

DOI: 10.11779/CJGE2020S1004

黏粒含量对细粒尾矿物理力学性质的影响

胡再强, 郭 婧, 梁志超, 王 凯, 冯 哲, 陈振鹏

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 随着选矿技术的进步, 尾矿粒径越来越小, 其中黏粒占比也逐渐增多, 因此, 研究黏粒含量对细粒尾矿物理力学特性的影响就变得尤为紧迫和必要。通过一系列物理力学试验, 研究黏粒含量对细粒尾矿物理特性、渗透特性、压缩特性、剪切特性和动力特性的影响。试验结果表明: 随黏粒含量的增大, C_u 显著增大, C_c 变化不明显, 液限、塑限和塑性指数都有所增大; 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, 且在 10% 时最容易发生液化破坏。随黏粒含量增加, 动剪切模量先减小后增大, 阻尼比先增大后减小。说明黏粒含量对细粒尾矿的物理力学性质有显著影响, 在工程中应予以充分重视。

关键词: 黏粒含量; 细粒尾矿; 黏聚力; 内摩擦角; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)S1-0016-06

作者简介: 胡再强(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程研究方面的工作。E-mail: huzq@xaut.edu.cn。

Effects of clay content on physical and mechanical properties of fine tailings

HU Zai-qiang, GUO Jing, LIANG Zhi-chao, WANG Kai, FENG Zhe, CHEN Zhen-peng

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the progress of beneficiation technology, the size of tailings is getting smaller, and the proportion of clay is gradually increasing. Therefore, it is particularly urgent and necessary to study the influences of clay content on the physical and mechanical characteristics of fine tailings. Through a series of physical and mechanical experiments, the effects of clay content on the physical characteristics, permeability characteristics, consolidation characteristics, shear characteristics and dynamic characteristics of fine tailings are studied. The test results show that as the clay content increases, C_u increases significantly, while C_c does not change significantly, and liquid limit, plastic limit and plastic index all increase. As the content of clay particles increases, the permeability coefficient decreases, and the compressibility first increases and then decreases. Cohesion keeps increasing with the increase of clay content, while the internal friction angle keeps decreasing. The effects of clay content on liquefaction of fine tailings are to promote first and then inhibit, and liquefaction damage is most likely to occur at 10%. As the clay content increases, the dynamic shear modulus decreases first and then increases, and the damping ratio increases first and then decreases. It is shown that the clay content has a significant effect on the physical and mechanical properties of fine tailings, and it should be paid full attention to in engineering.

Key words: clay content; fine tailings; cohesion; internal friction angle; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引 言

尾矿库是堆存各类矿石尾料的场所, 其稳定性及运行状况的好坏, 直接关系到矿山生产和人民生命财产安全^[1]。细粒尾矿因抗剪强度低, 渗透系数小, 固结稳定慢^[2]等特点, 使坝体发生滑坡、液化失稳的风险急剧增加, 因此越来越受到国内外学术界及工程界的重视。

中国很早就开始关注尾矿的稳定性问题^[3-6], 但对细粒尾矿的研究起步较晚。陈守义^[7]首先从沉积滩形式, 坝体横截面结构, 土层力学形式和渗透性等方面

对比分析了细粒尾矿对尾矿坝稳定性的不利影响。尹光志等^[8]对细粒尾矿坝静、动力稳定性进行了系统研究。巫尚蔚等^[9]研究了粉粒含量对细粒尾矿力学特性的影响。同时, 已有许多学者对不同黏粒含量土的工程性质进行较为深入的研究, 如 Constantinescu 等^[10]研究了黏粒含量对冰川沉积物的液限、塑限、塑性指数以及抗剪强度指标的影响。Dafalla^[11]通过对黏土与

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2017JM5059); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(13JS073)

收稿日期: 2020-06-01

砂土混合材料进行直剪试验发现, 混合材料的黏聚力随黏粒含量增加而不断增加。曾长女等^[12]研究指出, 黏粒含量为 8% 的粉土动剪应力最小而液化后低强度段应变最大。王力等^[13]通过负压湿筛装置筛选出黄土中的黏粒, 配制出不同黏粒含量的黄土并进行一系列物理力学试验。李涛等^[14]研究表明, 在相同细粒含量的砂土中, 黏粒含量不同, 试样抗液化强度也不同。而对不同黏粒含量尾矿物理力学性质的研究还鲜有报道。

随着选矿技术的进步, 一些金属矿山的矿渣颗粒越来越细, 尾矿中黏粒占比也逐渐增多, 因此, 研究黏粒含量对细粒尾矿物理力学性质的影响就变得尤为紧迫和必要。为更好地研究黏粒含量对细粒尾矿物理力学特性的影响, 本文对不同黏粒含量细粒尾矿进行一系列物理力学试验, 分析了黏粒含量对细粒尾矿物理特性、渗透特性、压缩特性、剪切特性和动力特性的影响, 为含黏粒细粒尾矿的理论研究及工程实践提供科学依据。

1 试样制备与试验方案

1.1 试样制备

本次试验所用尾矿料取自河南某钼矿尾矿库, 颗粒粒径小于 0.075 mm 的尾矿含量为 74%, 属细粒尾矿^[15]。将不同比例高岭土与细粒尾矿混合, 配制黏粒含量分别为 2% (未掺高岭土), 5%, 10%, 15% 和 20% 的尾矿料, 以初始含水率为 15% 制备试样, 制备完成后将试样抽真空饱和, 待试样孔压系数 B 达到 95% 以上, 默认饱和完成。表 1, 2 分别为细粒尾矿和高岭土的物理参数。

表 1 细粒尾矿各项物理参数

Table 1 Various physical parameters of fine tailings

颜色	$\rho_{dmin}/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	G_s
灰色	1.21	1.90	2.78

表 2 高岭土各项物理参数

Table 2 Various physical parameters of kaolin

颜色	塑性指数 I_p	G_s	(粒径 < 0.005 mm) %
白色	18.1	2.7	98

1.2 试验方案

对 5 种黏粒含量细粒尾矿进行渗透试验, 取干密度为 1.47, 1.55, 1.62, 1.71, 1.80 g/cm³。

对 5 种黏粒含量的细粒尾矿进行侧限压缩试验, 控制干密度为 1.55 g/cm³。试验采用逐级加载的方式, 压力等级为 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1200, 1600 kPa, 每级荷载持续 24 h, 待固结稳定后, 施加下一级荷载。

直接剪切试验采取固结快剪方式, 试样固结压力分别为 50, 100, 200, 400 kPa。研究黏粒含量对细粒尾矿抗剪强度指标的影响规律时, 5 种细粒尾矿控制干密度都为 1.55 g/cm³。

对 5 种黏粒含量细粒尾矿进行三轴试验, 控制干密度为 1.55 g/cm³, 研究黏粒含量对细粒尾矿动强度、动孔压、动剪切模量和阻尼比的影响规律。固结方式选用均压固结, 固结压力分别为 50, 100, 200, 400 kPa。液化破坏标准为应变控制标准, 应用 5% 应变作为液化破坏标准。试验时施加的振动波形为正弦波, 频率为 1 Hz。

2 结果与分析

2.1 黏粒含量对粒度组成的影响

对 5 种黏粒含量细粒尾矿进行颗粒分析, 分析结果见表 3。从表 3 中可以看出, 5 种黏粒含量细粒尾矿的 C_u 均大于 5, C_c 均在 1~3, 说明这 5 种黏粒含量的细粒尾矿级配均良好。随黏粒含量的增大, C_u 显著增大, C_c 变化规律不明显。

2.2 黏粒含量和液塑限指标的关系

图 1 为不同黏粒含量细粒尾矿液塑限和塑性指数与黏粒含量 P_c 关系曲线, 由图可知, 随黏粒含量的增加, 液限、塑限和塑性指数均增大, 且与黏粒含量呈正相关的线性关系, 相关系数 R^2 均大于 0.93。这是因为黏粒粒径小, 而比表面积和表面电荷大, 结合水含量高, 从而使塑性指数随黏粒含量的增大而增大。

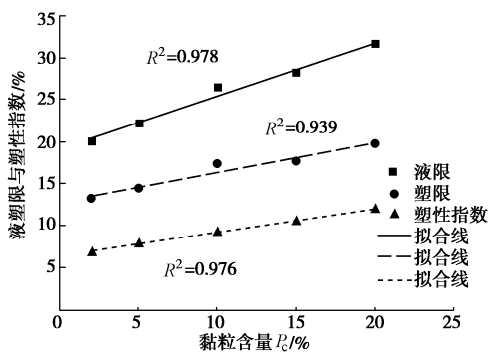


图 1 液塑限和塑性指与黏粒含量关系曲线

Fig. 1 Relationship among liquid-plastic limit, plastic finger and clay content

2.3 黏粒含量对细粒尾矿渗透系数的影响

图 2 为不同黏粒含量细粒尾矿渗透系数 k 与孔隙比 e 关系曲线, 由图可知, 黏粒含量对细粒尾矿的渗透性有显著影响。在相同孔隙比条件下, 黏粒含量增多, 渗透系数随之减小。当黏粒含量一定时, 渗透系数随孔隙比的增大而增大。

这是因为, 当黏粒含量较小时, 黏粒分散地附着

表 3 不同黏粒含量细粒尾矿颗粒分析结果表

Table 3 Analysis results of fine tailings particles with different clay contents

试样 编号	颗粒大小组成百分比 (%)					不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	中值粒径 D_{50}/mm
	>0.5 mm	0.5~ 0.1 mm	0.1~0.074 mm	0.074~ 0.005 mm	<0.005 mm			
#1	1.29	18.29	6.41	71.96	2.05	6.34	1.01	0.031
#2	1.25	17.74	6.22	69.81	4.99	7.33	1.09	0.030
#3	1.19	16.83	5.89	66.20	9.88	8.02	1.13	0.029
#4	1.12	15.91	5.58	62.61	14.78	12.01	1.02	0.024
#5	1.06	14.99	5.26	59.01	19.68	15.52	1.31	0.021

于骨架颗粒表面，随黏粒含量增大，骨架大颗粒逐渐被包埋在黏粒中。在相同孔隙比条件下，随黏粒含量的增加，小孔隙通道增多，大孔隙通道减少，导致渗透系数减小。另一方面，由于黏粒中的黏土矿物比表面积大，电荷作用强，且具有良好的亲水性，使得土体内水流速度降低，从而导致渗透系数减小。

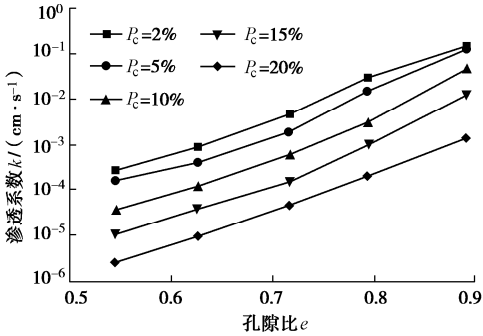


图 2 渗透系数与孔隙比关系曲线

Fig. 2 Relationship between k and e

2.4 黏粒含量对细粒尾矿固结特性的影响

图 3 为不同黏粒含量细粒尾矿 $e - \lg p$ 曲线，其中 e 为孔隙比， p 为竖向压力。由图可知，不同黏粒含量细粒尾矿 $e - \lg p$ 曲线都由平缓段和陡峭段组成，当黏粒含量小于 10% 时，黏粒含量越多，平缓段越短，陡峭段越长，压缩曲线随黏粒含量的增加而下移，即试样压缩性增大；当黏粒含量大于 10% 时，规律则相反。

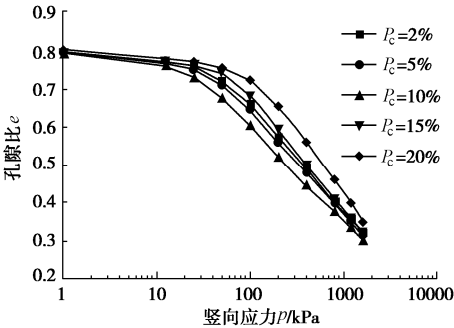


图 3 不同黏粒含量细粒尾矿的压缩曲线

Fig. 3 Compression curves of fine tailings with different clay contents

这是因为，当黏粒含量小于 10% 时，大部分黏粒分布于大颗粒接触点位置，使大颗粒构成的骨架结构

不稳定性增大，从而导致试样压缩性增强；当黏粒含量大于 10% 时，黏粒可较好地填充大颗粒间孔隙，将骨架颗粒包埋其中，使试样压缩性减弱。

2.5 黏粒含量对细粒尾矿抗剪强度的影响

黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与黏粒含量 P_c 的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知，黏聚力随黏粒含量的增加而呈上升趋势。当黏粒含量从 2% 增加到 5% 时，黏聚力增加趋势较平缓，而当黏粒含量大于 5%，黏聚力迅速增加。这是因为，当黏粒含量较小时，黏粒散乱地分布于大颗粒表面，使黏聚力有所增大；而当黏粒含量较大时，黏聚力主要源于黏粒间黏结作用，黏粒增多，黏结作用增强^[16]，黏聚力迅速增加。内摩擦角随黏粒含量的增加持续减小。这是因为，细粒尾矿颗粒表面粗糙度大，咬合摩擦力强，但黏粒含量增多，降低了颗粒间咬合摩擦力，起“润滑”作用^[17]，从而导致内摩擦角减小。

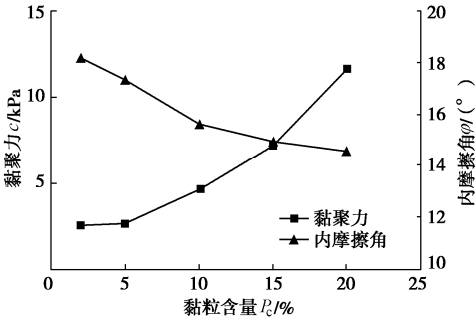


图 4 不同黏粒含量细粒尾矿的抗剪强度指标

Fig. 4 Shear strength index of fine tailings with different clay contents

2.6 黏粒含量对细粒尾矿动力特性的影响

(1) 动强度

5 种黏粒含量细粒尾矿动强度试验结果以动剪应力比 τ_d / σ'_3 与破坏振次 N_f 的关系曲线表示，如图 5 所示。其抗液化拟合公式为

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_3} = B - A \ln N_f \quad , \quad (1)$$

式中， τ_d 为试样 45° 斜面上动剪应力 ($\tau_d = \sigma_d / 2$)， σ_d 为动应力， σ'_3 为有效固结应力， N_f 为破坏振次， A ， B 为试验参数。

比较 5 种黏粒含量细粒尾矿的抗液化曲线关系可以发现, 随着黏粒含量的增大, 抗液化曲线先下移, 在黏粒含量为 10% 时达到最低, 之后随黏粒含量的增大, 曲线逐渐上移, 在黏粒含量为 20% 时达到高。说明黏粒含量对尾矿液化的影响为先促进后抑制, 且在 10% 时最容易发生液化破坏。

图 5 中的斜率和截距为式 (1) 中的参数 A , B , 如表 4 所示。液化曲线参数 A 随黏粒含量的增大, 逐渐减小, 参数 B 随黏粒含量的增大, 先减小后增大。

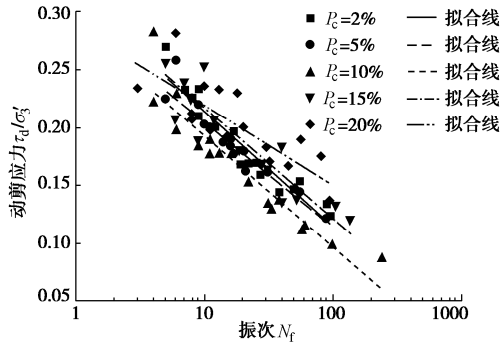


图 5 不同黏粒含量细粒尾矿 τ_d/σ'_3 与 N_f 关系曲线

Fig. 5 Relationship between τ_d/σ'_3 and N_f for fine tailings with different clay contents

表 4 细粒尾矿液化曲线参数

Table 4 Parameters of liquefaction curves of fine tailings

黏粒含量 $P_c/\%$	参数 A	参数 B
2	0.101	0.316
5	0.091	0.296
10	0.097	0.291
15	0.095	0.302
20	0.069	0.299

(2) 动孔压

图 6 为不同黏粒含量细粒尾矿动孔压发展曲线, 图中横坐标为振次比 N/N_f , 纵坐标为动孔压比 u_d/σ'_0 。

由图可知, 在开始振动阶段, 动孔压比随振次比的增大先迅速增大, 随后趋于平稳, 当振次比大于 0.8, 动孔压增长速率又逐渐增大。随黏粒含量的增大, 试样动孔压拟合曲线先向上移动, 在 10% 时达到最高, 而后向下移动。在振动前期, 动孔压比随黏粒含量的增大, 先增大后减小。而振动后期, 孔压比增长速率随黏粒含量的增大, 不断减小。

该曲线与 Seed 等^[19]提出的动孔压模型相似。因此可考虑用修正的模型公式进行拟合, 即

$$\frac{u_d}{\sigma'_0} = a \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_f} \right)^{1/2b}, \quad (2)$$

式中, u_d 为动孔隙水压力, σ'_0 为初始有效固结应力, N 为振次, N_f 为破坏振次, a , b 为试验参数。

由图 6 可知, 式 (2) 中的孔压模型可对不同黏粒含量细粒尾矿的动孔压试验结果进行良好的拟合, 相关系数都大于 0.95。其试验参数 a , b 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 试验参数 a , b 都随着黏粒含量的增加, 先增加后减小, 且在黏粒含量为 10% 达到最大。

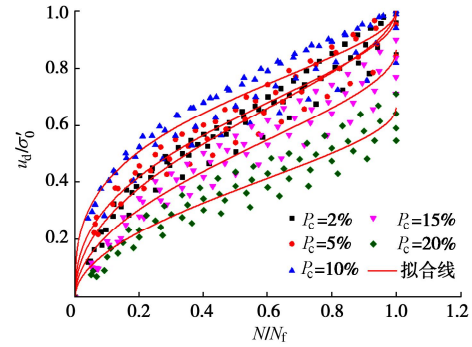


图 6 不同黏粒含量细粒尾矿 u_d/σ'_0 与 N/N_f 关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of u_d/σ'_0 and N/N_f of fine tailings with different clay contents

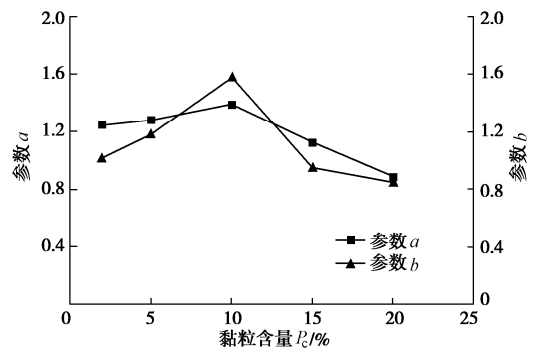


图 7 孔压模型试验参数

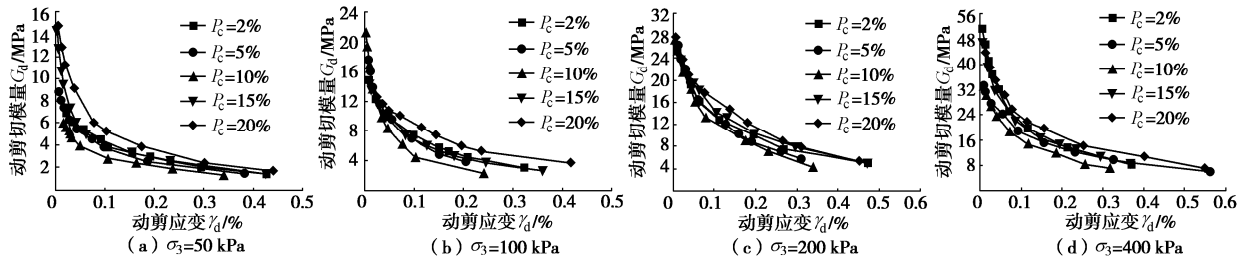
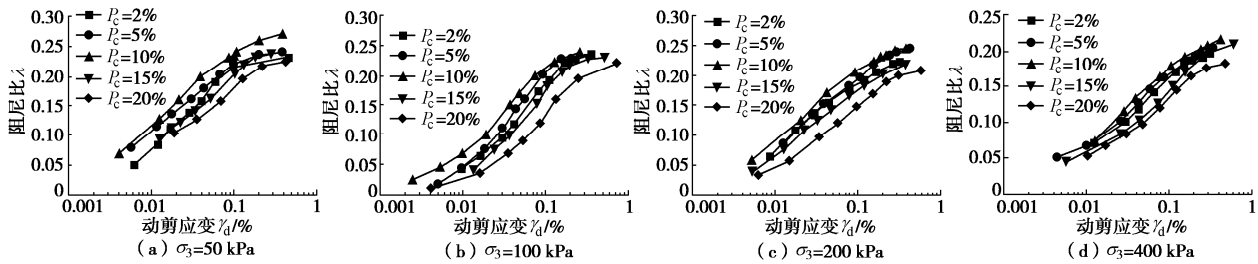
Fig. 7 Test parameters of pore pressure model

(3) 动剪切模量

图 8 为各黏粒含量细粒尾矿在不同围压下动剪切模量 G_d 与动剪应变 γ_d 关系曲线。如图 8 所示, 随动剪应变的增加, 各黏粒含量尾矿试样动剪切模量均不断降低, 且在小应变范围内, 动剪切模量下降迅速, 而随动剪应变的增大, 曲线逐渐趋于平缓。当黏粒含量小于 10% 时, 动剪切模量随黏粒含量的增大不断减少, 而当黏粒含量大于 10% 时, 动剪切模量随黏粒含量的增大而增大。

(4) 阻尼比

图 9 所示为各黏粒含量尾矿试样在不同围压下阻尼比 λ 与动剪应变 γ_d 关系曲线。由图可知, 随动剪应变增大, 各黏粒含量尾矿试样阻尼比均不断增大, 前期应变较小时, 阻尼比增加迅速, 随应变增大, 阻尼比增速减慢。相同剪应变条件下, 黏粒含量对阻尼比的影响较为明显。当黏粒含量小于 10% 时, 随黏粒含量的增加, 阻尼比不断增大。当黏粒含量大于 10% 时, 随黏粒含量的增加, 阻尼比不断减小。

图 8 不同黏粒含量细粒尾矿 G_d 与 γ_d 关系曲线Fig. 8 Relationship between G_d and γ_d of fine tailings with different clay content图 9 不同黏粒含量细粒尾矿 λ 与 γ_d 关系曲线Fig. 9 Relationship between λ and γ_d of fine tailings with different clay contents

3 结 论

(1) 5 种黏粒含量的细粒尾矿级配均良好。随黏粒含量的增大, C_u 显著增大, C_c 变化规律不明显; 细粒尾矿液限、塑限和塑性指数都增大。

(2) 在相同孔隙比条件下, 黏粒含量增多, 细粒尾矿渗透系数随之减小; 当黏粒含量一定时, 渗透系数随孔隙比的增大而增大。

(3) 当黏粒含量小于 10% 时, 随黏粒含量增大, 试样压缩性增强; 当黏粒含量大于 10% 时, 随黏粒含量增大, 试样压缩性减弱。

(4) 黏聚力随黏粒含量的增大而增大, 内摩擦角随黏粒含量增大而减小。

(5) 当黏粒含量小于 10% 时, 随黏粒含量的增大, 细粒尾矿抗液化能力下降, 动孔压升高, 动剪切模量呈减小趋势, 阻尼比呈增大趋势。而黏粒含量大于 10% 时, 规律则相反。

参考文献:

- [1] 《中国有色金属尾矿库概论》 编辑委员会. 中国有色金属尾矿库概论[R]. 北京: 中国有色金属工业总公司, 1992. ("Introduction to China Nonferrous Metal Tailings Library" Editorial Committee. Introduction to China Nonferrous Metal Tailings Reservoir[R]. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Corporation, 1992. (in Chinese))
- [2] 尾矿堆积坝岩土工程技术规范: GB 50547—2010[S]. 2010.

(Technical Specifications for Geotechnical Engineering of Tailings Deposit Dam: GB 50547—2010[S]. 2010. (in Chinese))

- [3] 徐志英, 沈珠江. 高尾矿坝的静、动应力非线性分析与地震稳定性[J]. 华东水利学院学报, 1980(4): 59 - 75. (XU Zhi-ying, SHEN Zhu-jiang. Nonlinear analysis of static and dynamic stresses and seismic stability of high tailings dam[J]. Journal of East China Water Conservancy College, 1980(4): 59 - 75. (in Chinese))
- [4] 王武林, 杨春和, 阎金安. 某铅锌矿尾矿坝工程勘察与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 332 - 344. (WANG Wu-lin, YANG Chun-he, YAN Jin-an. Engineering exploration and stability analysis of the tailings dam of a Lead-zinc Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(4): 332 - 344. (in Chinese))
- [5] 陈存礼, 何军芳, 胡再强, 等. 尾矿砂的动力变形及动强度特性研究[J]. 水利学报, 2007(3): 365 - 370. (CHEN Cun-li, HE Jun-fang, HU Zai-qiang, et al. Experimental study on dynamic deformation and dynamic strength of tailing sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(3): 365 - 370. (in Chinese))
- [6] 李宏儒, 胡再强, 陈存礼, 等. 金堆城尾矿坝加高方案数值模拟及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 39(4): 1138 - 1142. (LI Hong-ru, HU Zai-qiang, CHEN Cun-li, et al. Numerical simulation and slope stability analysis in Jingduicheng tailings dam to be designed to increase the dam height[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2008, **39**(4): 1138 - 1142. (in Chinese))
- [7] 陈守义. 浅议上游法细粒尾矿堆坝问题[J]. 岩土力学, 1995, **16**(3): 70 - 76. (CHEN Shou-yi. Some superficial views on the problem of building fine grain tailings fill dams by means of up-stream method[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, **16**(3): 70 - 76. (in Chinese))
- [8] 尹光志, 张东明, 魏作安, 等. 土工合成材料与细粒尾矿界面作用特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 426 - 429. (YIN Guang-zhi, ZHANG Dong-ming, WEI Zuo-an, et al. Testing study on interaction characteristics between fine grained tailings and geosynthetics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 426 - 429. (in Chinese))
- [9] 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. (WU Shang-wei, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. The effects of silt content on the mechanical properties of tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(8): 2007 - 2017. (in Chinese))
- [10] CONSTANTINESCU J, CONSTANTINESCU D. Particularity of plasticity characteristics of fine glacial materials (North Chicago area)[J]. Geocomarina, 2010.
- [11] DAFALLA M A. Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2013(4).
- [12] 曾长女, 冯伟娜. 黏粒含量对粉土液化后特性影响的试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, **36**(3): 727 - 733. (ZENG Chang-nü, FENG Wei-na. Influence of clay content on postliquefaction characteristics of silt[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, **36**(3): 727 - 733. (in Chinese))
- [13] 王力, 李喜安, 赵宁, 等. 黏粒含量对黄土物理力学性质的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, **29**(3): 133 - 143. (WANG Li, LI Xi-an, ZHAO Ning, et al. Effect of Clay Content on Physical and Mechanical Properties of Loess Soils[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, **29**(3): 133 - 143. (in Chinese))
- [14] 李涛, 唐小微. 黏粒和粉粒的共存对砂土静动力液化影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 169 - 172. (LI Tao, TANG Xiao-wei. Experimental study on effect of coexistence of clay and silt on static and dynamic liquefaction of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 169 - 172. (in Chinese))
- [15] 蔡清, 程江涛, 于沉香. 细粒尾矿的定义及分类方法探讨[J]. 土工基础, 2014, **28**(1): 91 - 93. 岩土力学, 2004, **25**(增刊): 71 - 74. (CAI Qing, CHENG Jiang-tao, YU Chen-xiang. Definition and classification of fine grain materials from mine tailings[J]. Soil Engineering and Foundation 2014, **28**(1): 91 - 93. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S0): 71 - 74. (in Chinese))
- [16] 李建红, 张其光, 孙逊, 等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(9): 1431 - 1435. (LI Jian-hong, ZHANG Qi-guang, SUN Xun, et al. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 2008, **48**(9): 51 - 55. (in Chinese))
- [17] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, **31**(10): 43 - 47. (GONG Xiao-nan, XIONG Chuan-xiang, XIANG Ke-xiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **31**(10): 43 - 47. (in Chinese))
- [18] 王权民, 李刚, 陈正汉, 等. 厦门砂土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(10): 107 - 111. (WANG Quan-min, LI Gang, CHEN Zheng-han, et al. Study on dynamic characteristics of Xia men Sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 107 - 111. (in Chinese))
- [19] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987. (XIE Ding-yi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiao-tong University Press, 1987. (in Chinese))

(编校: 孙振远)