

文章编号:1001-4888(2016)03-0417-08

不同含水率和压实度铅锌尾砂抗剪强度试验研究^{*}

梁冰¹, 董擎¹, 姜利国¹, 胡学涛¹, 贾立锋²

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 尾砂的抗剪强度是分析尾矿坝失稳问题的重要参数。为了探究含水率和压实度对铅锌尾砂抗剪强度的影响,开展三种压实度(80%、90%、100%)情况下五组不同含水率(3%、6%、9%、12%、15%)铅锌尾砂试样的抗剪强度试验。结果表明:铅锌尾砂的剪应力随压实度的增大而增大,随含水率的增大先增大后减小;随着含水率的增大,铅锌尾砂的内摩擦角先减小后增大,粘聚力先增大后减小;在含水率为6%时,粘聚力最大;随着压实度的增大,铅锌尾砂内摩擦角和粘聚力均呈线性增长,含水率为6%时压实度对粘聚力的影响最大,含水率超过12%,压实度对粘聚力的影响逐渐减小;保持尾砂含水率在6%左右和提高尾矿坝的压实度,能够有效提高尾砂抗剪强度,降低尾矿坝溃坝危险性。研究结果对尾矿坝的安全管理和稳定性评价具有一定意义。

关键词: 铅锌尾砂; 含水率; 压实度; 抗剪强度

中图分类号: TU411.7; TD982

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-160

0 引言

我国铅锌矿产资源比较丰富,生产能力、消费量及出口量均居于世界前列。随着铅锌冶炼的急剧增加,尾砂日益增多,尾矿坝是尾砂主要堆积方式,它是一个具有高势能的人造泥石流的危险源,如果发生失稳破坏将给下游工农业生产及人民生命财产造成巨大的危害^[1]。尾矿坝失稳问题分析中,抗剪强度是表征尾矿坝稳定性重要的参数之一,尾砂的抗剪强度主要受尾砂种类、粒径组成、含水率等影响^[2,3]。尾砂在建成尾矿坝后,库内水位受坝体的高度、大气降水、矿浆排放量影响,处于浸润线附近的尾砂容易产生液化而改变物理力学性质,从而影响坝体的变形及稳定性^[4-6]。随着尾砂的不断堆积,在顶部尾砂重力作用下,下部颗粒之间紧密结合,干密度较大,中上部松散堆积的尾砂比下部紧密压实的尾砂更容易发生滑坡现象^[7,8]。含水率和压实度是影响铅锌尾矿坝体稳定性的重要因素,许多学者在含水率和压实度对抗剪强度的影响方面做了大量的研究工作。胡昕等^[9]测定了不同含水状态煤系土试样的抗剪强度,结果表明随着含水率的增大,煤系土黏聚力减小,含水率变化对煤系土内摩擦角的影响较小;黄琨等^[10]对第三系粉砂土进行了直剪试验,研究结果表明,随着含水率的增加,土的抗剪强度降低,含水率降低了土的黏聚力,对内摩擦角的影响较小,土的抗剪强度的变化是含水率和压实度共同影响的结果;骆以道^[11]分析了含水状态对压实土抗剪强度的影响机制,提出了一个考虑饱和度影响的压实填土抗剪强度简易计算方法;杨磊^[12]开展了不同干密度和含水率黄土直接剪切试验,研究表明含水率和干密度是影响黄土抗剪强度的重要因素;朱崇辉等^[13]通过对非饱和黏性土在不同含水量状态下的重塑土样进行剪切和拉伸对比试验,指出非饱和黏性土的抗剪强度指标在一定范围内都随含水量的增大而减小;骆

^{*} 收稿日期: 2015-09-10; 修回日期: 2016-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574145); 国家自然科学基金资助项目(51304113)

通讯作者: 董擎(1988—),女,博士生。研究方向: 矿山灾害力学。Email: 1728753419@qq.com

圣明^[14]通过室内直剪试验分析了含水量、干密度以及各向异性对非饱和粉质粘土抗剪强度特性的影响,得到了抗剪强度指标和含水量、干密度之间的基本规律和拟合公式。

目前关于土体的抗剪强度研究较多,对尾砂抗剪强度的研究则相对较少,尾砂具有不同于土的物理力学特性,尾砂的抗剪强度特性也与土体有很大不同。因此本文以辽宁省葫芦岛杨家杖子铅锌矿尾砂为研究对象,通过开展不同含水率、不同压实度条件下铅锌尾砂抗剪强度试验,探究含水率和压实度对尾砂抗剪强度的影响,为尾矿坝的稳定性研究提供参考依据。

1 不同压实度和含水率铅锌尾砂抗剪强度试验

1.1 基本物理力学参数测试

试验尾砂取自辽宁省葫芦岛市杨家杖子铅锌矿区。先将尾砂在实验室条件下风干,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)对试样进行筛分(小于 0.075mm 采用密度计法),得到尾砂的粒径级配曲线,如图 1。开展视密度、液塑限、饱和含水率、比重、重型击实试验,试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知铅锌尾砂的最优含水率为 12%,颗粒不均匀系数为 5.28,质量分数 60% 以上的颗粒直径约为 0.132mm,直径 0.075mm 以下质量分数约占 40%,依据细粒土的划分标准,属于尾粉砂。

表 1 铅锌尾矿试样基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of lead-zinc tailings

视密度	自然含水率	比重	有效粒径	最大干密度
1.16g/cm ³	0.86%	2.90	0.028mm	1.97g/cm ³
液限	塑限	控制粒径	不均匀系数	最优含水率
18.52%	12.61%	0.132mm	5.28	12.30%

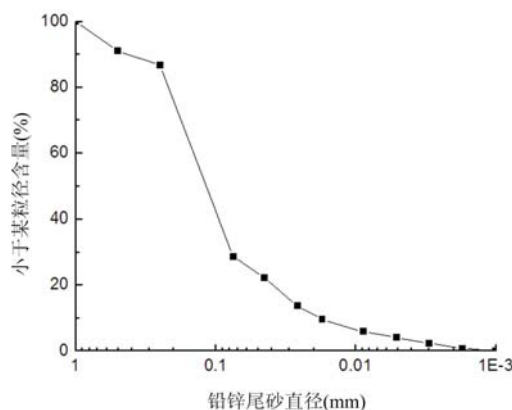


图 1 粒径级配曲线

Fig. 1 Partical size distribution curve



图 2 配制好的铅锌尾砂试样

Fig. 2 Lead-zinc tailings samples

1.2 试验方案

根据重型击实试验结果得出尾砂自然条件下压实度为 60%,制作铅锌尾砂试样的压实度分别为 80%、90%、100%,每组压实度设计五组不同含水率,分别为 3%、6%、9%、12%、15%(压实度为 100%的试样饱和含水率为 16%)。

以压实度为 80%、含水率为 9%试样为例介绍试验过程:(1)配制设计含水率的尾砂试样(如图 2),将配制好的试样放入塑料袋中焖 24 小时;(2)根据重型击实试验结果计算体积为 59.99cm³ 的环刀所需试样质量,称量尾砂试样并压入环刀中,每次制备四个试样,如图 3;(3)将试样放入 ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)中(图 4),施加 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 的法向应力,以 0.8mm/min 剪切速率进行不排水直接快速剪切,得到破坏时的剪切应力。每组不同含水率和压实度试样开展三次平行试

验,取试验数据均值作为最终结果(表 2)。



图 3 环刀试样
Fig. 3 Samples in cutting ring



图 4 四联直剪仪
Fig. 4 Direct shear apparatus

2 铅锌尾砂抗剪强度试验结果分析

不同压实度和含水率条件下法向应力所对应的剪应力如表 2 所示。

表 2 不同压实度不同含水率铅锌尾砂剪应力

Tab. 2 Shear stress of lead-zinc tailings under different moisture contents and compaction degrees

压实度 (%)	含水率 w (%)	剪应力(kPa)				粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)
		100kPa	200kPa	300kPa	400kPa		
80%	3%	77.09	110.97	144.94	192.58	36.28	20.83°
	6%	78.50	121.19	151.77	190.70	43.75	20.16°
	9%	79.21	111.86	134.48	197.21	36.54	20.46°
	12%	59.97	115.28	144.66	180.52	27.36	21.36°
	15%	65.94	126.00	156.02	203.71	27.08	23.91°
90%	3%	91.06	185.89	229.98	286.76	40.62	32.26°
	6%	100.68	160.32	225.24	258.71	51.49	28.32°
	9%	91.06	147.48	202.75	252.29	38.66	28.32°
	12%	94.51	132.00	199.90	250.22	35.40	28.15°
	15%	81.64	140.08	190.08	242.54	30.41	28.04°
100%	3%	124.81	243.97	312.72	372.72	45.44	41.43°
	6%	139.73	275.45	345.63	379.06	87.93	38.25°
	9%	120.24	237.67	313.87	362.34	62.14	36.89°
	12%	116.49	186.91	257.34	327.76	46.08	35.15°
	15%	109.90	206.04	274.82	361.84	32.00	39.51°

2.1 铅锌尾砂抗剪强度基本规律

以法向应力 100kPa 为例(图 5),压实度为 100%,铅锌尾砂剪应力最大值为 139.73kPa;压实度为 90%,剪应力最大值为 100.68kPa;压实度为 80%,剪应力最大值为 79.21kPa。剪应力总体上随压实度的降低而降低,随着含水率的增大先增大后减小。绘制法向应力和剪应力关系曲线(如图 6,图 7,图 8),并作线性拟合,得出粘聚力 c 值和内摩擦角 ϕ 值。由表 2 中 c 、 ϕ 值可知,不同含水率和压实度的

铅锌尾砂粘聚力都较小,抗剪强度主要靠内摩擦角贡献。

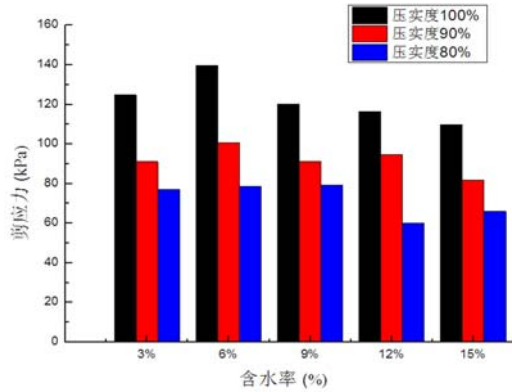


图 5 法向应力为 100kPa 时铅锌尾砂剪应力变化

Fig. 5 The shear stress change rule at normal stress 100kPa

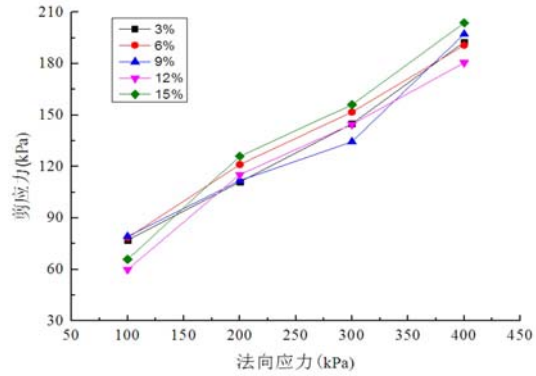


图 6 法向应力与剪应力关系曲线(压实度 80%)

Fig. 6 Relations between normal stress and shear stress (compaction degree 80%)

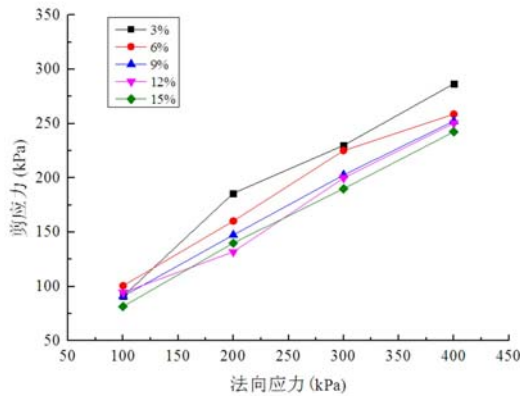


图 7 法向应力与剪应力关系曲线(压实度 90%)

Fig. 7 Relations between normal stress and shear stress (compaction degree 90%)

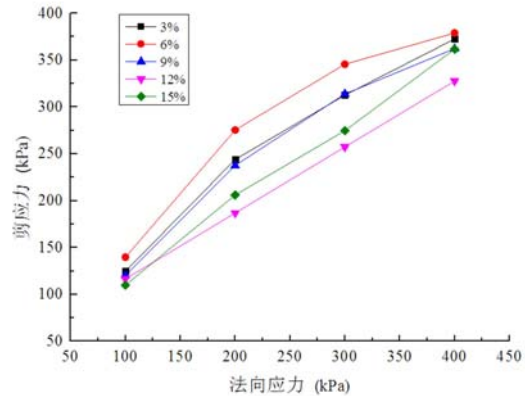


图 8 法向应力与剪应力关系曲线(压实度 100%)

Fig. 8 Relations between normal stress and shear stress (compaction degree 100%)

2.2 含水率对铅锌尾砂抗剪强度指标的影响

由含水率和内摩擦角关系曲线(图 9)可知:当压实度为 80%时,内摩擦角的变化范围为 $23.9^{\circ} \sim 20.1^{\circ}$;压实度为 90%时,内摩擦角的变化范围为 $32.2^{\circ} \sim 28.0^{\circ}$;压实度为 100%时,内摩擦角的变化范围为 $41.4^{\circ} \sim 35.1^{\circ}$ 。内摩擦角随含水率的增加波动较大,含水率增加内摩擦角先减小后增大,呈明显的非线性关系。当含水率为 3%~9%,曲线斜率较大,说明内摩擦角在含水率为 3%~9%区间内较敏感,容易受到含水率的影响,当含水率超过塑限范围(12%),内摩擦角有上升趋势,尤其当压实度为 100%时,曲线斜率较大,含水率对内摩擦角的影响更为明显。内摩擦角是颗粒之间发生滑动时颗粒接触面粗糙不平所引起的,由于铅锌尾砂 40%质量的颗粒直径在 0.075mm 以下,细粒含量较多,含水率的变化会显著改变颗粒结构及密实度的变化,水分在尾砂表面如同一种润滑剂,尤其在高压实度条件下,颗粒之间的密实度较高,含水率能够明显改变颗粒之间的滑移作用,导致内摩擦角显著变化。

由图 10 可知,由于铅锌尾砂粘粒含量较少,因此粘聚力偏低。压实度为 80%时不同含水率铅锌尾砂粘聚力变化范围为 27.08~43.75kPa;压实度为 90%时粘聚力变化范围为 30.41~61.4kPa;压实度为 100%时粘聚力变化范围为 32.00~87.93kPa。铅锌尾砂的粘聚力随着含水率的增加呈先增加后减小的趋势,在含水率为 6%时,粘聚力达到最大值,含水率大于 6%,粘聚力随含水率的增加迅速下降。

颗粒间的水膜联结和胶结作用是影响尾砂粘聚力的重要因素^[15],当含水率较小时,由于水的吸附作用,颗粒之间的粘结力很大,而使得尾砂具有一定的粘聚力;当尾砂的含水率大于6%时,一方面尾砂颗粒之间的薄膜水增厚,结合水变为自由水,水的粘滞性减弱,使得水膜与颗粒之间的电分子引力降低,粘结力受到削弱,另一方面含水量增多导致尾砂中的胶结物被溶蚀,颗粒胶结作用逐渐丧失,粘聚力显著减小。

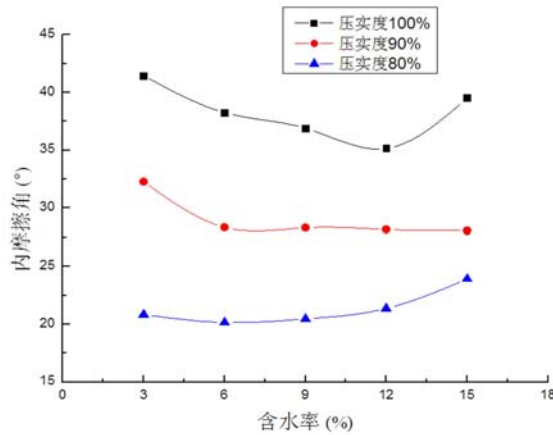


图9 铅锌尾矿内摩擦角与含水率关系

Fig. 9 Relations between internal friction angles and moisture contents of lead-zinc tailings

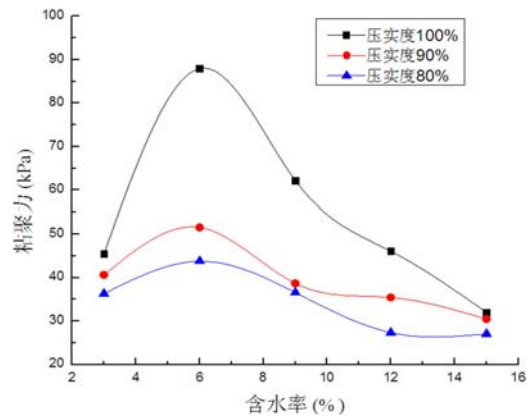


图10 铅锌尾矿粘聚力与含水率关系

Fig. 10 Relations between cohesive forces and compaction degrees of lead-zinc tailings

2.3 压实度对铅锌尾砂抗剪强度指标的影响

由内摩擦角与压实度关系曲线(图11)可知:压实度对内摩擦角影响较大,压实度与内摩擦角关系曲线满足一次函数,拟合公式如表3。例如当含水率为3%时,压实度100%的试样内摩擦角为41.4°,压实度为80%试样的内摩擦角为20.8°,两者相差将近20°,即使在含水率为12%时,内摩擦角相差最小也为14°。研究表明,压实度会显著改变颗粒表面摩擦力及颗粒连锁产生的咬合力。压实度的增大会使尾砂颗粒之间的接触更为紧密,颗粒之间的咬合力增大。此外当压实度增大时,部分尾砂间自由水转化为弱结合水,水对颗粒间摩擦的润滑作用减小,从而使内摩擦角增大^[16]。

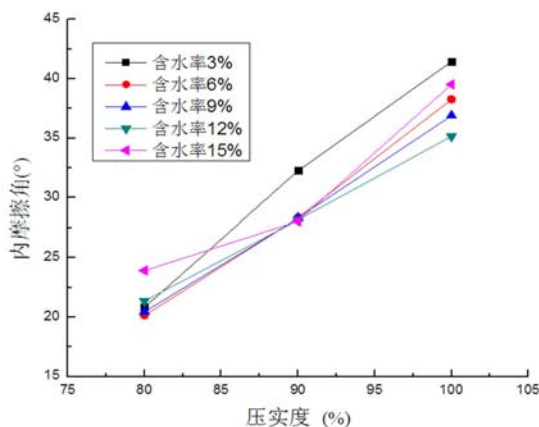


图11 铅锌尾砂内摩擦角与压实度关系

Fig. 11 Relations between internal friction angles and compaction degrees of lead-zinc tailings

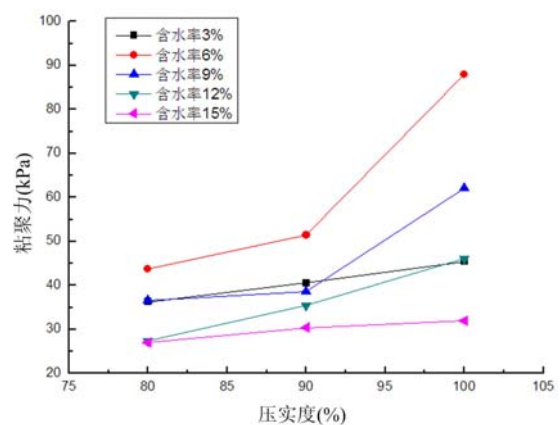


图12 铅锌尾砂粘聚力与压实度关系

Fig. 12 Relations between cohesive forces and compaction degrees of lead-zinc tailings

如图12所示,相同含水率条件下,粘聚力随着压实度的增大而增大,基本上呈线性关系,拟合公式

如表 3。含水率为 6% 时,曲线斜率最大,压实对粘聚力影响最大,当含水率超过 12%,曲线逐渐趋于平缓,压实度对粘聚力的影响逐渐减弱;含水率为 15% 时,压实度 100% 与 80% 粘聚力仅相差 3.33kPa。尾砂中孔隙水主要以颗粒周围结合水膜的形式存在^[17],压实度增大使尾砂水膜中的水与颗粒间的结合力增强,但当含水率超过 12% 时,压实度虽然能够使尾砂颗粒紧密接触,但水的作用使颗粒之间滑移性增大,压实度对粘聚力的影响也减弱。

表 3 压实度与内摩擦角、粘聚力关系拟合公式

Tab. 3 Fitting formulas of compaction degrees and friction angles, cohesive forces

拟合公式	R^2	拟合公式	R^2
$\phi=1.0298x-61.178$	0.9960	$c=2.2090x-137.751$	0.8767
$\phi=0.9041x-52.458$	0.9969	$c=2.2090x-134.420$	0.9872
$\phi=0.8214x-45.370$	0.9994	$c=1.2800x-69.420$	0.8116
$\phi=0.6899x-33.871$	0.9999	$c=0.9360x-47.960$	0.9934
$\phi=0.7801x-39.719$	0.9315	$c=0.2460x+7.690$	0.9600

表中, ϕ 为内摩擦角($^{\circ}$), x 为压实度(%), c 为粘聚力(kPa), R^2 为相关系数。

综上所述,压实度和含水率对铅锌尾砂的抗剪强度均有不同程度的影响,压实度越低含水率越高越容易发生剪切破坏。尾矿库在蓄水的情况下,其坝体内部含水率大部分高于 6%,甚至达到饱和状态,抗剪强度较低,在压实度较低含水率较高的尾矿坝中部,抗剪强度最小,极易产生失稳破坏,发生溃坝。一旦发生溃坝,坝体中部势能较高,能量巨大,影响面积广,危害极大。因此,在铅锌尾矿坝修建和维护过程中,增加尾矿坝的压实度及控制含水率(6%)能够有效增加铅锌尾砂的抗剪强度,从而降低溃坝危险性。

3 结论

(1) 铅锌尾砂的剪应力总体上随压实度的降低而降低,随含水率的增大先增大后减小。不同于土的物理性质,尾砂中细粒含量多,胶结物含量少,由内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c 值可知,尾砂颗粒间粘聚力较小,抗剪强度主要靠内摩擦角贡献。

(2) 铅锌尾砂的内摩擦角随含水率的增大先减小后增大,粘聚力随着含水率的增加先增大后迅速减小,当含水率为 6%,粘聚力最大。含水率与内摩擦角和粘聚力均呈明显的非线性关系,含水率对铅锌尾砂的内摩擦角及粘聚力影响均较大。

(3) 铅锌尾砂的内摩擦角和粘聚力均随着压实度的增大呈线性增长,压实度对内摩擦角影响较大,对粘聚力影响较小,尤其是在含水率较高的情况下,压实度对粘聚力的影响则更小。

(4) 含水率和压实度均能够显著影响铅锌尾砂的抗剪强度,铅锌尾砂含水率在 6% 左右及高压实度条件下抗剪强度最高,因此在尾矿坝的建设和维护过程中,合理调整尾砂含水率和提高压实度能够有效降低尾矿溃坝危险性。

参考文献:

- [1] 梁彤彤. 尾矿库内水位对尾矿坝稳定性影响分析及其预警研究[D]. 昆明理工大学, 2010:35—57 (LIANG Xingxing. Research of the tailings water influence on tailings dam stability analysis and early warning [D]. Kunming University of Science and Technology, 2010:35—57(in Chinese))
- [2] Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22:285—297.
- [3] 李志平, 彭振斌, 肖尊群 等. 含水率影响下尾矿砂内摩擦角随标贯击数变化研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1340—1344 (LI Zhiping, PENG Zhenbin, XIAO Zunqun, et al. Variation of internal friction angle of tailings with

- standard penetration number under influence of water content[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5):1340—1344(in Chinese))
- [4] Rico M, Benito G, Salgueiro A R, et al. Reported tailings dam failures: a review of the european incidents in the worldwide context[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152:846—852.
- [5] Rozalina S D, Ernest K Y. Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy[J]. *Engineering Geology*, 2012, 125:11—25.
- [6] 邵珠山, 申国强, 王新宇. 含水率与粗料含量对砾石土力学性能影响的试验研究[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(2):256—260 (SHAO Zhushan, SHEN Guoqiang, WANG Xinyu. Experimental study of the moisture content and coarse material content on the gravel soil mechanics performance influence[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(2):256—260(in Chinese))
- [7] Yin G Z, Yang Z Y, Wei Z A, et al. Physical and mechanical properties of Yang La-copper's tailing[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007, 30:117—122.
- [8] Chen R, Lei W D, Li Z H. Anisotropic shear strength characteristics of a tailings sand[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(12):5165—5172.
- [9] 胡昕, 洪宝宁, 杜强 等. 含水率对煤系土抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8):2291—2294 (HU Xin, HONG Baoning, DU Qiang, et al. Influence of water contents on shear strength of coal-bearing soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8):2291—2294(in Chinese))
- [10] 黄琨, 万军伟, 陈刚 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9):2600—2604 (HUANG Kun, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9):2600—2604(in Chinese))
- [11] 骆以道. 考虑饱和度的压实填土抗剪强度研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(10):3143—3147 (LUO Yidao. Research on shear strength of compacted soils considering saturation degree[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10):3143—3147(in Chinese))
- [12] 杨磊. 黄土抗剪强度特性分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2010, 8(3):163—165, 169 (YANG Lei. Analysis of characteristics about shear strength of loess[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2010, 8(3):163—165, 169(in Chinese))
- [13] 朱崇辉, 刘俊民, 严宝文 等. 非饱和黏性土的抗拉强度与抗剪强度关系试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2):3453—3458 (ZHU Chonghui, LIU Junmin, YAN Baowen, et al. Experimental study on relationship between tensile and shear strength of unsaturation clay earth material. [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2):3453—3458(in Chinese))
- [14] 骆圣明. 非饱和粉质粘土抗剪强度特性试验研究及其对边坡稳定性的影响分析[D]. 浙江工业大学, 2012:28—65 (LUO Shengming. Experimental study of unsaturated silty clay shear strength and its impact on slope stability analysis[D]. *Zhejiang University of Technology*, 2012:28—65(in Chinese))
- [15] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2):21—25 (CHEN Hongxing, LI Fahu, HAO Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2):21—25(in Chinese))
- [16] 申春妮, 方祥位, 王和文 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5):1347—1351 (SHEN Chunni, FANG Xiangwei, WANG Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5):1347—1351(in Chinese))
- [17] Ma S K, Huang M S, Fan Q Y. Unsaturated soil strength theory based on total stress strength indexes of saturated soil and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28:635—640.

Experimental investigation on Shear Strength of Lead-Zinc Tailings with Different Compaction Degrees and Moisture Contents

LIANG Bing¹, DONG Qing¹, JIANG Li-guo¹, HU Xue-tao¹, JIA Li-feng²

(1. School of Mechanical and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Shear strength of tailings is an important parameter for analysis of tailings dam instability problem. In order to explore the influence of moisture content and compaction degree on lead-zinc tailings shear strength, shear strength experiment was carried out for lead-zinc tailings samples with 3 different compaction degrees (80%, 90% and 100%) and 5 different moisture contents (3%, 6%, 9%, 12% and 15%), respectively. Experimental results show that along the increase of compaction degree, the shear force of lead-zinc tailings increases; while along the increase of moisture content, the shear force increases first then decreases; along with the increase of moisture content, the internal friction angle of lead-zinc tailings decreases first then increases, its cohesive forces increases first then decreases rapidly; the maximum cohesive force is reached when moisture content is 6%; along with the increase of compaction degree, both internal friction angle and cohesive force linearly increase; the maximum influence of compaction degree on cohesive force appears when moisture content is 6%; The influence of compaction degree on cohesive force decreases gradually when moisture content is higher than 12%; keeping moisture content about 6% and enhancing the compaction degree of tailings dam can effectively improve its shear strength and reduce the risk of tailings dam break. Above results may provide important evidences for lead-zinc tailings dam management and stability estimation.

Keywords: lead-zinc tailings; moisture content; compaction degree; shear strength