

卢林胜, 陈世万, 蔡良钧, 等. 岩溶区赤泥尾矿库渗漏-固结过程模拟试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 214-227. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.017

LU Linsheng, CHEN Shiwan, CAI Liangjun, et al. Simulation research on the leakage and consolidation process of red mud tailings in karst area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 214-227. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.017

岩溶区赤泥尾矿库渗漏-固结过程模拟试验研究

卢林胜¹, 陈世万^{1,2}, 蔡良钧³, 罗勇飞³, 李建章³, 田浪¹, 吴攀^{1,2}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州铝厂有限责任公司, 贵州 贵阳 550058)

摘要:【目的】研究岩溶区复杂补水条件下赤泥库渗漏和固结过程, 对岩溶区赤泥库渗滤液渗漏防治具有重要意义。【方法】以贵州扎塘赤泥库为例, 采用自研的尾矿库固结渗漏模拟试验装置, 提出了赤泥固结过程测量方法。开展了赤泥尾矿库自然固结、地下水侧向渗漏、地表渗漏3种典型工况下, 赤泥库固结及渗漏模拟试验。【结果】结果表明: (1)单一渗漏无渗漏工况下, 赤泥将在库内逐渐完成固结, 渗滤液在较短时间内可完全排泄。(2)在侧向渗漏工况下, 赤泥库表现出典型的孔隙-裂隙双重介质性质, 地下水沿赤泥库内形成的裂缝快速运移至各部位, 为赤泥内孔隙吸水提供水源。在存在侧向渗漏的条件下, 赤泥固结程度快速降低, 后期固结过程缓慢, 达到一个缓慢固结-不固结的平衡态。(3)在降雨渗漏工况下, 库内赤泥沿裂缝快速入渗。降雨渗漏过程中赤泥固结程度在降雨初期快速降低后保持平稳, 赤泥固结程度受排水影响明显。【结论】总体上, 研究了岩溶区复杂补水条件下库内赤泥固结和渗漏特征, 为针对性渗滤液渗漏防止提供了支撑。

关键词: 赤泥; 尾矿库; 渗漏; 模拟试验; 固结; 降雨; 岩溶区; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0214-14



Simulation research on the leakage and consolidation process of red mud tailings in karst area

LU Linsheng¹, CHEN Shiwan^{1,2}, CAI Liangjun³, LUO Yongfei³, LI Jianzhang³, TIAN Lang¹, WU Pan^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Guizhou Aluminum Plant Co., Ltd., Guiyang 550058, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] Studying the seepage and consolidation processes of red mud storage facilities under complex recharge conditions in karst areas is highly significant for preventing and controlling leachate seepage in these regions. [Methods] Using the Zhatang Red Mud Storage Facility in Guizhou as a case study, a self-developed experimental apparatus for simulating consolidation and seepage in tailings ponds was built, and a method was proposed to measure the red mud consolidation process. Simulation experiments on the consolidation and seepage of the red mud storage facility were conducted under three typical

收稿日期: 2024-08-01; 修回日期: 2024-12-02; 录用日期: 2024-12-11; 网络出版日期: 2025-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1805300); 贵州省重大科技成果转化项目(黔科合成果[2023]重大006)

作者简介: 卢林胜(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程研究。E-mail: 1043121674@qq.com

通信作者: 陈世万(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩石力学方面研究。E-mail: swchen@gzu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

conditions; natural consolidation of red mud tailings, lateral groundwater recharge, and surface recharge. [Results] The results show that: (1) Under conditions of seepage without recharge, the red mud gradually completes consolidation within the storage facility, and the leachate is entirely discharged in a short time. (2) Under lateral recharge conditions, the red mud storage facility exhibits typical pore-fracture dual media properties. Groundwater rapidly moves along fractures formed within the facility to various parts, supplying water for the pores in the red mud to absorb. In the presence of lateral recharge, the degree of red mud consolidation decreases rapidly, and the subsequent consolidation process slows down, reaching an equilibrium state of slow or non-consolidation. (3) Under rainfall recharge conditions, the red mud inside the storage facility rapidly infiltrates along fractures. During rainfall recharge, the degree of red mud consolidation decreases rapidly at the initial stage and then remains stable; the consolidation degree is significantly affected by drainage. [Conclusion] Overall, the consolidation and seepage characteristics of red mud within storage facilities under complex recharge conditions in karst areas were investigated, providing support for targeted prevention of leachate seepage.

Keywords: red mud; tailings reservoir; leakage; simulation test; consolidation; rainfall; karst areas; influencing factors

0 引言

我国南方岩溶区水文地质条件复杂, 地下岩溶通道发育, 地下水污染问题突出^[1]。由于岩溶空间的大小、形态、填充特征及空间分布高度非均匀性, 使地下水及污染物在介质中的迁移过程极为复杂^[2]。

由于缺乏勘察论证或受限于地质条件, 一些尾矿库选址未避开岩溶发育区^[3], 尾矿中的渗滤液在降雨淋滤和岩溶地下水渗漏下, 沿岩溶通道进入地下水, 造成区域性的地下水污染^[4]。为研究尾矿库渗漏污染特征, 吴慧群^[5]研究尾矿库岩溶渗漏问题, 总结出以岩溶裂隙、裂隙系统渗漏类型为主的尾矿库, 渗漏污染的影响范围较广。曲晨豪^[6]研究黔中龙井湾磷石膏尾矿库渗漏污染, 发现地表岩溶发育程度较高的尾矿库中污染物迁移方向与优势裂隙发育方向基本一致。彭展翔等^[7]研究发现库底众多的落水洞和消水洞等构成了区域地下水的污染渗漏点是造成摆纪磷石膏堆场渗漏的关键因素。高岩^[8]通过研究岩溶区赤泥尾矿库渗漏污染过程, 发现地下水侧向渗漏经过断层破碎带溶蚀后所形成的岩溶管道和裂隙, 使得库区渗滤液流量大、流速快。杨康康^[9]分析鲁塘尾矿库岩溶发育特征, 发现库区溶洞上部较破碎岩层, 易因尾矿库的扩容极坍塌, 引起新的渗漏。GAO等^[10]研究锡金属尾矿库对下伏岩溶水系统的影响, 证实了尾矿库渗漏污染的严重性。陈维孝^[11]研究晴隆尾矿库铊的释放及其在岩溶地下河中的水文地球化学行为, 发现岩溶地下水系统中的常见离子、碳酸盐岩对Sb的迁移转化有显著影响。张军以等^[12]对西南岩溶地区地下水污染现状及特点进行了调查分析, 总结了岩溶地区特殊的地表地下“二元三维”储水结

构及发达的管网系统, 使地下水污染不同于一般平原地区, 监测治理难度更大。

当前我国主要尾矿库类型有赤泥库、锰渣库、磷石膏库等, 其中赤泥是氧化铝生产过程中产生的固体废弃物, 全球年产量超过1.2亿t^[13]。目前我国赤泥堆存量已超过数亿吨, 不仅要投入大量资金进行堆存, 周边生态环境还因其强碱性特征而受到影响^[14]。铝土矿的提炼主要有拜耳法和烧结法两种^[15], 产物之一的赤泥属于高黏度、高浓度的非沉淀、固液两相流动的物质^[16]。目前赤泥的综合利用主要在新型建筑材料、环境修复、硅钙复合肥和塑料填料等领域^[17]。由于赤泥量大, 国内主要以堆填存放为主, 不仅占用土地, 造成的环境问题日益严重^[18], 主要体现在赤泥渗滤液污染物超标、影响范围广、污染严重方面。SUN等^[19]研究发现赤泥渗滤液中Al、Cl⁻、F⁻、Na、NO₃⁻和SO₄²⁻的浓度严重超出我国地下水质量标准。刘继东等^[20]研究发现, 赤泥经酸雨淋溶后溶出重金属并滞留在土壤中。杨芳^[21]研究赤泥中的NaOH、铝酸钠、NaCO₃等可溶性碱溶于地下水的过程, 发现形成的渗滤液呈强碱性, 具有较强的穿透特性和腐蚀性^[22]。QI等^[23]利用GMS软件模拟分析裂隙岩溶水文地质条件下赤泥引起的氟污染物运移规律, 发现随着时间的延长, 污染物的迁移和扩散速度减慢, 扩散量先增大后减小。

模拟试验是地下水污染研究领域的重要研究手段。MA等^[24]通过物理模型试验研究了排水条件下尾矿库矿渣固结特征, 发现在固结过程中, 从胶结尾矿泥浆中排出的孔隙水比未胶结的尾矿泥浆多。罗炳雄^[25]以高含水量的铝土尾矿泥浆为研究对象, 研究赤泥沉积固结特性, 发现沉积固结后的赤泥物理参数沿深度方向上均具有不同程度的逐级分段、

各级相对独立变化的特性。LI 等^[26]以广西平果赤泥尾矿库为原型, 研究逐层填埋赤泥的固结特性, 发现赤泥排水固结分为赤泥与水分层形成表面积水, 以及缓慢排水两个阶段。刘家旭^[27]研究磷石膏堆场渗滤液运移发现, 渗滤液入渗后在重力、毛细力、水头压力作用下同时进行垂向入渗和横向扩散, 在均匀介质中呈“锥形”入渗。可见, 当前研究主要集中在尾矿库渗滤液地下水污染过程和污染特征研究, 对岩溶区尾矿库赤泥固结和渗滤液析出过程研究较少。采用湿法堆填的赤泥尾矿库, 李明^[28]通过研究赤泥堆积坝稳定性, 发现赤泥固结排水过程会改变库区内部结构。赤泥堆体结构变化会影响渗滤液渗漏污染特征, 研究矿渣固结特征有助于解析尾矿库渗漏污染机理。

为研究岩溶区复杂补水条件下, 赤泥固结和渗滤液析出的过程, 提出了赤泥库固结-渗漏模型实验中赤泥固结程度测试方法, 并研发了赤泥库固结-渗漏模拟实验装置, 开展了种工况下赤泥尾矿库固结-渗漏模型试验, 为岩溶区赤泥尾矿库渗滤液地下水污染科学防治提供支撑。

1 扎塘赤泥库水文地质条件

1.1 研究区水文地质特征

研究区地下水类型有碳酸盐岩裂隙岩溶水、基岩裂隙水及第四系孔隙水 3 种类型。根据前期在本库区开展的水文地质调查工作^[29], 查明了该库区大气降水和岩溶地下水侧向渗漏明显; 同时, 研究区地下水的径流与排泄受地质构造、地层岩性、地形地貌的控制。库外主要渗漏点为煤么冲和大麻窝, 通过物探和钻孔验证查明了渗滤液主要径流通道, 以及侧向地下水渗漏源。如图 1 所示, 研究区落水洞主要集中于库区西北侧到大麻窝和陆家湾渗漏点, 大气降雨通过落水洞和侧向渗漏汇入地下水, 使得大麻窝和陆家湾漏点渗滤液流量较大, 库区南部由于存在较多断层和地表渗透系数较大, 大气降雨作用明显, 煤么冲漏点渗漏量较大, 且枯水期仍有大量渗滤液渗漏, 侧向渗漏明显。

1.2 研究区赤泥堆积和渗滤液污染特征

根据勘察报告^[30], 库区选址为近似半径 800 m 的岩溶洼地, 中部赤泥堆填最深, 为 79 m, 库底赤泥接触地层多为填土和泥岩。库区内采用湿法堆填烧结法和拜耳法两种赤泥, 烧结法赤泥塑限为 38.7, 粒径大小在 0.35~9.86 μm 范围内, 拜耳法赤泥塑限为 35.7, 粒径大小在 0.28~5.92 μm 范围内, 密度均为 1.6 g/cm³, 钻孔揭露赤泥含水率在深度上较不均匀, 靠南部煤么冲漏点的赤泥含水率较高。

在钻孔和渗漏点采取渗滤液水样(钻孔布置见图 1), 测试渗滤液成分如表 1 所列。结合取样位置分析, 库区内部和南部边缘渗滤液 pH 较高, 呈强碱性, 库区北部相对较低; 库区南部因为库内早期填埋部分生活垃圾, 所以煤么冲渗漏点渗滤液氨氮含量较高。

2 赤泥尾矿库固结过程模拟试验

2.1 试验准备

根据矿物成分和粒度分析成果, 赤泥与土的物理力学性质类似, 为解决库内赤泥在不同深度荷载作用下固结过程表征问题, 在常规固结试验基础上, 提出一种锥入法用于对赤泥固结度进行标定[见图 2(a)]。通过赤泥固结过程标定方法为赤泥尾矿库固结过程模拟试验中赤泥固结程度测定提供依据。

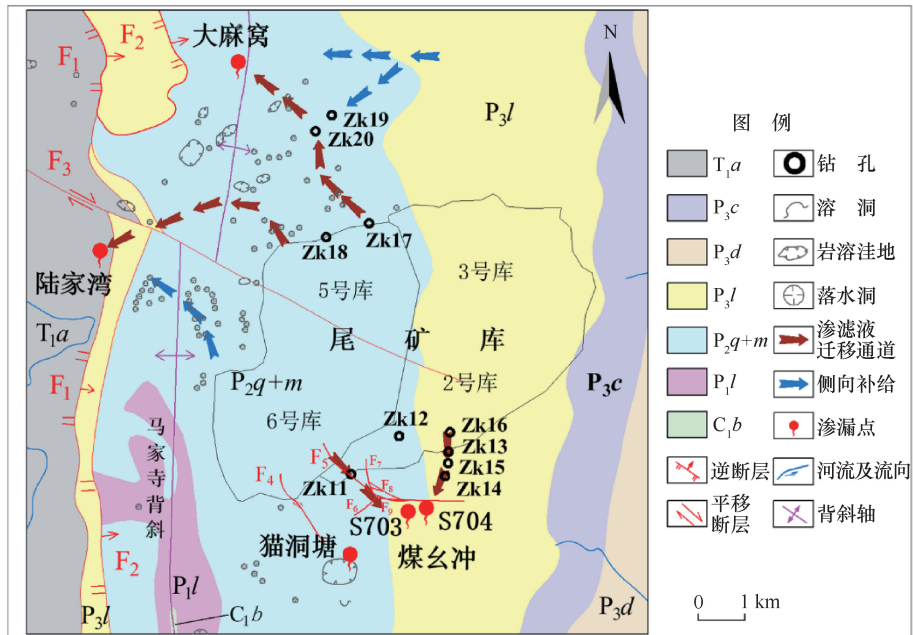


图 1 扎塘赤泥库区水文地质概况

Fig. 1 Hydrogeological map of the Zhatang Red Muddy Reservoir area

表 1 库区钻孔及部分水样成分表

Table 1 Composition table of boreholes and some water samples in the reservoir area

采样编号	pH	硫化物 /mg · L ⁻¹	氨氮 /mg · L ⁻¹	总氮 /mg · L ⁻¹	化学需氧量 /mg · L ⁻¹	色度/度	氟化物 /mg · L ⁻¹
Z11	13.6	1.83	129	290	3 077	100	0.71
Z14	11.8	0.24	76.9	105	7 543	20 000	5.15
Z15	12.8	2.35	256	561	385	5	0.28
Z16	11.5	0.08	393	511	369	25 000	0.28
Z17	12.6	0.32	47.2	118	2 037	12 500	2.70
Z18	9.1	0.09	0.376	2.00	15	30	0.40
Z19	7.6	0.05	0.329	0.79	17	5	0.21
煤玄冲漏点	12.2	0.01	68.0	98.7	417	7 500	1.33

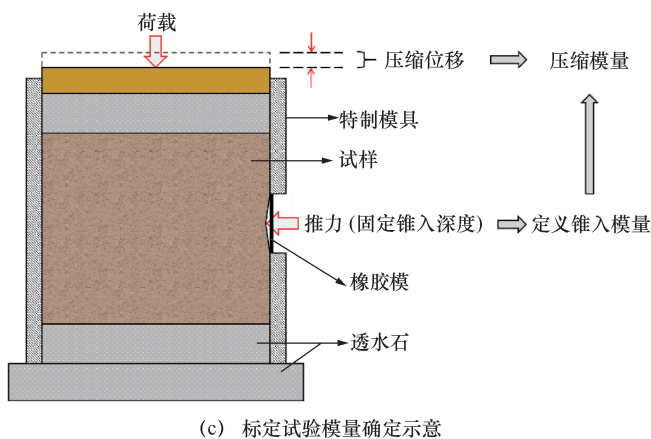
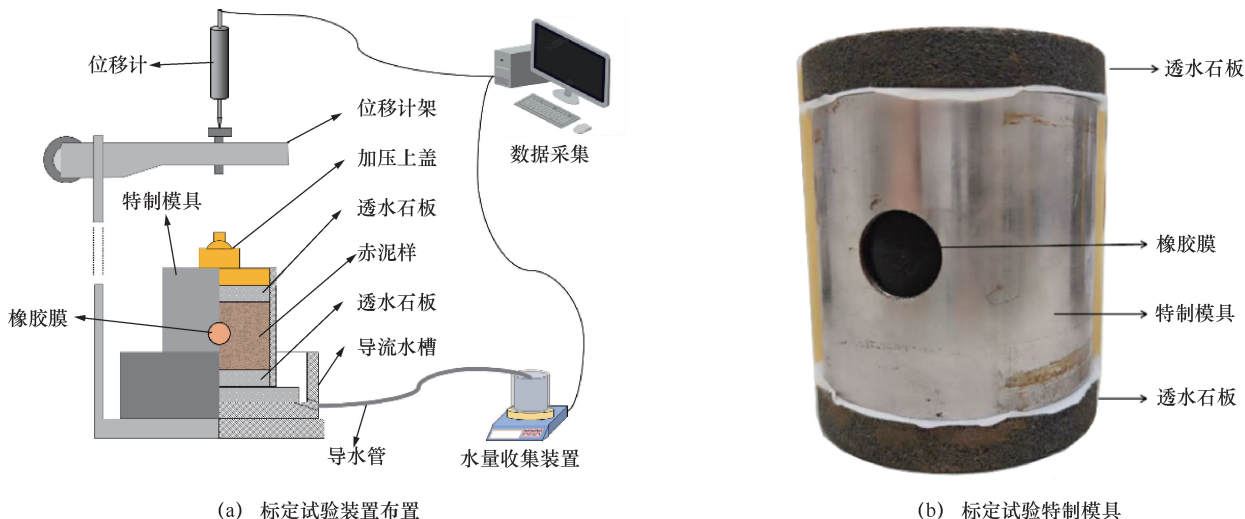


图 2 赤泥固结过程标定试验装置

Fig. 2 Calibration test device for red mud consolidation process

如图 2(b) 所示, 设计制作 61.8 mm×60 mm 圆柱筒, 在其 30 mm 高度处开直径为 20 mm 的圆孔, 并采用 2 mm 厚橡胶膜封堵圆孔, 形成特制的导环开展赤泥固结过程标定试验。

如图 2(c) 所示, 在赤泥固结试验过程中, 通过推力计在橡胶膜中心向赤泥锥入固定深度 (5 mm), 读取需施加的力荷载。在分级加载固结试验中各荷载

条件下均开展锥入试验, 获得固结过程中赤泥压缩模量与锥入荷载 (锥入变形模量) 之间的关系, 以用于赤泥库内模型试验中固结程度表征。

参考土的固结试验方法步骤^[31]进行试验, 选择单杠杆固结仪 1 : 10 比例加压, 一共加荷载 6 次, 分别为 10.42 kPa、20.84 kPa、41.26 kPa、82.91 kPa、166.21 kPa、332.81 kPa。试验过程中, 以终端监测

的形式以每秒 1 次的频率监测排出总水量和位移数据; 施加每级压力后记录推力计推入 5 mm 所示推力值, 施加每一级压力后按下列时间顺序测记数据变化: 30 s、1 min、1 min 30 s、2 min、4 min、7 min、10 min、15 min、20 min、30 min、60 min、90 min、120 min, 至稳定再加下一级荷载。

如图 3 所示, 在每次增加荷载时, 排出水量、推力值和变形量都会发生突变, 且增量随荷载的增加逐渐减小, 各曲线总体呈阶梯状增长。

根据标准^[31]计算压缩模量。如图 4(a)所示, 为量化固结过程锥入试验结果, 定义锥入模量 E 为

$$E = \frac{F}{\Delta L} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, F 为推力(N); L 为位移(m)。

根据试验结果, 建立锥入模量 E 和压缩模量 E_s 的关系, 通过拟合得到标定模量 E' 为

$$E' = (a \times p_i + b) \times E \quad (2)$$

式中, E' 为标定模量(MPa); E 为锥入模量(MPa); p_i 为第 i 级荷载(kPa); a 、 b 为系数, $a = 13.2$, $b = 561.24$ 。

通过标定式(2)可将锥入模量 E 转化为标定模量 E' [见图 4(a)], 在试验中除第一阶段荷载外, 标定模量与压缩模量误差均在 5% 以内[见图 4(d)]。

2.2 试验装置

为研究赤泥固结渗漏特征, 采利用现场所取赤泥样作为堆填材料, 采用库区建库时赤泥分层堆填的方法, 按照库区内赤泥堆填范围搭建 1:800 的物理模型, 研究赤泥库在不同工况下的固结和渗漏过程。实验过程中通过调整补水口和排水口位置模拟不同位置地下水渗漏及渗漏条件; 通过降雨模拟装置模拟大气降雨渗漏; 采用锥入法测定库内赤泥的固结程度; 并在库内布置水压传感器监测不同工况下赤泥固结过程水压演化。根据试验现象、排出水量、赤泥内部水位变化、固结程度变化等数据分析赤泥尾矿库渗漏污

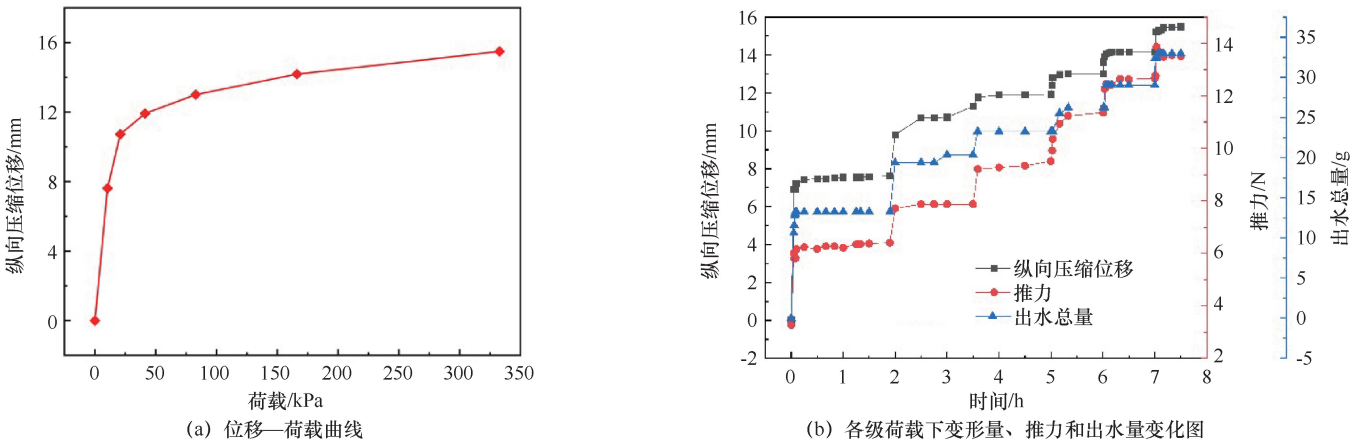


图 3 固结过程试验结果

Fig. 3 Consolidation process test results

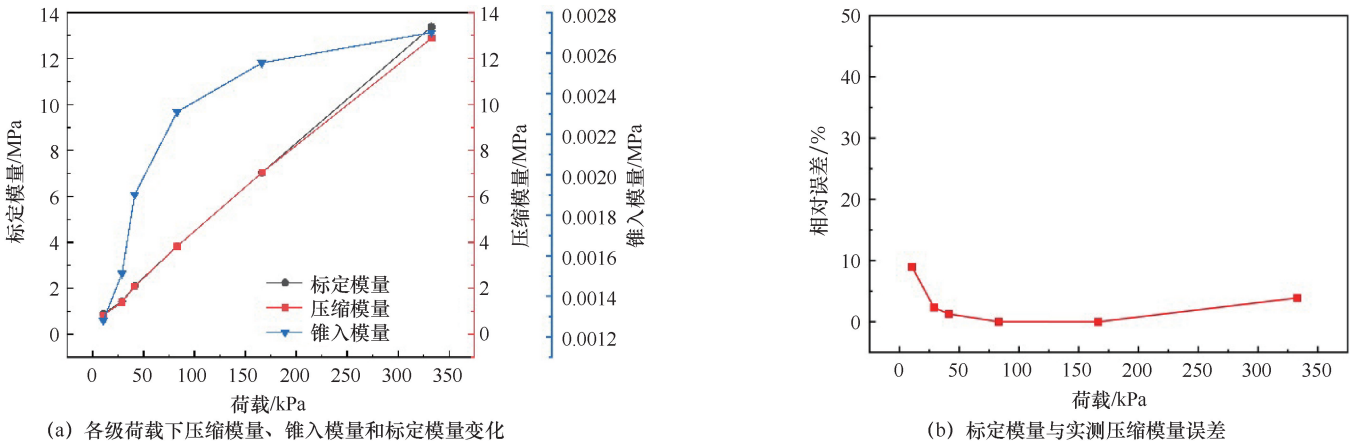


图 4 固结过程赤泥材料变形模量结果

Fig. 4 The results of the deformation modulus of the red mud material during the consolidation process

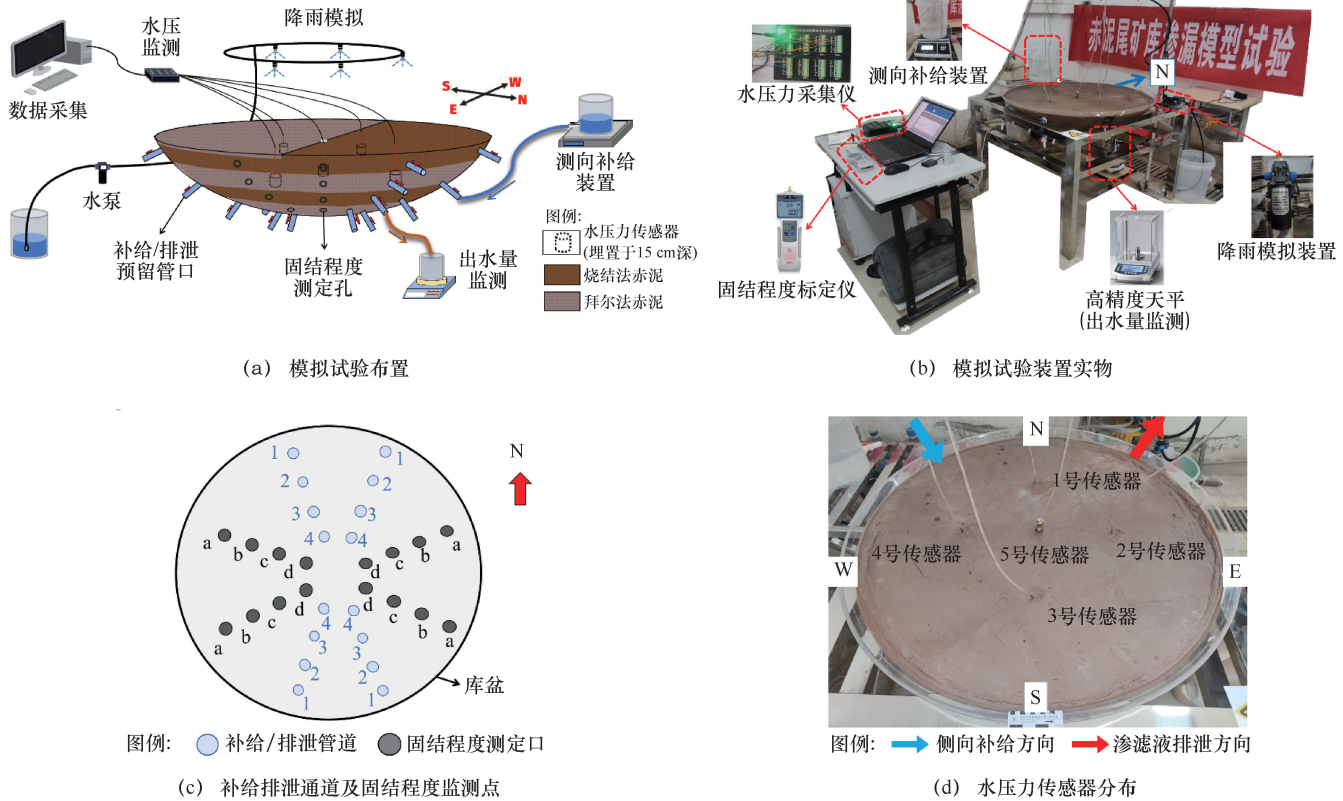


图5 赤泥尾矿库固结过程模拟试验装置

Fig. 5 Simulation test device for consolidation process of red mud tailings pond

染机理。

赤泥尾矿库固结过程模拟试验装置如图5(a)和图5(b)所示,该装置包含:尾矿库库盆、渗滤液测量系统、水压监测系统、固结程度测量系统、侧向渗漏模拟系统、降雨模拟系统共6个部分。尾矿库库盆为直径1.2 m,最大深度0.3 m的洼地模型。在模型主体边缘每隔45°的方向上,各方向纵向每隔7.5 cm开直径为2 cm的孔洞,用于渗漏或排泄,以及赤泥固结程度测定,其中固结程度测定孔大小和所用橡胶膜规格与标定实验保持一致,测试孔和渗漏排泄通道编号如图5(c)所示。试验过程中水压传感器布置如图5(d)所示,为便于表述,在模型上标注方向。

2.3 试验方法和步骤

赤泥库固结及渗漏模拟试验步骤如下。

(1)将已经固结成块的烧结法赤泥磨碎,过80目筛,拜耳法赤泥样因为松散状,不做研磨处理。

(2)库区建库时堆填赤泥为饱和状态,故将烧结法赤泥和拜耳法赤泥样配置为饱和状态,互层堆填入模型库盆中,每层高度5 cm,共计5层,且层面保持水平,底部为烧结法赤泥,顶部北半圆为拜耳法赤泥,南半圆为烧结法赤泥;堆至10 cm高度处,在模

型中心透水管中和东南西北四方个方向25 cm处放置1—4号水压传感器;在库盆中心放置一竖直透水管,放置5号传感器,高度与其他传感器一致。

(3)将渗滤液测量系统、水压监测系统、固结程度测量系统、侧向渗漏模拟系统、降雨模拟系统等设备连接。

(4)结合库区建库时堆填赤泥自然固结、地表硬化、硬化地表出现裂缝的发展顺序和库区渗漏较早,流量较大的特点。按单一渗漏式、侧向补给-渗漏式、降雨补给-渗漏式3种典型工况顺序模拟试验,试验条件和主要监测参数如表2所列。

在每个工况试验过程中,每隔6 h记录模型东偏南、东偏北、西偏南、西偏北四个方向,共计16个橡胶膜封孔处的固结程度,根据埋深,计算各固结程度测定孔所在赤泥层所受荷载分别为0.42 kPa、1.66 kPa、2.92 kPa、4.17 kPa;每个工况试验不少于5 d。

3 试验结果分析

3.1 单一渗漏式试验结果

3.1.1 试验现象

如图6所示,在单一渗漏式试验中,随着排出水

量增加, 赤泥表面出现干缩裂缝; 当表面积水流失完后部分位置开始有白色碱性物质析出。随着赤泥的固结和渗滤液渗漏, 模型中心偏西 40 cm 逆时针至中心偏南 35 cm 弧型路径上和中心偏东 50 cm 出现少量裂缝, 随着固结过程和渗滤液的排出裂缝逐渐增加、扩大、延长。赤泥干缩形成裂缝所处区域如图 6(b) 所示, 分别为 1 号和 2 号裂缝群以及沿着环向发育的 3 号和 4 号裂缝。

3.1.2 渗滤液渗滤及水压演化

在单一-渗滤式试验中, 堆入的赤泥呈饱和未固结状态, 内部孔隙水分布均匀, 开启出水口阀门后即刻有渗滤液泌出, 随库内赤泥自然固结过程, 渗滤液排出量逐渐减少, 直至 60 h 后无渗滤液析出, 共收集排出渗滤液 2 690 g, 如图 7(a) 所示。

如图 7(b) 所示, 试验初始时, 模型内各传感器水压从小到大依次为: 北侧 1 号、东侧 2 号、西侧

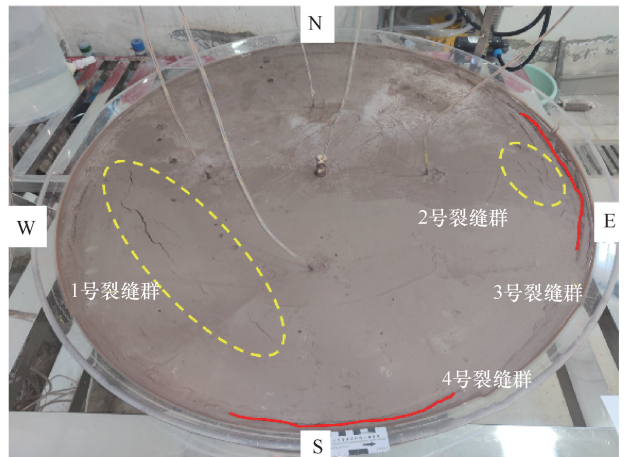
表 2 赤泥固结渗滤模拟 3 种工况

Table 2 Simulation of red mud consolidation and leakage under three working conditions

顺序编号	工况名称	模拟条件	控制条件	监测参数
1	单一-渗滤式试验	无渗滤	饱和赤泥堆填; 北偏西 2 号口出水	渗滤量、压缩模量、水压
2	侧向补给-渗滤式试验	侧向渗滤	侧向渗滤水量(北偏西 2 号进水口); 北偏东 3 号口出水	补给量、渗滤量、压缩模量、水压
3	降雨补给-渗滤式试验	降雨渗滤	降雨量; 北偏东 2、3、4 号口依次出水	降雨量、渗滤量、压缩模量、水压



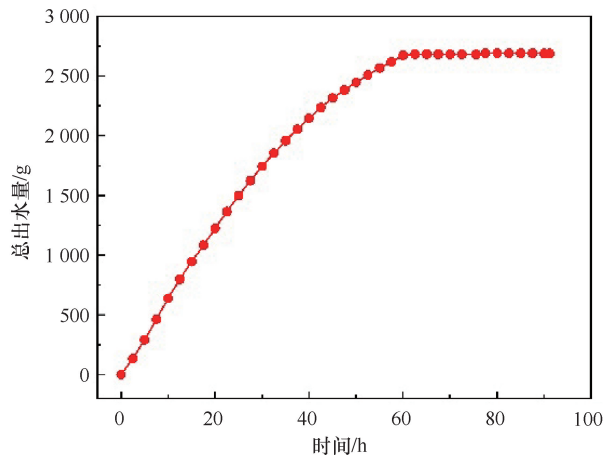
(a) 赤泥干缩产生裂缝



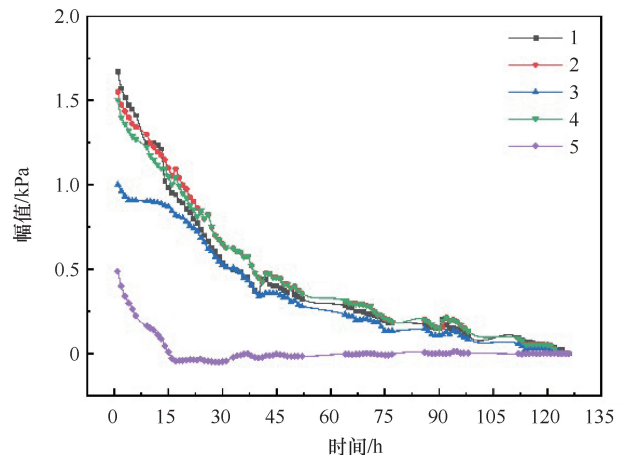
(b) 赤泥表面裂缝分布

图 6 单一-渗滤式试验现象

Fig. 6 Single leakage test phenomenon



(a) 渗滤液渗滤变化曲线



(b) 水压演化曲线

图 7 渗滤液渗滤量变化及水压演化

Fig. 7 Variation of leachate leakage and water pressure evolution

4号、南侧3号、中心5号。

靠近渗漏点的1号传感器水压数值下降速率较快,在40h左右下降速率减缓;2号传感器和4号传感器水压数值下降速率基本一致;3号传感器前期下降速率相对较缓,且在5~15h内数值有一定增长;5号传感器测试模型中的自由水下降速率很快,且在15h时降为负压,随后缓慢升回0压强值。在100h左右,埋入赤泥中的传感器水压数值有一定增长,随后降低,直至降为接近0kPa。

3.1.3 单一渗漏式试验固结程度演化过程

根据式(5),将锥入法测定数据转为压缩模量如图8所示。在赤泥固结排水过程中,随着渗滤液的排出,各位置处的赤泥固结程度整体呈增长趋势,且总体上表现为,埋深越大,固结程度越快,且在渗滤液排干后期,均出现快速固结阶段。由于b测量点位于排水层,其受排水影响显著。

3.2 侧向补给-渗漏式试验结果

3.2.1 试验现象

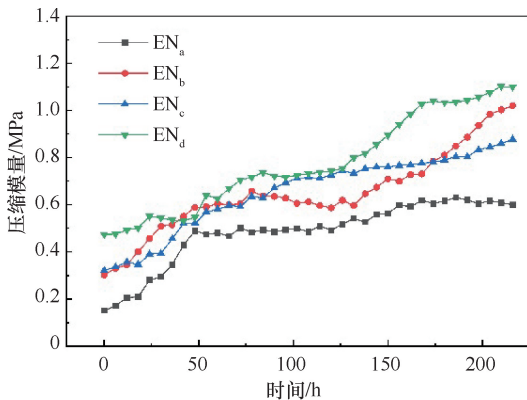
在单一渗透式试验后开展侧向补给-渗漏式试验,如图9(a)所示,试验开展前赤泥表明已存在较

多裂缝群。采用恒定水头进行侧向补给模拟,水位与侧向补给管口高差27cm,与赤泥表面高差为12cm。开启阀门后,水流迅速灌入冲蚀赤泥,补给20min后从补给孔正上方10cm处的孔洞流出,2h左右于赤泥表面裂缝流出。水压作用下,补给口附近被冲蚀形成冲蚀管道,同时补给水在赤泥裂缝网络中快速运移,补给进入赤泥库内。总体上,地下水对赤泥侧向补给条件下,存在优势通道使地下水快速运移。

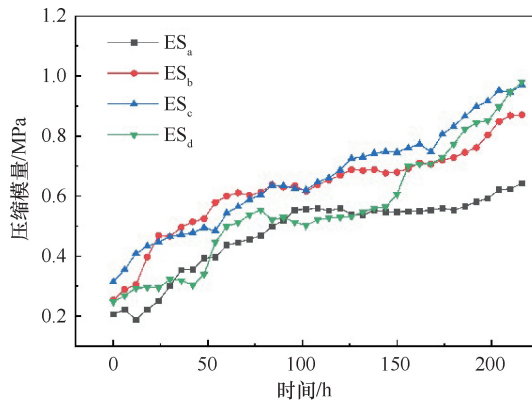
3.2.2 补水量、排水量及水压演化

如图10(a)所示,试验开始时,模型内赤泥含水率低,赤泥呈固结的块状,由于干缩裂缝的存在,补给水冲蚀赤泥,补给流量为8.66 mL/min,随着赤泥堆中水位的上升,补给流量逐渐降低,5h时流量降低接近0 mL/min,后略微上涨,在14h后几乎无补给。在前30h少量渗滤液经出水口排出,赤泥吸水饱和后,出水量快速增加并处于一个较稳定的出水量,在120~180h时间内流速减缓,直至明显出水。180h后出水量再次增加至一个稳定出水量。总体上,排泄流量处于轻微波动状态。

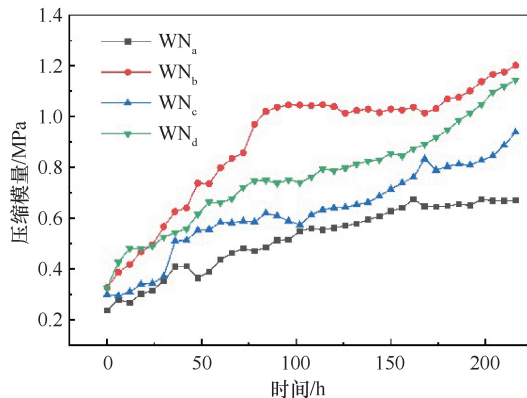
如图10(b)所示,侧向补给水流入赤泥堆体后,



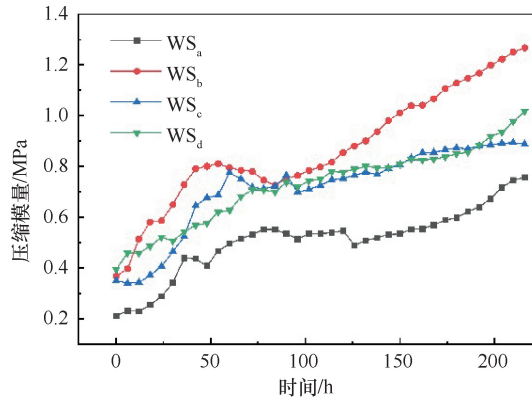
(a) 东偏北向各层赤泥固结程度变化曲线



(b) 东偏南向各层赤泥固结程度变化曲线



(c) 西偏北向各层赤泥固结程度变化曲线



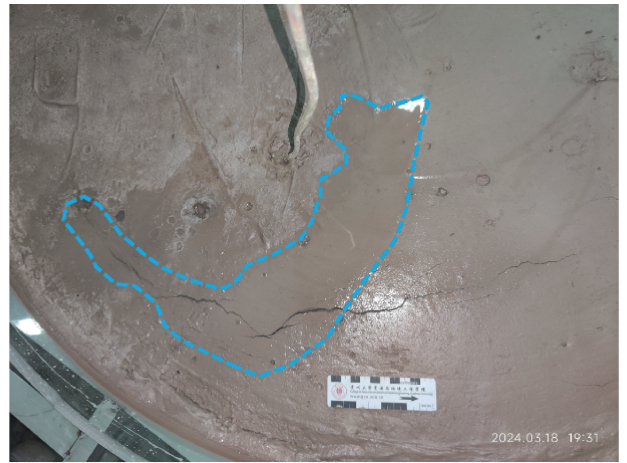
(d) 西偏南向各层赤泥固结程度变化曲线

图8 单一渗漏式试验不同位置固结程度变化

Fig. 8 Variation of the degree of consolidation at different locations in a single leakage test



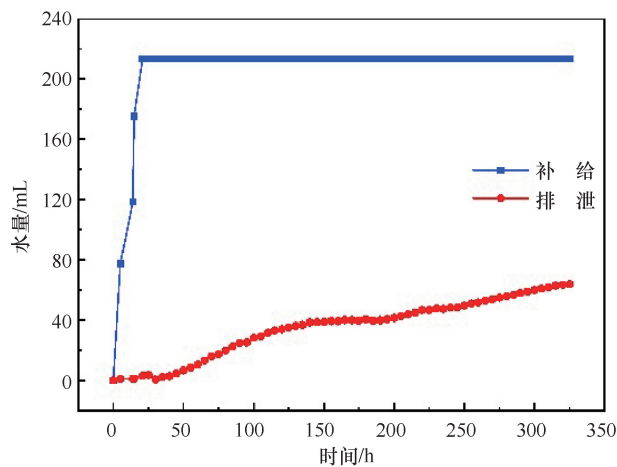
(a) 侧向补给冲蚀成孔



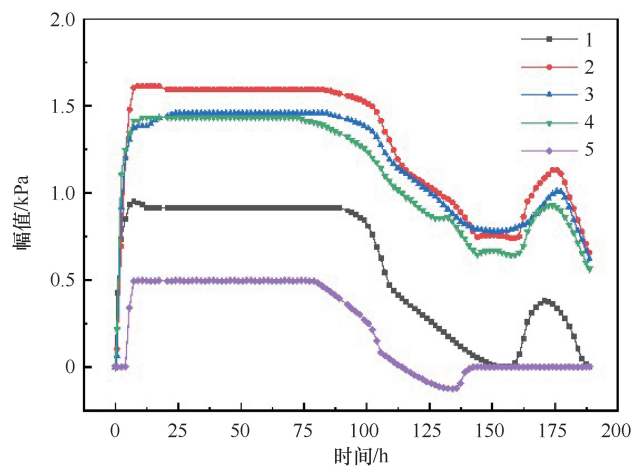
(b) 补给水由裂缝漫出

图9 侧向补给-渗漏式试验现象

Fig. 9 Lateral feed-leakage test phenomenon



(a) 侧向补给和排泄总水量变化



(b) 模型内部水压变化

图10 侧向补给和排泄总水量变化曲线

Fig. 10 Curves of total lateral recharge and excretion of water

由于1、2、3、4号水压传感器埋置于补水口同层赤泥中, 赤泥内含有大量裂隙和孔隙, 补给水沿着主通道裂隙快速运移, 并快速填满赤泥内的孔隙, 各传感器压力响应迅速; 而中心管内为赤泥饱和后的自由水压, 5号传感器响应时间相对滞后。1号传感器靠近出水口, 补给水灌入导致水压上升, 而后水流至出水口开始排水, 靠近补给和出水口区域水位降低; 在10~80 h时间段里, 补给水量与排泄水量近乎一致, 因此各处水压稳定; 而后赤泥饱和, 接收侧向补给量降低, 逐渐进入赤泥固结排水阶段, 水压开始降低; 当靠近补给区的水位降至临界值时, 补给水进入赤泥库, 各处水压力升高。总体上, 由于库内赤泥处于补给-排泄的动态平衡状态, 因此排水流量处于动态变化状态。

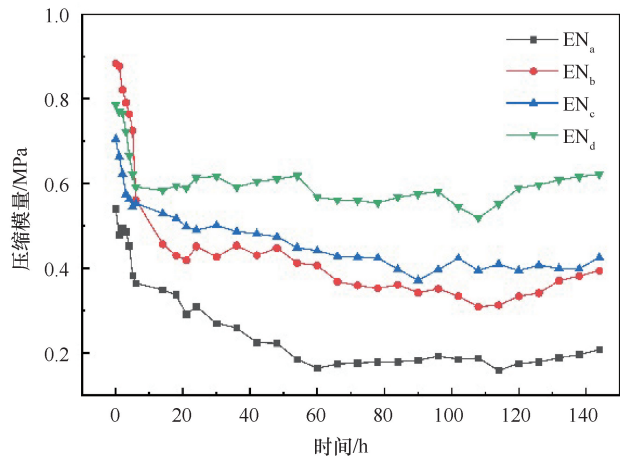
3.2.3 侧向补给-渗漏式试验固结程度演化过程

如图11所示, 随着侧向补给水量的增加, 各方向上不同深度赤泥压缩模量迅速降低, 均在约5 h后达到相对稳定状态。受荷载影响, 各方向赤泥层压缩模量随深度增加而增加。由于补给和排水口分别位于b孔和c孔所在赤泥层, 受补给水和渗滤液流动影响, 这两层赤泥压缩模量较接近。

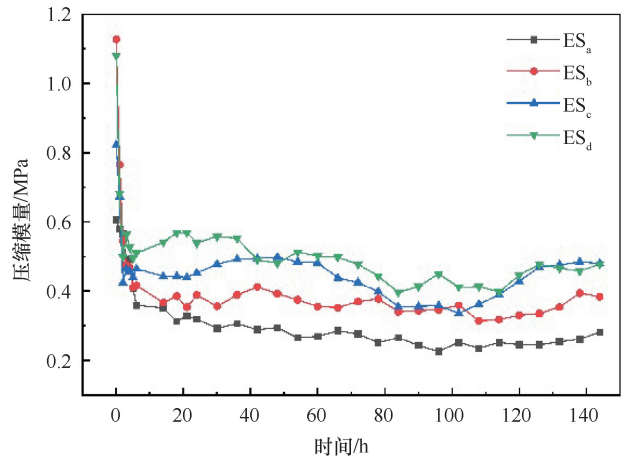
3.3 降雨补给-渗漏式试验结果

3.3.1 试验现象

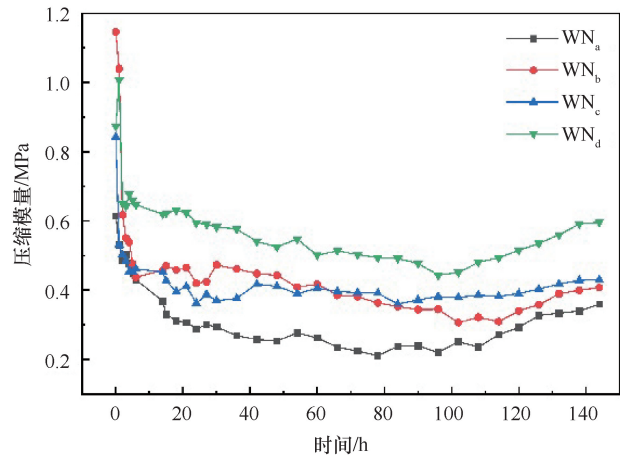
如图12所示, 在结束侧向补给-渗漏式工况试验后, 赤泥表面东西两侧出形成约100 cm, 最大宽度达0.5 cm的环向张拉裂缝。在第一次降雨时, 模型表面被大量雨水覆盖, 积水快速下渗使得内部气体被挤出, 形成气泡。前两个工况的干湿循环过程促使



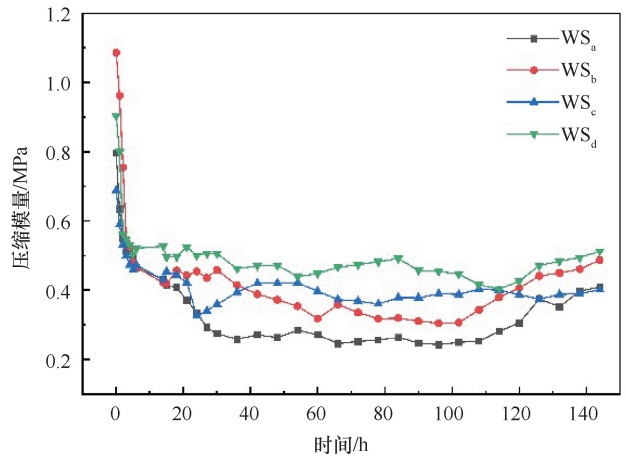
(a) 东偏北向各层赤泥固结程度变化曲线



(b) 东偏南向各层赤泥固结程度变化曲线



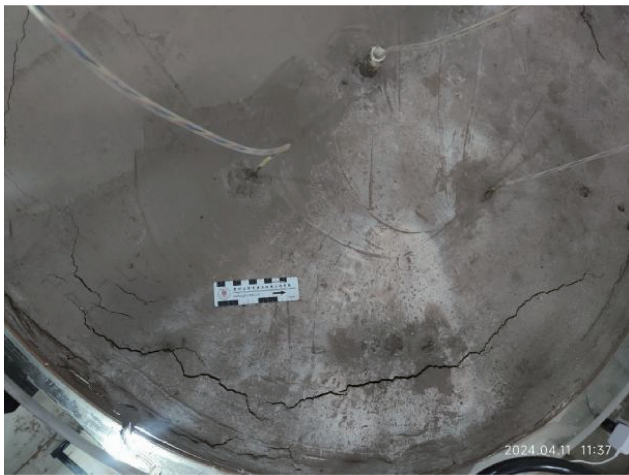
(c) 西偏北向各层赤泥固结程度变化曲线



(d) 西偏南向各层赤泥固结程度变化曲线

图 11 侧向补给-渗漏式试验不同位置固结程度变化

Fig. 11 Variation of the degree of consolidation at different locations in the lateral feed-leakage test



(a) 弧形裂隙



(b) 气泡现象

图 12 降雨补给-渗漏式试验现象

Fig. 12 Rainfall recharge-seepage test phenomenon

赤泥中干缩裂缝进一步扩展延长, 且侧向补给-渗漏过程对干缩裂缝的演化影响更为剧烈。

3.3.2 补-排水量及水压演化

降雨补给试验共开展 3 阶段, 按顺序各阶段分

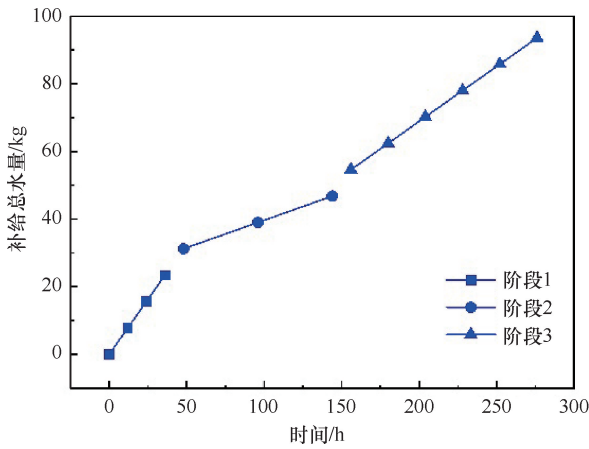
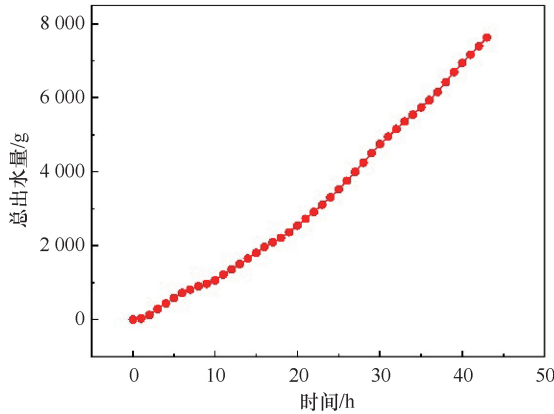


图 13 降雨补给总量变化

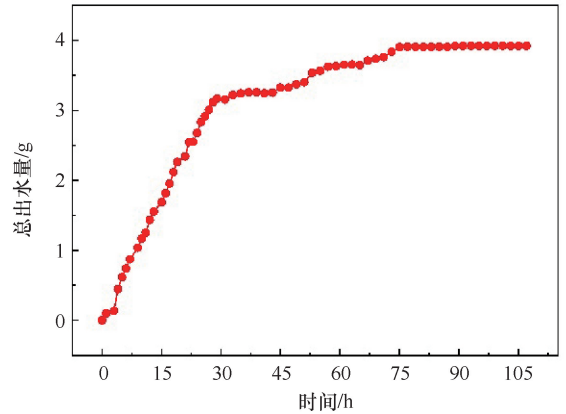
Fig. 13 Changes in total rainfall recharge

别打开北偏东 2 号口、3 号口和 4 号口进行排泄。将各出水孔排水期间补给降雨频率定为 2 次/d、0.5 次/d、1 次/d。如图 12, 试验期间, 更换出水口的 3 个阶段分别补水 23.4 kg、23.4 kg 和 46.8 kg, 共计补水约 93.6 kg。

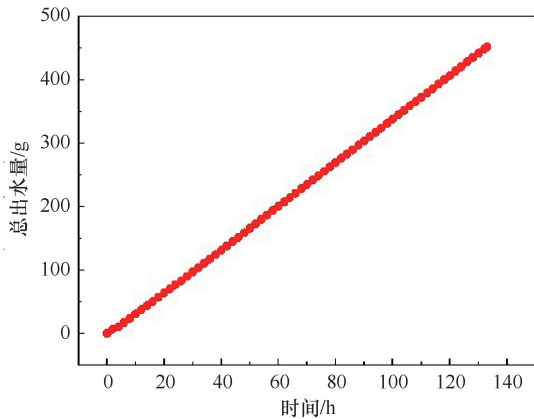
图 14(a) — (c) 为降雨补给-渗漏模拟试验过程,



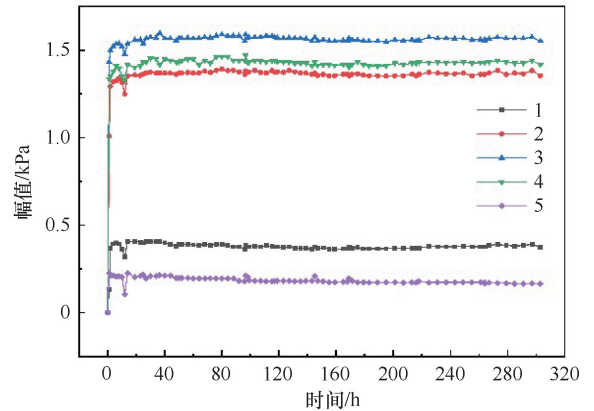
(a) 2号出水口排泄总水量变化曲线



(b) 3号出水口排泄总水量变化曲线



(c) 4号出水口排泄总水量变化曲线



(d) 模型内部水压变化曲线

图 14 降雨补给-渗漏试验不同出水口排泄总水量变化

Fig. 14 Changes in the total amount of water discharged from different outlets in the rainfall recharge-seepage test

2 号口排泄量显著高于其他 2 个排泄口, 出水速率逐渐增加至稳定的增长速率, 试验持续 43 h, 共收集渗滤液 7 630. 28 g。4 号出水口出水量较小, 但水流量稳定, 收集渗滤液 451. 984 g。3 号出水口出水水量最小, 且不稳定, 前 29 h 水流量约为 3.64×10^{-3} g/min, 在后 47 h 内降至 2.62×10^{-4} g/min, 47 h 后不再出水, 试验收集渗滤液仅 3.99 g。

图 14(d) 为监测的降雨过程赤泥库各处水压值, 传感器 1、2、3、4 均埋置于赤泥中, 由于赤泥库内裂缝深度大, 降雨快速补给进入赤泥内部, 使赤泥库内部水压数值迅速上升并达到一个稳定的值。裂缝存在于东、西和南方向, 导致 2 号、3 号、4 号传感器水压数值较大, 而 1 号传感器所处的无明显裂缝区域, 水压力值较小。中心透水管中测试的为自由水压, 其水压数值也较小。

受赤泥中前期产生的大量裂缝的影响, 在降雨补给情况下赤泥不同空间位置的排水速率和不同位置水位存在明显差异, 存在或接近裂缝的赤泥颗粒间孔隙大, 更易排出渗滤液, 降雨补给作用下水位也较高。

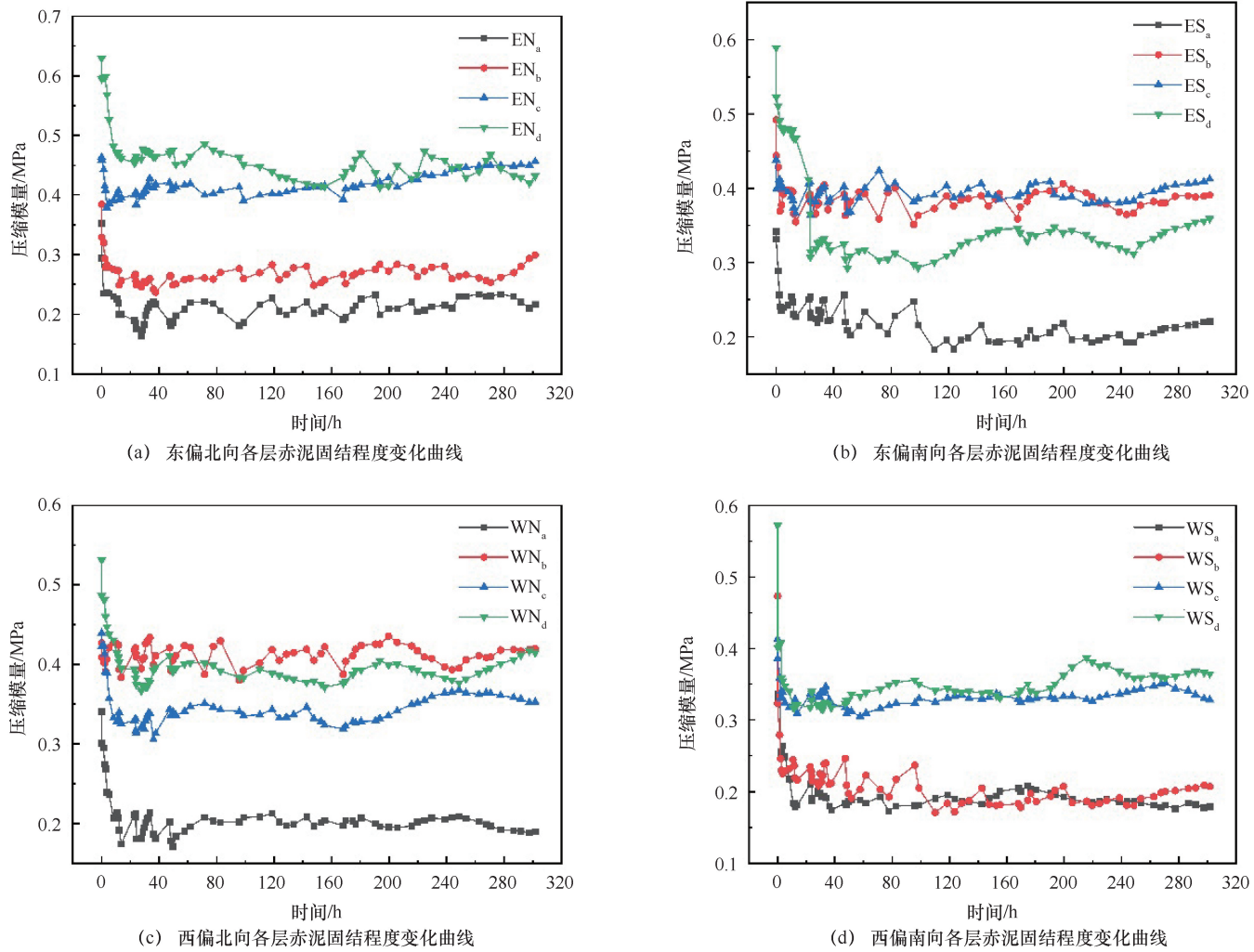


图 15 降雨补给—渗漏式试验不同位置固结程度变化

Fig. 15 Variation of the degree of consolidation at different locations in the rainfall recharge-seepage test

3.3.3 降雨补给—渗漏式试验固结程度演化过程

图 15 为降雨过程赤泥库固结程度演化过程。可见, 降雨补给情况下赤泥迅速吸水软化, 压缩模量迅速降低。受裂缝位置和深度影响, 东偏南和西偏北方向赤泥压缩模量在深度上无明显规律。以北偏东 2 号管口排水时, 因间歇性降雨补给和干缩裂缝影响, 东偏南、西偏南和西偏北各深度赤泥压缩模量上下波动较明显。更换为北偏东 2 号管口排水后, 降雨补给引起的各层赤泥压缩模量波动不明显。更换至北偏东 4 号管口出水时, 仅有靠近排水口的东偏北底部赤泥压缩模量受降雨影响波动。

4 结论

以贵州扎塘赤泥库为例, 采用自研的尾矿库固结渗漏模拟试验装置, 开展了无补水、侧向补给、地表补给 3 种典型工况下, 赤泥库渗漏及固结过程模拟试

验, 主要取得以下认识。

(1) 提出了一种库内赤泥固结程度测试方法, 通过在固结过程测定锥入模量与压缩模量, 建立了锥入模量与压缩模量的关系, 实验表明该方法测定赤泥固结过程中压缩模量误差小于 5%。

(2) 赤泥库各种工况模拟试验表明, 单一渗漏无补给工况下, 赤泥将在库内逐渐完成固结, 渗滤液在 60 h 内可完全排泄, 而赤泥中渗滤液在约 120 h 后稳定于出水口高度。赤泥库在失水固结过程中易形成大量裂缝, 成为降水和地下侧向补给的快速运移通道, 导致赤泥库内整体渗透性显著提升。

(3) 在侧向补给工况下, 赤泥库表现出典型的孔隙-裂隙双重介质性质, 地下水沿赤泥库内形成的裂缝快速运移至各部位, 为赤泥内孔隙吸水提供水源。赤泥在地下水侧向补给情况下固结度快速降低、孔隙水压快速升高并处于波动状态。在持续存在侧向补给

的条件下, 赤泥固结过程缓慢, 地下水侧向补给影响范围广, 渗滤液持续产生, 库内赤泥将达到一个缓慢固结或不固结的平衡态。

(4)在降雨补给工况下, 库内赤泥沿裂缝快速入渗, 初始渗漏速率大, 渗漏量受到库内赤泥裂缝群影响显著; 降雨补给过程中赤泥固结程度在降雨初期快速降低后保持平稳, 赤泥固结程度受排水影响明显。

参考文献 (References):

[1] 任虎俊. 废弃煤矿岩溶地下水污染机理及防控研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
REN Hujun. Investigation on the Mechanism and Control of Karst Groundwater Pollution due to Abandoned Coal Mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[2] 褚学伟. 黔中岩溶山谷型赤泥尾矿库污染物迁移机理及预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
CHU Xuewei. Research on the Mechanism and Prediction of Contaminant Migration in Red Mud Tailings in Karst Valley in Central Guizh [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

[3] GAO H, XU Z, REN Z, et al. Latreite as a potential seepage barrier from a karst-depression tailing impoundment [J]. Clays and Clay Minerals, 2021, 69(1): 1-22.

[4] THOMAS K, STEFAN S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy [J]. Environ Science Technol, 2002, 36(12): 2742-7.

[5] 吴慧群. 大沙地尾矿库岩溶发育特征及地下水环境影响分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
WU Huiqun. Karst Development Characteristics and Groundwater Environmental Impact Analysis of Tailings Pond in Great Sandy Strait Tailings [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.

[6] 曲晨豪. 基于离散型裂隙网络模型的黔中龙井湾磷石膏尾矿库渗漏污染研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
QU Chenhao. Research on Leakage and Contamination of Phosphogypsum Tailings Pond in Longjing Bay of Central Guizhou Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

[7] 彭展翔, 褚学伟. 摆摆磷石膏堆场渗漏分析[J]. 地下水, 2012, 34(5): 14-15.
PENG Zhanxiang, CHU Xuewei. Leakage analysis of Phosphogypsum Still in Baiji[J]. Ground Water, 2012, 34(5): 14-15.

[8] 高岩. 岩溶地区渗漏污染预测[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
GAO Yan. Prediction of leakage pollution in karst area [D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.

[9] 杨康康. 鲁塘尾矿库岩溶发育特征及其地下水环境影响[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
YANG Kangkang. Lutang tailing pond's karst development

characteristics and its groundwater environment impact. [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.

[10] GAO H, XU Z, WANG K, et al. Evaluation of the impact of karst depression-type impoundments on the underlying karst water systems in the Gejiu mining district, southern Yunnan, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7): 4673-4688.

[11] 陈维孝. 晴隆锑矿区锑的释放及其在岩溶地下河中的水文地球化学行为研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
CHEN Weixiao. Research on the Release of Antimony and Its Hydrogeochemical Behavior in Karst Underground Rivers in Qinglong Antim[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[12] 张军以, 王腊春, 马小雪, 等. 西南岩溶地区地下水污染及防治途径[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 245-249.
ZHANG Junyi, WANG Lachun, MA Xiaoxue, et al. Groundwater pollution and controlling measures in karst mountainous areas of Southwestern China [J]. Bulletin of Soiland Water Conservation, 2014, 34(2): 245-249.

[13] POWER G, GRAFE M, KLAUBER C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices [J]. Hydrometallurgy, 2011, 108(1): 33-45.

[14] 石龙成, 张庆建, 孙英杰, 等. 我国赤泥污染现状及资源化利用方向[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(10): 1386-1396.
SHI Longcheng, ZHANG Qingjian, SUN Yingjie, et al. Current situation of red mud pollution and the direction of resource utilization in China [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(10): 1386-1396.

[15] ZHANG J Z, LIU S J, YAO Z Y, et al. Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 605-613.

[16] WANG X, QU Y, HU W, et al. Particle characteristics and rheological constitutive relations of high concentration red mud [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(2): 266-270.

[17] 朱军, 兰建凯. 赤泥的综合回收与利用[J]. 矿产保护与利用, 2008(2): 52-54.
ZHU Jun, LAN Jiankai. Comprehensive recovery and utilization of red mud [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2008(2): 52-54.

[18] 柳晓, 韩跃新, 何发钰, 等. 赤泥的危害及其综合利用研究现状 [J]. 金属矿山, 2018(11): 7-12.
LIU Xiao, HAN Yuexin, HE Fayu, et al. Research status on hazards and comprehensive utilization of red mud [J]. Metal Mine, 2018(11): 7-12.

[19] SUN C, CHEN J, TIAN K, et al. Geochemical characteristics and toxic elements in alumina refining wastes and leachates from

- management facilities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1297-1297.
- [20] 刘继东,任杰,陈娟,等. 酸雨淋溶条件下赤泥中重金属在土壤中的迁移特性及其潜在危害[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(1): 76-84.
- LIU Jidong, REN Jie, CHEN Juan, et al. Migration characteristics and potential hazards of heavy metals from bauxite residue to soil under simulated acid rain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 76-84.
- [21] 杨芳. 碱在赤泥中的存在方式及固定方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- YANG Fang. The Existing Form of Alkali in Red Mud and the Research of Immobilization Methods[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [22] 李华伟. 赤泥滤液的渗流穿透特性及污染物迁移过程研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LI Huawei. The Study on the Penetration Property of Red Mud Filtrate and Transport Process of Contaminant[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [23] QI YM, ZHOU P, WANG JP, et al. Groundwater pollution model and diffusion law in ordovician limestone aquifer owe to abandoned red mud tailing pit[J]. *Water*, 2022, 14(9): 1472-1472.
- [24] MA QH, LIU GS, YANG XC, et al. Physical model investigation on effects of drainage condition and cement addition on consolidation behavior of tailings slurry within backfilled stopes[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(8): 1490-1501.
- [25] 罗炳雄. 铝土尾矿自重排水联合生石灰固化处理试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- LUO Bingxiong. Experimental Study on Self-weight Drainage Combined with Quicklime Solidification Treatment of Bauxite Tailings [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [26] LI J Q, OU X D. Model test on self-weight consolidation of the red mud tailings placed in the karsts[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(5): 2839-2849.
- [27] 刘家旭. 电阻率法在磷石膏堆场渗滤液运移检测中的试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- LIU Jiaxu. Experimental Study on Resistivity Method in Leachate Migrationdetection of Phosphogypsum Yard[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [28] 李明. 山东铝业公司赤泥堆积坝稳定性分析及安全措施研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2006.
- LI Ming. The Stability Analysis and Safety Precautions Research of Red Mud Embankment for Shandong Aluminium Corporation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006.
- [29] 陈世万. 贵州铝厂有限责任公司赤泥堆场渗滤液减量化及处理工艺研究[R]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- CHEN Shiwan. Research on Leachate Reduction and Treatment Process of Red Mud Stockpile of Guizhou Aluminum Plant [R]. Guiyang: Guizhou University, 2024.
- [30] 杨朝发, 李辉, 杨圣. 贵州铝厂赤泥堆场闭库工程勘察报告[R]. 贵阳: 贵州有色地质工程勘察公司, 2015.
- YANG Chaofa, LI Hui, YANG Sheng. Survey Report of the Closure Project of the Red Mud Yard of Guizhou Aluminum Plant [R]. Guiyang: Guizhou Nonferrous Geological Engineering Survey Company, 2015.
- [31] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

(责任编辑 王海锋)