

粉粒含量对尾矿力学特性的影响

巫尚蔚¹, 杨春和^{1,2}, 张超², 张修照², 王光进³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 尾矿的力学特性与粉粒含量有关, 但目前对粉粒含量的影响机制研究较少。为了研究粉粒含量对尾矿力学性质的影响及其微观机制, 通过显微观测、三轴试验和离散元模拟, 研究砂粒和粉粒的显微特征, 分析尾矿的临界粉粒含量, 并讨论粉粒含量效应的微观力学机制。结果表明: 砂粒和粉粒在粒径分布、棱角性和表面形貌方面存在差异, 粒径小于 30 μm 的颗粒具有独特的显微特征; 随着粉粒含量的增加, 混合尾矿逐渐由砂性尾矿过渡到粉性尾矿, 临界粉粒含量在 30% ~ 50% 范围; 理论推导证明, 粉粒的粒径和弹性模量越小, 相同力作用下的土体形变越大; 从介观上看, 粉粒含量的增加弱化了原有的强力链, 是导致粉粒含量效应的重要原因。研究结果揭示了混合尾矿的微观力学行为机制, 为宏微观关联性研究提供了参考。

关键词: 采矿工程; 颗粒性质; 粉粒含量; 三轴试验; 微观机制; 尾矿

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)08-2007-11

The effects of silt content on the mechanical properties of tailings

WU Shangwei¹, YANG Chunhe^{1,2}, ZHANG Chao², ZHANG Xiuzhao², WANG Guangjin³

(1. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: The mechanical properties of tailings are affected by the silt content, but so far, studies related to the influence mechanism of silt content on the mechanical properties are not much. This paper presents the investigation on the effects of silt content on the mechanical property of tailings and its mesoscopic mechanism. The microscopic observation, the triaxial test and the discrete element simulation were performed to study the microscopic characteristics of sand and silt. The critical silt content is analyzed based on the results of the experiment. Finally, we proposed a mesoscopic mechanism of silt content effect. The silt and sand particles are different in size distribution, angularity and surface topography. The tiny particles (< 30 μm) have the unique microscopic features. The sandy tailing is transformed into the silty tailing with the increase of silt content, and the critical content is 30% - 50%. It is theoretically proved that the smaller of silt particle size and the elastic modulus are, the bigger the deformation of soil is. Mesoscopically, the increase of salt content weakens the original force chain, thus resulting in the silt content effect.

Key words: mining engineering; particle properties; silt content; triaxial test; mesoscopic mechanism; tailings

收稿日期: 2016-11-17; **修回日期:** 2017-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51234004, 51004099, 41602307)

Supported by the State Key Program of National Natural Science of China(Grant Nos. 51234004, 51004099 and 41602307)

作者简介: 巫尚蔚(1990-), 男, 2012年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事尾矿微观结构及多尺度科学方面的研究工作。E-mail: wushangwei2017@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1456

1 引言

砂性尾矿和粉性尾矿主要由砂粒、粉粒混合而成,是常见的尾矿库筑坝材料,其力学特性与粉粒含量有关^[1]。根据土的粒组划分,粉粒指的是粒径为 5 ~ 75 μm 的颗粒。当砂性尾矿中的粉粒含量增加到一定程度时,尾矿由砂性土转变为粉性土,强度、变形等性质会发生显著变化,这种现象称为粉粒含量效应,此时的粉粒含量为临界粉粒含量。研究粉粒含量对尾矿力学特性的影响,可以为筑坝材料的选配和坝体稳定性分析提供理论参考,具有一定的学术价值和工程意义。

研究粉粒含量效应首先要了解砂粒和粉粒在颗粒显微特征上的差异。这里的显微特征指的是颗粒的成分和几何特征(粒径、轮廓、棱角性和表面纹理)。刘清秉等^[2]以中、粗石英砂及玻璃颗粒为试验材料,分析了颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力的影响,认为颗粒形状越不规则,桩在贯入时所受阻力越大,桩端承载力越高。U. Ulusoy 等^[3]研究了球磨机和棒磨机对石英形状和表面粗糙度的影响,发现破碎方式对颗粒的细观参数有重要影响。周健等^[4]通过图像处理技术,研究了均匀砂堆积体中砂颗粒大小、形状、孔隙分布等特征参数,并讨论了砂粒间接触关系的表征方法。综合已有文献,对尾矿颗粒显微特征的分析还鲜有报道,尤其是颗粒成分和颗粒几何形状之间的关系还有待研究。

在研究粉粒含量效应时,确定临界粉粒含量具有重要的工程意义。目前主要通过静、动力荷载试验来评估粉粒含量对土体工程性质的影响^[5-6]。R. Salgado 等^[7]研究了粉粒含量在 0% ~ 20% 范围的粉质砂土的强度特征,结果显示土体的峰值摩擦角和临界摩擦角随粉粒含量的增加而增加,但小变形阶段的刚度随粉粒含量的增加而减小。与 R. Salgado 等^[7]不同,朱建群等^[8]发现,南京河西地区的片状粉细砂(粉粒含量为 0% ~ 15%)的峰值内摩擦角在粉粒含量等于 9% 时取得极小值,而残余有效内摩擦角随粉粒含量的增加变化不大。V. T. A. Phan 等^[9]对粉粒含量在 0% ~ 60% 范围砂粉混合土进行了固结不排水三轴试验,认为土体强度先减小后增加,临界粉粒含量为 50%。张超和杨春和^[10]分析了细粒含量对尾矿材料液化特性的影响,研究表明,对于铜矿类尾矿坝的尾矿材料,当细颗粒含量为 35% 时其抗液化性能最佳。S. Prakash 和 P. Dakoulas^[11]则认

为粉砂混合土的抗液化强度总是随着细粒含量的增加而降低。可以看出,粉粒含量的影响是十分复杂的,砂粉混合土的性状并不稳定^[12],因此相关试验结果不尽相同,有进一步研究的必要。

对于粉粒含量的影响,通常用孔隙填充假说进行解释。该假说认为,当粗、细两种颗粒混合时,如果细粒含量较少,那么细颗粒首先填充粗颗粒间的孔隙,此时粗颗粒间不脱离接触,细粒含量的影响不大。如果细粒含量较多,粗颗粒就会被细颗粒包裹,处于“漂浮”状态,此时土体主要体现细颗粒的性质。当细颗粒恰好充满孔隙,粗颗粒的状态处于接触和漂浮之间时,对应的细粒含量就是临界细粒含量。但是,孔隙填充假说仅仅考虑了粒径的作用,忽略了颗粒性质的影响,不能解释所有的试验现象。

为研究粉粒含量对尾矿强度、变形特征的影响,本文通过显微观测试验、固结不排水三轴试验和细观离散元模拟试验,对尾矿的粉粒含量效应及其内在机制进行了研究,分析了砂粒、粉粒的颗粒特征,讨论了尾矿的土性渐变规律及临界粉粒含量判别依据,并提出力链弱化假说来解释尾矿的粉粒含量效应。研究结果可以为尾矿显微特征及其宏观响应问题的研究提供参考。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料及试样制备

本试验采用的铜尾矿取自江西德兴铜矿 4 号坝。为了保证取得的样品具有代表性,沿垂直于坝轴线方向,在干滩上设置了 13 个采样点,在每个采样点剥离 10 cm 表面土后进行取样。

为了避免黏粒对结果的干扰,本试验采用气流分级技术去除尾矿中的黏粒^[13]。本试验所用分级机的粒度分级在 2 ~ 74 μm 范围。分级时,首先将风干后的尾矿经过气流分级机筛分,去除尾矿中的黏粒。然后用 75 μm 的标准振动筛,分离剩余尾矿中的砂粒和粉粒。砂粒、粉粒的分级效果如图 1 所示。

为了尽量减少对颗粒成分和性状的破坏,在制备显微观测的试样时采用物理方法分散颗粒。光学显微样品用对磨的方法分散颗粒^[14],电子显微样品用声波振动的方法分散颗粒。分散的标准是不黏连颗粒达到 80% 以上。

三轴试验采用湿击法(*under-compaction moist tamping method*)制样,以更好地控制试样孔隙率^[15]。

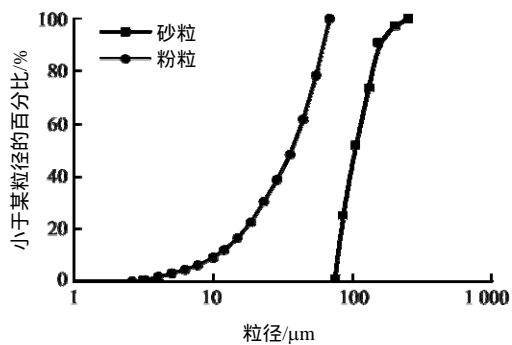


图 1 砂粒、粉粒样本的粒径分布

Fig.1 Particle-size distributions of silt and sand samples

首先将砂粒和粉粒按表 1 混合。按照我国的尾矿工程分类，表中的 1[#]~4[#]属于砂性尾矿，5[#]~7[#]属于粉性尾矿。然后将配好的混合土均分为 5 层压实，制成尺寸为 3.91 cm×8.0 cm、干密度为 1.70 g/cm³ 的标准圆柱形试样。

表 1 试样配比表

Table 1 Proportion table of samples

试样编号	砂粒含量/%	粉粒含量/%
1 [#]	100	0
2 [#]	85	15
3 [#]	75	25
4 [#]	65	35
5 [#]	50	50
6 [#]	30	70
7 [#]	0	100

2.2 试验方法

为了研究砂粒和粉粒的成分和形状，使用 XRD (X-Ray Diffraction)检测、光学显微和电子显微测试对试样进行分析，各种测试结果之间可以相互补充和验证。

光学显微试验采用透反射偏光显微镜，可以利用颗粒的光学性质鉴别部分颗粒的矿物成分。试验时，将制备好的标本放在显微镜下，采用单偏光和正交偏光，对每个标本取 15 个视场进行拍摄，以保证数据的完整性。之后进行数字图像处理，统计颗粒细观参数。

扫描电子显微镜(SEM)可以实现对颗粒表面形貌的扫描观测，是光学显微结果的重要补充。试验采用 Quanta 250 型扫描电子显微镜，放大倍数为 6~1 000 000。试验时，依次选择 100，200，800，

2 000 倍的放大倍数对砂粒和粉粒的形态、形状和表面形貌进行观测。

为了确定尾矿的临界粉粒含量和土性的渐变规律，需要进行不同细粒含量的尾矿三轴试验。根据现场工况，选择在固结不排水条件下进行三轴试验。试验选用 100，200，300，400 kPa 的围压，剪切速率为 0.074 mm/min，轴向变形达到 20%停止试验。

3 试验结果及分析

3.1 砂粒和粉粒的颗粒特征

根据对样本的肉眼观察，砂粒呈深灰色，手捻时颗粒感强，无黏性，碾压后容易分散，加水后不发生团聚。粉粒呈白灰色，颜色略浅于细砂，手捻时有颗粒感，略有黏性，碾压后基本分散，加水后有一定的团聚现象。

XRD 试验结果显示，尾矿主要由石英、伊利石、绿泥石、铁白云石组成(还有微量的长石、方解石、石膏、金属矿物)。图 2 为根据 XRD 试验结果整理的雷达图，从图中可以看出，砂粒和粉粒的主要成分都是石英和伊利石，粉粒中的石英含量比砂粒略低，而伊利石含量略高。但这种矿物成分上的微小差距难以解释砂性尾矿和分析尾矿在力学性质上的不同。因此，砂性尾矿和粉性尾矿的力学性质差异不能单单从成分上进行解释。

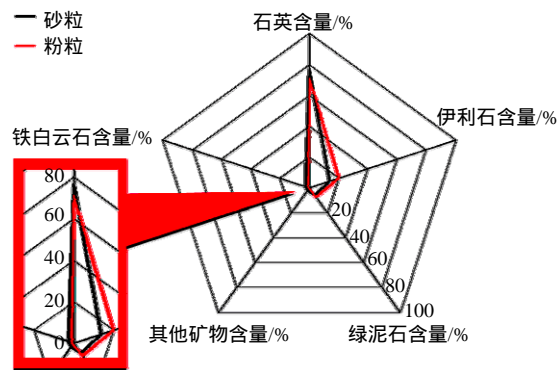


图 2 砂粒和粉粒的矿物成分对比

Fig.2 Contrast of mineral compositions between silt particles and sand particles

图 3 展示了在相同放大倍数下，砂粒和粉粒的光学显微照片。从图 3 中可以看出，砂粒的粒径分布较均匀，而粉粒颗粒的粒径分布具有两极化特征，这是由粉碎过程决定的。球磨机粉碎主要依靠研磨和磨削，破坏发生在颗粒的表面，产生大量的颗粒碎屑，即粉粒中的微小颗粒。由此可以看出，尾矿中的砂粒和粉粒在粒径分布上具有不同的特点。

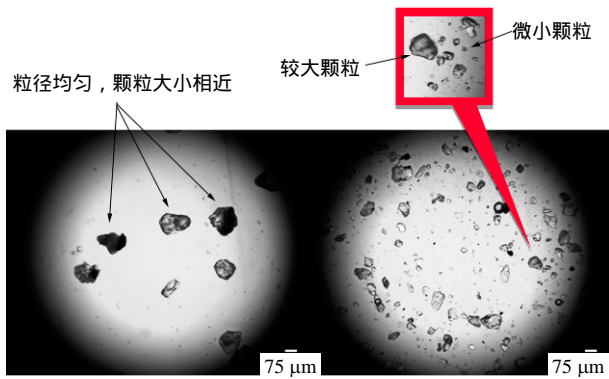


图3 砂粒和粉粒的粒径分布对比

Fig.3 Contrast of size distribution between silt particles and sand particles

图4展示了部分砂粒和粉粒的SEM照片。从照片分析的结果看,砂粒、粉粒形态上有较大区别:砂粒颗粒全部以粒状形式存在,而粉粒颗粒以粒状为主,但含有少量片状颗粒;不同矿物成分的颗粒在表面形貌、颗粒轮廓和棱角性方面是不同的;相同矿物成分而不同粒径的颗粒,表面形貌相近,但是颗粒的轮廓和棱角性也存在一定差异。总之,砂粒和粉粒的颗粒形态具有较大的区别。

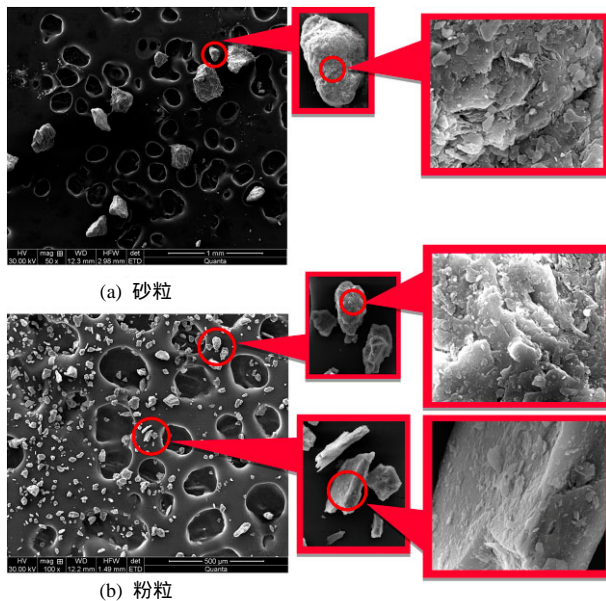


图4 颗粒的形状和表面形貌特征

Fig.4 Shape and surface topography of particles

为了定量分析砂粒和粉粒的显微结构差异,需要对颗粒属性进行分析统计,部分单颗粒显微照片如图5所示。

根据统计结果,尾矿颗粒可以分为黏土矿物颗粒、非黏土矿物颗粒、混合矿物颗粒以及金属矿物颗粒(样品中的黏土矿物包括伊利石和绿泥石,非黏土矿物包括石英、铁白云石长石、方解石和石膏)。

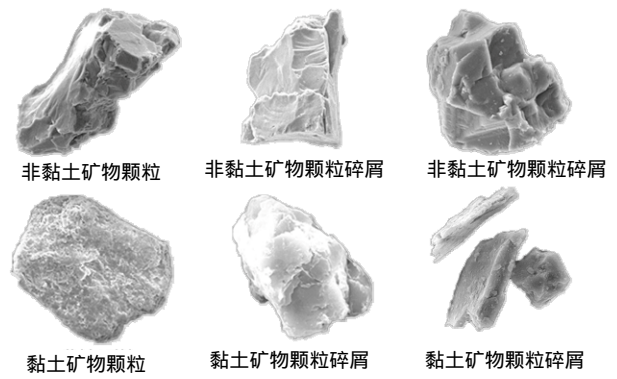


图5 黏土矿物颗粒和非黏土矿物颗粒的显微图像

Fig.5 Mesoscopic images of clay mineral particles, non-clay mineral particles

由于混合矿物颗粒和金属矿物颗粒研究价值不大,本文只对黏土矿物颗粒和非黏土矿物颗粒进行讨论。

从图5可以看出,黏土矿物颗粒棱角性弱,表面凹凸性不强,形成的颗粒碎屑有明显层状特征,形状以板状为主。而非黏土矿物颗粒的表面有一定棱角,颗粒强度高,形成的颗粒碎屑呈粒状,具有尖锐的棱角。

以上结果证明,不同成分、不同粒径的尾矿颗粒具有不同的形状特征。为了定量分析成分和粒径对形状的影响,本文采用结构分维数^[16]、磨圆度和圆形度这3个指标对颗粒形状进行描述^[17-18]。结构分维数描述了颗粒表面的纹理特征,它的值越大,颗粒表面越粗糙;磨圆度描述了颗粒的棱角性,它的值越小,颗粒棱角性越强;圆形度描述了颗粒整体轮廓,它的值越大,颗粒越接近圆形。

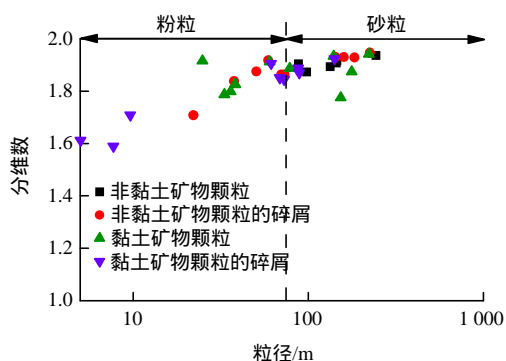
图6展示了不同矿物成分、不同粒径颗粒的形状指标,从图中可以看出:

(1) 粒径小于30 μm的颗粒主要由非黏土矿物组成,具有分维数小,磨圆度高的特点。粒径大于30 μm的颗粒分维数较高,大致在1.9附近波动,磨圆度分布范围较为离散,均值也相对较小。

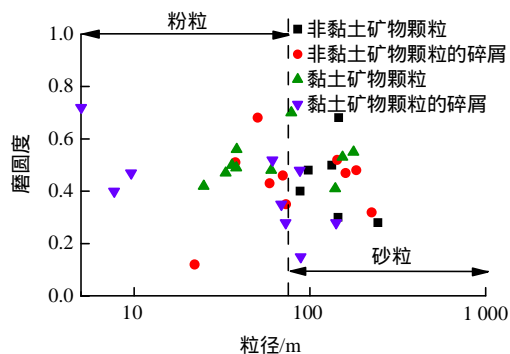
(2) 非黏土矿物颗粒分维数较大,集中在1.87~1.93范围,其碎屑的分维数为1.70~1.94。而黏土矿物颗粒的分维数在1.77~1.94范围,其碎屑的分维数为1.59~1.92。

(3) 尾矿颗粒的圆形度较为稳定,不同粒径的颗粒在圆形度上的差别不大。

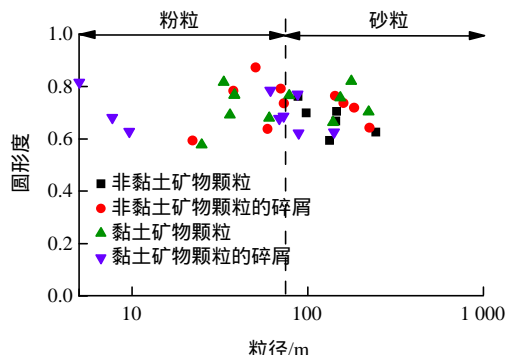
综上所述,砂粒的成分、形状、粒径相对稳定,而粉粒在颗粒特征上具有两极化分布特点。砂粒主要由石英颗粒组成,粒径较大,棱角性和粗糙度较



(a) 分维数与粒径的关系



(b) 磨圆度与粒径的关系



(c) 圆形度与粒径的关系

图 6 颗粒形状与粒径的关系

Fig.6 Relationship between particle shape and size

高。粉粒中的较大颗粒与砂粒颗粒在成分、形状上的区别不大。但微小颗粒(粒径小于 30 μm)主要由黏土矿物(伊利石)颗粒的碎屑组成,表面凹凸性弱,棱角性不强,与砂粒有明显区别。这是粉粒与砂粒在显微结构上的重要区别。

为了验证黏土矿物和非黏土矿物在宏观性质上的区别,采用人工石英粉和伊利石粉进行直剪试验,结果如图 7 所示。由试验结果可知,在低压时黏土矿物和非黏土矿物颗粒的宏观抗剪强度相近,在中高压时非黏土矿物颗粒的宏观抗剪强度大于黏土矿物颗粒。这间接证明,石英颗粒的强度高于伊利石颗粒。

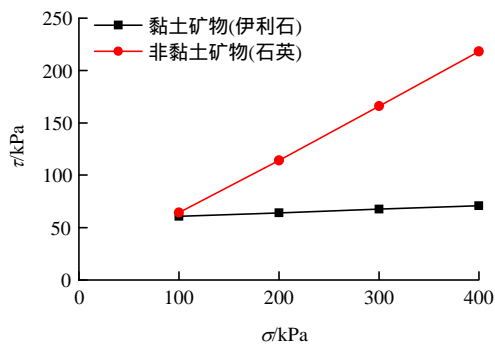


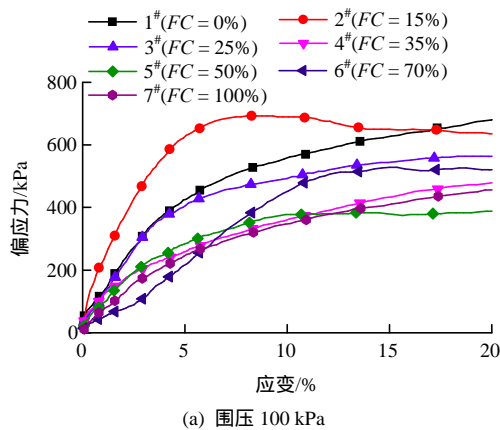
图 7 石英粉和伊利石粉的强度对比

Fig.7 Contrast of strengths of quartz and illite

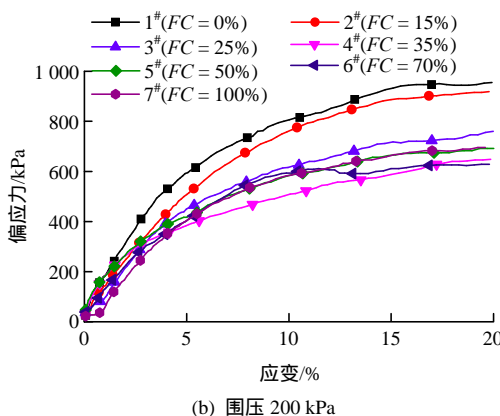
3.2 不同粉粒含量下混合尾矿的力学特征

根据粉粒含量的多少,砂粉混合尾矿分为砂性尾矿和粉性尾矿。砂性尾矿的力学特性接近于纯砂,而粉性尾矿的性质体现了粉粒的特点。

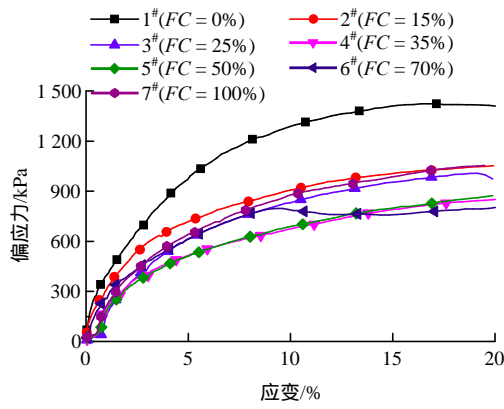
应力-应变曲线的形状可以反映土体在外力作用下发生形变过程,是研究宏观力学特性的重要参考。图 8 为不同粉粒含量下尾矿的应力-应变曲线,图中 FC 值表示细粒含量占总质量的百分比。从图中可以看出,砂粉混合尾矿的应力-应变曲线具有渐变特性:在砂性尾矿转变为粉性尾矿的过程中,孔隙压密阶段越来越明显,屈服点逐渐前移并下降,峰值强度有下降趋势,屈服阶段从轻度应变硬化转为强烈应变硬化。



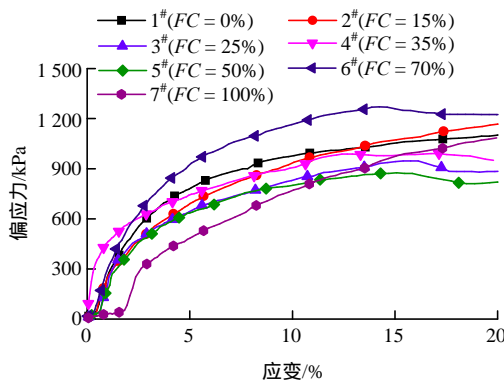
(a) 围压 100 kPa



(b) 围压 200 kPa



(c) 围压 300 kPa



(d) 围压 400 kPa

图 8 不同粉粒含量下的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves under different silt contents

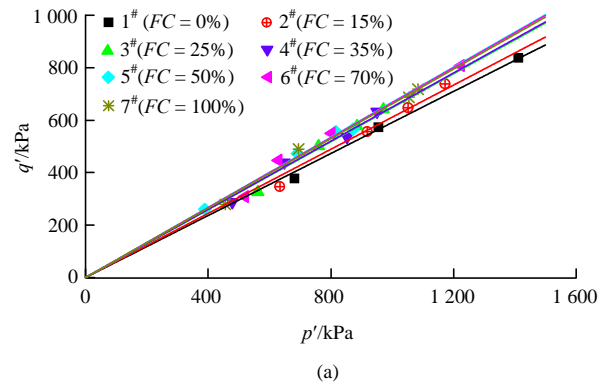
确定临界粉粒含量具有重要的工程意义^[8]。峰值强度是判断临界粉粒含量的常用指标，但由于单次试验的偶然误差较大，峰值强度与粉粒含量的关系存在很大的波动性(见图 8)。为了尽量消除单次试验误差带来的波动，可以用临界状态线(CSL)的位置来判断临界粉粒含量。临界状态线是指在 $p'-v-q'$ 空间中，由土三轴剪切试验破坏点的集合组成的直线。临界状态线的位置是由多次实验结果确定的，并且与加载路径无关，体现的是材料自身的性质，因此可以作为临界粉粒含量的判据指标。

临界状态线在 $p'-q'$ 平面上表示为一条直线：

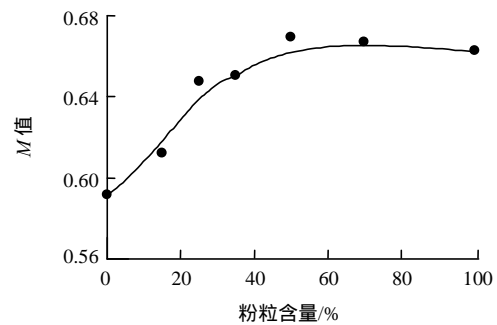
$$q' = Mp' \quad (1)$$

式中： q' 为广义剪应力， p' 为平均主应力， M 为直线斜率。

图 9 展现了不同粉粒含量下的 $p'-q'$ 曲线，从图中可以看出，随着粉粒含量的增加， $p'-q'$ 曲线的斜率有增大后平稳的趋势。 M 值为 0.59 ~ 0.66。当掺入少量粉粒时，临界状态线 CSL 斜率迅速增大。粉粒含量越多， M 值越大，但当粉粒含量达到 50% 后， M 值趋于稳定。根据 M 值的变化拐点位置，砂-粉



(a)



(b)

图 9 不同粉粒含量下的 $p'-q'$ 曲线

Fig.9 $p'-q'$ curves under different silt contents

混合土临界粉粒含量在 35% ~ 50% 范围。

以上试验现象显示，砂粉混合尾矿的剪切强度一开始就随粉粒含量的增加而减少。根据孔隙填充假说，CSL 线的变化应该存在一个粉粒含量阈值，当小于这个阈值时，增加粉粒含量不改变 CSL 线位置，当大于阈值时，CSL 线斜率迅速增大。这与试验结果不符，间接说明没有发生细粒填充孔隙的情况。这是因为当砂粒和粉粒中的石英颗粒大小相近，起不到填充孔隙的作用。此时引起混合尾矿强度变化的主要因素不是颗粒的级配，而是细颗粒的性质。

根据上文分析，粉粒中的伊利石微粒具有黏性，掺入的伊利石微粒有可能直接黏附在石英颗粒表面，夹杂在石英颗粒之间，改变了石英颗粒间的接触属性，降低了土体强度。当伊利石微粒含量不断增加，石英表面完全被伊利石覆盖时，石英颗粒间完全脱离接触，混合尾矿体现出粉性尾矿的特征。

4 粉粒含量效应的微观机制分析

Q. C. Sun 等^[19]认为，多尺度问题可以遵循“颗粒-力链-体系”的研究框架，这是一个从细

观到介观，再到宏观的过程。粉粒含量增加的本质就是土的结构的变化，这涉及到颗粒变形、位移、接触方式等问题，宏观理论难以解释其内在机制。

4.1 粉粒含量效应的微观机制

考虑到砂粒和粉粒的粒径大小关系，在尾矿砂粒中掺入粉粒时，粉粒不是填充在孔隙中，而是夹杂在砂粒之间，土体的变形特性与颗粒性质有关。图 10 描述了砂粒夹杂粉粒时，颗粒变形特性与颗粒位移的关系。

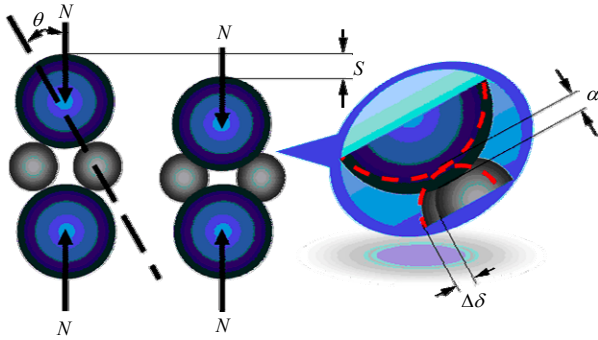


图 10 粉粒含量效应示意图
Fig.10 Sketch of the effect of silt content

为了简化问题，忽略重力影响。假设在外力 N 作用下，颗粒接触后经微小变形后系统达到平衡状态，此时总压缩量为 S 。如图 10 所示，由于小球的掺入，大球脱离接触。假设大球半径为 r_1 ，弹性模量 E_1 ，泊松比 ν_1 ，小球半径为 r_2 ，弹性模量 E_2 ，泊松比 ν_2 ，两球中心连线与竖直方向的夹角为 θ 。

显然，系统的总压缩量与球体变形量的关系为

$$S = 2\alpha \cos \theta + 2\Delta\delta \sin \theta \quad (2)$$

式中： α 为粒间法向位移， $\Delta\delta$ 为粒间切向位移。

对大球进行受力平衡分析，有

$$N = 2N_1 \cos \theta + 2f \sin \theta \quad (3)$$

式中： N_1 为粒间法向力， f 为粒间切向力。

对小球进行受力平衡分析，有

$$N_1 \sin \theta = f \cos \theta \quad (4)$$

根据 Hertz 法向力理论，有

$$N_1 = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{0.5} \alpha^{1.5} \quad (5)$$

式中： E^* 为有效弹性模量， R^* 为有效半径。

根据 Mindlin-Deresiewicz 切向力理论，有

$$N_1 = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{0.5} \alpha^{1.5} \quad (6a)$$

$$f = 8\sqrt{\alpha R^* G^*} \theta_0 \Delta\delta + \mu(1 - \theta_0) \Delta N \quad (6b)$$

式中： G^* 为有效剪切模量， θ_0 为函数参数， μ 为颗粒表面静摩擦因数， ΔN 为因剪切引起的法向力增量。

为了简化计算，假设颗粒表面静摩擦因数足够大，此时 $\theta_0 = 1$ ，式(6)简化为

$$f = 8\sqrt{\alpha R^* G^*} \Delta\delta \quad (7)$$

联立式(2)~(7)，解得

$$S = \left(\frac{1.04 \cos^2 \theta}{E^*} + \frac{0.17 \sin^2 \theta}{G^*} \right) \left(\frac{E^* N^2}{R^* \cos \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{E^*} \equiv \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (9)$$

$$\frac{1}{R^*} \equiv \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{G^*} \equiv \frac{4 + 2\nu_1 - 2\nu_1^2}{E_1} + \frac{4 + 2\nu_2 - 2\nu_2^2}{E_2} \quad (11)$$

由于 θ 较小， $\sin \theta \approx 0$ ，式(8)可近似为

$$S = 1.04 \left(\frac{N^2 \cos^5 \theta}{(E^*)^2 R^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

特别地，当 $\theta = 0$ 的时候 S 取得最大值：

$$S = 1.04 \left[\frac{N^2}{(E^*)^2 R^*} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

式(13)描述了总压缩量 S 和外力 N 的关系，说明在外力一定的条件下，颗粒的性质对压缩量是有影响的。从中可以看出，在摩擦因数足够大的条件下，粉粒粒径 r_2 越小，弹性模量 E_2 越小，夹角 θ 越小，相同力作用下的总压缩量就越大。

4.2 粉粒含量效应的介观机制

4.2.1 土体结构状态的表征参量

为了定量地反映颗粒的平均受力和变形情况，本文在 Hertz 法向接触理论和 Mindlin-Deresiewicz 切向接触理论的基础上，提出了“平均接触力”和“平均位移”的概念。

“平均法向接触力”为所有接触(contacts)的法向力绝对值的平均值，用来表征平均每个颗粒所受的法向接触力的大小。其增量表达式为

$$\Delta \bar{N} = \frac{\sum_{n=1}^{n_c} |\Delta N_n|}{n_c} \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^{n_c} |\Delta N_n| = |\Delta N_1| + |\Delta N_2| + |\Delta N_3| + \dots + |\Delta N_{n_c}| =$$

$$\sum_{n=1}^{n_c} |2a_n E^* \Delta a_n| \quad (15)$$

式中： $\Delta \bar{N}$ 为平均法向力增量， ΔN_n 为第 n 个接触的法向力增量， n_c 为接触(contact)的个数， a_n 为第 n 个接触半径， E^* 为有效弹性模量。

同理，定义“平均切向接触力”：

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{n=1}^{n_c} |\Delta T_n|}{n_c} \quad (16)$$

$$\sum_{n=1}^{n_c} |\Delta T_n| = |\Delta T|_1 + |\Delta T|_2 + |\Delta T|_3 + \dots + |\Delta T|_{n_c} = \sum_{n=1}^{n_c} 8a_n G^* \theta_{kn} \Delta \delta_n \quad (17)$$

$$\theta_{kn} = \left(1 - \frac{T_n + \mu \Delta N_n}{\mu N_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

式中： $\Delta \bar{T}$ 为平均切向力增量， ΔT_n 为第 n 个接触的切向力增量， μ 为颗粒表面摩擦因数， $\Delta \delta_n$ 为第 n 个颗粒间的切向位移增量。

“ x 方向平均位移”为所有颗粒 x 方向(试样径向)位移的绝对值的平均值，用来表征平均每个颗粒在 x 方向的平均位移大小。其增量表达式为

$$\Delta \bar{S}_x = \frac{\sum_{n=1}^{n_p} |\Delta S_{xn}|}{n_p} \quad (19)$$

式中： $\Delta \bar{S}_x$ 为 x 方向平均位移， n_p 为颗粒总数， ΔS_{xn} 为第 n 个颗粒的 x 方向位移的增量。

4.2.2 二元混合土的介观演化规律

砂粉混合尾矿包含砂粒和粉粒，属于二元混合离散材料，因此可以用离散元方法研究粉粒含量效应^[20]。为了简化离散元建模，用均匀粒径的粗、细颗粒分别模拟砂粒和粉粒，并赋予不同的颗粒属性参数。然后按不同的细粒含量配比建立离散元模型，模拟混合土的三轴剪切过程。为了避免细颗粒填充到粗颗粒孔隙的情况，经多次调试，设置粗粒半径为 2.0 mm，细粒半径为 0.7 mm，孔隙率为 0.1。粗、细颗粒的细观参数、配比情况如表 2，3 所示。

根据理想试验的结果(见图 11)，细粒含量对应力应变曲线的影响体现在峰值强度和起始弹性模量上。随着细粒含量的增加，混合土的峰值强度和起

表 2 离散元模型的颗粒参数

Table 2 Granule parameters of discrete element model

颗粒种类	形状	接触模型	半径/mm	法向刚度/ (10^8 Pa)	切向刚度/ (10^8 Pa)
粗粒	圆形	线性接触	2.0	9.0	9.0
细粒	圆形	线性接触	0.7	6.0	6.0

表 3 离散元模型的颗粒配比

Table 3 Particle contents in discrete element model

试样编号	粗粒含量/%	细粒含量/%
1-1	85	15
1-2	75	25
1-3	50	50
1-4	25	75
1-5	0	100

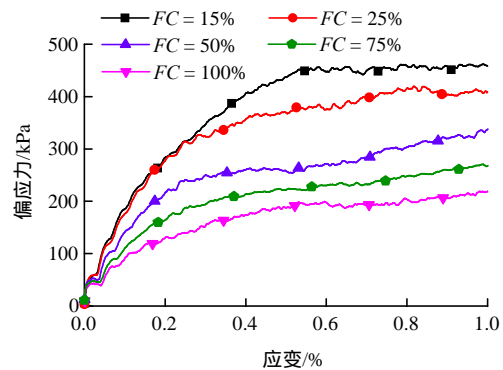


图 11 二元混合材料的应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves of binary mixtures

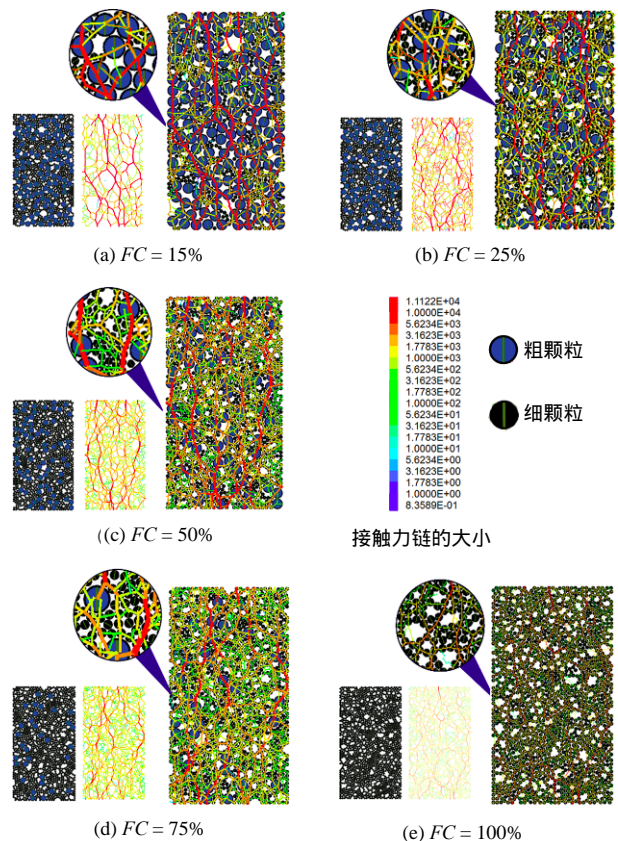


图 12 不同细粒含量的力链分布

Fig.12 Force chains under different contents of fine particles

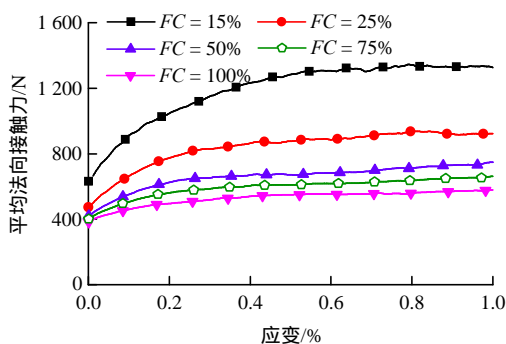
始弹性模量逐渐减低，这与室内试验得到的规律基本一致，验证了上文的相关结论，同时说明该数值

模型的有效性。

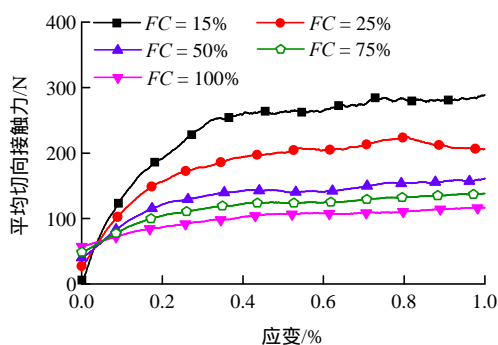
细粒含量对土体结构的影响可以通过力链来描述。图 12 为不同细粒含量的力链分布图,从图中可以看出,随着细粒含量的增加,细粒承受的力越来越大,力链数量不断上升,强力链逐渐减少,弱力链不断增加。

这种力链的分布特点主要与颗粒的刚度和数量有关。在同样的变形量下,颗粒的刚度越大,颗粒产生法向力也越大,形成的力链强度越高。在同一外力作用下,颗粒的数量越少,单个颗粒受到的力越大,形成的力链强度越高。因此,在二元颗粒结构中,刚度较高的粗颗粒容易形成强力链,刚度较小的细颗粒形成弱力链。随着细粒含量的增加,强力链逐渐被数量众多的弱力链取代,力链结构发生变化。当弱力链增长到一定程度时,粗颗粒间完全脱离接触,强力链结构遭到破坏,力链分布由弱力链中的细颗粒决定。

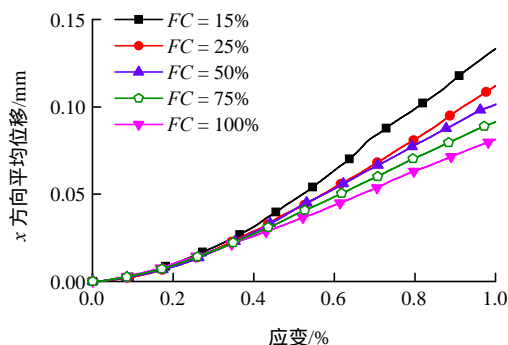
细粒含量对土体结构的影响也可以通过平均接触力和平均位移来定量描述。在数值模拟中,可以使用软球模型简化法向力和切向力的计算。如图 13 所示,随着细粒含量的增加,平均法向力-应变曲线和平均切向力-应变曲线逐渐由双曲线趋于水平直线;细粒含量越大,平均法向力的初始值越小,平均切向力的初始值越大,接触力的最终稳定值越小。同一应变下, x 方向平均位移随细粒含量的增加而降低。



(a) 平均法向力-应变曲线



(b) 平均切向力-应变曲线



(c) x 方向平均位移-应变曲线

图 13 不同细粒含量下介观参量的演变规律

Fig.13 Variation of mesoscopic parameters under different contents of fine particles

结合平均接触力和平均位移的变化规律可以推测,在压缩试验中,颗粒的变形和位移是此消彼长的关系。同样的宏观形变下,刚度小的颗粒可以通过颗粒变形减少法向和切向接触力。在摩擦因数相同的情况下,接触力的减少意味着颗粒的位移量较小。因此,在不考虑其他因素影响下,刚度大的颗粒变形小而位移大,刚度小的颗粒变形大而位移小。随着弱刚度颗粒含量的增加,二元混合土的平均接触力下降,颗粒平均位移减小,宏观上体现为应力-应变曲线逐渐下降。

综合理论推导和数值模拟的结果,在摩擦力足够大的情况下,砂粉混合尾矿的土性渐变主要受到颗粒刚度的影响。石英颗粒刚度大,伊利石微粒刚度小,两者混合形成具有刚度差的二元离散材料。随着伊利石微粒含量的增加,软弱的微粒夹杂在坚硬的石英颗粒之间,破坏了原有的强力链,弱力链数量逐渐增加,宏观上由砂性尾矿转为粉性尾矿。

5 讨论

大量试验表明,土体性质与其细观结构有关。研究混合尾矿的显微结构及其宏观响应,有助于认识粉粒含量效应的细观机制,为工程实践和土力学细观理论的发展提供参考。然而,对尾矿显微结构的研究存在诸多难题,需要在以后的研究中逐步解决。

(1) 显微镜下的单颗粒成分鉴别和几何特征描述有一定难度。尾矿通常由多种矿物颗粒组成,甚至同一颗粒中也包含多种矿物,因此对颗粒成分的

鉴别是十分困难的。在这方面,可以借鉴矿物学领域的相关研究成果,在此基础上进行单颗粒矿物成分分析方面的探索。本文依靠颗粒的光学性质和表面形态,大致将尾矿颗粒分为黏土矿物颗粒和非黏土矿物颗粒,这种分类是十分粗略的,还有很大的提高空间。

由于矿物成分、破碎方式的不同,尾矿颗粒的形状千差万别,其中的难点在于显微图像的处理和数学表征。本文从轮廓、棱角性和纹理特征三个层次上初步讨论了尾矿颗粒的几何特征,但这仅仅是二维平面内的观测结果,要全面认识颗粒的几何特征还需要进行三维的显微观测分析。

(2) 矿质成分、几何特征对颗粒力学性质的影响难以确定。对颗粒力学性质的直接测量有一定难度,除了少数学者使用特制仪器对不同矿质成分、几何特征的砂粒进行直接的颗粒力学测试外,大部分研究是通过宏观实验间接来反映颗粒强度的,本文也采用这种间接方法讨论石英颗粒和伊利石颗粒的力学差异,这主要是受到实验条件的限制,未来需要做进一步的实验补充和验证。

(3) 剪切过程中尾矿显微结构的演化规律还有待研究。尾矿是颗粒的聚集体,但尾矿的性质并不等于颗粒性质的简单叠加,其力学行为还受到颗粒组织结构影响,称为土的结构性。土的结构在在外力作用下会不断变化,研究尾矿细观结构的形变特点有助于解释土体强度和变形的内在机制。但是,受制于现有显微观测技术的不成熟,在三轴试验过程中观测显微结构的演化是十分困难的。受制于显微观测的技术水平,本文侧重于描述试验前尾矿颗粒的显微结构特点,并通过离散元模拟压缩过程中细观结构的变化,没有对土体结构及其在三轴实验过程中的形变进行试验验证,相关结论还需要在以后的试验中逐步验证和修正。

6 结 论

研究粉粒含量对尾矿力学特性的影响,可以为尾矿库筑坝方法设计提供理论参考,具有现实的工程意义。本文通过一系列宏细观试验和模拟,从颗粒组成的角度对尾矿的粉粒含量效应进行了研究。主要结论如下:

(1) 砂粒和粉粒在显微特征上存在较大差异。

特别是粉粒中的伊利石微粒,具有粒径小、棱角性弱、强度低的特点,与其他颗粒(主要是石英颗粒)形成鲜明对比。

(2) 随着粉粒含量的增加,砂粉混合尾矿的强度逐渐下降。这种渐变性可以用临界状态线的位置变化来反映。 $p'-q'$ 曲线的斜率随粉粒含量的增加而增加,最后趋于稳定。根据斜率变化的拐点,砂粉混合尾矿的临界粉粒含量在 35% ~ 50% 范围。

(3) 尾矿粉粒不是填充在孔隙中,而是夹杂在砂粒之间,因此不能用孔隙填充假说进行解释。根据理论模型的推导,在外力一定和摩擦因数足够大的条件下,颗粒间的压缩量受到粒径,弹性模量和粒间夹角的影响。

(4) 尾矿的粉粒含量效应可以从颗粒性质的角度进行解释。随着粉粒含量的增加,软弱的伊利石微粒夹杂在大颗粒之间,逐渐破坏了原有的强力链,形成弱力链网络,宏观上体现为土性的转变。

参考文献(References):

- [1] 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(4): 923-927.(QIAO Lan, QU Chunlai, CUI Ming. Effect of fines content on engineering characteristics of tailings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 923-927.(in Chinese))
- [2] 刘清秉, 项 伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400-409.(LIU Qingbing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 400-409.(in Chinese))
- [3] ULUSOY U, YEKELER M, HICYILMAZ C. Determination of the shape, morphological and wet ability properties of quartz and their correlations[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(10): 951-964.
- [4] 周 健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 047-2 052.(ZHOU Jian, YU Rongchuan, JIA Mincai. Measurement of microstructure parameters for granular soil model using digital image technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2 047-2 052.(in Chinese))
- [5] BELKHATIR M, SCHANZ T, ARAB A. Effect of fines content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and undrained shear strength of sand-silt mixtures[J]. Environmental Earth

- Sciences, 2013, 70(6): 2469–2479.
- [6] DESSOUKI M, MYERS M T, HATHON L A. The impact of CEC, silt content, and salinity on multistage triaxial tests of resedimented mudrocks[C]// Proceedings of the 50th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association. [S.l.]: [s.n.], 2016: 167–173.
- [7] SALGADO R, BANDINI P, KARIM A. Shear strength and stiffness of silty sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 451–462.
- [8] 朱建群, 孔令伟, 高文华, 等. 无黏性混合土临界细粒含量的多途径判别研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 103–109. (ZHU Jianqun, KONG Lingwei, GAO Wenhua, et al. Multi-ways to identify the transitional fine content of cohesionless soil with fines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 103–109. (in Chinese))
- [9] PHAN V T A, HSIAO D H, NGUYEN P T L. Critical state line and state parameter of sand-fines mixtures[J]. Procedia Engineering, 2016, 142: 298–305.
- [10] 张超, 杨春和. 细粒含量对尾矿材料液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1133–1137. (ZHANG Chao, YANG Chunhe. Effect of fines content on liquefaction properties of tailings material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1133–1137. (in Chinese))
- [11] PRAKASH S, DAKOULAS P. Ground failures under seismic conditions[C]// Sessions of ASCE National Convention. [S.l.]: [s.n.], 1994: 56–61.
- [12] EL TAKCH A, SADREKARIMI A, EL NAGGAR H. Cyclic resistance and liquefaction behavior of silt and sandy silt soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83: 98–109.
- [13] ESWARAI AH C, ANGADI S I, MISHRA B K. Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier[J]. Powder Technology, 2012, 218: 57–63.
- [14] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 干滩表层沉积尾矿的细观几何特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 768–777. (WU Shangwei, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Microscopic geometric characteristics of surface sedimentary tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 768–777. (in Chinese))
- [15] MADHUSUDHAN B N, BAUDET B A. Influence of reconstitution method on the behaviour of completely decomposed granite[J]. Géotechnique, 2014, 64(7): 540–550.
- [16] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 四种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1060–1068. (GAO Guanglei, DING Guodong, ZHAO Yuanyuan, et al. Effects of soil particle size classification system on calculating volume-based fractal dimension[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(6): 1060–1068. (in Chinese))
- [17] SANTAMARINA J C, CHO G C. Soil behaviour: The role of particle shape[C]// Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference. Thomas Telford: [s.n.], 2004: 604–617.
- [18] BARNARD P L, RUBIN D M, HARNEY J, et al. Field test comparison of an autocorrelation technique for determining grain size using a digital ‘beachball’ camera versus traditional methods[J]. Sedimentary Geology, 2007, 201(1): 180–195.
- [19] SUN Q, WANG G, HU K. Some open problems in granular matter mechanics[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(5): 523–529.
- [20] DOLEZALOVA M, CZENE P, HAVEL F. Micromechanical modeling of stress path effects using PFC^{2D} code[J]. Numerical Modeling in Micromechanics Via Particle Methods, 2002, 182(1): 97–101.