

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.02.18

淋滤固结对尾矿砂土作用试验分析

邹梦超¹, 陈颖辉^{1,2}, 欧明喜^{1,2}, 戴志峰¹, 王修峰¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省土木工程防灾重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要: 以云南卡房尾矿库为背景, 采用单一变量原则, 通过淋滤试验, 对淋滤过程中淋滤时间、淋滤量以及淋滤液成分控制分析, 研究淋滤固结对尾矿砂土固结的影响, 得出: 在一定范围, 尾矿砂土的淋滤固结程度及其抗剪强度指标与淋滤时间及淋滤流量呈正相关, 与淋滤液的化学成分也存在一定关系; 自重固结作用下的最终沉降量远小于淋滤固结作用下的沉降量, 尾粉砂前者沉降量较后者小近 80%, 尾粉土前者沉降量较后者小约 83%, 尾粉砂前者的黏聚力、内摩擦角值较后者分别小约 37.8%、15.1%, 尾粉土前者的黏聚力及内摩擦角值较后者分别小约 29.8%、4.8%。

关键词: 尾矿库; 尾矿砂土; 单一变量原则; 固结; 淋滤试验

中图分类号: TD167

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)02-0134-07

Experimental analysis of leaching consolidation on tailings sand

ZOU Mengchao¹, CHEN Yinghui^{1,2}, OU Mingxi^{1,2}, DAI Zhifeng¹, WANG Xiufeng¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: This study aimed to find the effect of leaching consolidation on consolidation of tailings sand. The single-variable principle is applied to the leaching test based on the background of Yunnan Kafang tailings reservoir. According to the analysis of control leaching time, leaching amount and leachate composition, the following conclusions were obtained: within a certain range, the leaching consolidation degree and shear strength index of tailings sand are positively correlated with leaching time and leaching flow, and also have a certain relationship with the chemical composition of leaching filtrate; The final settlement under self-heavy consolidation is much smaller than that under leaching consolidation. The settlement of the former silt is nearly 80% smaller than that of the latter, and the settlement of the former silt is about 83% smaller than the latter. The cohesive force and the internal friction angle of the former are about 37.8% and 15.1%, respectively, and the cohesive force and the internal friction angle of the former powdery soil are about 29.8% smaller than the latter. 4.8%.

Keywords: tailings pond; tailings sand; single variable principle; consolidation; leaching test

0 引言

云南个旧卡房尾矿库属于平地型铜矿尾矿库, 由 8 个分坝环绕而成, 根据《尾矿设施设计规范》

(GB50863—2013)^[1]的规定, 为三等库。该库尾矿浆沿四周堆积坝坝顶向库区内排放, 形成环形交替放矿模式。库区属岩溶洼地、洼塘地貌, 地处断层构造发育交汇地段, 本项目位于红河与南盘江地表分水岭, 库区

收稿日期: 2019-08-13; 修订日期: 2019-10-30

基金项目: 云南省应用基础研究计划项目(2017FB088)

第一作者: 邹梦超(1994-), 男, 湖北赤壁人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 1307402895@qq.com

通讯作者: 陈颖辉(1964-), 男, 云南昆明人, 副教授, 研究方向为地基基础。E-mail: 1126276546@qq.com

内地表水不发育,无地表水与尾矿库相连,尾矿颗粒可分为四类:尾粉砂、尾粉土、尾粉质黏土及尾黏土层,干滩面成分主要为尾粉砂及尾粉土。

针对尾矿库稳定性影响因素,国内外学者做了很多相关研究,主要集中于渗流分析^[2-3]、抗震性能^[4-5]、应力应变规律^[6]等方面。目前研究淋滤作用对尾矿固结影响的文献相对较少,而尾矿库稳定性又是影响库区周边人类生命安全的关键因素,且尾矿库排放的尾矿大部分都含矿液,因此,研究淋滤作用对尾矿固结的影响就较有实际工程意义。

KWAK^[7]通过分析尾矿排放浓度对其沉积特征的影响,得出尾矿坝抗剪强度随浆液浓度的增大而提高的结论;TAYLOR^[8]通过控制堆坝颗粒的沉积位置,发现粗细颗粒均匀沉积可提高尾矿坝稳定性的机理;A TOLOGA 等^[9]、M T 等^[10]探究孔隙水压力在尾矿坝稳定性中的作用,发现在相同运行条件下,不同尾矿沉积坝体其孔隙水压力是不同的;刘文连等^[11]、曹净等^[12]分析某尾矿库尾矿砂固结特征,揭示了尾矿中淋滤固结的形成机理;曹净等^[13]通过试验,分析尾矿坝在淋滤下处于饱和-非饱和交替环境的机理,揭示了渗透力作用下的固结特征;魏宁等^[14]建立尾矿土体的非线性弹-粘弹本构模型,分析了尾矿固结过程中孔隙水压力及位移随时间的变化规律;徐宏达^[15]通过分析细粒尾矿的沉积规律,发现粒径小于 0.02 mm 的尾矿颗粒仅能够在静水条件下沉积;颜学军^[16]在尾矿沉积固结实验基础上,研究了尾矿排放浓度、流量、流速等因素对尾矿坝稳定性的影响规律。

论文将在已有研究成果基础上,针对环形放矿模式下卡房尾矿库,通过使用新型专利中的淋滤固结试验仪^[17],对不同尾矿层土样进行淋滤固结试验,研究卡房尾矿库中除自重固结作用外淋滤固结作用的发展变化规律。

1 试验准备

为模拟真实的固结作用环境,在库区分别选取多个具有代表性的采样点,采取尾粉砂、尾粉土各 10 袋。试样样品中尾粉砂呈灰褐色、局部为褐红色,处于松散到中密状态,稍湿,局部夹薄层尾粉土;尾粉土呈灰、灰褐色,处于稍密或密实状态,稍湿和很湿之间,局部夹薄层尾粉砂。将土样装入土样箱内,密封条件下静置数天,使重塑尾矿样先在自重应力作用下固结沉降,排除自重固结作用对淋滤试验的影响,提高试验的准确性,试验制备及试验如图 1 及图 2 所示。



图 1 重塑尾矿样制备图

Fig. 1 Preparation of reshaped tailings



图 2 淋滤固结试验设备工作效果

Fig. 2 Working effect of leaching and consolidation test equipment

2 淋滤固结试验

根据生产日志,卡房尾矿库每次放矿的时间不超过 3 h。针对土样,试验分为两组,每组 8 个工况,重点研究淋滤时间、流量及淋滤液成分对尾矿固结影响。设计单一变量对照试验方案,试验变量和取样时间如表 1、表 2 所示。

为研究不同淋滤液成分对固结作用的影响,将 1、2、9、10 号土样箱用清水作为淋滤液,其余样本采用尾矿澄清液。而 1、3、9、11 的土样箱每天控制淋滤总流量为 10 L (约 8 min),其余样本每天控制淋滤总时间为 1 h,以研究淋滤时间及淋滤流量对固结作用的影响。同时 8 号、16 号箱不进淋滤试验,为自重固结沉降(图 3)。

根据表 1、表 2 试验方案,在固定时间段进行淋滤,试验结束后在规定的时间内对尾粉砂及尾粉土进行取样,并进行直剪试验。室内的物理力学指标测定方法及原位试验方法依据《土工试验规程(SL237—1999)》^[18]和《土工试验方法标准(GB/T50123—

1999)》^[19]执行。试验采用四联自动直剪仪,分级施加各试样的抗剪强度指标。
垂直荷载:100 kPa、200 kPa、300 kPa 及 400 kPa,得出

表 1 试验变量对照表
Table 1 Test variable comparison table

土样箱编号	1	2	3	4	5	6	7	8
土样种类	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂
变量 1 淋滤液成分	水	水	尾矿澄清液	尾矿澄清液	尾矿澄清液	尾矿澄清液	尾矿澄清液	/
变量 2 控时间/流量	总流量 10 L	总时间 1 h	总流量 10 L	总时间 1 h	总时间 1 h	总时间 1 h	总时间 1 h	/
土样箱编号	9	10	11	12	13	14	15	16
土样种类	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土
变量 1 淋滤液成分	水	水	尾矿澄清液	尾矿澄清液	尾矿澄清液	尾矿澄清液	尾矿澄清液	/
变量 2 控时间/流量	总流量 10 L	总时间 1 h	总流量 10 L	总时间 1 h	总时间 1 h	总时间 1 h	总时间 1 h	/

表 2 取样时间表
Table 2 sampling schedule

土样箱编号	1	2	3	4	5	6	7	8
土样种类	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂	尾粉砂
取样时间	15 d	15 d	15 d	15 d	60 d	90 d	120 d	120 d
土样箱编号	9	10	11	12	13	14	15	16
土样种类	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土	尾粉土
取样时间	15 d	15 d	15 d	15 d	60 d	90 d	120 d	120 d



图 3 淋滤固结试验沉降采集器

Fig. 3 Leaching consolidation test settlement collector

3 试验结果与分析

3.1 淋滤作用对尾矿单日沉降效果影响分析

为使沉降差仅由淋滤作用产生,消除尾矿液中矿物成分的影响,试验采用 2 号、10 号土样箱沉降监测数据,整理得到尾粉砂土 $\Delta S \sim t$ 关系曲线图(图 4、图 5)。

图 4 和图 5 给出了在多个淋滤过程中,尾粉砂、尾粉土的沉降特征:两者均呈现先回弹后沉降的趋势,尾粉砂土的回弹量分别稳定在 1 ~ 2 mm 和 0.5 ~ 1.5 mm,单日最大沉降量约为 8 mm 和 4 mm,均发生在第一天,随着淋滤次数的增加,两者的单日沉降量均逐渐减小。淋滤时出现回弹,这是由于在排矿之前尾矿处于非饱和状态,尾矿粗颗粒间水膜的毛细力使颗粒相

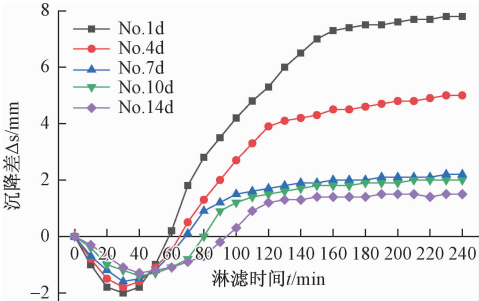


图 4 尾粉砂淋滤固结试验 $\Delta S \sim t$ 关系曲线图

Fig. 4 Tail-sludge leaching test $\Delta S \sim t$ relationship curve

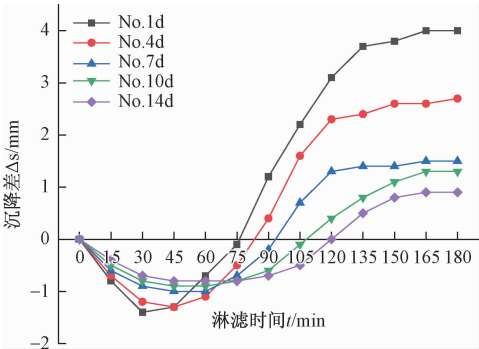


图 5 尾粉土淋滤固结试验 $\Delta S \sim t$ 关系曲线图

Fig. 5 Tail-soil leaching consolidation test $\Delta S \sim t$ relationship curve

互靠近趋于密实,当向饱和状态过渡时,水膜的毛细力逐渐消失,尾矿颗粒间孔隙变大产生回弹^[13]。

3.2 淋滤时间、流量及滤液成分对尾矿固结影响分析

通过测量 1、2、3、4 号土样箱和 9、10、11、12 号土样箱的 15d 时的最终沉降量,得出尾粉砂土在不同变量下最终沉降量关系如图 6 和图 7 所示。

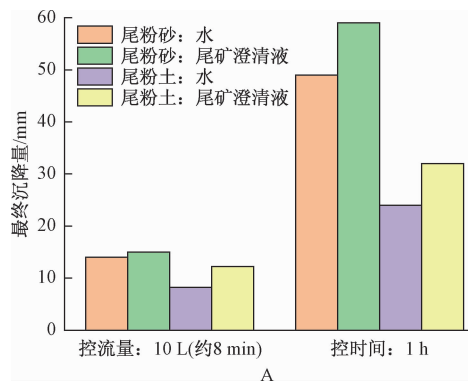


图 6 尾粉砂土不同流量最终沉降量对比

Fig. 6 Comparison of final settlement of different flow rates of tailin

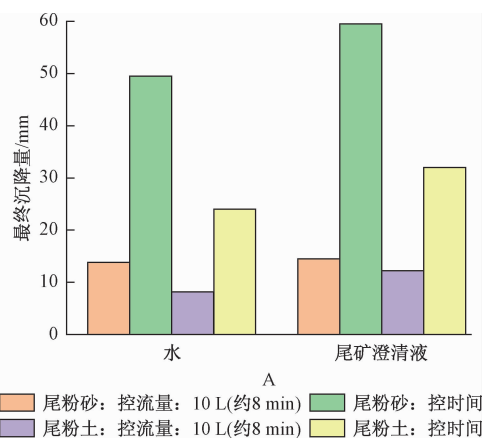


图 7 同滤液成分最终沉降量对比

Fig7 Comparison of final sedimentation of different filtrate components

由图 6 得,不管在清水还是尾矿澄清液淋滤下,尾粉砂土的控流量组的最终沉降量较控时间组的最终沉降量均小 60% 以上。由于尾粉砂土从非饱和状态过度到饱和状态时,尾矿粗颗粒间的水膜毛细力消失,颗粒就从紧密状态转为松散状态。长时间淋滤使粗颗粒孔隙间的细颗粒有充分时间进入下层土样,加速了尾矿砂土的沉降^[13]。由图 7 得,淋滤时间和流量相同时,尾矿澄清液淋滤下尾粉砂最终沉降量比清水淋滤下的最终沉降量约大 20.4%,而尾粉土前者沉降量较后者约大 33%。卡房尾矿库是从硫化矿中进行选锡生产工作,尾矿澄清液为酸性溶液。在前期排矿时,尾矿中存在的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子随尾矿浆进入尾

矿颗粒的孔隙中,形成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 CaCO_3 硬化结晶物包裹在尾矿颗粒表面并填充在尾矿颗粒间,形成硬化壳体,在酸性淋滤液下,硬化结晶物溶解,孔隙减小,使尾矿沉降量增大。

3.3 淋滤时间、流量及滤液成分对抗剪强度影响分析

为防止淋滤试验中表层尾矿受扰动及其他因素影响,干扰尾矿抗剪强度指标,采用 40cm 深度处的尾矿试样进行对比分析,如图 8 ~ 图 11 所示。

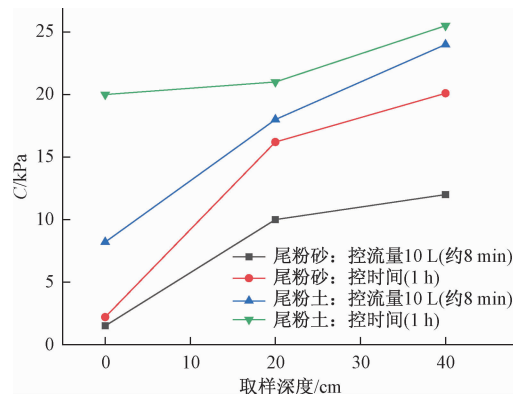


图 8 尾粉砂土不同流量直剪试验黏聚力

Fig. 8 Different flow straight shear test cohesion of tailings

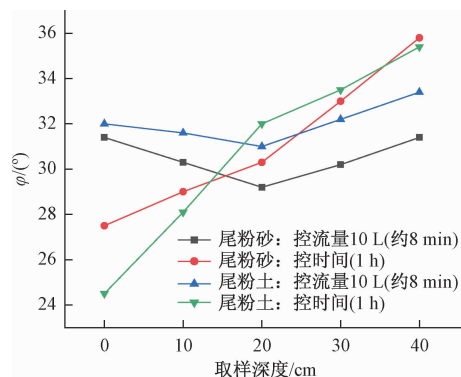


图 9 尾粉砂土不同流量直剪试验内摩擦角

Fig. 9 Inner friction angle of different flow straight shear test

分析图得出:(1)尾矿砂土控流量组的抗剪强度指标明显小于控时间组的强度指标,尾粉砂黏聚力,内摩擦角值前者较后者分别小约 42.1% 和 12%;尾粉土黏聚力,内摩擦角值前者较后者小约 5.1% 和 5.6%。(2)尾矿澄清液下的尾矿砂土抗剪强度指标也大于在水淋滤下的强度指标,尾粉砂前者的黏聚力、内摩擦角值较后者分别大 73.9%、16.3%;尾粉土前者的黏聚力、内摩擦角值较后者分别大 28.9%、27%。

由于卡房尾矿库特殊放矿模式,尾矿处于非饱和和交替状态,尾矿重新进入饱和状态时,粗颗粒孔隙间的细颗粒在渗流力的作用下重排列,部分细颗粒被

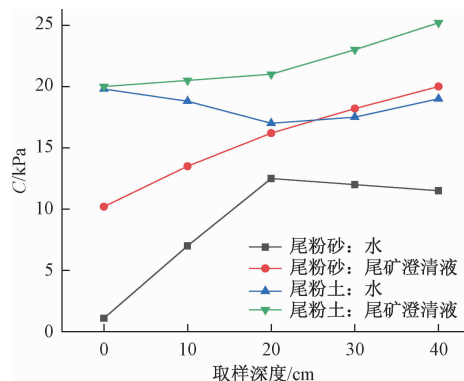


图 10 尾粉砂土不同滤液直剪试验黏聚力

Fig. 10 Straight shear test cohesion of different filtrates of tailings

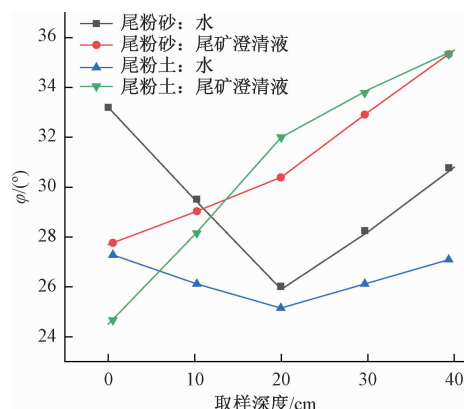


图 11 尾粉砂土不同滤液直剪试验内摩擦角

Fig. 11 Inner friction angle of direct filtrate test of different filtrates of tailings

带出粗颗粒间孔隙进入下层土层中;再次进入非饱和状态后,水膜的毛细力使粗颗粒再次相互靠近,使得尾矿变得更加密实,力学性能也变的更好。在酸性尾矿澄清液淋滤下,尾矿中的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 的浓度将会逐渐增加,使得尾矿颗粒孔隙间的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体增多并在饱和-非饱和和交替环境中逐渐沉淀而固化,同样使尾矿力学性能提高^[12]。淋滤固结机理如图 12 所示^[13]。

3.4 淋滤固结与自重固结对尾矿最终沉降量影响

通过 8 号与 5、6、7 号箱,16 号与 13、14、15 号箱取样试验的结果,得出淋滤固结试验中尾粉砂土的最终沉降量及抗剪强度指标对比图(图 13~图 15)。

从图 13 得出,仅自重固结作用下的尾矿最终沉降量远小于淋滤固结作用下的沉降量,尾粉砂前者沉降量较后者小近 80%,尾粉土前者沉降量较后者小约 83%。由图 14 及图 15 可得,仅在自重固结作用下的抗剪强度指标也比淋滤固结作用下的指标值小,尾粉

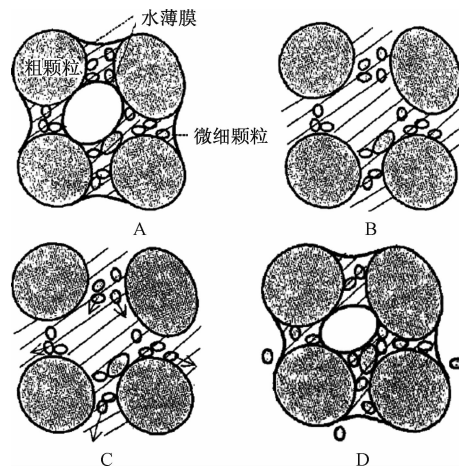


图 12 淋滤固结作用机理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of leaching consolidation mechanism

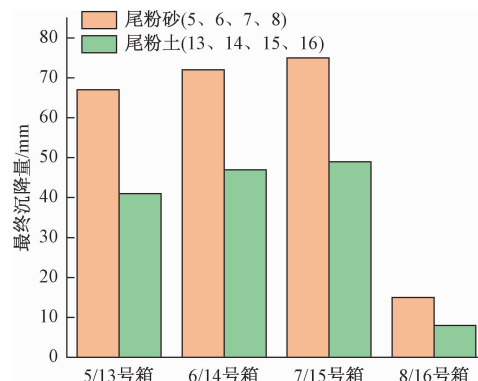


图 13 尾粉砂土最终沉降量对比图

Fig. 13 Comparison of final settlement of tailings silt

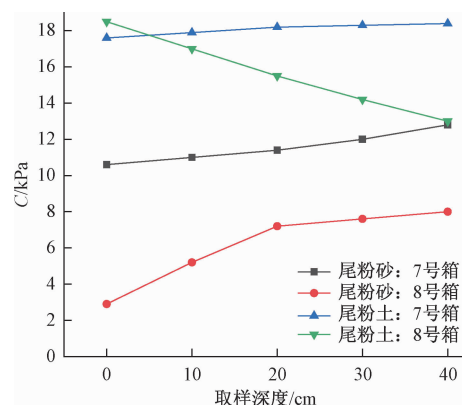


图 14 尾粉砂土直剪试验黏聚力对比图

Fig. 14 Comparison of cohesion of straight-slurry test of tailings

砂前者的黏聚力、内摩擦角值较后者分别小 37.8%、15.1%,尾粉土前者的黏聚力、内摩擦角值较后者分别小 29.8%、4.8%。试验可得,淋滤作用能有效增大尾

矿砂土的固结效果和抗剪强度。

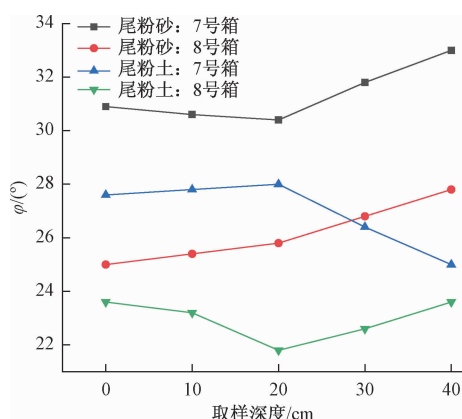


图 15 尾粉砂土内摩擦角对比图

Fig. 15 Comparison of internal friction angle ϕ of tail powder sand powder

4 结论

通过试验分析得出:

(1) 尾矿库经过淋滤作用后,其尾矿颗粒固结效果和抗剪强度指标相较于仅自重固结下有很大的提高。淋滤作用后尾矿颗粒最终沉降量比自重影响下增大大约 80%

(2) 每次淋滤过程中,尾粉砂土体均先出现膨胀回弹,当停止淋滤(淋滤时间为 60 min)后,因水位下降至尾矿样顶部以下,淋滤液水头压消失,试样迅速产生收缩沉降,沉降量逐渐增加,最终趋于稳定。

(3) 尾矿的淋滤固结程度与淋滤时间及淋滤流量呈正相关。随着尾矿淋滤时间越长,淋滤流量越大,尾矿的沉降量将越大,同时固结程度随之升高,抗剪强度指标也相应提高。

(4) 尾矿的淋滤固结程度与淋滤液的化学成分也存在相关关系。相较于水作为淋滤液,尾矿澄清液组尾矿的沉降量较大,固结程度和抗剪强度指标也较高,说明淋滤固结中尾矿液的化学成分在尾矿的固结进程中也起到一定的作用。

论文针对卡房尾矿库进行淋滤试验,揭示了淋滤固结作用的积极影响,不仅为卡房尾矿库今后的使用和管理提供了相关的理论依据,也为该地区同类型尾矿库的建库、使用及发展提供了一定借鉴的经验。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 尾矿设施设计规范: GB 50863—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013 [Ministry of Housing and Urban-Rural

Development of the People's Republic of China. Design specification for tailings facilities: GB 50863—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)]

- [2] 柳厚祥, 李宁, 廖雪, 等. 考虑应力场与渗流场耦合的尾矿坝非稳定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2870–2875. [LIU H X, LI N, LIAO X, et al. Unsteady seepage analysis of tailings dams considering coupling of stress and seepage fields [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2870–2875. (in Chinese)]
- [3] ZANDARIN M T, OLDECOP L A, RODRIGUEZ R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams [J]. Engineering Geology, 2009, 105(1/2): 108–118.
- [4] 王炳文, 张磊, 赵彦昌, 等. 基于 FLAC^{3D} 的尾矿库地震稳定性分析[J]. 金属矿山, 2010(4): 159–162. [WANG B W, ZHANG L, ZHAO Y C, et al. Analysis on stability of tailing pond under earthquake with FLAC^{3D} [J]. Metal Mine, 2010(4): 159–162. (in Chinese)]
- [5] KEMPER T, SOMMER S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(12): 2742–2747.
- [6] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 等. 尾矿坝垮塌机制与溃决模式试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1377–1384. [JING X F, YIN G Z, WEI Z A, et al. Model experimental study of collapse mechanism and broken mode of tailings dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1377–1384. (in Chinese)]
- [7] KWAK M, JAMES D F, KLEIN K A. Flow behaviour of tailings paste for surface disposal [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 77(3): 139–153.
- [8] TAYLOR, MICHAEL J, D'APPOLONIA, E. Integrated solutions to tailings disposal [C]. ASCE, 1977: 301–326.
- [9] A TOLGA OZERA, LESLIE G BROMWELL B. Stability assessment of an earth dam on silt/clay tailings foundation: A case study [J]. Engineering Geology, 2012, (151): 88–89.
- [10] SEED K M, BYMEP M. Embankment dams and earthquakes [J]. Hydropower & Dams, 2004(2): 96–102.

- [11] 刘文连, 张晓玲, 阎鼎熠, 等. 某大型尾矿库坝体勘察新技术及尾矿砂土工程特性初步研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增刊1): 523 - 528. [LIU W L, ZHANG X L, YAN D Y, et al. A preliminary study on new prospecting technology of large tailings-dam and engineering property of tailings[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12 (Sup1): 523 - 528. (in Chinese)]
- [12] 曹净, 龚宪伟, 李鸿翔, 等. 攀钢马家田尾矿化学固结机理初探[J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(2): 147 - 150. [CAO J, GONG X W, LI H X, et al. A preliminary study on mechanism of chemical consolidation of Majiatian tailings, Panzhihua steel and iron plant [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2000, 20 (2): 147 - 150. (in Chinese)]
- [13] 曹净, 陈颖辉, 李睿, 等. 尾矿砂土淋滤固结机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 30(05): 73 - 77. [CAO J, CHEN Y H, LI R, et al. Study on leaching and consolidation mechanism of tailings sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 30(05): 73 - 77. (in Chinese)]
- [14] 魏宁, 茜平一, 张波, 等. 软基处理工程的有限元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5789 - 5794. [WEI N, QIAN P Y, ZHANG B, et al. Simulation of treatment of soft clay foundation by fem method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2): 5789 - 5794. (in Chinese)]
- [15] 徐宏达. 细粒尾矿冲填筑坝的沉积规律初探[J]. 中国矿山工程, 2004, 33(1): 39 - 42. [XU H D. Discussion on the deposition law of fine tailings fill daw [J]. China Mine Engineering, 2004, 33 (1): 39 - 42. (in Chinese)]
- [16] 颜学军. 上游法尾矿堆筑坝坝体沉积规律探讨[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(2): 54 - 58. [YAN X J. Investigation on the depositing law of tailings dam by upstream damming [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36(2): 54 - 58. (in Chinese)]
- [17] 刘文连, 王修峰, 丁飞. 一种改进的室内重塑土样淋滤固结试验仪 [P]. 中国: ZL201820286441.6, 2018 - 10 - 16. [LIU W L, WANG X F, DING F. An improved indoor remolded soil sample leaching consolidation tester [P]. China: ZL201820286441.6, 2018 - 10 - 16. (in Chinese)]
- [18] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237 1999 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Geotechnical Test Procedures: SL237 1999 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1999. (in Chinese)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T50123 1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T50123 1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]