

选矿及尾矿工艺

细粒含量对尾矿砂动力特性影响研究

Study on the Effect of Fines Content on the Dynamic Properties of Tailing Sands

刘金勇¹, 蔡晓光², 宋会彬³, 郑学鑫^{3,4}

(1. 江西铜业股份有限公司德兴铜矿, 江西 上饶 334224; 2. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029;

3. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 4. 尾矿库灾害防控技术与装备国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要:对于旋流器不同分级效果下的尾矿砂,在设计干密度和等压固结状态下,开展不同细粒含量尾矿砂的非饱和试样的共振柱试验,分析尾矿砂动模量和阻尼比与细粒含量有何种关系。试验结果表明,相同细粒含量条件下,最大动剪切模量与围压的变化规律一致。相同围压下,尾矿砂的最大动剪切模量随着细粒含量的增加而呈现降低趋势,说明细粒含量对尾矿砂抵抗剪切破坏的能力有一定的影响。在相同细粒含量下,三种尾矿砂的最大阻尼比均随着围压的增大而降低。由于临界细粒含量的存在,尾矿砂的最大阻尼比随着细粒含量的逐渐增多,其趋势表现为先上升后下降。本项研究成果可为不同细粒含量尾矿砂的动力反应分析提供基础数据,也可为地震高烈度地区中线法尾矿库的设计及管理提供参考依据。

关键词:细粒含量; 尾矿砂; 动力特性; 共振柱试验

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)01-0050-06

Abstract: To explore the link between dynamic modulus and damping modulus of tailings sand, taking into account its fines content, the samples were conditioned under a specified dry density and isobaric consolidation, across different cyclone classification scenarios. This analysis sought to clarify how fines content affects the dynamic and damping behaviors of tailings sand, resonance column tests were conducted on unsaturated tailings sand samples with different fines contents. Test results indicated that at the same fines content, the maximum value of the dynamic shear modulus follows the law of variation of the ambient pressure. At the same pressure, the maximum dynamic shear modulus of the tailings sand showed a decreasing trend with increasing fines content, indicating that fines content has a certain effect on the shear damage resistance of the tailings sand. At the same fines content, the maximum damping modulus of the three tailings sands decreased with increasing ambient pressure. Due to the critical fines content, the maximum attenuation coefficients of the tailings sands tend to increase and then decrease with a gradual increase in fines content. The study's outcomes furnish essential information for evaluating how tailings with varying fines content respond dynamically. These insights form a cornerstone for designing and managing intermediate tailings ponds in earthquake-prone areas.

Key words: fine-grained content; tailing sand; dynamic properties; resonant column test

1 前言

选矿厂对金属或非金属矿石进行分选后,有价值的精矿被提取出来,而剩余的砂状物质则形成尾矿。用以储存选矿厂排出尾矿的场所即为尾矿库。根据筑坝形式的不同,可分为上游式筑坝法、下游式筑坝法以及中线式筑坝法。上游法和下游法筑坝工

艺未将全尾矿砂分级处理,直接作为筑坝材料堆筑;中线法筑坝工艺^[1]通过旋流器将全尾矿砂分级为不同级配的尾砂,底流尾砂(沉砂)用于下游筑坝,而溢流尾砂排入上游库内沉积。受旋流器分级效果的影响,不同分级效果下的尾矿砂其细粒含量有着明显差异,相应尾矿砂的动力特性也有所不同。

尾矿坝坝体通常由细砂、粉砂、粉土等尾矿砂组成。细粒是指粒径范围小于0.075 mm的土粒,在工程案例中,细粒含量的多少往往能影响尾矿砂的工程特性。陈玉芳等^[2]对尾矿库的成分,粒径分布等因素综合分析,实现了全粒径尾矿的合理利用。Huang等^[3]针对旋流器分级效果不同的尾矿砂,进行了不同级配的饱和与非饱和试样共振柱试验,以

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目“尾矿库水位动态精准监测与超前主动处置系统研发”(编号:2023YFC3012204)

[作者简介] 刘金勇(1984—),男,汉,江西高安人,本科,工程师,主要从事尾矿库运行管理工作。

[引用格式] 刘金勇,蔡晓光,宋会彬,等.细粒含量对尾矿砂动力特性影响研究[J].中国矿山工程,2025,54(1):50-55.

研究其力学特性。试验结果表明,不同级配条件下,底流尾矿砂随着细粒含量增大,最大动模量逐渐增大,阻尼比趋势相反;溢流尾矿砂随着细粒含量增大,溢流尾矿砂最大动模量逐渐减小,最大阻尼比逐渐增大。Zhao^[4]等通过一系列的循环三轴试验研究了三种不同类型铜尾矿的动力特性。研究结果显示,对于围压 100 kPa 时,弹性模量随着粗粒占比减少而增大,同时还发现弹性模量随围压的增大而增大,最后达到稳定值。在围压 200 和 300 kPa 下,弹性模量随细粒含量的减少的趋势表现为先增后减,且弹性模量最大值对应较好的级配。Liew M^[5]等对美国阿巴拉契亚煤田的两个煤尾矿库进行了地震折射、面波多道分析和地震监测,导出了细粒煤尾矿的剪切波速、压缩波速、泊松比、小应变杨氏模量和剪切模量、峰值颗粒速度,通过与其他爆破应用相比发现细粒煤尾矿的振动衰减率相对较高。基于经过微小修改的液化评估简化程序和来自地震调查的输入参数,在受到来自矿山爆破的地面振动时,细煤尾矿被评估为潜在可液化。Amini F 等^[6]研究比较不同粉砂含量和围压下,层状和均质粉砂在地震液化条件下的行为,结果表明,随着围压的增大,粉砂的液化阻力随围压的增大而减小。粉砂含量的增加使粉砂在均匀土和层状土条件下的抗液化能力增加。Kenney T. C.^[7]的研究指出,当细粒与砂混合物中细粒体积占比超过 50% 时,其残余强度与纯细粒土体相近;反之,则与纯砂相近。黄鑫^[8]等通过共振柱试验对比了铜矿尾矿库的尾粉砂、尾细砂和尾中砂与石英标准砂的动剪切模量和阻尼比特性,发现动剪切模量最大的是石英砂,同时其阻尼比最小,尾粉砂则相反,尾细砂介于两者之间。乐陶^[9]等对磷矿浮选细粒尾矿研究指出,剪切模量随剪应变增大而减小,初始剪切模量与固结应力线性相关,具有特定变化规律。曹培^[10]等利用动三轴试验系统探究了坝体砂砾料的残余变形特性,发现粗颗粒含量增多可提高土料抵抗动力荷载变形的能力。对目前的研究成果总结后发现,国内多侧重于研究不同尾砂的动力特性,关于细粒含量的研究尚显不足。

本文以江西某尾矿库为研究对象,采集尾矿砂试样,在设计不同细粒含量及固结应力下开展共振柱试验,研究不同细粒含量及围压下尾矿砂的剪切模量与阻尼比特性,并对其变化规律进行分析,所得试验结果可为尾矿库的工程建设提供参考。

2 试验概况

2.1 试验材料

试验材料取自江西某尾矿库筑坝用尾矿砂,将尾矿砂取样后,将细粒尾矿砂于粗粒尾矿砂按照不同配比要求,具体如图 1 所示。在实验室配置不同细粒含量(15%、25%、35%)的尾矿砂,通过筛分法与密度计法联合测定尾矿砂的颗粒含量,测得三组尾矿砂的粒径特征指标(表 1),其颗粒级配曲线如图 2 所示。



(a) 粗粒尾矿砂(粒径>0.075 mm) (b) 细粒尾矿砂(粒径<0.075 mm)

图 1 尾矿砂试样

对试验结果分析可知,细粒含量 15% 的尾矿砂不均匀系数 $C_u = 3.13$,属于均粒土,曲率系数 $C_c = 1.45$,级配不良;细粒含量 25% 的尾矿砂不均匀系数 $C_u = 5.42$,曲率系数 $C_c = 2.37$,为良好级配砂;细粒含量 35% 的尾矿砂不均匀系数 $C_u = 7.86$,曲率系数 $C_c = 2.26$,为良好级配砂。

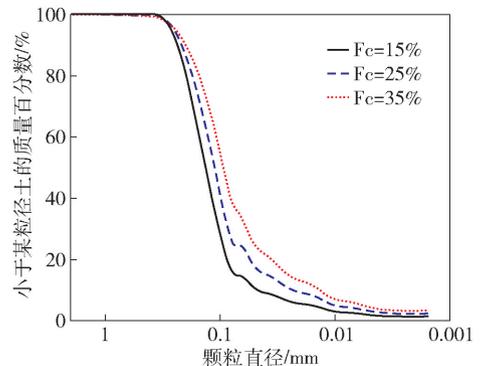


图 2 尾矿砂的颗粒级配曲线

2.2 试验设备

共振柱试验主要通过 TSH-100 型共振柱试验系统进行,可实现 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 小应变范围内土体动力参数的精确测定。系统能够获取一系列关键的动力参数,包括共振频率、最大剪切应变、剪切波速、剪切模量以及阻尼比等。其激励频率可在 0 至 250 Hz

范围内自由调节,最大剪切行程可达 $\pm 25^\circ$,共振柱 试验的试样尺寸为 $\phi 38.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。

表 1 三种尾矿砂的粒径特征指标

细粒含量	粒径(mm)分布/%						级配特征指标/mm			
	<0.075	0.075~0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	d_{60}	d_{50}	d_{30}	d_{10}
15%	45.4	39.2	193.0	20.8	0.3	0	0.15	0.137	0.102	0.048
25%	73.8	50.8	160.1	14.1	0.8	0	0.13	0.111	0.086	0.024
35%	110.4	52.5	122.5	12.2	0.8	0	0.11	0.094	0.059	0.014

2.3 试验方法

共振柱试验采用 3 种不同细粒含量在 2 种干密度下的试样,含水率均设置为 15%。按照规范制备重塑样,将土样烘干碾散后,再分层击实制备重塑样,将试样装样后套上玻璃罐,对其进行固结,固结完成后,对试样进行激振,对试样施加一个扭力,初步确定试样的共振频率,然后在详细扫频,实验设置扫频增量 0.1 Hz,振动 10 周测共振频率与阻尼比。加载 9~10 级扭力后结束,然后继续加压固结,重复上述试验步骤,直到完成 3 级围压的动剪切模量与阻尼比测试后卸压并拆除试样。

不同工况下的试样编号及基本信息见表 2。

表 2 尾矿砂试验工况表

试验材料	编号	细粒含量/%	工况条件			围压/kPa
			干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	固结比	含水率/%	
尾矿砂	W1	15	1.5	1.0	15	100,200,400
	W2	25	1.5	1.0	15	100,200,400
	W3	35	1.5	1.0	15	100,200,400

3 试验结果

试验所用尾矿砂其级配曲线及其物理性质指标试验结果已在前文介绍,对细粒含量为 15%、25%、35% 下的尾矿砂进行了 100、200、400 kPa 围压下的共振柱试验,得出动剪切模量、阻尼比与剪应变的变化关系如图 3 所示。

观察试验数据可以发现,在动剪应变范围内,尾矿砂试样在不同细粒含量及围压情况下动剪切模量与阻尼比随动剪应变的关系曲线基本相似,同一围压下,尾矿砂试样的动剪切模量与应变的变化呈负相关关系;应变条件相同时,动剪切模量与围压的变化呈正相关关系。阻尼比与应变的变化呈正相关关系,与围压的变化呈负相关关系。

4 数据处理

目前对于共振柱试验结果处理的模型中,常见

的有 Hardin-Drnevich (H-D 模型) 等效黏弹性模型与沈珠江等效粘弹塑性模型以及对于两种模型的修正模型,对于本次共振柱试验得到的数据,采用 H-D 模型拟合试验结果,动剪切模量 G_d 的表达式为

$$G_d = \frac{1}{a + b\gamma_d} \quad (1)$$

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_d}{\gamma_r}} \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_{max} \left(1 - \frac{G_d}{G_{dmax}}\right)^m \quad (3)$$

由式(1)~式(3)拟合试验数据,从而得到了三种尾矿砂模型参数的详细拟合结果(具体参见表 3)。从图 4 中可以清晰地观察到,试验数据的拟合效果显著,具有较高的可靠性。随着围压的逐步增大,动剪切模量呈现出明显的上升趋势,而阻尼比则呈现出相应的下降趋势。动剪切模量和阻尼比的变化趋势与一般砂土研究规律基本吻合^[11-12]。

表 3 Hardin 模型参数列表

试样编号	细粒含量	含水率	固结围压 σ_{3c}/kPa	$G_{dmax}/$ MPa	$\lambda_{max}/\%$	m
FC15%	15%		100	62.58	8.10	0.590
			200	88.03	5.66	0.431
			400	127.91	3.77	0.313
FC25%	25%	15%	100	61.63	7.91	0.555
			200	86.08	5.84	0.455
			400	130.0	5.13	0.50
FC35%	35%		100	59.20	9.07	0.660
			200	81.98	6.88	0.539
			400	120.55	4.81	0.427

5 试验结果分析

5.1 最大动剪切模量 G_{dmax}

根据 Hardin 模型参数列表中的数据,绘制出尾矿砂最大动剪切模量与围压关系曲线,具体如图 4 所示,分析该曲线图以及上表中的数据,3 种尾矿砂

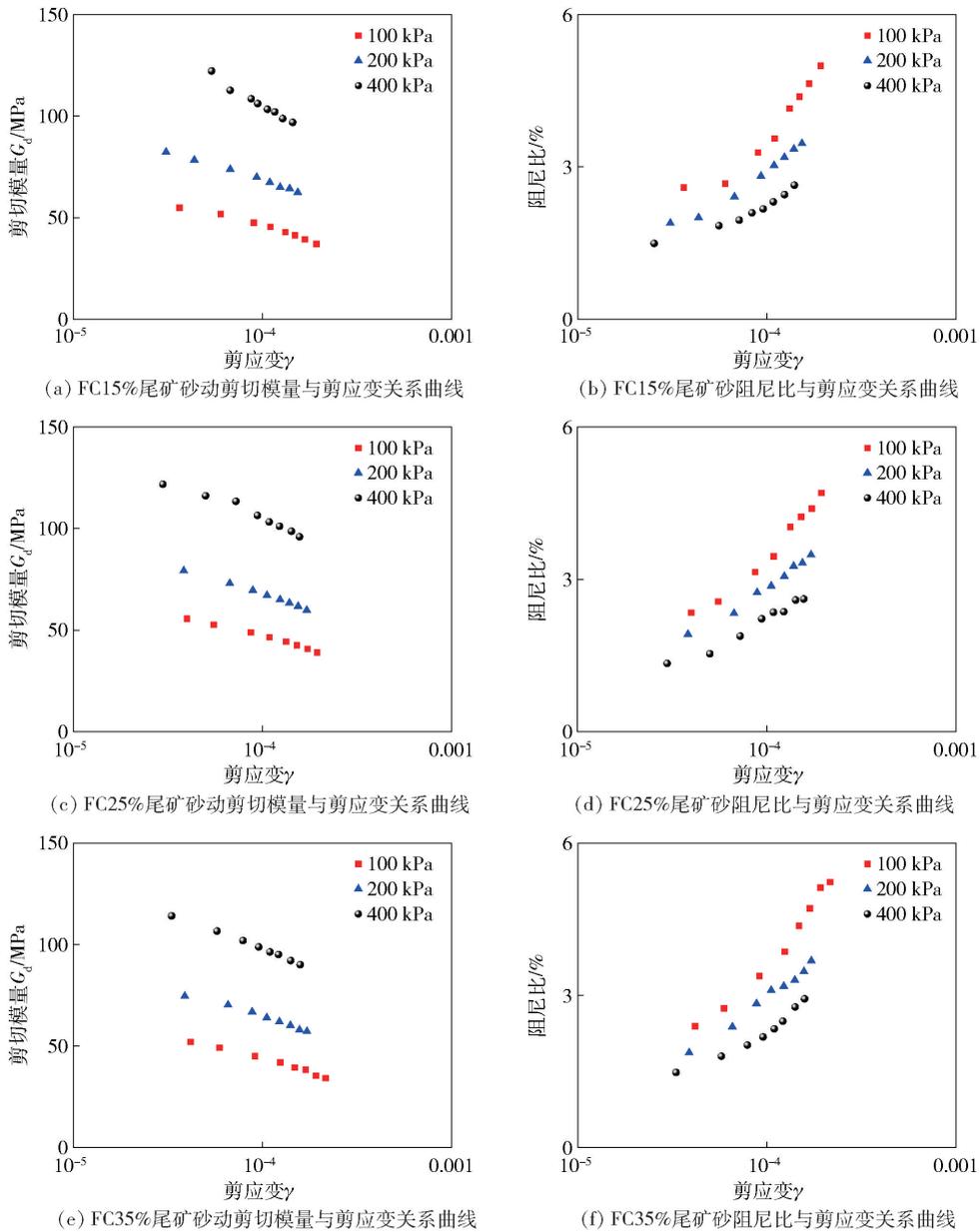


图 3 不同细粒含量尾矿砂的共振柱试验曲线

的最大动剪切模量均随围压的升高而上升,且细粒含量为 35% 的尾矿砂的最大动剪切模量低于细粒含量较少的尾矿砂。分析图 4 可知,在相对密度一定时,在围压一致的情况下,由于细粒含量的升高,尾矿砂的最大动剪切模量逐渐减小,且随着围压的增大,细粒含量为 35% 的尾矿砂其最大动剪切模量减小的趋势更为明显。分析其原因,可能是当细粒含量为 15% 与 25% 的尾矿砂在抵抗剪切变形时,主要是土颗粒中的粗粒骨架发挥作用,当细粒含量超过 25% 时,土体中细粒与粗粒比值上升,当细粒含量达到 35% 时,细粒土与粗粒土的比值明显上升,从而细粒骨架开始发挥作用,粗粒土骨架由于细

粒含量的增加变得比较松散,进而导致尾矿砂抵抗变形的能力减弱,所以细粒含量最多的尾矿砂其最大动剪切模量也最小。

图 5 所示为双对数坐标下最大动模量 G_{dmax} 与平均有效主应力 σ'_0 的关系曲线。从曲线形态可见,两者间存在近似的直线联系,可用幂函数表示:

$$G_{dmax} = KP_a \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^n \quad (4)$$

式中: P_a 为大气压, K 和 n 为模量参数。由图 5 可以看出,数据拟合度较好,在均压固结条件下,可直接用公式 4 计算两种尾矿砂的最大动剪切模量。

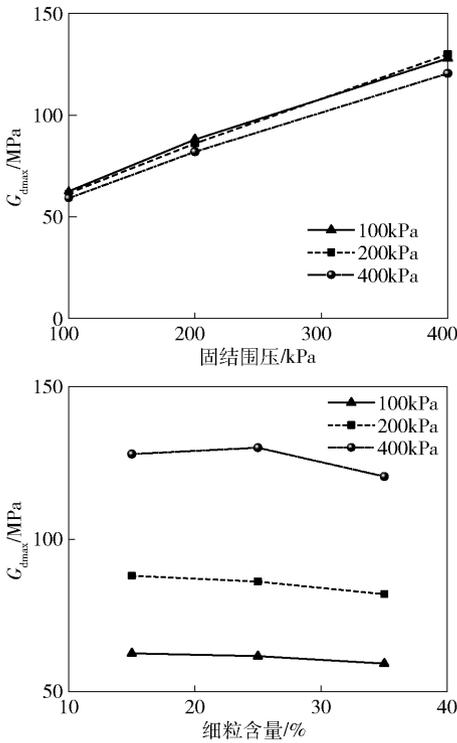


图4 最大动剪切模量 G_{dmax} 与围压、细粒含量关系曲线

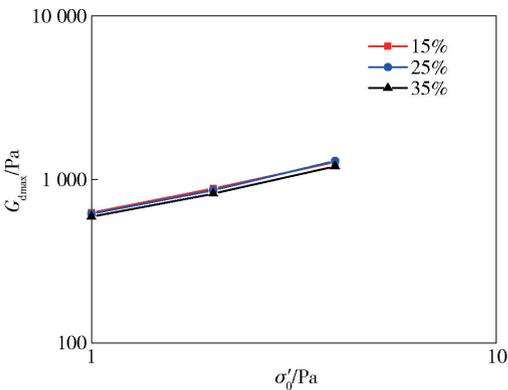


图5 双对数坐标下最大动剪切模量 G_{dmax} 与有效有效围压 σ'_0 关系曲线

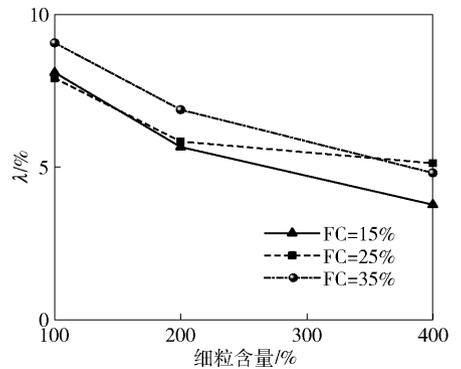
5.2 最大阻尼比 λ

根据表3的数据,绘制出不同细粒含量尾矿砂最大阻尼比 λ 与围压以及细粒含量的关系曲线,具体如图6所示,分析下图可知,在相同密实度下,三种尾矿砂的最大阻尼比均随着围压的增大而降低。在低围压状态时,细粒含量为15%及25%的尾矿砂试样最大阻尼比相近,且明显低于细粒含量为35%的最大阻尼比,而当围压上升至400 kPa时,细粒含量为35%的尾矿砂试样其最大阻尼比反而低于细粒含量为25%的尾矿砂试样,分析其原因,可能是在高围压下,尾矿砂的最大阻尼比与细粒含量的增

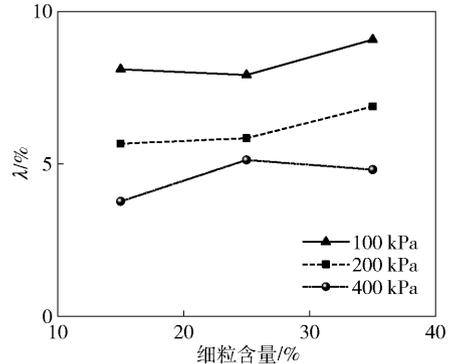
加并非单调地升高或降低,而是存在一个临界细粒含量,由于临界细粒含量的存在,尾矿砂的最大阻尼比随着细粒含量的增加呈现的趋势为先增大后减小,是否存在这个细粒含量临界值还需要进一步开展专门试验研究。具体参数汇总见表4。

表4 尾矿砂最大动剪切模量参数汇总

细粒含量	K	n
15%	622.43	0.5157
25%	608.33	0.5384
35%	586.11	0.513



(a) 最大阻尼比与围压关系



(b) 最大阻尼比与细粒含量关系

图6 最大阻尼比 λ 与围压、细粒含量关系曲线

5.3 归一化动剪切模量与阻尼比数据分析

归一化的动模量阻尼比衰减曲线为分析动模量与阻尼比随动应变发展的变化规律提供了较为直观的参考。图7中显示在不同围压下,不同细粒含量的尾矿砂在阻尼比归一化处理后,其结果显示出一一定的相似性;细粒含量为25%的尾矿砂动剪切模量比在不同围压下的变化规律差别不大,尾矿砂的在细粒含量为15%和25%时,其动剪切模量比的特征表现为随着围压的升高而增大。

6 结论

本文通过对某拟建中线法铜矿尾矿库筑坝用尾

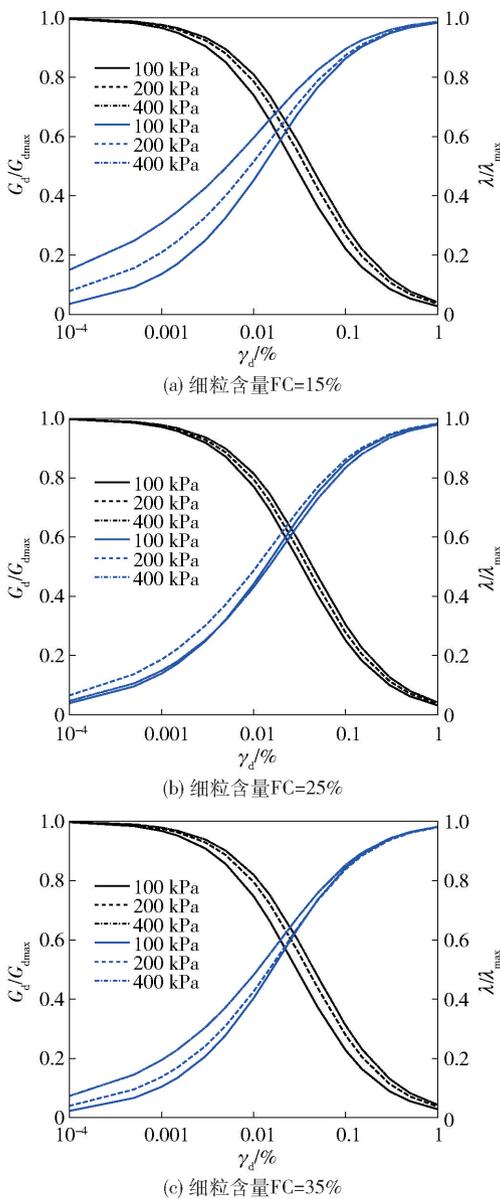


图7 $G_d/G_{dmax} \sim \gamma_d$ 和 $\lambda/\lambda_{max} \sim \gamma_d$ 试验结果曲线

矿砂进行了不同细粒含量及围压条件下的共振柱试验,对试验数据处理并分析后,得出以下结论:

(1)在相同细粒含量的条件下,尾矿砂的最大动剪切模量会随着围压的升高而增加。当围压保持不变时,其最大动剪切模量会随着细粒含量的增加而呈现降低趋势,说明细粒含量对尾矿砂抵抗剪切破坏的能力有一定的影响。

(2)三种尾矿砂的最大阻尼比均随着围压的增大而降低。由于临界细粒含量的存在,尾矿砂的最

大阻尼比与细粒含量之间存在一定的变化趋势。随着细粒含量的增加,阻尼比会先上升后下降。

(3)试验获得了不同细粒含量及围压的动模量和阻尼比衰减曲线,利用 Hardin 模型对试验数据进行回归拟合,得到了尾矿砂的模型参数,并对该模型拟合得出三种尾矿砂的最大动剪切模量及阻尼比,为尾矿坝的工程建设提供必要的的数据参考。

[参考文献]

[1] 宋会彬,郑学鑫,刘金勇. 中线式尾矿筑坝法关键技术[J]. 有色设备,2022,36(4):21-25.

[2] 陈玉芳,朱灿. 铜尾矿库尾矿全粒径规模化低碳消纳研究[J]. 铜业工程,2022(05):31-37.

[3] Xin H, Xiaoguang C, Jingshan B, et al. Experimental study of the influence of gradation on the dynamic properties of centerline tailings sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2021,151.

[4] Zhao B J, Ji C Y, Liu X, et al. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Tailings [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,3307(580-583).

[5] Liew M, Xiao M, Liu S, et al. In Situ Seismic Investigations for Evaluating Geotechnical Properties and Liquefaction Potential of Fine Coal Tailings[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2020,146(5).

[6] Amini F, Qi Z G. Liquefaction Testing of Stratified Silty Sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(3).

[7] Kenney, T. C., Residual strength of mineral mixtures [A]. Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C], Tokyo, 1977, 1: 155-160.

[8] 黄鑫,蔡晓光,薄景山,等. 尾矿砂的动模量和阻尼比特性试验[J]. 有色金属工程,2022,12(07):139-147.

[9] 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.

[10] 曹培,王芳,严丽雪,等. 砂砾料动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(S1):211-215.

[11] 乔兰,屈春来,崔明. 细粒含量对尾矿工程性质影响分析[J]. 岩土力学,2015,36(04):923-927+945.

[12] 褚卫瑞. 细粒含量对尾矿砂动力特性影响研究[J]. 矿业研究与开发,2017,37(02):70-73.