

# 原地浸矿对某稀土矿边坡稳定性的影响规律研究

史景涛<sup>1</sup>, 何文<sup>1,2\*</sup>, 马勤为<sup>1</sup>

1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000;  
2. 江西理工大学稀有金属资源安全高效开采重点实验室, 江西 赣州 341000



**摘要:**原地浸矿是引发离子型稀土矿山滑坡灾害的重要因素之一。为保障稀土矿山的安全高效生产,以我国南方某稀土矿为例,运用数值模拟方法,研究了注液参数对离子型稀土矿边坡稳定性的影响规律;定量分析了注液参数对该稀土矿边坡稳定性影响的敏感性;根据浸矿液在边坡内整体的渗透速度,确定了针对该矿山的最佳注液参数。结果表明:加大注液强度和延长注液时间会导致边坡孔隙水压力整体上升,平均有效应力降低,剪应变和位移增大,边坡整体稳定性下降,增大注液孔间距则呈相反规律;注液强度和注液时间为影响边坡稳定性的高敏感参数,注液孔间距为敏感参数;在保障该矿山边坡稳定的前提下,确定最佳注液参数,即注液强度为 $2.3 \text{ m}^3/\text{d}$ ,孔间距为 $1.50 \text{ m}$ ,在该参数下浸矿液渗透速度高达 $2.09 \text{ m/d}$ 。研究成果对离子型稀土矿山的安全生产及注液条件选定具有参考意义。

**关键词:**离子型稀土;原地浸矿;数值模拟;注液参数;边坡稳定性;渗透速度

中图分类号:TD865 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0815-14 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.062  
引用格式:史景涛,何文,马勤为.原地浸矿对某稀土矿边坡稳定性的影响规律研究[J].黄金科学技术,2025,33(4):815-828.  
SHI Jingtao, HE Wen, MA Qinwei. Study on the Influence Law of In-situ Leach Mining on the Slope Stability of a Rare Earth Ore [J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 815-828.

稀土作为各国重要领域的关键战略性矿产资源,被广泛应用于军工制造、航空航天和光学精密仪器等尖端科技领域(陈乔等,2022;叶前林等,2024)。我国是全球稀土矿储量最大的国家,其中离子型稀土矿是我国南方的优势矿产资源,富含高价值的中重稀土元素,已成为世界上中重稀土资源的主要来源(Kanazawa et al, 2006; 池汝安等, 2019; 王臻等, 2021)。离子型稀土矿历经堆浸、池浸和原地浸矿三代开采工艺,其中原地浸矿工艺因具有成本低、回收率高和污染小等优点而被广泛应用(肖筱丰等, 2022; 郭钟群等, 2025)。然而,由于原地浸矿工艺的浸出周期长,离子型稀土矿矿体长期受到浸矿液的冲刷侵蚀作用,其力学性质严重弱化(周

凌波等, 2020; 钟文等, 2022; 郭钟群等, 2024)。当浸矿液浸入矿体后,边坡土体由非饱和向饱和状态的变化过程导致孔隙水压力增大,极易引发山体滑坡(王晓军等, 2022)。

针对原地浸矿过程中离子型稀土矿边坡稳定性问题,国内外学者从多角度开展了关于影响因素和失稳机理方面的研究。在诸多影响因素中,注液强度是影响矿山边坡变形的主要因素,注液强度过大会引发山体滑坡(蒋舒等, 2024);对矿山浸润面、土压力和裂缝宽度变化的现场监测表明,注液强度过大易引发推移式滑坡和牵引式滑坡(王观石等, 2017)。此外,基于室内试验对注液时间与矿体强度之间的关系开展了一系列研究,如:室内浸矿试

收稿日期:2025-01-20;修订日期:2025-04-15

基金项目:国家自然科学基金地区项目“裂隙影响下稀土原地浸出溶液非均匀渗流特征及强化浸出机制”(编号:52464013)和国家自然科学基金青年项目“尾矿库溃坝灾害的散状—连续介质摩擦碰撞致声信号监测应用探索”(编号:51604127)联合资助

作者简介:史景涛(1998—),男,安徽涡阳人,硕士研究生,从事矿山安全方面的研究工作。E-mail: m15256362499@163.com

\*通信作者:何文(1981—),男,广东中山人,副教授,从事矿山岩土工程测试方面的研究工作。E-mail: herman3@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

验探讨浸矿时间与矿土黏聚力和内摩擦角之间的关系(陈勋等,2019)室内柱浸试验结合SEM和NMR分析观察矿样微观颗粒变化(Wang et al, 2023),发现由于浸矿过程细小矿物颗粒发生迁移,削弱了颗粒间的黏聚力强度,矿样剪应力峰值与注液时间呈负相关关系。在入渗至坡内液体量方面,Sadeghi et al(2019)在不排水的三轴压缩试验中观察到持续的孔隙水压力积累降低了土体间的有效应力,是引发滑坡灾害的主要原因之一。Geng et al(2023)采用MatDEM软件对离子型稀土矿的渗透分布和边坡稳定性的变化进行了研究,发现入渗至坡内液体量的增大,会降低边坡稳定性进而引发滑坡破坏。综上所述,现有成果揭示了原地浸矿过程中注液强度、注液时间等因素对边坡稳定性的负面影响,但注液参数变化对边坡稳定性的影响规律和敏感性的定量分析方面仍显不足。

鉴于此,本文以我国南方某离子型稀土矿山原地浸矿工程为背景,利用Midas-GTS软件对原地浸

矿中不同注液参数下边坡稳定性进行分析,揭示了原地浸矿作用对离子型稀土矿边坡稳定性的影响规律;通过正交试验定量分析了注液参数对该稀土矿边坡稳定性影响的敏感性;最后,基于矿山的边坡安全及浸矿液的渗透速度确定了原地浸矿注液强度和孔间距的最优参数,以期对矿山的注液参数选取及安全生产提供理论依据。

## 1 原型边坡概况

某离子型稀土矿位于我国南方,处于亚热带南缘湿润季风气候区。区内属低山丘陵地貌,地势较平坦,地形相对西高东低,最高海拔为392 m,最低海拔为270 m,相对高差为50~80 m,最大高差为105 m,坡度为 $5^{\circ}$ ~ $36^{\circ}$ 。稀土矿化岩体地貌形态以馒头状为主要特征。在浸矿作用前,矿区山体整体较为稳定,属典型似层状表面显露型矿体,形态特征较为单一,矿体产状和厚度变化均明显受地貌形态的影响。矿体分层如图1所示。

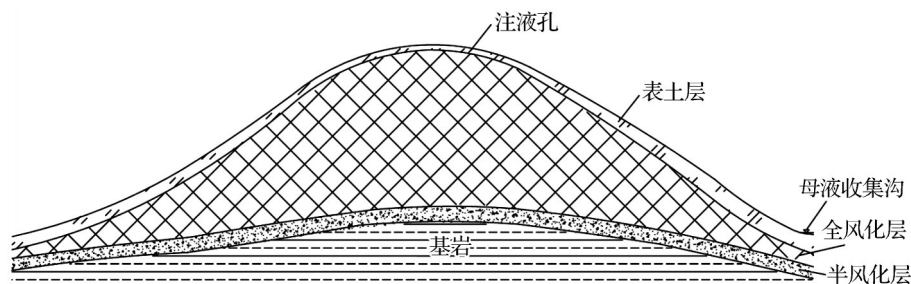


图1 矿体分层图

Fig. 1 Stratigraphic map of orebody

根据地质资料及钻孔揭露对矿体进行分层,矿体从上至下依次为表土层、全风化层、半风化层和基岩。表土层:一般厚度为0.4~2.0 m,局部区域厚度达4 m,主要包括腐殖质、亚砂土和亚黏土,呈灰黑色;全风化层:主要为全风化花岗岩,岩石强度极低,具有较高的孔隙度和渗透率,厚度为2.0~24.5 m,呈黄褐色;半风化层:主要为半风化花岗岩,岩石较紧密,厚度为2.2~4.5 m,呈灰肉红色;基岩:厚度为10~15 m,部分区域厚度为3 m,主要为黑云母花岗岩,为陆地表层中的坚硬岩层,具有较高的抗拉和抗压强度。针对后续三维网格模型各层土体材料参数的赋值问题,基于室内土工试验实

测数据,结合矿区已有试验数据,得到各土层材料参数如表1所示。

## 2 模型前处理

### 2.1 边坡三维实体建立

首先,基于原型矿山原地浸矿工程布置图及矿区地形资料,利用Midas-GTS数值模拟软件地形数据生成器功能建立边坡最危险部位表土层层面模型;然后,依托钻孔信息沿表面向下创建全风化花岗岩、半风化花岗岩和基岩层面;最后,经扩展、实体切割生成边坡三维模型实体。三维边坡实体生成步骤如图2所示。

表1 各土层材料参数  
Table 1 Material parameters of each soil layer

土层名称	弹性模量/kPa	泊松比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	初始孔隙比	渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
表土层	3 190	0.21	16.57	22.28	12.81	0.98	2.57E-05
全风化层	3 530	0.24	17.34	24.02	14.69	0.79	1.23E-05
半风化层	5 200	0.25	18.15	30.14	16.23	0.75	1.03E-05
基岩层	65 800	0.29	32.56	56.69	31.28		

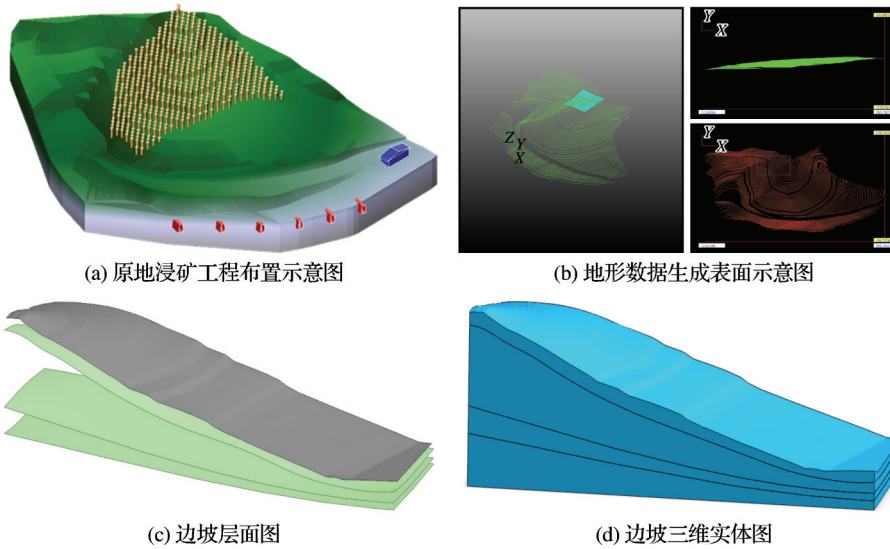


图2 边坡三维实体生成步骤

Fig. 2 Generating steps of slope 3D solid entity

### 2.2 边坡网格模型生成

采用Midas-GTS软件默认的四面体网格生成器对本文计算模型进行网格划分,划分后共生成129 266个网格,29 171个节点。对网格模型施加位移约束边界和边坡自重荷载。边坡网格模型如图3所示。

### 2.3 工况设置

原地浸矿作用是通过离子型稀土矿山体表面

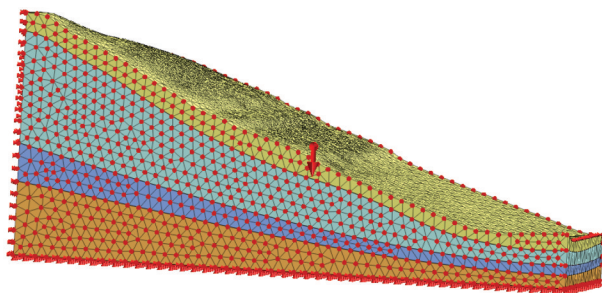


图3 边坡网格模型

Fig. 3 Slope mesh model

的注液孔向赋存稀土元素的矿体注入浸矿液,将吸附在矿物表面的稀土阳离子置换到溶液中形成稀土母液,进而从母液中提取稀土(李琪等,2021)。利用Midas-GTS软件渗流边界模拟浸矿作用,以单孔流量设定注液强度。根据边坡土体的渗透强度,本文选定注液强度范围为1.3~2.8 m<sup>3</sup>/d。注液30 d后,边坡安全系数不再变化,因此注液时间范围选定为5~30 d。注液孔间距布置过大易造成浸矿盲区,降低稀土资源回收率;注液孔间距布置过小则会增大注液量,易发生滑坡(桂勇等,2018)。结合工程实际,注液孔间距范围选定为1.50~2.25 m。

渗流—应力耦合作用能够加快土质边坡内部液体的入渗速度,加剧坡内孔隙水压的增长速度,并使基质吸力比非耦合状态消散得更快,导致耦合作用下计算的安全系数更小(周亦良等,2023)。特别是原地浸矿过程中,随着浸矿时间延长,在溶浸液渗流和应力耦合因素作用下,稀土矿矿体空间结构发生改变,减弱了土体间的黏结强度,致使矿体

抗剪强度下降(陈勋等,2019)。由此可知,考虑渗流—应力耦合作用,开展边坡稳定性分析对于深入研究工程边坡稳定性具有重要的理论意义和工程应用价值(彭和鹏等,2022)。因此,在分析过程中将施工阶段组设置为应力—渗流—边坡,在此阶段,软件能够自动根据建模时设置的渗流边界条件计算得到孔隙水压力,并将得到的孔隙水压力数据纳入下一步的应力分析中。通过计算得到初始边坡及不同注液参数下浸矿后边坡的孔隙水压力、平均有效应力、剪应变和位移云图。注液参数设计如表2所示。

表2 注液参数设计  
Table 2 Design of liquid injection parameters

序号	注液时间/d	注液孔间距/m	注液强度/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
1	30	1.50	1.3
2	30	1.50	1.8
3	30	1.50	2.3
4	30	1.50	2.8
5	5	1.50	2.8
6	10	1.50	2.8
7	20	1.50	2.8
8	30	1.50	2.8
9	30	1.50	2.8
10	30	1.75	2.8
11	30	2.00	2.8
12	30	2.25	2.8

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同注液强度

(1)孔隙水压力分析。土质边坡孔隙水压力是指地下水作用于边坡土体微粒与孔隙之间所产生的压力,对边坡稳定性具有显著影响。一方面,边坡负孔隙水压能够反映土体含水率及基质吸力的变化;另一方面,边坡内部孔隙水压的存在会改变土体内部物理力学特性(如黏聚力和摩擦角等)(孙子涵等,2020)。如图4所示,浸矿前后边坡的孔隙水压力分布格局大致相似,表现为孔压自坡面向深处延伸至坡底,数值由负转正并逐渐增大,坡内负孔压反映了土体基质吸力的变化,而基质吸力与土体含水率呈负相关关系。随着注液强度的增大,入渗至坡体内的浸矿液增加,土体含水率相应增大,基质吸力变弱,坡内孔隙水压力整体增大,最大负孔压减小。

(2)平均有效应力及剪应变分析。根据太沙基有效应力原理,土的强度和变形直接取决于有效应力(宋二祥,2025)。边坡稳定性与岩体剪切强度密切相关,有效应力越大,土体颗粒之间的黏结力越强,剪切强度也越大,从而有助于边坡的稳定。从图5可以看出,初始阶段边坡主要受自身重力荷载

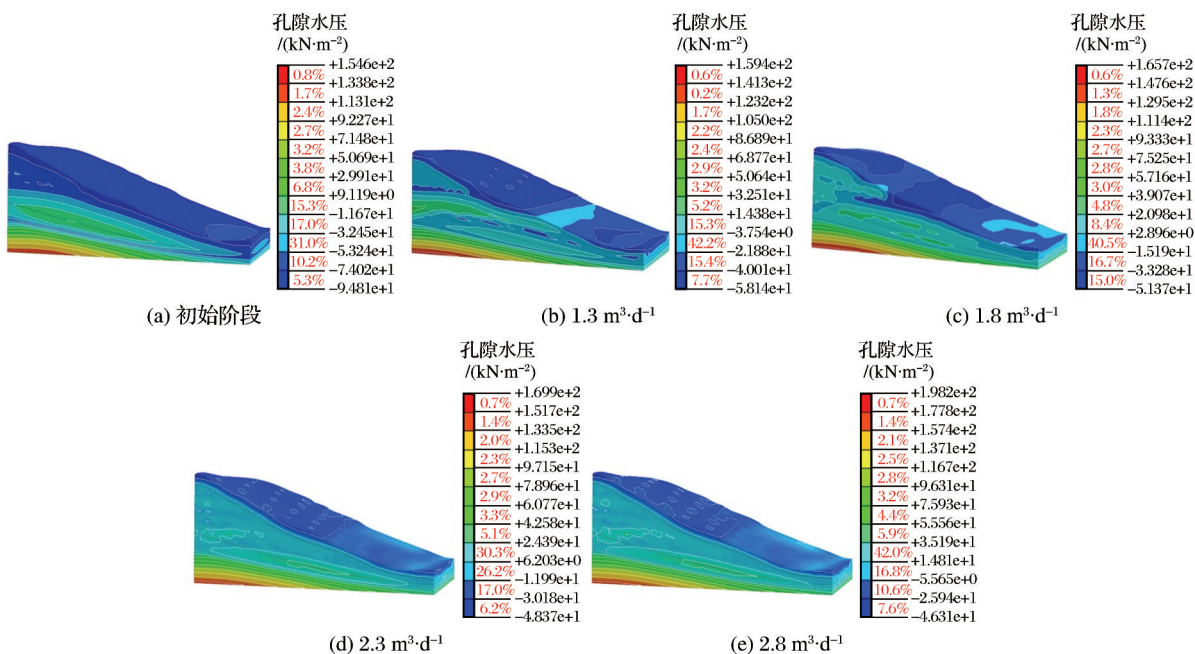


图4 不同注液强度下边坡孔隙水压力云图

Fig. 4 Contour plot of pore water pressure in slopes under different grouting intensities

作用,从坡面向深处延伸至坡底,坡内平均有效应力逐渐增大。在浸矿作用后,平均有效应力数值整体呈现减小的趋势,结合前文浸矿后孔隙水压力的变化规律可知:随着注液强度的增大,渗入坡体内的浸矿液增多,土体含水率增大,孔隙水压力变大,导致浸矿液对土体产生更大的向上浮托力,抵消部分自重荷载的作用,有效应力整体降低,边坡的安全系数降低,稳定性减弱。注液强度为 $2.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 时的最大平均有效应力较注液强度为 $2.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 时略有回升。为了研究平均有效应力回升现象的影响,基于软件模拟结果,绘制了不同注液强度下边坡安全系数的变化曲线,如图6所示。由图6可知,当注液强度达到 $2.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,边坡安全系数降至 $0.98$ ,说明该

注液强度下边坡处于不稳定状态,边坡内部结构遭受破坏,有效应力受结构破坏影响出现回升现象。

初始阶段边坡处于稳定状态,如图7所示。该阶段边坡在自重荷载及地势影响下,最大剪应变区域主要集中在坡顶下方全风化花岗岩层中上部。由图6和图7可以看出,注液强度增大,边坡剪应变整体增大,土体产生更大程度的变形,因此边坡的安全系数下降,稳定性降低。从图7可以看出,随着注液强度的增大,最大剪应变的主要区域逐步向坡面中部下方的全风化层底部转化,且该区域范围逐渐扩大,坡顶下方的最大剪应变区域逐渐消弱。说明浸矿作用对边坡剪应变的影响远大于其自重荷载作用。

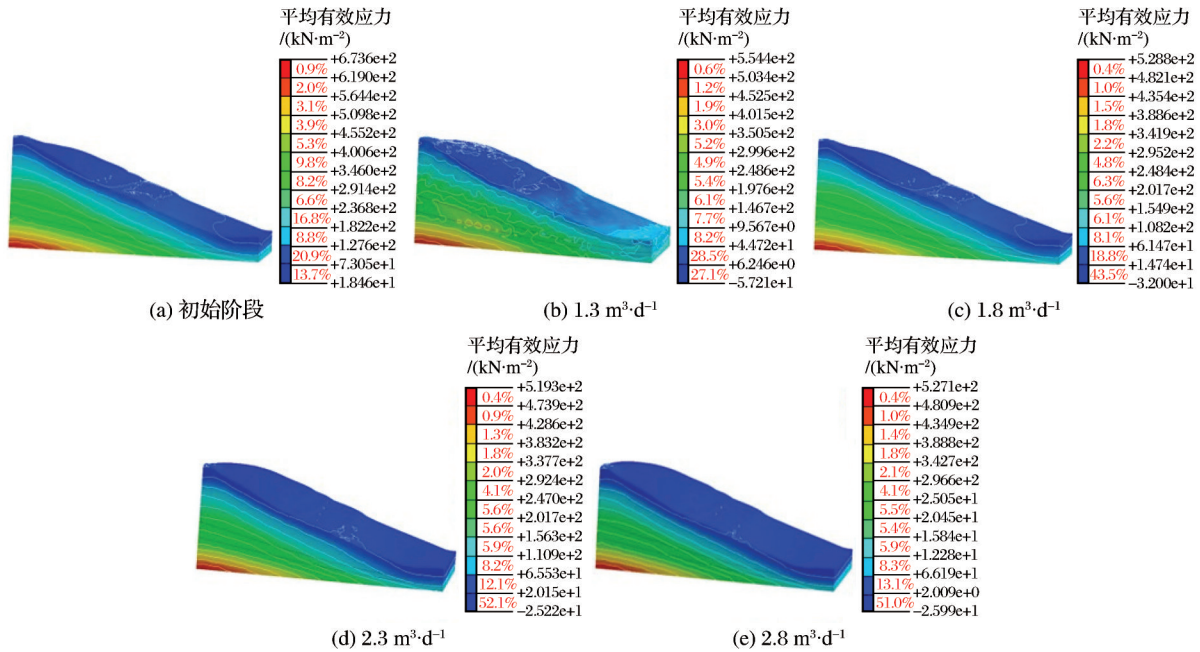


图5 不同注液强度下边坡平均有效应力云图

Fig. 5 Contour plot of average effective stress on slopes under different grouting intensities

(3)边坡位移分析。位移是评估边坡稳定性的关键因素,图8所示为初始阶段及不同注液强度下边坡的位移情况,图中初始阶段边坡最大位移区域表现在坡顶顶部及坡面中上部,浸矿作用后,坡顶部位最大位移区域逐步转化为一般位移区域。考虑到基岩层具有较高的抗拉和抗压强度,且不透水,云图中基岩的位移量几乎为0。随着注液强度的增大,最大位移区域表现出向X方向即坡脚部位移动的趋势,最终集中在坡面中部表层及全风化

层部位,位移数值整体增大,最大值由初始阶段的 $1.48 \text{ mm}$ 增加至 $258.37 \text{ mm}$ 。

### 3.2 不同注液时间

(1)孔隙水压力分析。不同注液时间下边坡孔隙水压力变化趋势整体与不同注液强度下的变化趋势大致相同,即边坡孔隙水压力整体随注液时间的延长而增大。最大负孔压可以反映土体含水率和基质吸力的变化情况,为研究注液时间对边坡土体渗流场的影响,绘制了不同注液时间下最大负孔

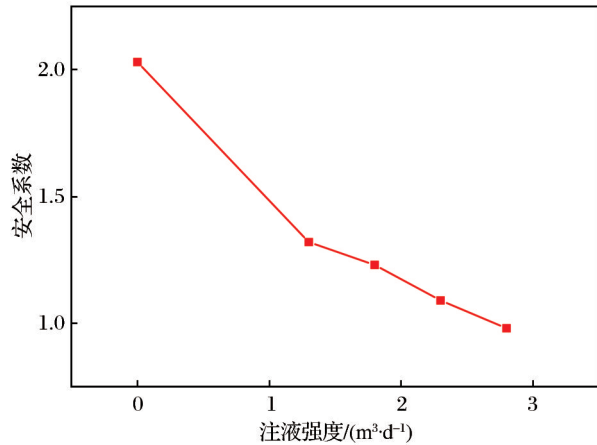


图6 不同注液强度下安全系数的演变

Fig. 6 Evolution of the safety factor under different injection intensities

压的变化曲线。如图9所示,注液0~20 d,边坡土体逐步由非饱和状态向饱和状态转变,孔隙水压持续升高,最大负孔压迅速降低,考虑到土体基质吸力变小,最大负孔压下降速度持续放缓。

(2)平均有效应力及剪应变分析。为了解浸矿作用对边坡有效应力的影响规律及在剪切力作用

下的变形程度,绘制了不同注液时间下边坡的平均有效应力及最大剪应变变化情况,如图10所示。从图10可以看出,在浸矿作用初中期,随着注液活动的进行,边坡平均有效应力呈现出持续减小的趋势。结合前文关于注液强度的影响分析:此时边坡处于不稳定状态,内部结构遭受破坏,土体应力状态开始新的调整,因此当注液时间达到30 d时,有效应力出现回升的现象。随着浸矿作用的进行,浸矿液持续浸入边坡内部,使得土体含水率提升,导致饱和区域扩大,孔隙水压上升,有效应力降低,土体抗剪强度受浸矿液浸泡作用持续下降,边坡更易发生剪切变形,因此剪应变整体增大。如图10所示,剪应变随注液时间的延长而持续增大,注液5 d剪应变由19.9迅速增至26.5,考虑土体基质吸力削弱,剪应变增长速度减慢。此外,最大剪应变在注液30 d时为34.7,表明此时边坡已经产生大变形。

(3)边坡位移分析。为进一步研究注液时间对边坡稳定性的影响,分析了不同注液时间下的边坡最大位移演变。如图11所示,注液5 d,边坡最大位移较初始阶段增大9.50 mm;相比注液5 d,注液5~

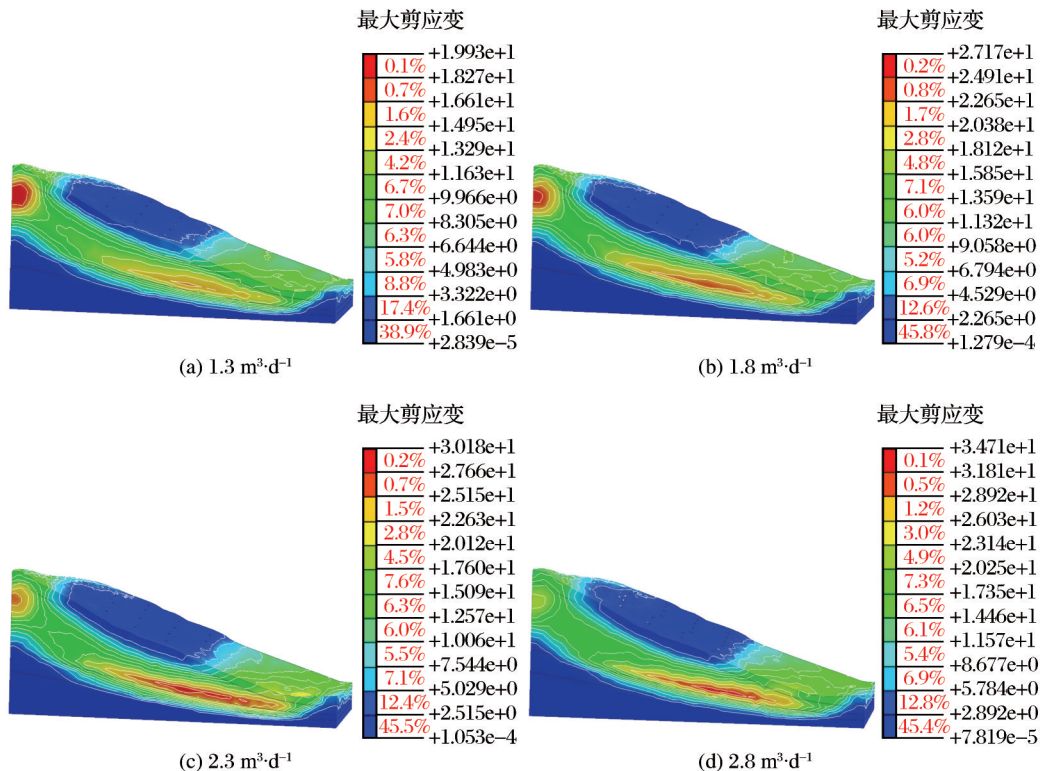


图7 不同注液强度下边坡剪应变云图

Fig. 7 Contour plot of shear strain on slopes under different grouting intensities

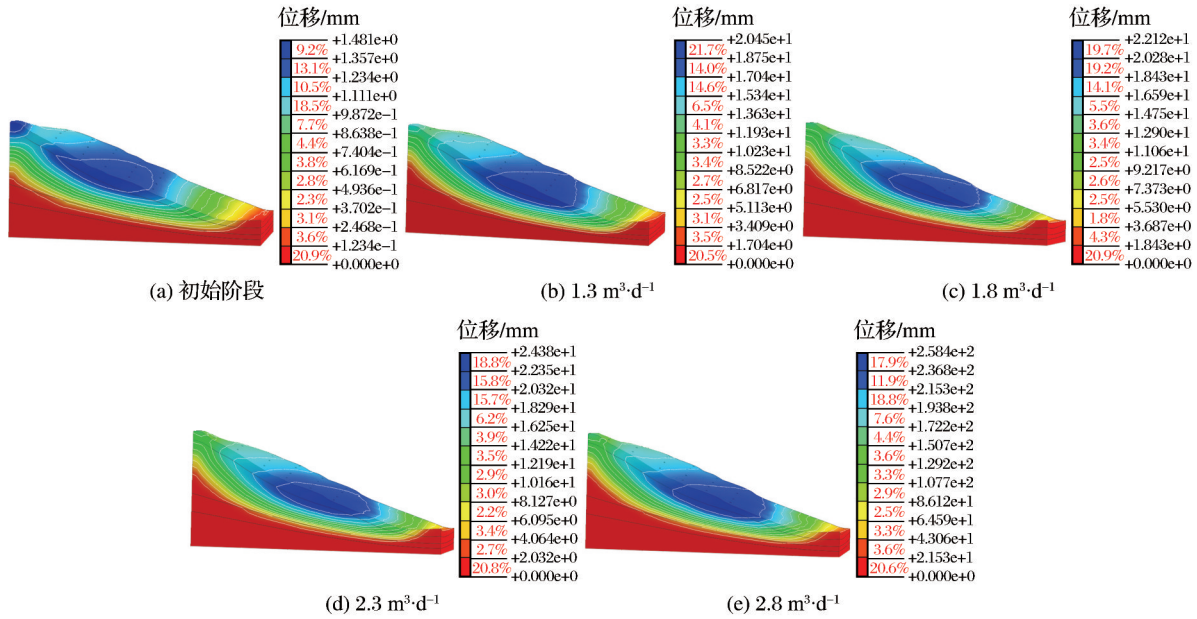


图8 不同注液强度下边坡位移云图

Fig. 8 Contour plot of displacement on slopes under different grouting intensities

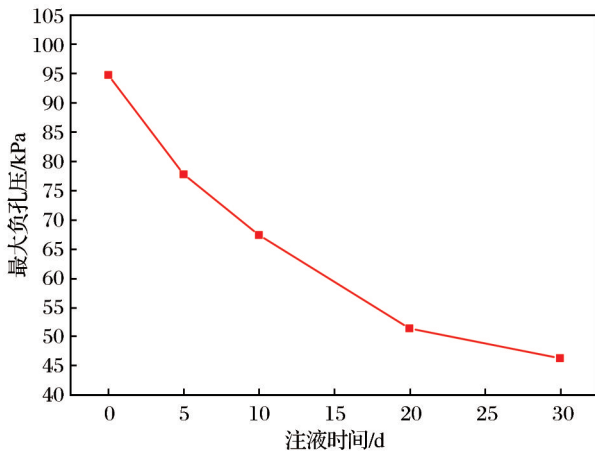


图9 不同注液时间下最大负孔压演变

Fig. 9 Evolution of maximum negative pore pressure under different injection times

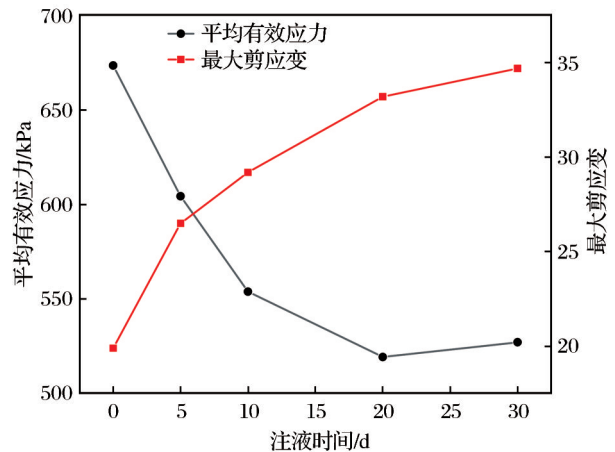


图10 不同注液时间下的最大平均有效应力及剪应变演变

Fig. 10 Evolution of maximum average effective stress and shear strain under different injection times

10 d的最大位移增大11.21 mm,其中前10 d共增大22.19 mm,随后由于土体基质吸力减小,浸矿液入渗至土体的速度下降,位移增大量随之降低;注液10~20 d的最大位移相比上一阶段(注液5~10 d)仅增大11.07 mm;注液20~30 d相比上阶段(注液10~20 d)增大了225.11 mm,产生了增大突变,进一步表征在注液强度和注液孔间距不变的情况下注液30 d条件下边坡处于不稳定状态。

### 3.3 不同注液孔间距

(1) 孔隙水压力分析。注液孔间距的布置直接关系到矿山的生产安全和矿体的浸取效率,合理的注液孔间距能够确保浸矿液均匀完全渗透,减少矿体破坏,保障边坡稳定。为探究注液孔间距对边坡渗流场的影响,对不同注液孔间距下最大负孔隙水压力曲线(图12)进行对比。其中,坡内负孔压反映了土体基质吸力的变化,而基质吸力与土体含水率

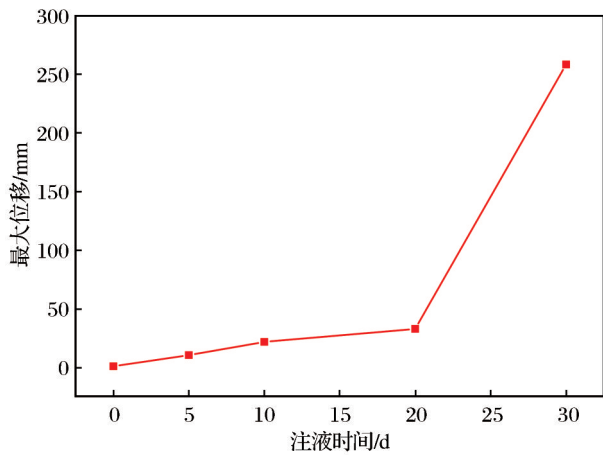


图 11 不同注液时间下的边坡最大位移演变

Fig. 11 Evolution of maximum displacement of the slope under different injection times

为负相关关系。如图 12 所示,随着孔间距的增大,注液孔数量相应减少,注液量随之减小,土体内含水率降低,基质吸力增强,孔隙水压整体下降,最大负孔压增大。

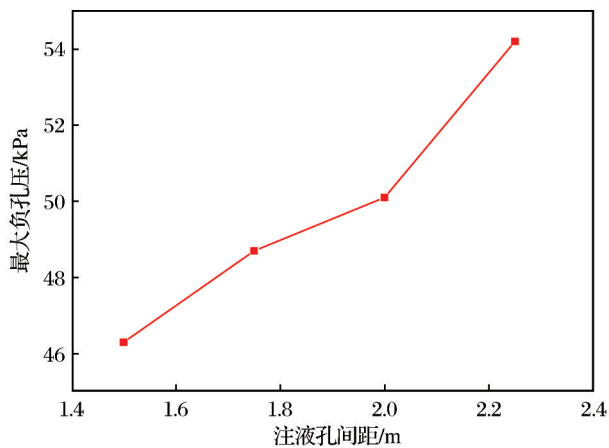


图 12 不同注液孔间距下的边坡最大负孔压

Fig. 12 Maximum negative pore pressure of the slope under different spacing between injection holes

(2)平均有效应力及剪应变分析。基于前文分析结果,孔隙水压力在土体中产生了向上的浮托力,能够抵消部分自重荷载作用。如图 13 所示,当注液孔间距为 1.75~2.25 m 时,随着孔间距的增大,坡内孔隙水压降低,导致浮托力减小,其对自重荷载的抵消作用减弱,使得边坡平均有效应力逐渐增大。此外,在孔间距为 1.50 m 条件下边坡呈不稳定状态,有效应力发生突变。进一步分析表明,当注

液孔间距增大时,渗入边坡内部的浸矿液减少,土体含水率降低,浸矿对土体强度的影响减弱,剪应变随之降低。

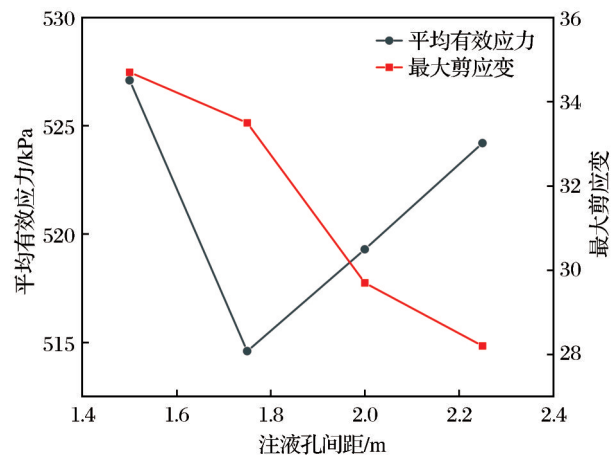


图 13 不同注液孔间距下的平均有效应力及最大剪应变

Fig. 13 Average effective stress and maximum shear strain under different spacing between injection holes

(3)边坡位移分析。图 14 所示为不同注液孔间距下边坡的最大位移量。由图 14 可知,随着注液孔间距的增大,边坡最大位移数值降低,结合前文关于剪应变的分析得出,扩大注液孔间距在一定程度上能够增强离子型稀土矿边坡的稳定性。

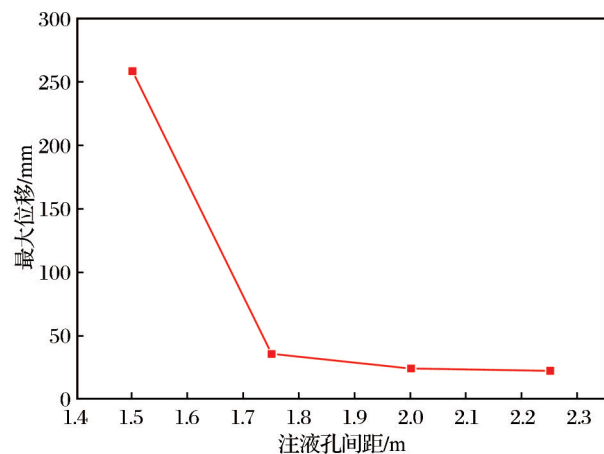


图 14 不同注液孔间距下的边坡最大位移演变

Fig. 14 Evolution of maximum displacement of the slope under different spacing between injection holes

### 3.4 稳定性分析

安全系数是衡量边坡稳定性的重要指标。由 Midas-GTS 软件根据强度折减法 (SRM) 得到不同

注液工况下边坡的安全系数如表3所示,稳定性状态划分如表4所示。结果显示:边坡安全系数随着注液强度的增大而增大,随着注液时间的延长而减小,随着注液孔间距的增大而增大。结合边坡孔隙水压、有效应力、剪应变和位移分析得出,边坡稳定性随着注液强度的增大而逐渐减弱,随着注液时间的延长而逐渐减弱,随着注液孔间距的增大而增强。

在注液强度为2.8 m<sup>3</sup>/d、孔间距为1.50 m条件下注液30 d的边坡安全系数由初始阶段的1.89降至0.98,结合前文分析和图15确定该阶段边坡处于不稳定状态。在注液强度为2.3 m<sup>3</sup>/d,孔间距为1.50 m和注液强度为2.8 m<sup>3</sup>/d、孔间距为1.75 m条

件下边坡安全系数均为基本稳定范围内,但仅靠安全系数的大小判别边坡是否失稳不够精准。对于边坡稳定性的准确评估,主要依据(He et al, 2018; 高冯等,2020; Ma et al.,2020)有:(1)模拟计算过程中,力与位移是否双收敛;(2)滑面上应力与位移是否存在突变现象;(3)滑面上塑性区域是否完全贯通。

首先,根据计算结果,在注液强度为2.3 m<sup>3</sup>/d、孔间距为1.50 m和注液强度为2.8 m<sup>3</sup>/d、孔间距为1.75 m条件下力与位移是双收敛的。其次,滑面上有效应力和位移均发生突变现象。最后,从图15可以看出,虽然边坡在2种条件下出现了塑性区,但均未完全贯通。因此,边坡仍处于稳定状态。

表3 不同注液参数下边坡安全系数

Table 3 Safety factors of slope under different injection conditions

参数一:注液强度变化				参数二:注液时间变化				参数三:注液孔间距变化			
时间/d	间距/m	强度/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	F <sub>s</sub>	强度/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	间距/m	时间/d	F <sub>s</sub>	强度/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	时间/d	间距/m	F <sub>s</sub>
30	1.50	1.3	1.32	2.8	1.50	5	1.45	2.8	30	1.50	0.98
30	1.50	1.8	1.23	2.8	1.50	10	1.25	2.8	30	1.75	1.07
30	1.50	2.3	1.09	2.8	1.50	20	1.17	2.8	30	2.00	1.11
30	1.50	2.8	0.98	2.8	1.50	30	0.98	2.8	30	2.25	1.17

表4 边坡稳定性状态划分

Table 4 Classification of slope stability conditions

边坡稳定性系数	边坡稳定性状态
F <sub>s</sub> < 1.00	不稳定
1.00 ≤ F <sub>s</sub> < 1.05	欠稳定
1.05 ≤ F <sub>s</sub> < F <sub>st</sub>	基本稳定
F <sub>s</sub> ≥ F <sub>st</sub>	稳定

注:F<sub>st</sub>为边坡稳定安全系数,取1.25(中华人民共和国住房和城乡建设部,2013)

### 3.5 边坡稳定性敏感性分析

为了定量研究浸矿过程中注液参数对该离子

型稀土矿边坡稳定性影响的敏感度,设计了三因素四水平正交试验,选取注液强度、注液时间和注液孔间距作为考察因素,以边坡安全系数作为评定指标,正交试验方案设计见表5。

基于3个影响因素和4个水平,构建了正交试验方案,分别计算16次试验的边坡安全系数作为边坡稳定程度指标,详见表6。

采用方差分析法对边坡安全系数进行敏感性分析,总变差平方和S<sub>T</sub>表示为

$$S_T = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \frac{T}{n} \right)^2 \quad (1)$$

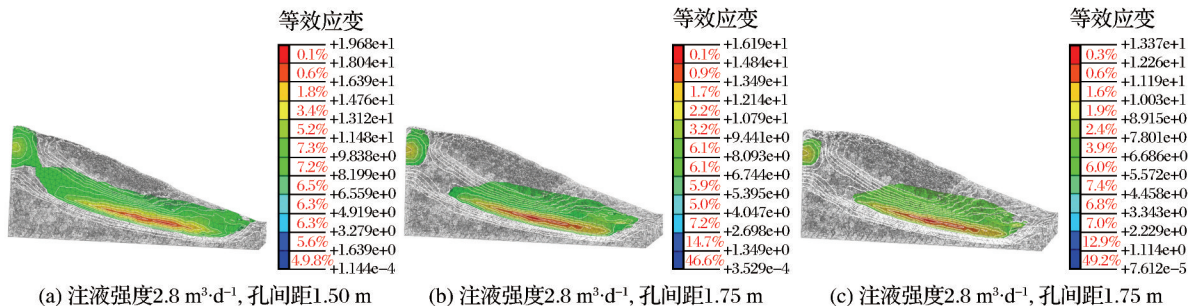


图15 注液30 d边坡滑面塑性区

Fig. 15 Plastic zone on the slope sliding surface after 30 d liquid injection

表5 影响因素及水平

Table 5 Influencing factors and levels

水平	注液强度/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	注液时间/d	注液孔间距/m
1	1.3	5	1.50
2	1.8	10	1.75
3	2.3	20	2.00
4	2.8	30	2.25

表6 正交试验结果

Table 6 Orthogonal experiment results

试验序号	注液强度/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	注液时间/d	注液孔间距/m	边坡安全系数
1	1.3	5	1.50	1.63
2	1.3	10	1.75	1.59
3	1.3	20	2.00	1.57
4	1.3	30	2.25	1.54
5	1.8	5	1.75	1.57
6	1.8	10	1.50	1.62
7	1.8	20	2.25	1.59
8	1.8	30	2.00	1.47
9	2.3	5	2.00	1.52
10	2.3	10	2.25	1.47
11	2.3	20	1.50	1.22
12	2.3	30	1.75	1.18
13	2.8	5	2.25	1.61
14	2.8	10	2.00	1.30
15	2.8	20	1.75	1.19
16	2.8	30	1.50	0.98

式中： $\frac{T}{n}$ 为各因素试验结果 $y_i$ 的平均值。

$$f=n-1 \quad (2)$$

$$F=(S_T/f)/S_E \quad (3)$$

式中： $f$ 为自由度； $F$ 为判定敏感性的检验值； $S_E$ 为误差均方差。

对边坡稳定性进行浸矿注液参数敏感性分析时,采用 $F$ 值作为判定标准。当 $F \geq F_{0.01}$ 时,该因素为高敏感性参数,对指标具有高度显著影响;当 $F_{0.01} > F \geq F_{0.05}$ 时,该因素为敏感性参数,对指标具有显著影响;当 $F_{0.05} > F \geq F_{0.10}$ 时,该因素为一般敏感性参数,对指标具有一般显著影响,当 $F < F_{0.10}$ 时,该因素为不敏感参数,对指标具有无显著影响。

采用方差分析法对表6数据进行分析,基于实际情况,设置了0.01、0.05和0.10共3个显著水平。查阅 $F$ 检验临界值表(NIST,2012)可知: $F_{0.01}(3,6)=$

9.780,  $F_{0.05}(3,6)=5.409$ ,  $F_{0.10}(3,6)=3.289$ 。进一步计算得到如表7所示的显著性结果。

表7 显著性结果

Table 7 Significance results

因素	平方和	自由度	均方和	$F$	显著性	敏感特征
注液强度	0.291	3	0.097	17.488	高度显著	高敏感
注液时间	0.189	3	0.063	11.378	高度显著	高敏感
注液孔间距	0.090	3	0.030	5.430	显著	敏感
误差	0.033	6	0.006			

根据方差分析结果,注液强度和注液时间对边坡稳定性系数的影响高度显著,为高敏感参数,注液孔间距对边坡稳定性系数的影响显著,为敏感参数,3种因素的敏感性排序为:注液强度>注液时间>注液孔间距。因此,在原地浸矿施工过程中,应重点考虑注液强度参数的选取,并通过布置合理的注液孔间距,从而保障离子型稀土矿山的安全高效生产。

### 3.6 注液参数选定

浸矿液在矿体中的渗透速度反映了溶液在矿层中的运动速度。渗透速度越快,矿石被冲刷的程度就越高,越有助于反映产物迅速离开浸出反应区,进入溶液主体,从而提高浸出效率。为研究该矿山最优注液参数,结合边坡安全系数的变化情况(表3),分析边坡在常规注液参数条件下,以及注液强度为2.3 m<sup>3</sup>/d、孔间距为1.50 m和注液强度为2.8 m<sup>3</sup>/d、孔间距为1.75 m参数条件下浸矿液在边坡内的渗透速度。考虑边坡在长时间注液下可能达到饱和状态,对注液20 d的渗透速度进行分析,结果如图16所示。由图16可知,边坡在3种参数条件下最大渗透速度分别为2.09 m/d和1.98 m/d。在注液强度为2.3 m<sup>3</sup>/d和孔间距为1.50 m条件下浸矿液在边坡内渗透速度更快,且较常规注液参数增大了0.14 m/d,由此确定注液强度为2.3 m<sup>3</sup>/d和孔间距为1.50 m是该离子型稀土矿最优注液参数。在实际工程中,该注液参数方案具有缩短浸矿周期、保障稀土元素充分浸出和降低工程成本的重要指导意义。

## 4 结论

基于某离子型稀土矿工程实际,运用Midas-GTS数值模拟软件建立了渗流—应力耦合数值模

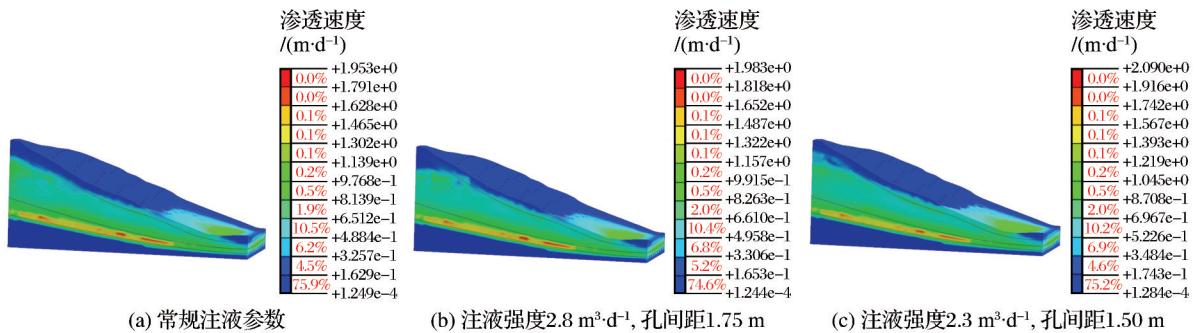


图 16 注液 20 d 浸矿液渗透速度

Fig. 16 Flow velocity of leaching solution after 20 day liquid injection

型,结合强度折减法模拟 3 种工况,分析了注液强度、注液时间和注液孔间距参数变化对边坡稳定性的影响,并对 3 种参数进行了敏感性分析,考虑不同参数下边坡的渗透速度,得到以下结论:

(1)当注液强度增大,边坡孔隙水压力整体升高,产生浮托力促使平均有效应力降低,剪应变增大,加剧边坡发生大位移滑坡,导致边坡稳定性降低。

(2)随着注液时间的延长,边坡逐渐由非饱和状态向饱和状态转化,该过程中孔隙水压力升高,平均有效应力降低,但在 30 d 时发生回升突变,剪应变增大,位移增大,最终边坡在 30 d 失稳。

(3)当增大注液孔间距时,由于孔的数量减少,渗入土体的浸矿液也减少,边坡的稳定性增强。

(4)对于边坡稳定性,注液强度和注液时间为高敏感参数,注液孔间距为敏感参数,因此在原地浸矿施工过程中,应重点考虑注液强度参数的选取,并通过合理布置注液孔间距等方式,保障离子型稀土矿山的安全高效生产。

(5)针对该离子型稀土矿山,在确保边坡稳定的前提下,确定最优注液参数:注液强度为 2.3 m<sup>3</sup>/d、孔间距为 1.50 m。该参数下注液 20 d 浸矿液在边坡内的渗透速度高达 2.09 m/d。

参考文献 (References):

Geng J B, Wang Z S, Lan X, et al, 2023. Numerical simulation and safety distance analysis of slope instability of ionic rare earth tailings in different rainy seasons [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1): 2277127.  
He B B, Sheng Y, Chou Y L, et al, 2018. Analysis of the embank-

ment stability in permafrost regions based on double strength reduction finite element method [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 189: 022022.

Kanazawa Y, Kamitani M, 2006. Rare earth minerals and resources in the world [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 408: 1339-1343.

Ma Y C, Su P D, Li Y G, 2020. Three-dimensional nonhomogeneous slope failure analysis by the strength reduction method and the local strength reduction method [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1): 21.

NIST, 2012. Handbook of statistical methods [M/OL]. Gaithersburg: NIST [2025-01-20]. <https://doi.org/10.18434/M32189>.

Sadeghi H, Kiani M, Sadeghi M, et al, 2019. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess [J]. *Engineering Geology*, 250: 89-100.

Wang H, Wang X J, Li G, et al, 2023. Weakening of mechanical parameters of ion-absorbed rare-earth ores subjected to leaching [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9(1): 124.

陈乔, 靳诚, 邓祖涛, 2022. 全球稀土贸易网络结构特征及路径演变 [J]. *地理与地理信息科学*, 38(3): 58-65. Chen Qiao, Jin Cheng, Deng Zutao, 2022. Structural characteristics and path evolution of global rare earth trade network [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 38(3): 58-65.

陈勋, 齐炎, 尹升华, 等, 2019. 溶浸作用下稀土矿力学弱化规律研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 50(4): 939-945. Chen Xun, Qi Yan, Yin Shenghua, et al, 2019. Law of weakening mechanical properties of rare earth ore with leaching [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 50(4): 939-945.

池汝安, 刘雪梅, 2019. 风化壳淋积型稀土矿开发的现状及

- 展望[J].中国稀土学报,37(2):129-140.Chi Ru'an, Liu Xuemei, 2019. Prospect and development of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 37(2): 129-140.
- 高冯,李小军,迟明杰,2020.基于有限元强度折减法的单双面边坡稳定性分析[J].工程地质学报,28(3):650-657.
- Gao Feng, Li Xiaojun, Chi Mingjie, 2020. Analysis of stability of single and double side soil slopes with fem strength reduction method [J]. Journal of Engineering Geology, 28(3): 650-657.
- 桂勇,王观石,赖远明,等,2018.原地浸矿单孔注液影响半径的计算模型[J].中国有色金属学报,28(5):1050-1058.Gui Yong, Wang Guanshi, Lai Yuanming, et al, 2018. A calculation model of influence radius of single-hole injection in in-situ leaching [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 28(5): 1050-1058.
- 郭钟群,刘琪琪,刘凌峰,等,2025.模拟降雨—浸矿条件下离子型稀土矿滑坡试验研究[J].有色金属(中英文),15(1):129-139.Guo Zhongqun, Liu Qiqi, Liu Lingfeng, et al, 2025. Experimental study on landslide simulation of ion-type rare earth mine under rainfall-leaching condition [J]. Nonferrous Metals, 15(1): 129-139.
- 郭钟群,罗飞跃,唐韬,等,2024.浸矿作用下离子型稀土典型重金属释放规律研究[J].黄金科学技术,32(6):1056-1067. Guo Zhongqun, Luo Feiyue, Tao Tao, et al, 2024. Release regularity of heavy metals of ion-type rare earth ore under leaching conditions [J]. Gold Science and Technology, 32(6): 1056-1067.
- 蒋舒,路瑞利,位伟,等,2024.原地浸矿诱发离子型稀土矿山边坡变形机制及其稳定性研究[J].武汉大学学报(工学版),57(5):545-553. Jiang Shu, Lu Ruili, Wei Wei, et al, 2024. Study on slope deformation mechanisms and stability of ionadsorption rare-earth mine induced by in situ leaching [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 57(5): 545-553.
- 李琪,秦磊,王观石,等,2021.离子吸附型稀土浸矿机制研究现状[J].中国稀土学报,39(4):543-554. Li Qi, Qin Lei, Wang Guanshi, et al, 2021. Leaching mechanism of ion-adsorption rare earth [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 39(4): 543-554.
- 彭和鹏,李馨馨,2022.考虑土层软化及渗流应力耦合的边坡稳定性分析[J].武汉大学学报(工学版),55(2):117-122. Peng Hepeng, Li Xinxin, 2022. Slope stability analysis considering soil softening and seepage-stress coupling effect [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 55(2): 117-122.
- 宋二祥,2025.饱和土不排水计算理论与方法探究[J].岩土工程学报,47(1):1-29. Song Erxiang, 2025. Theories and methods for undrained strength and deformation of saturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 47(1): 1-29.
- 孙子涵,王述红,杨天娇,等,2020.降雨条件下多层土坡入渗机理与稳定性分析[J].东北大学学报(自然科学版),41(8):1201-1208. Sun Zihan, Wang Shuhong, Yang Tianjiao, et al, 2020. Infiltration mechanism and stability analysis of multilayer soil slope under rainfall conditions [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 41(8): 1201-1208.
- 王观石,罗嗣海,胡世丽,等,2017.裸脚式稀土矿山原地浸矿渗流过程及边坡变形[J].稀土,38(3):35-46. Wang Guanshi, Luo Sihai, Hu Shili, et al, 2017. Seepage process and slope deformation of barefoot type rare earth mine in situ leaching [J]. Chinese Rare Earths, 38(3): 35-46.
- 王晓军,钟启平,胡凯建,等,2022.离子吸附型稀土矿剪切力学特性及微震信号特征[J].黄金科学技术,30(6):912-922. Wang Xiaojun, Zhong Qiping, Hu Kaijian, et al, 2022. Shear mechanical properties and microseismic signal characteristics of ionadsorption rare earth ore [J]. Gold Science and Technology, 30(6): 912-922.
- 王臻,肖仪武,冯凯,2021.离子吸附型稀土矿成矿特点及元素赋存形式[J].有色金属(选矿部分), (6):43-51. Wang Zhen, Xiao Yiwu, Feng Kai, 2021. Metallogenic characteristics and occurrence of REE in ion adsorption type rare earth deposits [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), (6): 43-51.
- 肖薇丰,秦磊,王观石,等,2022.改进单毛细上升模型确定原地浸矿中的毛细损失高度[J].稀有金属,46(2):215-226. Xiao Youfeng, Qin Lei, Wang Guanshi, et al, 2022. Determination of capillary loss height in *in situ* leaching by improving single capillary rise model [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 46(2): 215-226.
- 叶前林,马继越,2024.全球稀土贸易格局演化及竞合关系研究[J].黄金科学技术,32(1):144-159. Ye Qianlin, Ma Jiyue, 2024. Research on the evolution of global rare earth trade network pattern and the relationship between competition and cooperation [J]. Gold Science and Technology, 32(1): 144-159.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2014.建筑边坡工程技术规范:GB50330-2013[S].北京:中国建筑工业出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of

- the People's Republic of China, 2014. Technical code for building slope engineering: GB 50330-2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press.
- 钟文, 朱文韬, 曾鹏, 等, 2022. 浸矿开采对离子型稀土基岩力学特性的影响研究[J]. 岩土力学, 43(6): 1481-1492. Zhong Wen, Zhu Wentao, Zeng Peng, et al, 2022. Experimental study of the influence of leaching mining on mechanical properties of ionic earth ore floor bedrock [J]. Rock and Soil Mechanics, 43(6): 1481-1492.
- 周凌波, 王晓军, 黄成光, 等, 2020. 浸矿过程中离子吸附型稀土矿力学特性实验研究[J]. 稀土, 41(1): 26-36. Zhou Lingbo, Wang Xiaojun, Huang Chengguang, et al, 2020. Experimental research on mechanical properties of ion-adsorption rare earth in leaching process [J]. Chinese Rare Earths, 41(1): 26-36.
- 周亦良, 贺其, 李明, 等, 2023. 考虑渗流—应力耦合的不同降雨条件下非饱和土边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 42(8): 57-63. Zhou Yiliang, He Qi, Li Ming, et al, 2023. Stability analysis of unsaturated soil slope considering seepage-stress coupling under different rainfall conditions [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 42(8): 57-63.

## Study on the Influence Law of In-situ Leach Mining on the Slope Stability of a Rare Earth Ore

SHI Jingtao<sup>1</sup>, HE Wen<sup>1,2</sup>, MA Qinwei<sup>1</sup>

1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Safe and Efficient Mining of Rare Metal Resources, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China

**Abstract:** In-situ leaching is a significant factor contributing to landslide occurrences in ion-adsorption rare earth mines. To ensure the safe and efficient operation of such mines, a case study was undertaken at an ion-adsorption rare earth mine located in southern China. Utilizing numerical simulation techniques and the Midas-GTX finite element software, a three-dimensional numerical simulation model of the mine slope was developed. This model incorporated the actual in-situ leaching construction phase of the project. The study examined the effects of three leaching parameters—leaching intensity, leaching duration, and the spacing between injection holes—on pore water pressure, average effective stress, shear strain, and displacement within the slope during the in-situ leaching process. By employing the slope safety factor as a criterion, the sensitivity of liquid injection parameters to the stability of the rare earth mine slope was quantitatively assessed. Based on the overall volumetric flow rate of the leaching solution within the slope and the slope's stability status, the optimal leaching parameters for this mine were identified. The findings indicate that an increase in leaching intensity resulted in a general rise in pore water pressure, a reduction in average effective stress, an increase in shear strain, and an augmentation in displacement, collectively diminishing the overall stability of the slope. Prolonged leaching time facilitated the transition of the slope from unsaturated to saturated conditions. Throughout this transition, pore water pressure, increased while average effective stress decreased, with a notable surge occurring after 30 days. Concurrently, shear strain and displacement escalated, culminating in slope instability at the 30-day mark. Expanding the spacing between injection holes effectively reduced the number of holes and the volume of leaching solution penetrating the soil, thereby enhancing slope stability. Both injection intensity and injection duration emerged as highly sensitive parameters influencing slope stability, whereas the spacing of injection holes was identified as a sensitive parameter. Under the condition of ensuring

the stability of the slope of the ion-adsorption rare earth mines, the optimal injection parameters are an injection intensity of 2.3 m<sup>3</sup>/d, a hole spacing of 1.50 m, and an infiltration rate of the leaching solution reaching 2.09 m/d. The research findings provide significant reference value for the safe production of ion-adsorption rare earth mines and the selection of leaching conditions.

**Key words:** ion rare earth; in-situ leaching; numerical simulation; injection parameters; slope stability; flow velocity

### 四川矿产勘查和资源增储成效显著

2025年以来,四川省自然资源厅以改革方式纵深推进找矿行动,开辟重点矿种找矿项目绿色通道,持续增强矿产资源保障能力,优势战略性矿种找矿突破和增储上产成效显著。为高效推进找矿行动,四川厅采取多项措施提升改革实效:一是开辟绿色通道,实行入库审查随到随审,上半年新入库项目36个,目前在库储备项目171个,谋划部署调查评价及综合研究项目21个。二是积极探索“订单式”“众筹式”两种首创性、差别化调查模式,按矿种“一矿一策”开展找矿重点攻坚,以改革的办法纵深推进找矿行动。三是创新建立矿业权出让收益分享激励机制,与省财政厅、税务局联合印发《关于调整四川省矿业权出让收益分享比例的通知》,推动形成省、市、县共同参与找矿行动的联动格局。截至目前,矿业权出让收益分享激励机制已调动市县出资2.79亿元参与找矿,资源能源基金成功投资大村煤矿项目3.5亿元。战略性矿产资源勘探增储成效显著,其中,马尔康市加达锂矿勘探新增锂资源量约60万t,达到大型规模;青川县毛湾里锰矿探获资源量462.8万t,单矿体资源量为近十年省内第一。同时,四川厅科学有序投放矿业权,集中推介优势矿产区块,上半年出让区块55宗,油气矿业权出让收益历史欠费征收实现“零突破”;着力提升矿产资源综合开发利用水平,提出集矿山建设、产业导入、耕地保护、生态修复、共同富裕“五位一体”的综合开发利用思路,开展年度矿产资源开发利用水平调查评估,进一步强

化资源节约和综合利用。

(来源:中国自然资源报)

### 湖北上半年新发现15处矿产地

7月10日从湖北省地质局传来消息,该局上半年新发现15处矿产地、25处找矿靶区,同比均实现大幅增长,并超额完成目标。湖北省地质局上半年共实施144个找矿项目,资金投入的精准发力,让找矿的“探头”越探越深。

在新能源与清洁能源矿产领域,该局勘查工作取得重要进展,鄂恩页2HF井返排加快,来凤县金龙沟地热一井井口水温43℃,每日流量2352 m<sup>3</sup>,为绿色发展添“底气”。建筑用石料、饰面石材等民生矿产勘查成果丰硕,砖瓦用页岩、硅石矿等资源储备充足,南漳县桑树垭查明大型建筑石料用灰岩矿,资源量约2.86亿t;麻城市张家河查明石英岩矿资源总量1107.2万t等,为地方建材、制造业注入“源头活水”。据介绍,湖北省财政资金发挥“指挥棒”重要作用,吸引地方财政和社会资金2.86亿元共同参与找矿,形成多元投入格局。

湖北省地质局地勘处相关负责人表示,这些找矿成果将成为地方产业发展的“推进器”,为区域经济高质量发展提供了坚实的资源保障。

目前,该局正紧盯国家战略需求,以鄂西页岩气、鄂西北铀钍稀土、鄂东南铜铁金和幕阜山锂铍钨钽4个国家级能源资源基地建设为核心载体,调整优化找矿工作布局,提升战略性矿产资源保障能力。

(来源:湖北日报)