2365.TG.20250423.1712.010>.
- [5]陈仁祥,伏慧平,宋勇,等.稀土浸矿区山体滑坡特征及成因[J].江西建材,2021,(01):183-185.

[6]王钰霖.浸矿剂浓度对离子型稀土矿体强度参数影响的试验研究及其应用[D].江西理工大学,2020.

[7]黄彬,陈斌锋,马艳平等.基于地质条件的离子型稀土矿原地浸矿工艺适用性评价模型构建研究[J].有色金属(矿山部分),2025,77(06):87-97.

[8]汤民波,涂志刚.赣南某稀土矿边坡稳定性影响因素正交分析[J].现代矿业,2017,33(02):196-197+200.

[9]陈飞,张仕彬,谢蕴忠,等.离子型稀土堆浸场地复合土壤

固化剂正交实验研究[J].有色金属科学与工程,2023,14(06):887-894.

[10]涂志刚.赣南某离子型稀土矿原地浸矿边坡稳定性分析[D].江西理工大学,2015.

作者简介:

谢昊翔(1989--),男,江西赣州人,本科,工程师,主要从事水工环地质技术研究。