

# 攀枝花马家田尾矿库尾矿力学性质试验研究

冉路蔓<sup>1</sup>, 陈刚<sup>\*1</sup>, 眭素刚<sup>2</sup>, 杨元富<sup>1</sup>, 梅倩玮<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 昆明 650051)

**摘要:** 在尾矿库的设计与稳定性研究中, 堆存尾矿的力学性质是一种重要的基础参数。本文对微观颗粒进行分析以及对尾细砂与尾粉土两种尾矿进行了压缩试验、剪切试验与三轴试验。试验结果表明: (1) 在自重应力作用下, 细粒尾矿的孔隙比变化明显强于粗粒尾矿, 透水性和渗透系数随深度增大逐渐变小, 抗压能力则相反。(2) 尾细砂固结快剪指标较直剪快剪指标低, 尾粉土则相反。尾矿的三轴试验与剪切试验  $c$  值差异较大。(3) 不同围压下的两种尾矿  $\sigma_3/\tau_d - N_f$  的拟合程度较高, 归一性较好。其动剪模量随着动剪应变幅的增大而减小, 阻尼比则随着动剪应变幅的增大而增大。

**关键词:** 尾矿; 稳定性; 力学性质; 压缩试验; 剪切试验; 三轴试验

**中图分类号:** P694; TD167 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF TAILINGS FROM MAJIATIAN TAILINGS POND IN PANZHUIHUA

RAN Lu-man<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>\*1</sup>, SUI Su-gang<sup>2</sup>, YANG Yuan-fu<sup>1</sup>, MEI Qian-wei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, KUST, Kunming 650093, China;

2. China Nonferrous Metal Industry Kunming Survey Design Institute Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** In the design and stability of tailings pond, the mechanical properties of tailings are an important basic parameter. In this paper, the micro-particle analysis and the two kinds of tailings of tailings and fine sand triaxial test, shear test and triaxial test. The test results show that: (1) under the action of gravity stress, the change of pore ratio of fine tailings is significantly stronger than that of coarse tailings, permeability and permeability coefficient gradually decrease with the increase of depth, and the compression resistance is opposite. (2) the consolidation fast shear index of tailings is lower than that of direct shear fast shear index, and the tailings are opposite. The  $c$  value of triaxial test and shear test of tailings is different. (3) the two kinds of tailings under different confining pressures have a higher degree of fitting and better normalization. The dynamic shear modulus decreases with the increase of dynamic shear strain amplitude, and the damping ratio increases with the increase of dynamic shear strain amplitude.

**Key words:** tailings; stability; mechanical properties; compression test; shear test; triaxial test

### 1 引言

在金属或者非金属矿山进行开采之后, 选矿厂

会选出有价值的精砂, 其产生的像细砂或粉土一样的“废渣”被称为尾矿<sup>[1]</sup>。为堆存尾矿而修建的构筑物系统被称为尾矿库, 其中尾矿坝是尾矿库的主要

构筑物<sup>[2]</sup>。在我国现有尾矿库已超10 000座,大多数的尾矿库都会采用上游法堆筑<sup>[3]</sup>。而上游法堆筑利用沉积的尾矿料来进行堆筑,坝体内浸润线较高,对其并未进行压密而导致了这些尾矿基本都是处在饱和且疏松的状态之下,并且这些尾矿的固结程度较差,颗粒较细,比重较大。

许多学者广泛深入地研究了尾矿的稳定性和力学性质,以避免失稳溃坝事故的发生进而导致的人员伤亡和经济损失。曹文贵在土体初始和再压缩变形机制与特征研究基础上,对土体初始和再压缩 $e-p$ 曲线模型进行了深入探讨<sup>[4]</sup>。Chen研究了改良后的直剪装置,对自重下落之后的不规则尾砂的直剪力学特性进行研究,并且发现了在强度最低的情况下,界面的倾角达到 $45^\circ$ <sup>[5]</sup>。乐陶与杨春和通过对尾矿进行动三轴试验,研究了其在周期荷载作用下的动力特性,包括剪切模量、阻尼比、抗液化剪应力和动孔隙水压力的变化规律<sup>[6-7]</sup>。Liang通过研究提出了一种同时检测土体水平总应力和孔隙水压力的有效应力铲试验方法,并提出了利用有效应力铲试验确定静土压力系数的方法<sup>[8]</sup>。此外尹光志、王文松、武立功等通过结合物理模型试验和数值模拟的方法,进一步研究了尾矿的稳定性<sup>[9-11]</sup>。叶自欢对粗、细尾矿进行了力学测试,获得了粗、细尾矿的力学与变形特征<sup>[12]</sup>。张鹏伟不仅获得了粗细尾矿料物理力学指标并将其应用到尾矿库数值分析<sup>[13]</sup>。尾矿力学性质还与粉粒含量密切相关,但尾矿库粉粒含量的影响研究还较不充分。其中巫尚蔚根据实验研究发现,可以从颗粒特性的角度解释尾矿的粉粒含量效应<sup>[14]</sup>。张超开展了粒径对尾矿强度及坝体稳定性影响的研究<sup>[15]</sup>。胡再强发现黏粒含量增多,渗透系数随之减小,压缩性则呈先增大后减小趋势;黏聚力随黏粒含量的增加持续增大,而内摩擦角持续减小,黏粒含量对细粒尾矿液化的影响为先促进后抑制<sup>[16]</sup>。

尾矿力学特性研究对尾矿坝体稳定评价及抗震分析具有十分重要的作用。为更好地研究细粒尾矿库的稳定性,本文以马家田尾矿库尾矿为依托对细粒尾矿库常见的筑坝材料中尾细砂与尾粉土进行了研究。分析了两种尾矿的微观特性、物理特性、压缩特性、静力特性和动力特性,为实际尾矿颗粒力学性质提供了科学依据,并可为类似项目提供一定的参考。

## 2 试验材料

根据尾矿库勘察成果表明,攀枝花马家田尾矿

库尾矿粒组众多,从尾中砂到尾黏土均有分布,其中以尾细砂、尾粉土比例最大,分布也最为广泛,故本次试验材料为尾矿库中尾细砂、尾粉土两类尾矿。从空间分布上,尾细砂广泛分布于堆积坝表面,最大堆积厚度26.50 m,最大埋深42.80 m,局部呈透镜体夹于尾粉砂及尾粉土层中。手标本及岩芯尺度上,尾细砂层理不发育,大部分岩芯较为松散,局部呈碎块状构造,等效直径约为2~5 cm。堆积年限相对较长,区域具有胶结特征,胶结块透水性良好,难以用手捏碎。尾粉土主要沉积区域在垂向上位于中下部,在平面上位于库区中后部区域。尾粉土的沉积受水动力影响显著,随着水动力条件的强、弱在时间尺度上的交替变化,尾粉砂被搬运到不同的位置沉积,在沉积滩前缘表现为强烈的尾粉砂与尾粉土交替沉积特征。在沉积滩中部到库尾,形成尾粉土多层片状层理结构特征。两种尾矿空间分布图如图1、图2所示,手标本如图3、图4所示。

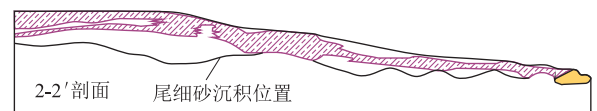


图1 尾细砂空间分布

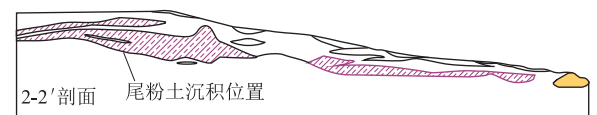


图2 尾粉土空间分布

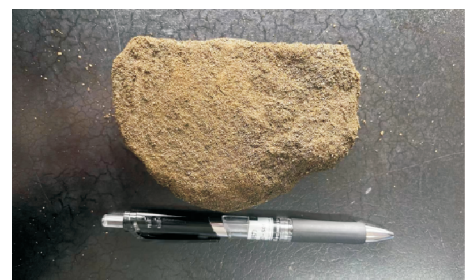


图3 尾细砂手标本



图4 尾粉土手标本

对试样尾细砂、尾粉土进行颗粒分析可知,尾细砂和尾粉土的有效粒径分别为  $d_{10}=0.076\text{ mm}$ 、 $0.010\text{ mm}$ ,中间粒径分别为  $d_{30}=0.134\text{ mm}$ 、 $0.030\text{ mm}$ 。尾细砂、尾粉土的不均匀系数  $C_u$  分别为 3.39、9.05,  $C_u$  越大土体均匀程度越差,即土的粗颗粒和细颗粒之间差别就越大,土粒愈不均匀,土愈易于压实,尾细砂、尾粉土的曲率系数  $C_c$  分别为 1.00、1.95。其级配曲线如图 5 所示。

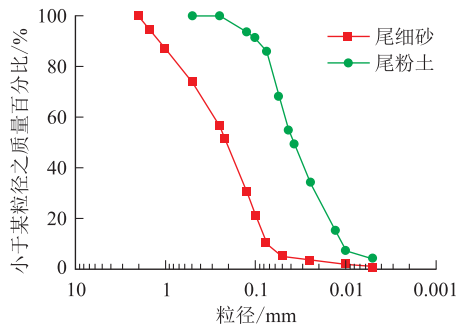


图 5 级配曲线

为研究尾矿颗粒微观结构与力学性质的关系,采用扫描电镜对观测样品的表面微观形态进行观测,结果如图 6 所示。并且对尾细砂与尾粉土薄片取 3 个点进行二值化处理进行镜下统计,粒径按照长轴粒径进行统计,取 3 个试验点的平均值作为平均粒径。

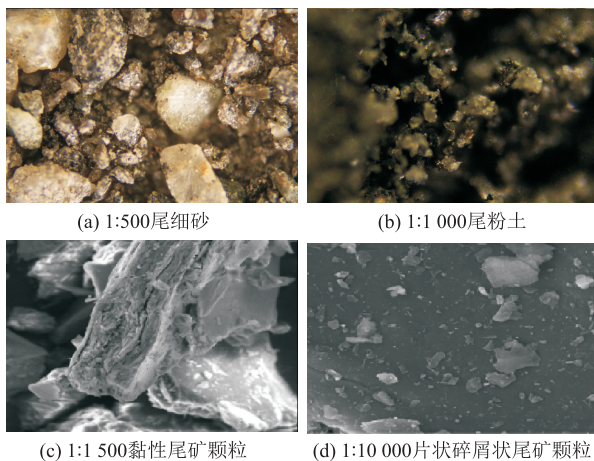


图 6 尾矿微观形态

尾细砂平均粒径为  $0.32\text{ mm}$ ,其中最大粒径约为  $0.93\text{ mm}$ ,最小粒径  $0.07\text{ mm}$ ,尾细砂样品中粒径分布分散,其中大于  $0.25\text{ mm}$  粒径数量占总数的  $60\%$ , $0.25\sim 0.075\text{ mm}$  粒径数量占总数的  $25\%$ ,小于  $0.075\text{ mm}$  尾矿颗粒数量占总数的  $15\%$ 。由于尾粉土颗粒较小,且镜下结果表明其颗粒较为均匀,平均粒径约为  $0.06\text{ mm}$ 。观察发现粗粒尾矿颗粒较为分散,以粗粒为主,细颗粒填充于粗颗粒中,粒径差异较大,细粒尾矿材料粒径较为均匀,粗粒尾矿颗粒以亚圆形为主,部分颗粒呈明显的棱角状。在扫描电镜下观察,黏性尾矿与砂性尾矿在形态上存在明显差异,砂性尾矿主要呈块状颗粒形态,而黏性尾矿则呈片状或碎屑状形态,粉性尾矿则处于两者之间,既包含砂性颗粒的颗粒状形态,又附着黏性尾矿的黏性颗粒。颗粒由粗到细,从砂性转变为粉性,再到黏性尾矿。在承受荷载的情况下,板状和碎屑状更容易被压碎,这对尾矿的强度是不利的。

### 3 试验方案方法

对大量尾矿样品进行统计分析研究其力学特性,其中尾细砂样品有 22 组,尾粉土样品有 188 组。压缩特性试验参照 ASTM D2435/D2435M-11 标准,使用杠杆式压缩试验仪进行。剪切试验按照 GB/T 50123-2019.《土工试验方法标准》<sup>[17]</sup>。固结不排水试验采用三轴压缩仪,选用 DDS-70 型微机控制电磁式振动三轴试验系统进行动强度试验。此次试验设置 1.0、1.5、2.0 共 3 种不同的固结应力比,再分别对每一个固结应力比设置 3 个不同的固结围压,分别为  $100\text{ kPa}$ 、 $200\text{ kPa}$ 、 $400\text{ kPa}$ 。阻尼比采用  $K_c=1.0$  进行试验<sup>[18]</sup>。

### 4 尾矿料力学性质

#### 4.1 基本物理性质

两种尾矿料的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 尾矿料基本物理性质

	比重	密度	初始孔隙比	含水率	渗透系数	
					垂直	水平
尾细砂	3.35	$2.16\text{ g/cm}^3$	0.80	5.94%	$1.64\text{E-}03\text{ cm/s}$	$2.12\text{E-}03\text{ cm/s}$
尾粉土	3.20	$2.14\text{ g/cm}^3$	0.76	20.04%	$1.82\text{E-}04\text{ cm/s}$	$3.94\text{E-}04\text{ cm/s}$

两种尾矿料的比重都较大,而尾矿的比重大小和尾矿所含有的矿物成分有很大关系,尾粉土与尾细砂相比比重较小,说明尾矿粒度越小,比重也会越小。由于尾细砂的均匀性较差,级配较好,故尾细砂

的孔隙比较大。对于相同尾矿,由于自重固结,孔隙比的大小也会随着深度增加而缓慢减小,如图 7 所示。这是尾矿材料随着坝高不断堆高,土体逐渐压实形成。同时,尾粉土较于尾细砂自身就具有含水

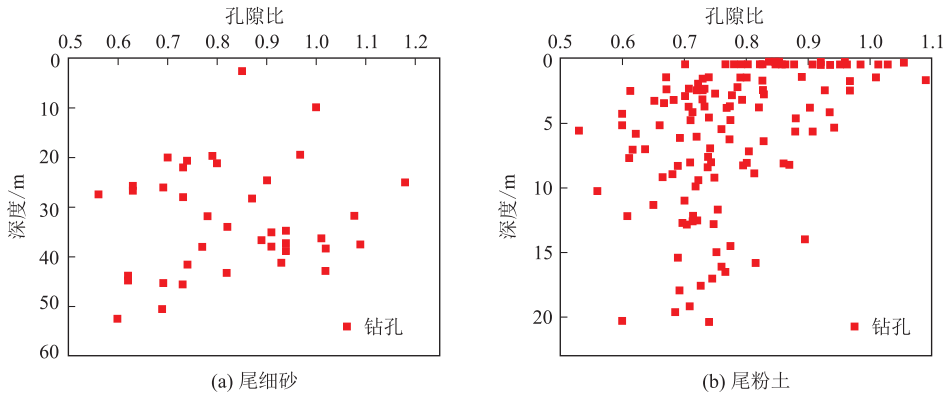


图 7 孔隙比与深度关系

率高的特点,随着尾矿堆积厚度的逐渐增加,在自重应力作用下,细粒尾矿的孔隙比变化明显强于粗粒尾矿。

由表 1 可知砂类尾矿样品含水率较小,这与砂类尾矿透水性能较好有关,同时也是由于粗粒尾矿多沉积于坝坡顶部,从而其含水率相对较小。两类尾矿的渗透系数较为合理,基本上反映了尾矿的渗透性能,垂直渗透系数比水平渗透系数小,这是成层尾矿的特征,也反应了尾矿的各向异性,但两者的差异并不大。堆积尾矿渗透系数总体处于  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm/s 量级,属于中等透水层。透水性和渗透系数因粒组成分、孔隙比变化随深度增大逐渐变小。

4.2 压缩特性

尾矿材料的变形特性决定尾矿稳定状态、库容规划、继续开发及二次利用的重要指标,是确定尾矿材料固结程度的重要依据,而其中压缩特性又尤为重要。表 2 为两种尾矿在 200~400 kPa 压缩下的压缩系数与压缩模量统计表。

尾矿压缩系数与压缩模量与土体性质密切相

表 2 尾矿料的压缩性指标

	压缩系数 $a_{v0.2 \sim 0.4}$		压缩模量 $E_{S0.2 \sim 0.4}$	
	平均值	标准值	平均值	标准值
尾细砂	0.10	0.12	20.5	23.7
尾粉土	0.20	0.21	16.76	17.66

关,故尾细砂与尾粉土压缩性指标大不相同。尾粉土与尾细砂相比,压缩系数较大,压缩模量较小。而压缩系数越大,尾矿颗粒的压缩性就越高。从微观上来讲,尾矿颗粒的位移与变形会导致土体的压缩。所以在低压条件下,随着尾矿颗粒的滑移与滚动,尾矿会压缩;但在中高压情况之下,压缩还来自于尾矿颗粒的变形<sup>[19]</sup>。而黏性尾矿中的板状片状颗粒在高压条件下的可挠曲性远大于粉类砂类尾矿,更不易发生变形。但由于粗粒尾矿位于钻孔顶部受压较小,故压缩系数也较小,而细粒尾矿在较深处受压较大,压缩系数也较大,所以尾矿压缩性指标与尾矿深度密切相关。图 8 为两种尾矿样品压缩系数与深度的关系图。

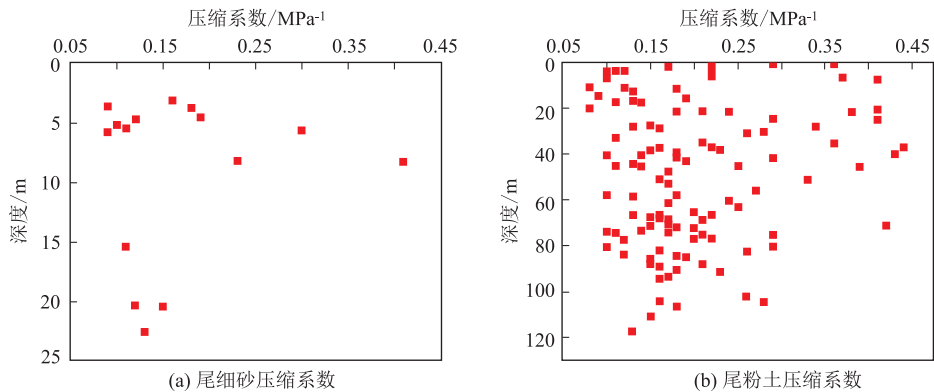


图 8 压缩系数与深度关系

两种尾矿均有深度越大压缩系数越小的趋势,即深度越大,尾矿材料的抗压缩性能越强,这是由于

尾矿筑坝是一个逐步加高的过程,上覆尾矿堆填增加,那么它的压力也就越大,此时不同粒组尾矿都呈

现出压密效果,这一过程也使尾矿强度不断提高,有利于尾矿坝体的稳定性。

由于两种尾矿的上覆压力各不相同,其高压特性也不同。由图 9 可知,当轴向压力由 0 kPa 增加到 250 kPa 左右时尾细砂的孔隙比下降速率较大,当轴向压力大于 250 kPa 时孔隙比的下降速率降低。当轴向压力由 0 kPa 增加到 500 kPa 左右时尾粉土的孔隙比下降速率较大,当轴向压力大于

500 kPa 时孔隙比的下降速率降低,并且分析不同尾矿  $e-p$  曲线发现,尾粉土的曲线斜率更大,那是因为尾粉土主要由细粒颗粒组成,具有更强的压缩性。同时尾细砂与尾粉土的临近压力并不相同,尾细砂在垂直压力达到 600~800 kPa 时其压缩性质基本稳定;而尾粉土在垂直压力达到 1 200~1 600 kPa 时,其压缩性质基本稳定。图 9 为两种尾矿样品的高压  $e-p$  曲线。

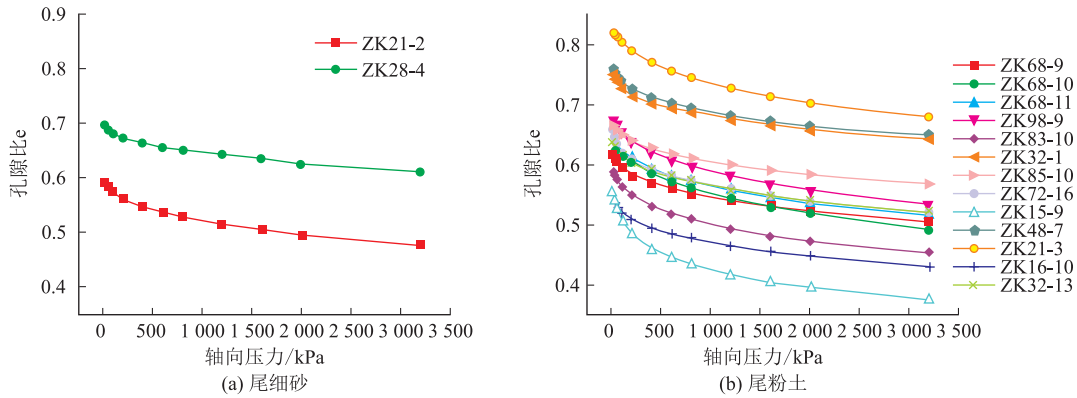


图 9  $e-p$  曲线

### 4.3 强度力学特性

强度力学试验能够反映土样的真实应力状态,并且能够获取尾矿料较为可靠的强度指标。表 3 为尾细砂的强度力学特性试验成果统计表。

表 3 尾矿料强度力学特性

		尾细砂		尾粉土	
		平均值	标准值	平均值	标准值
直剪快剪	$C/kPa$	19.7	17.1	17	15.6
	$\varphi/^\circ$	31.3	29.5	25.3	24.2
固结快剪	$C/kPa$	17.4	16.33	18.7	15.3
	$\varphi/^\circ$	29.8	29.68	30.3	28.7
固结不排水	$C/kPa$	49.9	36.3	40.1	29.5
	$\varphi/^\circ$	38.3	36.3	29	25.7

由表 3 可知尾细砂固结快剪指标较直剪快剪指标低,是由于在固结快剪试验中,土体原有固结改变,结构强度降低,同时尾矿颗粒有不同程度压碎变细。而在直剪快剪试验中土体原有固结状态未改变,并且尾矿固结较好。但对于尾粉土,由于在固结压力作用下,尾粉土中黏粒颗粒较多,使土体的排水固结加强,造成了尾粉土强度增大,所以其固结快剪指标  $C$ 、 $\varphi$  值均比直剪快剪大。

而三轴试验能够控制试样排水条件,受力状态也比较明确,并且可以控制大小主应力,剪切面不固定,能准确测定土的孔隙压力及体积变化,所以三轴试验能更好地模拟土体受力情况<sup>[20]</sup>。但在实际尾矿中长期承载力与尾矿的稳定性研究为主要研究问

题,快剪与三轴试验中出于安全性考虑,后期筑坝等工程活动采用快剪试验数据更加保险。

### 4.4 动力特性

图 10 为两种尾矿在固结比  $K_c$  相同时,在相同围压( $\sigma_3=200$  kPa)条件下的动剪应力  $\tau_d$  与振次  $N_f$  的关系曲线。当围压固结比和振次保持固定时,尾细砂的动强度较大,而尾粉土的动强度则较小。在相同围压条件下尾细砂和尾粉土的动剪应力  $\tau_d$  与破坏振次  $N_f$  之间的关系曲线变化规律基本相同,即动剪应力与振次成反比。在固结围压保持不变的情况下,动剪应力  $\tau_d$  增加,使得试样达到破坏所需的振次  $N_f$  减小。尾细砂的曲线斜率明显高于尾粉土,这是因为在较低的振次下,尾细砂的结构比尾粉

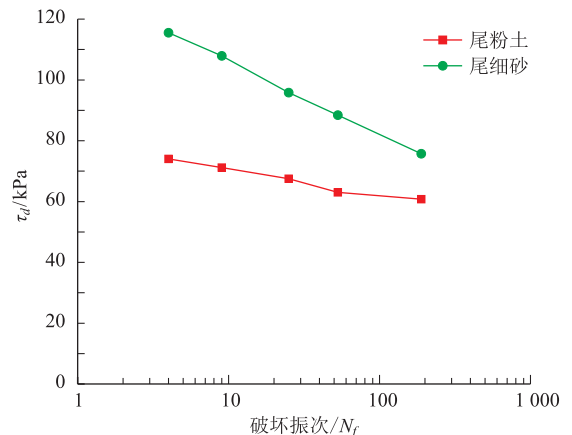


图 10 动剪应力与振次的关系曲线

土更加的密实,所以为了能够达到其破坏标准需要更大的动应力。而在高振次条件下,由于尾细砂的结构变得更加的松散,因此只需较低的动力就能破坏土样。相比之下,尾粉土的结构相对稳定,因此斜率较小。

如图 11 所示,3 种不同围压下的动剪应力  $\tau_d$  与振次  $N_f$  的关系曲线规律如前所述动剪应力与振次成反比。分析不同围压曲线可知,围压越大,动减应力随振次减小的速率越大。当不同的围压作用于同种试样时,该试样在相同破坏振次下所能承受的动应力与围压  $\sigma_3$  成正比。表明随着尾矿的围压增大,动应力变化的敏感性随之降低。这是因为随着围压增大,尾矿受到了更大的动应力,导致土体更为密实,所以要使土样达到破坏条件需要较大的振次才能实现。这一特性与静力剪切相似,固结压力增大时,其抗剪强度也增加。

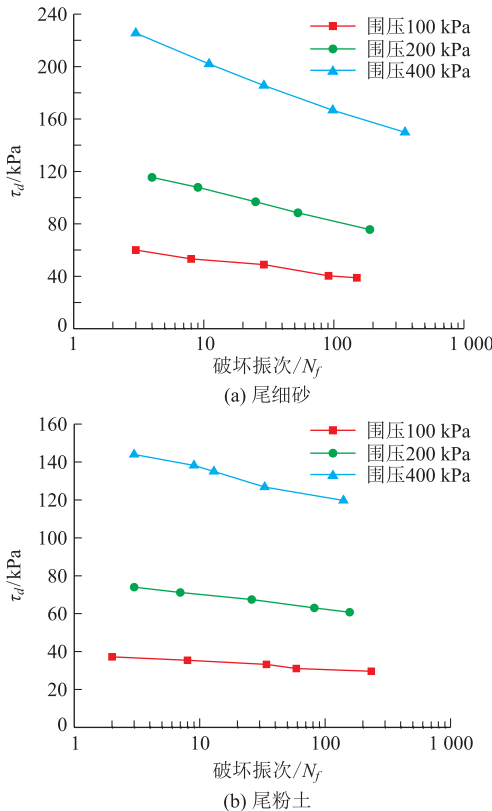


图 11 不同围压动剪应力与振次关系的曲线

采用幂函数对尾细砂和尾粉土的  $\sigma_3/\tau_d$  和破坏振次  $N_f$  关系曲线进行拟合,绘制  $\sigma_3/\tau_d - N_f$  关系曲线,如图 12 所示,并以此作为动强度标准。参数  $a$ 、 $b$  和拟合优度  $R^2$  的数值具体见表 4。两种尾矿的曲线拟合优度非常高,  $R^2$  皆超过 0.95,不同围压条件下的动剪强度比归一性较好,这说明围压对试验尾矿的动强度影响较小。总体而言,尾细砂的幂函

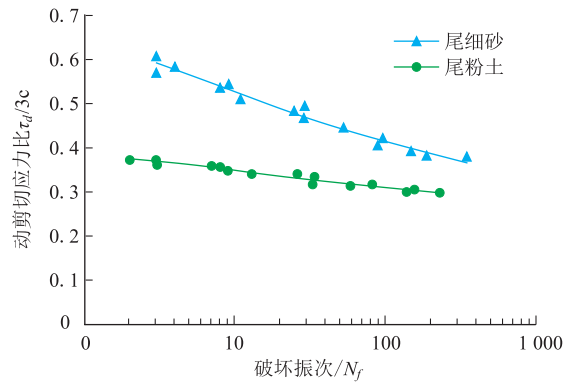


图 12 动剪应力比  $\sigma_3/\tau_d$  与破坏振次  $N_f$  关系

数曲线较为陡峭,表明随着破坏振次  $N_f$  的变化,尾细砂的动剪应力比  $\sigma_3/\tau_d$  更敏感。

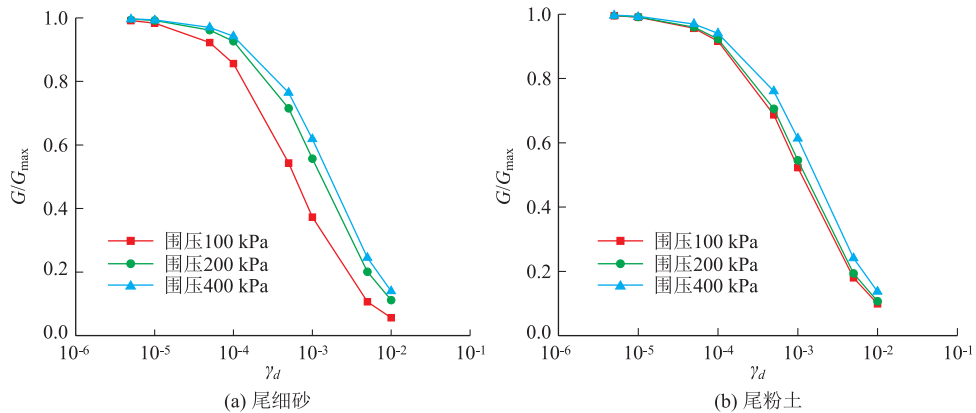
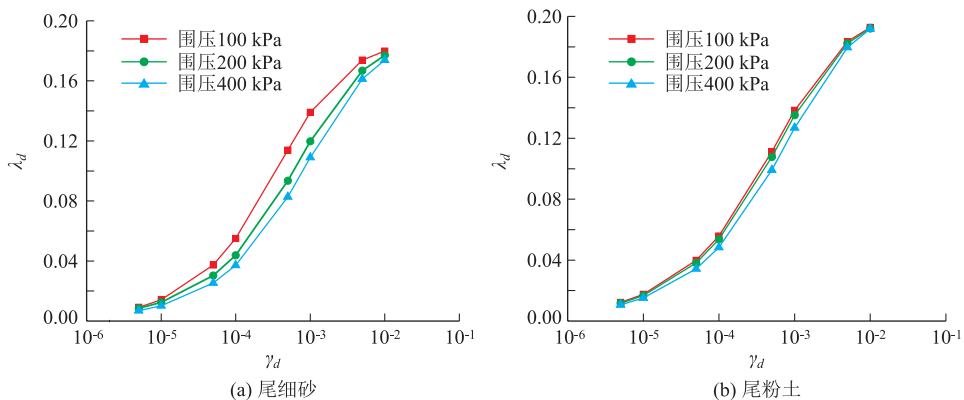
表 4 动剪应力比  $\sigma_3/\tau_d$  与破坏振次  $N_f$  关系幂函数拟合结果

尾矿种类	动强度拟合		
	$a$	$b$	$R^2$
尾细砂	0.658 4	0.102	0.975 1
尾粉土	0.387 1	0.049	0.959 6

#### 4.5 动模量与阻尼比试验

等压固结不同围压下试样的动剪切模量比、阻尼比与剪应变的关系曲线如图 13、图 14。分别给出了尾细砂与尾粉土在等压固结、围压  $\sigma_3$  分别为 100 kPa、200kPa 和 400 kPa 的动剪模量比  $G/G_{max}$  与动剪应变幅  $\gamma_d$ 、阻尼比  $\lambda_d$  与动剪应变幅  $\gamma_d$  的关系曲线。

由图 13 可以看出当  $\gamma_d < 10^{-4}$  时试样的  $G/G_{max}$  与  $\gamma_d$  的关系曲线逐渐的重合,当  $\gamma_d \geq 10^{-4}$  之后试样的  $G/G_{max}$  与  $\gamma_d$  的关系曲线会出现一个类似条带形的区域,并且动剪切模量比随着动剪切应变幅的增大而缩小。由图 14 可知,在剪应变幅值  $\gamma_d$  够小的情况下,不同围压尾矿颗粒阻尼比  $\lambda_d$  趋于一致。随着动剪应变幅值  $\gamma_d$  的增大,阻尼比  $\lambda_d$  也逐渐增大,并呈现出围压越大,阻尼比越大的趋势,而当动剪应变幅值达到  $10^{-3}$  时不同围压阻尼比之差逐渐减小并且逐渐趋于一致。并且可以看出较尾细砂而言,尾粉土的动剪切模量比和阻尼比与动剪切应变幅的关系对围压的敏感程度较小,不同围压下试验曲线较为相似。阻尼比是土颗粒动能的耗散特性,它是土颗粒运动过程中因内摩擦角而损失的能量与弹性体时动载荷所做的功之比,它从中可以看出土体颗粒的动能耗散特性。因此,在相同动荷载下,土颗粒之间接触越密实,其位移越困难,能量损失越少,阻尼比越低。如果阻尼比越高,则意味着其动能

图13 不同围压动剪模量比  $G/G_{\max}$  与动剪应变幅  $\gamma_d$  关系图14 不同围压阻尼比  $\lambda_d$  与动剪应变幅  $\gamma_d$  的关系

衰减得越快。

## 5 结论

(1) 随着尾矿堆积厚度的逐渐增加, 细粒尾矿的孔隙比变化明显强于粗粒尾矿。且两种尾矿透水性和渗透系数因粒组成分、孔隙比变化随深度增大逐渐变小。但深度越大其压缩性越强。

(2) 尾细砂固结快剪指标较直剪快剪指标低, 尾粉土则相反。虽然三轴试验能更好地模拟土体受力情况, 但在实际工程中仍应出于安全性综合考虑。

(3) 尾细砂和尾粉土两种尾矿在不同围压下的  $\sigma_3/\tau_d - N_f$  幂函数拟合曲线  $R^2$  均超过 0.95, 拟合程度较高。说明不同围压下这两种尾矿的动剪应力比归一性都较好, 这也说明了围压对试验尾矿的动强度影响较小。

(4) 动剪切模量比随着动剪切应变幅的增大而缩小。在剪应变幅值  $\gamma_d$  够小的情况下, 不同围压尾矿颗粒阻尼比  $\lambda_d$  趋于一致, 随着动剪应变幅值  $\gamma_d$  的增大, 阻尼比  $\lambda_d$  也逐渐增大, 并呈现出围压越大, 阻尼比越大的趋势。

## 参考文献

- [1] 姚斌. 高堆尾矿坝稳定性分析及加固关键技术研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2018, (22): 5816.
- [2] 樊鹏斐. 细粒尾矿土的动力特性试验研究[D]. 长安大学, 2011.
- [3] Ramon Verdugo, Nicholas Sitar, M. EERI, J. David Frost, M. EERI; Jonathan D. Bray, M. EERI; Gabriel Candia, M. EERI; Terry Eldridge; Youssef Hashash, M. EERI; Scott M. Olson, M. EERI; Alfredo Urzua. Seismic Performance of Earth Structures during the February 2010 Maule, Chile, Earthquake; Dams, Levees, Tailings Dams, and Retaining Walls[J]. EARTHQUAKE SPECTRA, 2012, 28(1): 75-96.
- [4] 曹文贵, 李鹏, 张超, 等. 土的初始和再压缩曲线分析模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 166-173.
- [5] Chen, R (Chen, Rui); Lei, WD (Lei, Weidong); Li, ZH (Li, Zaihong). Anisotropic shear strength characteristics of a tailings sand[J]. ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES, 2014, 71(12): 5165-5172.
- [6] 乐陶, 张进, 曹纪刚. 磷矿浮选细粒尾矿的动力特性试验[J]. 现代矿业, 2014, 30(11): 98-100
- [7] 杨春和, 张超, 马昌坤, 等. 高应力条件下尾矿破碎特性及坝体稳定性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 20-26.

- [8] Liang, W Xiong, D S. Research on the Solution to Coefficient of Earth Pressure at Rest Using Effective Stress Spade (Article)[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(7): 5-9, 35.
- [9] 尹光志,王文松,魏作安,等.地震作用下高堆尾矿坝永久变形与稳定性分析[J].岩土力学,2018,39(10): 3717-3726
- [10] 王文松,尹光志,魏作安,等.高烈度地震区细粒尾矿上游法筑坝动力反应与稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1201-1214.
- [11] 武立功,肖利兴,刘晓峰,等.尾砂粒径对尾矿坝漫顶溃坝的影响[J].中国安全科学学报,2020,30(4):160-165.
- [12] 叶自欢,李世涛.粗、细尾矿力学特性试验研究[J].铜业工程,2020,(2):8-11.
- [13] 张鹏伟,吴辉,胡黎明,等.铁矿尾矿料力学特性及坝体变形稳定性研究[J].工程地质学报,2015,23(6):1189-1195.
- [14] 巫尚蔚,杨春和,张超,等.粉粒含量对尾矿力学特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):2007-2017.
- [15] 张超,马昌坤,杨春和,等.粒径对尾矿抗剪强度及坝体稳定性影响[J].岩土工程学报,2019,41(201):145-148.
- [16] 胡再强,郭婧,梁志超,等.黏粒含量对细粒尾矿物理力学性质的影响[J].岩土工程学报,2020,42(S1):16-21.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准(GB/T 50123-2019)[S].2019-05-24.
- [18] 尹光志,王文松,魏作安,等.小打鹤尾矿库筑坝尾矿的动力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(201):3121-3130.
- [19] 巫尚蔚,杨春和,胡晓明,等.尾矿颗粒性质与压缩固结特性的关联性研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(11):121-126
- [20] 巴凌真主编.土力学实验[M].广州:华南理工大学出版社,2016.

**作者简介:** 冉路蔓(1999—),女,四川达州人,硕士研究生,主要从事工程地质和灾害防治研究。E-mail:1345126763@qq.com

**通讯作者:** 陈刚(1981—),男,河南林州人,博士,讲师,硕士研究生导师,主要研究方向:水文与工程地质、地下水和工程地质数值模拟。  
E-mail: chen\_kust@qq.com