

文章编号: 1001-1986(2020)01-0174-09

# 筋土界面特性宏观细观分析试验仪器研制与应用

易富<sup>1</sup>, 杜常博<sup>2</sup>, 王政宇<sup>2</sup>, 于犇<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为了更全面地分析筋土界面相互作用特性, 改制了一台可视加筋土界面特性宏观细观分析的试验仪器, 可开展不同土工合成材料与填料的直剪和拉拔试验; 该仪器改进了试验箱的尺寸, 可方便两种试验的对比分析, 增加了图像摄录系统, 可进行试验过程的细观分析。使用新研制仪器分别进行了土工合成材料(土工格栅和土工布)加筋尾矿砂的直剪和拉拔试验, 试验结果表明: 两种试验条件下, 土工格栅与尾矿的界面参数(似黏聚力和似摩擦角)及似摩擦系数均比土工布与尾矿的界面参数和似摩擦系数大; 直剪试验下筋材网孔的有无对筋-尾矿界面参数均有较大影响, 拉拔试验下筋材网孔有无对筋-尾矿界面参数似黏聚力的影响较为显著, 对似摩擦角的影响较小。随着宏观变量法向应力的增加, 细观参数孔隙率减小, 平均接触数增加, 反映在宏观上的现象就是填料颗粒被压密, 筋材需要克服的阻力增大。该试验仪器能够较好地分析筋土界面宏观细观特性, 获得关键技术指标以用于加筋结构的设计。

**关 键 词:** 筋土界面; 直剪试验; 拉拔试验; 宏细观分析; 界面参数

**中图分类号:** TB331    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.01.023



移动阅读

## Development and application of macroscopic and mesoscopic analytical testing instrument for reinforcement-soil interface characteristics

YI FU<sup>1</sup>, DU Changbo<sup>2</sup>, WANG Zhengyu<sup>2</sup>, YU Ben<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** To analyze the interaction characteristics of soil-reinforcement interface more comprehensively, an experimental instrument for macro-and micro-analysis of interface characteristics of visible reinforced soils was developed and can be used for direct shear and pull-out tests with different geosynthetics and fillers. The instrument improves the size of test box, facilitates the comparative analysis of the two tests, and has an image recording system which enables the microscopic analysis of test process. The direct shear and pull-out tests of geosynthetics(geogrid and geotextile) reinforced tailings sand were carried out with the newly developed apparatus. The results show that the interface parameters(pseudo-cohesion and pseudo friction angle) and pseudo-friction coefficient between geogrid and tailings are about 30% larger than those between geotextile and tailings under the two test conditions. The presence or absence of reinforcement mesh has great influence on the interface parameters of reinforcement-tailings under direct shear test, while has more significant influence on the pseudo-cohesion of reinforcement-tailings interface parameters and less on the pseudo friction angle under pull-out test. With the increase of normal stress of macro variable, the porosity of micro parameter decreases while the average contact number increases. The macro phenomenon reflects that the filler particles are compacted and the resistance of reinforcement materials to be overcome increases. The test instrument can better analyze the macro and micro characteristics of reinforced soil interface, and obtain key technical indicators for the design of reinforced structures.

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774163); 辽宁省教育厅科研基金项目(LJYL054); 鞍钢科研项目(2018-科 A19)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(51774163); Scientific Research Fundation of Education Bureau of Liaoning Province, China(LJYL054); Scientific Research Project of Angang Group(2018-Ke A19)

第一作者简介: 易富, 1978年生, 男, 河北张北县人, 博士, 教授, 从事环境岩土工程及道路工程方向研究. E-mail: yifu9716@163.com

引用格式: 易富, 杜常博, 王政宇, 等. 筋土界面特性宏观细观分析试验仪器研制与应用[J]. 煤田地质与勘探. 2020, 48(1): 174-182.

YI FU, DU Changbo, WANG Zhengyu, et al. Development and application of macroscopic and mesoscopic analytical testing instrument for reinforcement-soil interface characteristics[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(1): 174-182.

**Keywords:** reinforcement-soil interface; direct shear test; pull-out test; macroscopic and mesoscopic analysis; interface parameters

近年来, 筋土界面特性试验设备的研制备受关注, 分析筋土界面作用特性的试验仪器主要是直剪试验设备和拉拔试验设备, 由于试验机理的差异, 导致使用这两种设备得到的试验结果也有很大不同<sup>[1-3]</sup>。张嘎等<sup>[4]</sup>得出直剪试验和拉拔试验都不能完整反映筋土界面作用特性, 但二者可相互补充; 刘文白等<sup>[5]</sup>认为拉拔试验在土工格栅与土相对位移较大时能反映实际情况, 而直剪试验却在位移较小时能反映实际情况; 史旦达等<sup>[6]</sup>对比单、双向土工格栅加筋工况, 认为单向格栅加筋时的直剪和拉拔曲线表现为应变软化型, 而双向格栅加筋的两种试验曲线一般表现为应变硬化型。

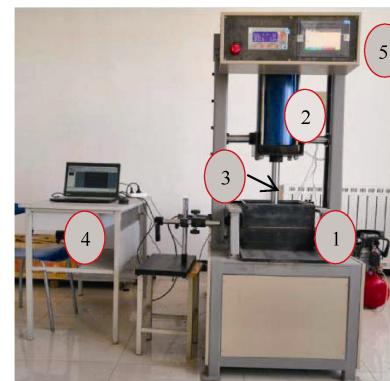
国内外许多学者对直剪和拉拔这两种试验设备进行了大量研制和改装。S. C. Desai 等<sup>[7]</sup>研制了多自由度循环直剪仪; M. Sugimoto 等<sup>[8-9]</sup>研制了主要用于分析土工格栅与砂土界面作用的中型拉拔测试仪, 尺寸为 680 mm×300 mm×620 mm, 竖直加载采用了双面气囊; 张嘎等<sup>[10]</sup>研制了剪切盒尺寸为 250 mm×250 mm、500 mm×360 mm 的大型接触面循环加载剪切试验机; 徐林荣等<sup>[11]</sup>研制一套适用于研究土工格栅与膨胀土界面特性的室内模型试验装置; N. Morci 等<sup>[12]</sup>利用尺寸为 1 700 mm×600 mm×680 mm 的拉拔箱对筋土界面特性影响因素进行了拉拔试验研究; 杨和平等<sup>[13]</sup>为分析土工格栅与膨胀土界面特性研制了 CS-LB01 大型数控土工合成材料拉拔试验系统; 刘炜等<sup>[14]</sup>研制了 500 mm×500 mm×400 mm 大尺寸直剪仪; 肖朝昀等<sup>[15]</sup>采用大尺寸直剪仪研究了 HDPE 土工膜与无纺土工布的界面剪切性能; 陈凯等<sup>[16]</sup>利用 DSJ-2 型电动四联等应变直剪仪, 分别进行了黏土与不同粒径砂和不同含水率砂的直剪试验; 王军等<sup>[17]</sup>应用美国公司生产的 ShearTracIII 直剪仪, 开展了玻璃纤维土工格栅与标准砂的室内直剪试验; 高俊丽等<sup>[18]</sup>改装了现有大型拉拔剪切仪, 使加载方式能够实现柔性承压和刚性承压; 蔡剑韬<sup>[19]</sup>应用叠环式剪切试验机分析了土工格栅与膨胀土的界面特性; 王家全等<sup>[20]</sup>研制了一台大尺寸可视直剪试验仪器, 实现了直剪试验过程的可视和数据自动化采集; 易富等<sup>[21]</sup>改装的拉拔设备采用万能试验机施加水平拉力, 竖向荷载由砝码控制; 孟凡祥等<sup>[22]</sup>研制了土工合成材料剪切仪, 可进行土工合成材料直剪和拉拔试验, 但其设备尺寸较小且两种试验箱底面积不同。

目前国内外尚无一种公认的标准或试验方法, 所研究设备均存在不足之处: 首先, 试验过程无法

可视, 无法进行界面特性的细观分析; 其次, 直剪试验和拉拔试验需用两种试验设备分别进行, 无法在同一设备上进行两种试验, 且两种试验箱底面积不相同, 不利于两种试验的对比分析; 最后, 试验数据的读取与处理存在误差。所以, 为了更方便地在同一设备上开展直剪拉拔试验并进行对比分析, 研制出一种新型土工合成材料直剪拉拔摩擦试验系统至关重要。

## 1 试验仪器的设计

本试验仪器由南京华德仪器公司生产的 YT1200 土工合成材料直剪拉拔试验系统改制而成, 在现有仪器的基础上改进了试验箱的尺寸, 可方便两种试验的对比分析, 增加了图像摄录系统, 可进行试验过程细观分析。该系统主要包括试验箱(直剪和拉拔)、垂直加载系统、水平加载系统、图像摄录系统和数据采集系统, 试验设备如图 1 所示。



1—试验箱; 2—垂直加载系统(包括气泵);  
3—水平加载系统; 4—图像摄录系统; 5—数据采集系统

图 1 试验装置

Fig.1 Test device

### 1.1 试验箱

本仪器设计两种试验箱, 直剪试验箱和拉拔试验箱, 如图 2 所示。直剪试验箱分为上直剪箱(图 2 左)和下直剪小车, 试验时土工合成材料固定在下直剪小车上, 上直剪箱内径为 300 mm×300 mm×150 mm(长×宽×高), 在上直剪箱侧面中央开口 200 mm×50 mm 尺寸大小; 拉拔试验箱(图 2 右)内径为 300 mm×300 mm×220 mm, 在试验箱前后正中开 300 mm×10 mm 窄缝, 供土工合成材料的引出, 试验时筋材水平铺设在试验箱的窄缝高度位置, 在拉拔箱侧面中央开口 200 mm×90 mm 尺寸; 在直剪试验箱和拉拔试验箱的开口处内侧粘上 10 mm 厚的钢化有机玻璃, 便于观测试验过程中筋材的变形并

拍摄照片, 以实现试验过程中筋土界面的可视化。



图 2 仪器试验箱组成

Fig.2 Test cases

## 1.2 坚向加载系统

坚向加载系统由带压力传感器的气缸通过反力装置施加上覆压力, 气缸为 30 L 的空气压缩机, 在气压加载系统顶部有一块 295 mm×295 mm×10 mm 大小的承压板, 可均匀施加 0~200 kPa 范围内上覆压力。

## 1.3 水平加载系统

水平加载系统采用速率可控的带拉力传感器拉压电机, 可为试验施加 0~5 mm/min 范围内恒定加载速度并测量试验力。

## 1.4 图像摄录系统

图像采集系统由奥斯微 AO-3M140 视频视显微镜、专用光源及支架组成, 采用细观测量技术采集分析处理筋土界面图像; 图像采集系统直接与计算机相连, 进行图像的采集与初步处理。

## 1.5 数据采集系统

本试验机设有控制面板(图 1), 左侧控制面板与坚向加载系统相连, 可进行上覆压力的设定, 右侧控制面板与水平加载系统相连, 可将试验结果实时地反映在显示屏上, 实现了对试验数据的实时监控, 以便试验出现问题后及时分析或停止; 试验时数据自动采集保存, 试验机与计算机相连, 在试验结束后数据可导入计算机。

## 1.6 试验仪器的特点

相较于国内外其他类似直剪拉拔设备, 本文研制的土工合成材料直剪拉拔试验系统具有如下技术特点。

a. 直剪与拉拔两用, 两种试验箱底面面积相同, 可方便开展不同工况的直剪与拉拔试验, 并进行对比分析, 这是本设备相较于其他同类设备具备的一个显著的技术优点。

b. 试验箱由具有一定刚度的钢板和受力时不变形的有机玻璃组成, 可避免试验时边界效应的影响, 尤其对于直剪试验来说, 试验箱的尺寸比同类试验箱尺寸大, 对尺寸效应有一定减小, 而拉拔试验装置的尺寸效应可通过润滑侧壁和控制筋材长宽比来减少这一影响。

c. 加载系统控制方便。在坚直方向上, 采用气压加载系统控制试验设备的坚向加载, 便于荷载的控制和卸载, 可以对试验箱内的填料施加不同的恒定上覆压力; 在水平方向上, 由拉压电机控制水平加载的恒定速度, 可设定不同的加载速度。

d. 试验过程可视化。在试验箱侧面开口处安装视频显微镜, 对整个试验过程进行摄录, 获得直剪与拉拔试验过程中筋土界面区域填料颗粒位移及细观参数的变化规律。

e. 数据采集自动化。试验过程中实现了试验数据的实时监测和自动采集, 保证了试验的高效及结果的准确性。

f. 试验仪器一体化。整个试验设备除图像摄录系统外统一安装在一个实验台上, 使拉压电机作用在试验箱的力和反力装置产生在试验箱的反作用力相互抵消, 便于试验控制及减少试验误差。

## 2 试验装置的应用

通过试验研究筋-尾矿的界面特性有助于指导加筋尾矿的设计与施工。为了检验新改制试验设备的可靠性与实用性, 使用该仪器分别进行了土工格栅与土工布加筋尾矿砂的直剪试验与拉拔试验。

### 2.1 试验原理

进行试验时, 在土工合成材料即被拉出时, 假定筋材表面剪应力均匀分布且满足平衡条件, 计算直剪和拉拔界面摩擦强度<sup>[20]</sup>:

$$\tau_{f1} = \frac{T_{d1}}{A} \quad (1)$$

$$\tau_{f2} = \frac{T_{d2}}{2A} \quad (2)$$

式中  $\tau_{f1}$ 、 $\tau_{f2}$  为直剪、拉拔摩擦强度, kPa;  $T_{d1}$ 、 $T_{d2}$  为筋材受到的最大剪应力、最大拉拔力, kN;  $A$  为筋材在直剪或拉拔试验箱内的面积, 即为试验箱底面积, 经计算  $A = 0.09 \text{ m}^2$ 。

直剪试验和拉拔试验均在不同法向应力  $\sigma_n$  作用下进行, 可绘制出  $\tau_f - \sigma_n$  曲线并进行线性拟合, 当曲线符合莫尔-库伦定律时, 由此可确定出直剪或拉拔试验的界面参数似黏聚力  $c$  和似摩擦角  $\phi$ 。

筋土之间的相互作用特性可以用筋土界面似摩擦系数  $f$  描述, 一般为界面摩擦强度  $\tau_f$  与对应法向应力  $\sigma_n$  的比值:

$$f = \frac{\tau_f}{\sigma_n} \quad (3)$$

### 2.2 尾矿填料及土工合成材料参数指标

试验所用尾矿砂填料来源于内蒙古包头市大中

股份有限公司的尾矿库, 密度为  $1.83 \text{ g/cm}^3$ , 含水率为 3.75%。该尾矿砂具有的物理性质指标为: 有效粒径  $d_{10} = 0.10 \text{ mm}$ , 中值粒径  $d_{30} = 0.19 \text{ mm}$ , 限制粒

径  $d_{60} = 0.30 \text{ mm}$ , 不均匀系数  $C_u = 3 < 5$ , 曲率系数  $C_c = 1.2$ , 说明该尾矿砂属于级配不良, 具体颗粒级配见表 1。

表 1 尾矿砂颗粒级配  
Table 1 Grain gradation of tailings

粒径/mm	$>1.18\sim2.36$	$>0.60\sim1.18$	$>0.30\sim0.60$	$>0.15\sim0.30$	$0.075\sim0.15$	$<0.075$
分级筛余/%	1.19	6.81	30.89	42.98	12.98	5.15
累计筛余/%	100	98.81	92	61.11	18.13	5.15

如图 3 所示, 试验采用的土工合成材料为 TGSG35 双向拉伸塑料土工格栅(图 3 左)和短纤针刺土工布(图 3 右), 这两种土工合成材料在各种加筋工程中有较好的应用效果, 具体加筋材料参数见表 2。

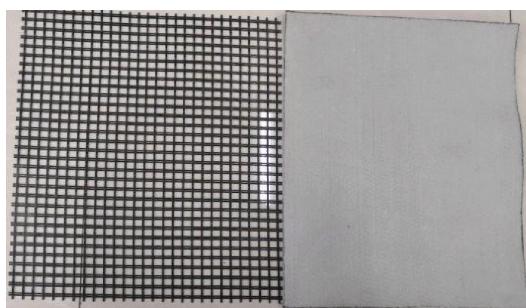


图 3 试验所用土工合成材料  
Fig.3 The geosynthetic used in test

表 2 土工合成材料性能参数  
Table 2 The technology parameters of geosynthetics

针刺短纤土工布 力学参数	性能 指标	TGSG35土工格栅 力学参数	性能指标
纵、横向断裂 强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	30	纵、横向拉伸 强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	35
纵、横向标准强 度对应伸长率/%	40~80	标称伸长率/%	纵向 15%、 横向 13%
CBR 顶破强 力/kN	$\geq 13$	纵、横向 2% 伸长率时 拉伸强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$\geq 12$
纵横向撕破 强力/kN	$\geq 12$	纵、横向 5% 伸长率时 拉伸强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$\geq 24$
等效孔径/mm	0.05~0.2		
垂直渗透 系数/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1.0 \times 10^{-3}$		
厚度/mm	4.2		

### 2.3 试验方案

设计在土工格栅和土工布上进行直剪和拉拔试验, 法向应力取 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa, 两种试验共计 16 组。为了降低试验结果的离散性,

每组试验进行 1~3 组平行试验。试验时, 以尾矿砂的密度控制试验槽的装砂量, 并在装砂过程中分层压实, 保证每组试验的密实度相同; 同时, 在拉拔试验箱两侧均匀涂上润滑油以减少试验过程的尺寸效应; 直剪试验和拉拔试验的试验速度均设定为 2 mm/min, 试验严格参照 JTG E 50—2006《公路工程土工合成材料试验规程》<sup>[23]</sup>进行。

### 2.4 直剪试验结果分析

#### a. 直剪界面宏观特性

图 4 为不同法向应力下土工格栅和土工布与尾矿的直剪试验结果。由图 4 可知, 土工格栅和土工布与尾矿的直剪试验曲线变化规律基本一致, 剪切

图 4 土工格栅和土工布的直剪试验曲线  
Fig.4 Direct shear test curves of geogrids and geotextiles

力首先随着剪切位移增大而增大, 达到峰值后剪切力基本稳定(图 4b 中试验曲线在较大法向应力下土工布与下直剪小车发生滑落导致试验结束, 但不影响试验结果的分析); 直剪试验曲线的总体规律都是在剪切位移达到 10 mm 前, 剪切力增长较快, 随后逐渐减缓, 且法向应力越大, 剪切力达到的峰值越大。

根据式(1)计算可得直剪摩擦强度与法向应力的变化关系, 如图 5 所示。从图可以发现, 土工格栅和土工布的直剪摩擦强度与法向应力都有很好的线性关系, 相关系数都在 97% 以上, 验证了该仪器直剪试验的可靠性; 图 5 中的线性拟合公式根据摩尔-库伦强度准则可得土工格栅和土工布与尾矿的界面参数, 其中似黏聚力分别为 7.36 kPa、4.78 kPa, 似摩擦角分别为 29.57°、20.96°; 土工格栅计算得到的界面参数均比土工布的界面参数大, 其中似黏聚力相差 54%, 似摩擦角相差 41.1%, 由此可知, 直剪试验条件下筋材网孔的有无对筋-尾矿界面参数似黏聚力和似摩擦角均有较大影响。

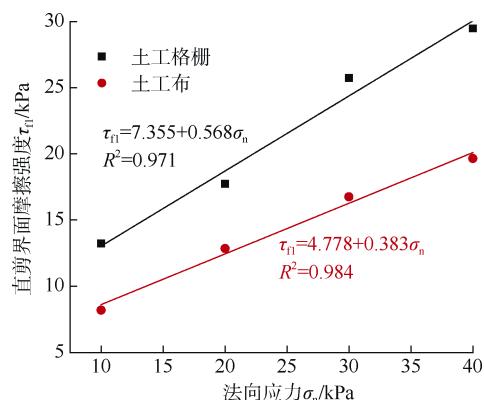


图 5 直剪摩擦强度与法向应力的关系

Fig.5 Relationship between direct shear friction strength and normal stress

根据式(3)可计算得到直剪似摩擦系数与法向应力变化关系, 如图 6 所示。由图 6 可知, 土工格栅和土工布的直剪似摩擦系数与法向应力均呈负指数关系, 随着法向应力的增大, 似摩擦系数减小, 且减小速度逐渐减缓; 土工格栅的直剪似摩擦系数介于 0.74~1.32, 土工布的直剪似摩擦系数介于 0.49~0.82, 相同法向应力条件下, 土工格栅的直剪似摩擦系数比土工布的约大 56%。

### b. 直剪界面细观特性

试验过程中采用视频显微镜在可视玻璃窗口前方拍摄直剪筋-尾矿界面区域内尾矿颗粒的运动状态, 图 7 显示土工格栅在法向应力 20 kPa 作用下的直剪界面尾矿颗粒运动变化。由图 7 可知, 尾矿颗

粒在筋-尾矿直剪界面处主要表现为平移形式, 对比图中标志颗粒 1 和颗粒 2 可发现, 越靠近界面处的颗粒位移越大; 在剪切过程中随着界面区域内颗粒的运动, 区域外的细小颗粒会逐渐向界面内运动。

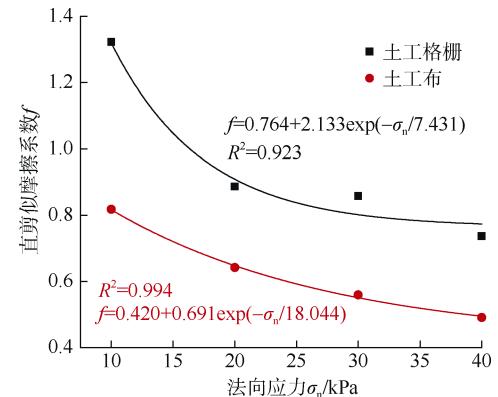


图 6 直剪似摩擦系数与法向应力的关系

Fig.6 Relationship between direct shear pseudo-friction coefficient and normal stress

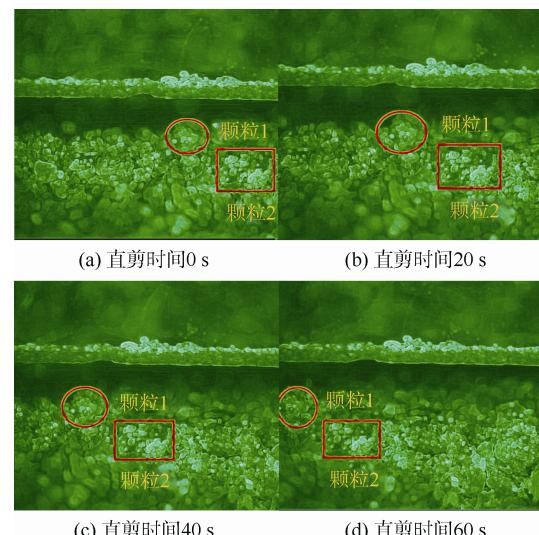


图 7 直剪界面尾矿颗粒运动状态变化(法向应力 20 kPa)

Fig.7 Motion state of tailing particles at direct shear interface

根据图像分析软件可求得直剪过程中的细观系数, 孔隙率为孔隙所占的像素点数目除以整个直剪界面区域的像素点总数的百分比(非填料真实孔隙率, 为界面区域的细观孔隙率)<sup>[24]</sup>, 而统计范围内每一填料颗粒的平均接触数目认定为平均接触数。图 8 为土工格栅在不同法向应力下直剪界面区域内细观参数孔隙率和平均接触数的变化规律。由图 8 可以发现, 刚开始剪切过程中, 颗粒从原来的位置发生平移, 尾矿体发生剪涨现象, 使得细观孔隙率增大, 平均接触数减小, 当剪切过程处于相对稳定状态后, 颗粒被压密, 导致孔隙率降低, 平均接触数增多; 但由于尾矿属于不良级配, 颗粒比较均匀, 导致在试验时细观孔隙率和平均接触数随

剪切位移的变化不明显。进一步分析可得到, 细观参数与宏观变量之间的关系, 随着宏观变量法向应力的增加, 细观参数孔隙率减小, 平均接触数增加, 而反映在宏观上的现象为填料颗粒被压密, 筋材需要克服的阻力增大, 从而导致剪切力随着法向应力的增加而增加, 当剪切力达到峰值平稳后, 细观参数也开始趋于稳定。

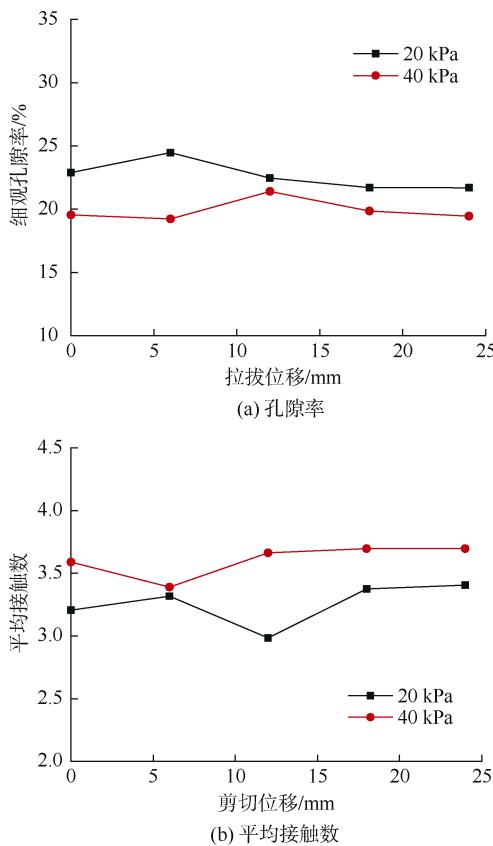


图 8 直剪界面区域细观参数的变化规律

Fig.8 Variation rule of mesoscopic parameters in direct shear interface region

## 2.5 拉拔试验结果分析

### a. 拉拔界面宏观特性分析

不同法向应力下土工格栅和土工布与尾矿的拉拔试验结果如图 9 所示。在图 9 中, 不同法向应力下土工格栅与尾矿的拉拔试验曲线随拉拔位移的增大缓慢达到峰值, 而土工布的拉拔试验曲线中, 拉拔力随着拉拔位移增大迅速达到峰值后明显下降。对比图 4 可以看出, 直剪和拉拔试验的剪切力峰值均随着法向应力增大而增大。

根据式(2)和式(3)分别计算得到拉拔摩擦强度和拉拔似摩擦系数与法向应力变化关系, 如图 10、图 11 所示。在图 10 中, 土工格栅和土工布的拉拔摩擦强度与法向应力也呈线性相关, 符合摩尔-库伦强度准则, 相关系数都在 92% 以上, 验证了该仪器拉拔试验的可靠性。根据摩尔-库伦强度准则, 由

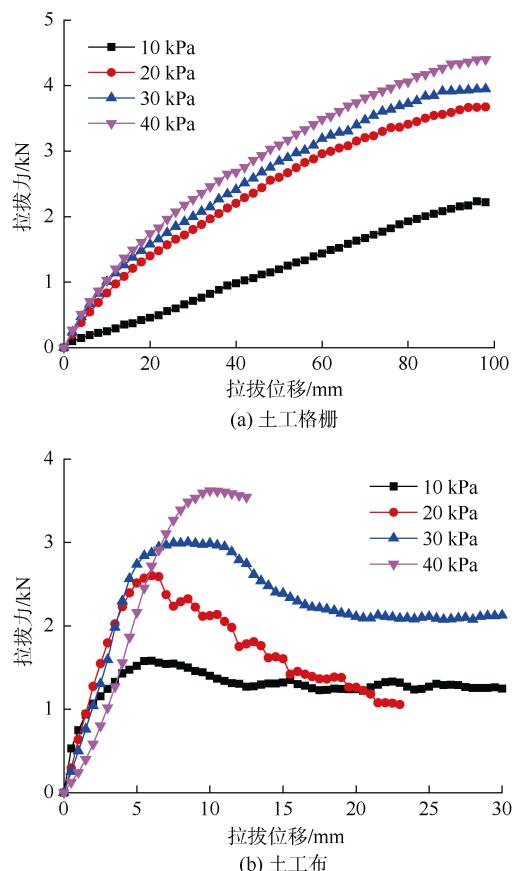


图 9 土工格栅和土工布的拉拔试验曲线

Fig.9 Pull-out test curves of geogrids and geotextiles

图 10 中的线性拟合公式可得土工格栅和土工布与尾矿的界面参数似黏聚力分别为 10.22 kPa、6.08 kPa, 似摩擦角分别为 21.31°、19.85°, 土工格栅计算得到的界面参数也都比土工布的界面参数大, 其中似黏聚力相差 68.1%, 似摩擦角相差 7.4%, 由此可知, 拉拔试验条件下筋材网孔的有无对筋-尾矿界面参数似黏聚力的影响较为显著, 对似摩擦角的影响较小。图 11 中土工格栅和土工布的拉拔似摩擦系数与法向应力均呈负指数相关, 土工格栅的拉拔似

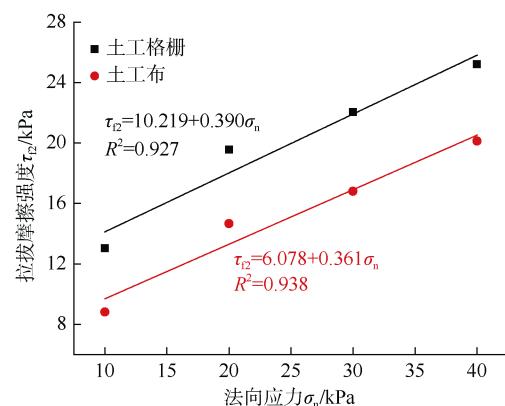


图 10 拉拔摩擦强度与法向应力的关系

Fig.10 Relationship between pull-out friction strength and normal stress

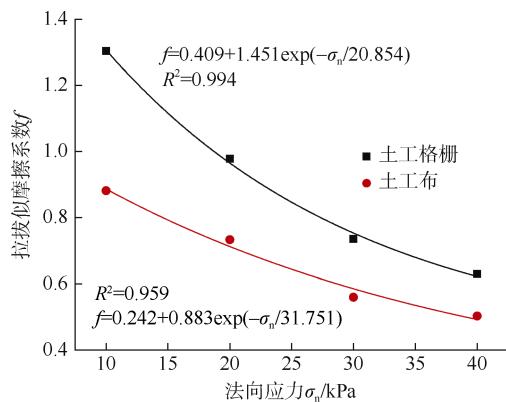


图 11 拉拔似摩擦系数与法向应力的关系

Fig.11 Relationship between pull-out pseudo-friction coefficient and normal stress

摩擦系数介于 0.63~1.31, 土工布的拉拔似摩擦系数介于 0.51~0.88, 相同法向应力条件下, 土工格栅的拉拔似摩擦系数要比土工布的约大 36%。

### b. 拉拔界面细观特性

土工格栅在法向应力为 20 kPa 作用下的拉拔界面尾矿颗粒运动状态如图 12 所示。由图 12 可知, 尾矿颗粒在筋-尾矿拉拔界面区域内主要表现为平移形式, 对比颗粒 1 和颗粒 2 可发现, 越靠近界面处的颗粒位移越大, 在界面区域外上面的尾矿颗粒比界面区域外下面的运动明显, 且在拉拔过程中界面区域外上面的细小颗粒会逐渐向界面内运动。

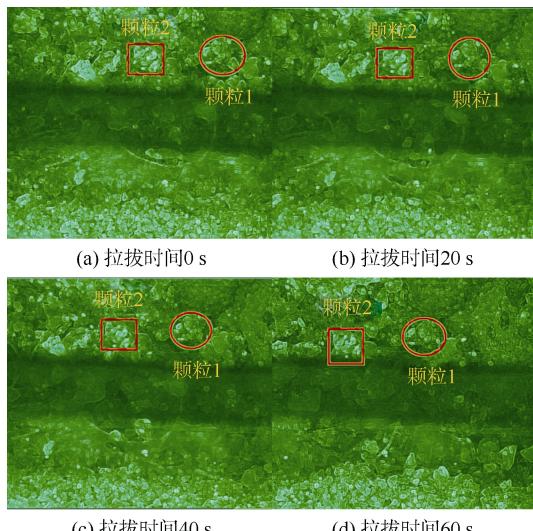
图 12 拉拔界面尾矿颗粒运动状态变化  
(法向应力 20 kPa)

Fig.12 Variation of motion state of tailing particles at pull-out interface

土工格栅在拉拔界面区域内不同法向应力下孔隙率和平均接触数的变化规律如图 13 所示。由图 13 可以发现, 在拉拔过程中由于尾矿属于不良级配, 颗粒比较均匀, 使得试验时细观孔隙率和平均

接触数随拉拔位移的变化不明显; 尾矿体刚开始会发生剪涨现象, 使得细观孔隙率增大和平均接触数减小, 拉拔达到相对稳定颗粒会被压密, 孔隙率降低, 平均接触数增多。随着宏观变量法向应力增加, 细观参数孔隙率减小, 平均接触数增加, 当拉拔力达到峰值平稳后, 细观参数也开始趋于稳定, 反映在宏观上的现象就是填料颗粒被压密, 筋材需要克服的阻力增大, 进而导致拉拔力随着法向应力的增加而增加。

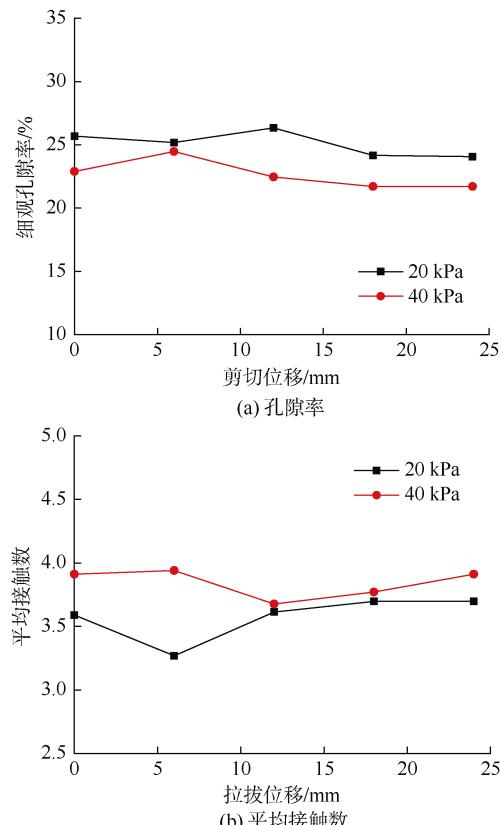


图 13 拉拔界面区域细观参数的变化规律

Fig.13 Variation rule of mesoscopic parameters in pull-out interface region

### 2.6 两种试验结果的对比分析

表 3 为直剪和拉拔两种试验结果的对比情况。由表 3 可知, 两种试验条件下, 土工格栅与尾矿的界面参数(似黏聚力和似摩擦角)和似摩擦系数均分别比对应土工布与尾矿的界面参数及似摩擦系数大, 土工格栅加筋尾矿的效果更理想; 对于土工格栅和土工布, 由拉拔试验计算得到的界面参数似黏聚力均比直剪试验得到的似黏聚力大, 其中土工格栅的似黏聚力相差 38.9%, 土工布的似黏聚力相差 27.2%, 但拉拔试验得到的似摩擦角却比直剪试验得到的小, 其中土工格栅的似摩擦角相差 38.7%, 土工布的似摩擦角几乎相同。由此, 直剪和拉拔两种试验种类对于土工格栅加筋尾矿界面参数似黏聚力

和似摩擦角的影响都比较显著, 而试验种类对于土工布加筋尾矿界面参数似黏聚力的影响显著, 对似摩擦角的影响较小, 造成这种现象的原因是直剪和拉拔两种试验机理不同及土工格栅独特的网孔结构对于尾矿的咬合和镶嵌作用<sup>[3]</sup>。

从两种试验得到的土工格栅细观参数孔隙率和平均接触数的数值关系可以看出, 拉拔试验得到的细观参数均比直剪试验的细观参数稍大, 考虑到似黏聚力在筋土界面作用中占主导作用<sup>[25]</sup>, 这样从细观上也验证了得到的宏观界面参数变化关系。

表3 直剪和拉拔试验的结果对比  
Table 3 Comparison of results of direct shear and pull-out tests

试验种类	界面参数		似摩擦系数 $f$	细观参数	
	似黏聚力 $c/kPa$	似摩擦角 $\phi/(^{\circ})$		孔隙率/%	平均接触数
土工格栅	直剪试验	7.36	29.57	0.74~1.32	19~25
	拉拔试验	10.22	21.31	0.63~1.31	21~26
土工布	直剪试验	4.78	20.96	0.49~0.82	—
	拉拔试验	6.08	19.85	0.51~0.88	—

结合以上分析可知, 土工格栅对加筋尾矿的效果更理想, 这是由于其特有的网孔结构对尾矿颗粒的镶嵌和咬合作用, 但土工格栅网孔尺寸的确定有待进一步研究。由于直剪和拉拔两种试验机理不同, 在加筋尾矿工程中应根据实际情况充分考虑筋材在加筋尾矿中所处的位置, 合理判断出是属于直剪摩擦还是拉拔摩擦, 从而选取合适的试验方法及界面参数指标。

### 3 结论

a. 改制了一台用于加筋土界面特性宏细观分析可视化试验仪器, 该仪器可开展土工合成材料与填料的直剪和拉拔试验, 尤其是对于两种试验的对比分析, 能够获得较为可靠的试验力-位移曲线和界面细观参数分析图。该仪器相较其他同类产品具有优点: ① 直剪与拉拔试验的对比分析; ② 大尺寸试验箱; ③ 控制方便的竖向和水平加载系统; ④ 试验过程可视化; ⑤ 数据采集自动化; ⑥ 试验仪器一体化。

b. 两种试验条件下, 由于土工格栅特有的网孔结构, 产生对尾矿颗粒的镶嵌和咬合作用, 土工格栅与尾矿的界面参数(似黏聚力和似摩擦角)以及似摩擦系数均比对应土工布与尾矿的界面参数及似摩擦系数大, 土工格栅加筋尾矿的效果更理想; 同时直剪和拉拔两种试验对于土工格栅加筋尾矿界面参数似黏聚力和似摩擦角及似摩擦系数的影响都比较显著, 而试验种类对于土工布加筋尾矿界面参数似黏聚力的影响显著, 对似摩擦角的影响较小。

c. 尾矿砂颗粒在筋-尾矿界面区域主要表现为平移形式, 越靠近界面处的颗粒位移越大, 在试验过程中区域上面的细小颗粒会逐渐向界面区域内运动; 随着宏观变量法向应力的增加, 细观参数孔隙

率减小, 平均接触数增加, 反映在宏观上的现象就是填料颗粒被压密, 筋材需要克服的阻力增大。

请听作者语音介绍创新技术成果  
等信息, 欢迎与作者进行交流



### 参考文献(References)

OSID 码

- [1] WANG Z , RICHWIEN W. A study of soil-reinforcement interface-friction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2002 , 128(1) : 92~94.
- [2] 张文慧, 王保田, 张福海, 等. 双向土工格栅与黏土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007 , 28(5) : 1031~1034.  
ZHANG Wenhui , WANG Baotian , ZHANG Fuhai , et al. Test study on interaction characteristics between two-way geogrids and clay[J]. Rock and Soil Mechanics , 2007 , 28(5) : 1031~1034.
- [3] 靳静, 杨广庆, 刘伟超. 横肋间距对土工格栅拉拔特性影响试验研究[J]. 中国铁道科学 , 2017 , 38(5) : 1~8.  
JIN Jing , YANG Guangqing , LIU Weichao. Experimental study on effect of transverse rib spacing on geogrid pull-out characteristics[J]. China Railway Science , 2017 , 38(5) : 1~8.
- [4] 张嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学 , 2006 , 27(1) : 51~55.  
ZHANG Ga , ZHANG Jianmin. Experimental study on behavior of interface between soil and geotextile[J]. Rock and Soil Mechanics , 2006 , 27(1) : 51~55.
- [5] 刘文白, 周健. 土工格栅与土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学 , 2009 , 30(4) : 965~970.  
LIU Wenbai , ZHOU Jian. Experimental research on interface friction of geogrids and soil[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(4) : 965~970.
- [6] 史旦达, 刘文白, 水伟厚, 等. 单、双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性对比试验研究[J]. 岩土力学 , 2009 , 30(8) : 2237~2244.  
SHI Danda , LIU Wenbai , SHUI Weihou , et al. Comparative experimental studies of interface characteristics between uniax-

- ial/biaxial plastic geogrids and different soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2237–2244.
- [7] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(6): 793–815.
- [8] SUGIMOTO M, ALAGIYAWANNA A M N, KADOGUCHI K. Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19(5): 257–277.
- [9] SUGIMOTO M, ALAGIYAWANNA A M N. Pullout behavior of geogrid by test and numerical analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(4): 361–371.
- [10] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(2): 149–153.
- ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 149–153.
- [11] 徐林荣, 凌建明, 刘宝琛. 土工格栅与膨胀土界面摩擦阻力系数试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(2): 172–176.
- XU Linrong, LING Jianming, LIU Baochen. Experiment on interface friction coefficient parameters between geogrids and expansive soil[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2004, 32(2): 172–176.
- [12] MORACI N, RECALCATI P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(4): 220–242.
- [13] 杨和平, 万亮, 郑健龙. 大型数控拉拔试验系统的研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(7): 1080–1084.
- YANG Heping, WAN Liang, ZHENG Jianlong. Development and application of large scale numerical control pullout test system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(7): 1080–1084.
- [14] 刘炜, 汪益敏, 陈页开, 等. 土工格室加筋土的大尺寸直剪试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 3133–3138.
- LIU Wei, WANG Yimin, CHEN Yekai, et al. Research on interaction of geogrid and sand interface by direct shear tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 3133–3138.
- [15] 肖朝昀, 涂帆. HDPE 土工膜与无纺土工布界面剪切性能试验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(12): 186–191.
- XIAO Chaojun, TU Fan. HDPE geomembrane-geotextile interface shear properties determined by large size direct shear test[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(12): 186–191.
- [16] 陈凯, 姜振泉, 孙强. 砂与黏土接触界面的力学特性试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(4): 56–59.
- CHEN Kai, JIANG Zhenquan, SUN Qiang. Experiment on mechanical behavior of interface between sand and clay[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(4): 56–59.
- [17] 王军, 林旭, 刘飞禹, 等. 砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊 1): 113–120.
- WANG Jun, LIN Xu, LIU Feiyu, et al. Research on large size direct shear test for geocell reinforced soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S1): 113–120.
- [18] 高俊丽, 李晶. 大型拉拔直剪仪剪切盒的改装[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2014, 20(6): 802–812.
- GAO Junli, LI Jing. Modification of shear box in a large pullout direct-shear instrument[J]. *Journal of Shanghai University(Natural Science Edition)*, 2014, 20(6): 802–812.
- [19] 蔡剑韬. 土工格栅加筋膨胀土拉拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊 1): 204–208.
- CAI Jiantao. Pull-out test on interface behavior between expansive soils and geogrids[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 204–208.
- [20] 王家全, 周岳富, 唐咸远, 等. 可视大模型加筋土直剪数采仪的研发与应用[J]. *岩土力学*, 2017, 38(5): 1533–1540.
- WANG Jiaquan, ZHOU Yuefu, TANG Xianyuan, et al. Development and application of large size direct shear test apparatus with visual and digital collection functions for reinforced soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1533–1540.
- [21] 易富, 杜常博, 张利阳. 金尾矿与土工格栅界面摩擦特性的试验[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(6): 2217–2221.
- YI Fu, DU Changbo, ZHANG Liyang. Experimental study on the interface friction characteristics between the gold tailings and the geogrid[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6): 2217–2221.
- [22] 孟凡祥, 徐超. 筋土之间直剪试验与拉拔试验的对比分析[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(6): 80–84.
- MENG Fanxiang, XU Chao. Comparison and analyses of direct shear test and pull-out test of the interface between soils and geosynthetics[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009, 36(6): 80–84.
- [23] 交通部公路科学研究院. 公路工程土工合成材料试验规程: JTGE 50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of geosynthetics for highway engineering: JTGE 50—2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [24] 王家全, 周健, 黄柳云, 等. 土工合成材料大型直剪界作用宏观研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 908–915.
- WANG Jiaquan, ZHOU Jian, HUANG Liyun, et al. Macroscopic and mesoscopic studies of interface interaction on geosynthetics by use of large direct shear tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 908–915.
- [25] 张波, 石名磊. 黏土与筋带直剪试验与拉拔试验对比分析[J]. *岩土力学*, 2005, 27(增刊 1): 61–64.
- ZHANG Bo, SHI Minglei. Research on direct shear test and pullout test between clay and geotextile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 27(S1): 61–64.

(责任编辑 周建军)