

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.020

真空影响下铁尾矿-土工织物滤层渗透特性试验研究

吴海民¹,汪万升¹,杨 龙²,张祖刚²,欧张文²

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 南京宝地梅山产城发展有限公司矿业分公司)

摘要: 为提高铁尾矿坝排渗效果,对铁尾矿坝中土工织物滤层进行了不同真空负压作用下的渗透试验,分析了滤层颗粒运移规律和土工织物孔隙结构的变化规律,探析了真空负压对铁尾矿-土工织物滤层渗透特性的影响。结果表明:真空负压可显著提高铁尾矿-土工织物滤层的渗透性能,对于短纤、长丝、滤布 3 种土工织物,渗透稳定时,长丝土工织物滤层的渗透系数最大,滤布土工织物滤层次之,短纤土工织物滤层最小;短纤土工织物滤层渗透系数从真空负压为 70 kPa 开始显著增大,后随着真空负压值增大而增大;长丝和滤布土工织物滤层在真空负压为 70 kPa 时渗透系数最大,相较于无真空作用下的稳定渗透系数分别增大了 94.6 倍和 14.2 倍;真空作用对土工织物滤层渗透特性的改善效果受织物自身纤维的粗细和织物厚度的影响,对于由较粗纤维组成的土工织物或较厚土工织物,真空作用对其滤层渗透特性的改善效果较为明显。

关键词: 铁尾矿;土工织物滤层;常水头渗透试验;真空作用;渗透系数

Experimental study on permeability characteristics of iron tailings-geotextile filter under vacuum conditions

Wu Haimin¹, Wang Wansheng¹, Yang Long², Zhang Zugang², Ou Zhangwen²

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;

2. Mining Branch of Nanjing Baodi Meishan Industrial City Development Co., Ltd.)

Abstract: To improve the drainage performance of iron tailings dams, permeability tests were conducted on geotextile filters in iron tailings dams under different vacuum negative pressures. The particle migration laws within the filter and the variation laws of the pore structure of the geotextiles were analyzed, and the influence of vacuum negative pressure on the permeability characteristics of the iron tailings-geotextile filter was investigated. The results indicate that vacuum negative pressure can significantly improve the permeability of the iron tailings-geotextile filter. Under stable seepage conditions, among the three types of geotextiles, staple fiber, namely filament and filter cloth geotextiles, the permeability coefficient of the filament geotextile filter is the highest, followed by that of the filter cloth geotextile filter, and the staple fiber geotextile filter exhibits the lowest permeability coefficient. The permeability coefficient of the staple fiber geotextile filter increases significantly starting from a vacuum negative pressure of 70 kPa and then increases with the increase of vacuum negative pressure. For the filament and filter cloth geotextile filters, the maximum permeability coefficients are obtained at a vacuum negative pressure of 70 kPa, increasing by 94.6 and 14.2 times, respectively, compared with the stable permeability coefficients without vacuum action. The improvement effect of vacuum action on the permeability characteristics of the geotextile filter is influenced by the fiber thickness and fabric thickness of the geotextiles. For geotextiles composed of coarser fibers or those with greater thickness, the improvement effect of vacuum action on the permeability characteristics of the filter is more pronounced.

Key words: iron tailings; geotextile filter; constant head permeability test; vacuum action; permeability coefficient

尾矿坝作为尾矿工程中重要的组成部分,其安全稳定对整个尾矿工程和周围基础设施及环境极为重要。尾矿坝排渗设施的淤堵是威胁尾矿坝安全的重要因素之一^[1],因为尾矿坝内局部淤堵将造成浸润线抬升,而浸润线是尾矿库安全运行的“生命线”^[2]。一旦浸润线埋深不足,甚至出现渗流溢出,便会严重危及坝体稳定^[3]。此外,水流通过土体时引起的土颗粒迁移易诱发渗流侵蚀^[4],尾矿坝上部尾矿土层的自重效应较为薄弱,浸润线过高可能会诱发坝内渗流侵蚀。因此,如何有效降低尾矿坝内部因淤堵而抬升的浸润线是保障尾矿坝安全稳定的关键问题。

目前,我国尾矿库多采用铺设土工织物作为排渗设施的滤层^[5],而土工织物与尾矿泥浆组成的滤层一旦发生淤堵,将严重影响尾矿坝的排渗效果^[6]。尾矿坝中土工织物滤层的渗透性能作为排渗效果的重要参

考指标,已成为众多学者研究的重点课题。例如:Veylon 等^[7]认为尾矿坝中土工织物渗透系数的降低主要是细颗粒尾矿在排渗管中、土工织物内部及上游表面的沉积所导致;杨春和等^[8]也得出相似的结论,并发现垂直载荷可导致土工织物和尾矿砂渗透性能降低,尾矿砂和土工织物的渗透系数与垂直压力呈负相关关系;基于杨春和等^[8]的研究,李国栋等^[9]对不同水压作用下的尾矿库中土工织物滤层反滤特性进行了试验研究,发现与逐级施加外水压力相比,外水压力直接升高条件下系统的梯度比值更大,流量更小,直接升压会增大土工织物发生淤堵的风险。在对尾矿坝土工织物滤层渗透特性形成系统认识的前提下,如何优化滤层排渗能力,已成为现阶段面临的主要技术难题。崔旋等^[10]在细粒尾矿库土工织物反滤设计的研究中提出,设计中需重点考虑其淤堵影响因子,尽可能延长排渗系统的服役年限,认为薄层大孔径材料应成为今后尾矿库排渗系统首选的反滤材料。然而,对于已建成的尾矿坝,其排渗设施已埋设于坝体内部,直接开挖更换不仅实施难度大,而且可能扰动坝体结构并增加施工成本和安全风险。因此,在不进行大规模开挖的条件下恢复或提升既有排渗系统的效能更具工程意义。针对已建成尾矿坝排渗设施出现淤堵的问题,汪泉等^[11]提出利用气驱排渗的方法进行尾矿排渗降水,该方法通过气驱系统在排渗井内营造负压,进而在周边土体形成真空渗流场,加快孔隙水的渗流速率,且其对细颗粒、高压缩性、低渗透性的尾矿泥浆,具备优异的降水排渗效果。

目前关于真空负压抽滤技术在尾矿坝排渗中的应用相对较少,要将真空抽滤技术更好地应用到已建尾矿坝的排渗工作中,首先应探明真空负压作用下的尾矿-土工织物滤层的渗透特性规律。为此,本文对真空作用下的铁尾矿-土工织物滤层的渗透特性进行了系列试验研究,同时鉴于不同尾矿工程中所采用的土工织物类型不同,对工程中可选的3种不同类型土工织物依次进行试验,以期应用真空抽滤技术进行已建尾矿坝排渗降水提供参考。

1 渗透试验

1.1 试验装置及方法

渗透试验装置如图1所示,装置主要包括上游水箱、下游水箱和渗透室3个部分。渗透室高度为335 mm,内径为150 mm。先针对某种类型铁尾矿-土工织物滤层进行常水头渗透试验,试验过程中记录不同时刻泥浆高度以及渗透水体积,待渗透系数稳定或产生淤堵后,在下游水箱出水口安装真空室和真空泵进行后续的5种不同真空负压下的真空渗透试验。试验结束后对滤层的渗透系数以及试样不同位置处的泥浆颗粒粒径变化规律进行分析。

1.2 试验材料和方案

试验采用的尾矿土取自南京某铁尾矿库现场,其基本物理特征参数如下:干密度为 1.850 g/cm^3 ,比重为 2.712 , pH 为 $6.8\sim 6.9$,特征粒径 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} 分别为 1.377 、 8.173 、 $61.85\text{ }\mu\text{m}$,黏粒含量(质量分数,下同)为 39.37% ,粉粒含量为 53.29% 。为了模拟现场尾矿堆存实际情况,将尾矿土配置成含固率为 30% 的泥浆,铁尾矿泥浆下部垫有用于反滤的土工织物。为了探究不同土工织物渗透特性效果,分别采用3种不同类型的土工织物(图2)进行试验研究,其基本物理特征参数见表1。

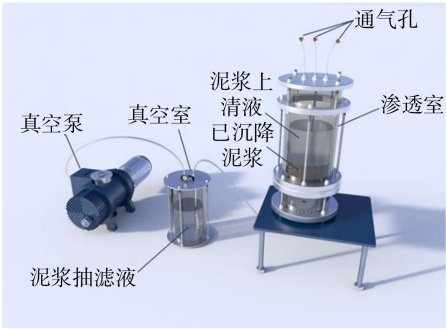


图1 渗透试验装置

Fig.1 Permeability test device



(a) 短纤土工织物 (b) 长丝土工织物 (c) 滤布土工织物

图2 试验采用的土工织物样品

Fig.2 Geotextile samples used in test

表 1 土工织物基本物理特性参数

Table 1 Basic physical property parameters of geotextiles

织物类型	厚度/mm	单位面积质量/(g/m ²)	等效孔径/mm
短纤	1.684	208.9	0.09
长丝	2.031	210.6	0.095
滤布	0.591	126.9	0.2

渗透试验分为常水头渗透试验和真空渗透试验,其中常水头渗透试验的水头高度为 120cm,真空渗透试验设置 40、50、60、70、80 kPa 共 5 级真空负压工况(为避免产生歧义,本文真空负压值均指相对于大气压的负表压绝对值)。

2 试验结果与分析

2.1 铁尾矿-短纤土工织物滤层

由图 3 可知,在常水头作用下,铁尾矿-短纤土工织物滤层的渗透系数在试验前期有微弱增大趋势,并在 3.5 h 时达到最高值 3.67×10^{-6} cm/s,随后逐渐下降,并最终于 7 h 时发生淤堵。随着真空负压的施加,在 40 kPa 真空负压作用下滤层的渗透系数增加到了 10^{-5} 数量级。当真空负压达到 50 kPa 和 60 kPa 时,滤层的渗透系数随试验时间的持续均呈现先减后增再减的变化趋势,并在第 2 次减小至最小值后分别稳定在 1.1×10^{-5} cm/s 和 5.5×10^{-6} cm/s。当真空负压达到 70 kPa 和 80 kPa 时,滤层的渗透系数大幅度增大,并随着试验时间的持续,两种真空负压下该滤层的渗透系数均呈先增再减又增的变化趋势,且在 1.5 h 左右达到稳定,其中 70 kPa 和 80 kPa 真空作用下滤层的渗透系数分别稳定在 7.70×10^{-5} cm/s 和 1.20×10^{-4} cm/s 左右。对于铁尾矿-短纤土工织物滤层,真空负压为 70 kPa 为其渗透系数的转折点,当真空负压小于 70 kPa 时,渗透系数随着真空负压的变化不明显,均处于一个较小范围,而当真空负压大于 70 kPa 后,该滤层渗透系数出现明显提高。

2.2 铁尾矿-长丝土工织物滤层

由图 4 可知,常水头作用下铁尾矿-长丝土工织物滤层的渗透系数随试验时间的持续呈逐渐减小的变化趋势,并最终在 3.5 h 后稳定在 2.03×10^{-4} cm/s 左右。后续在不同真空负压的作用下,滤层的渗透系数均有较为明显的增大。其中,40、50、80 kPa 真空负压作用下该滤层渗透系数在试验前期呈现波动式下降,并最终依次稳定在 3.69×10^{-4} 、 3.59×10^{-4} 、 3.02×10^{-4} cm/s,而 60 kPa 和 70 kPa 真空负压作用下滤层渗透系数在试验前期呈波动式增大的趋势,并最终分别稳定在 4.0×10^{-4} 、 4.86×10^{-4} cm/s。铁尾矿-长丝土工织物滤层的渗透系数在 40~70 kPa 范围内总体呈上升趋势,直到 80 kPa 真空作用时显著降低,发生该现象的原因是当真空负压提高到 80 kPa 时更多细颗粒被带动向下移动,造成土工织物内部原本打开的渗流通道被淤堵,同时部分细颗粒嵌入土工织物的孔隙中,导致渗透系数降低。综上,对于铁尾矿-长丝土工织物滤层,真空负压可有

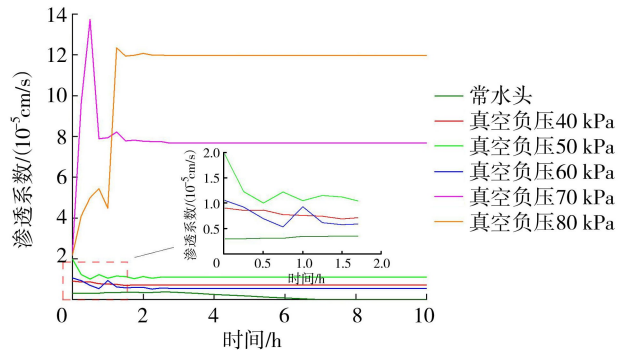


图 3 铁尾矿-短纤土工织物滤层渗透系数随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of permeability coefficient of iron tailings-staple fiber geotextile filter with time

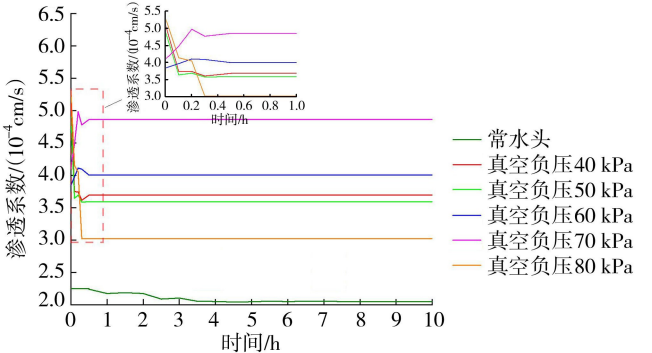


图 4 铁尾矿-长丝土工织物滤层渗透系数随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curves of permeability coefficient of iron tailings-filament geotextile filter with time

效改善其渗透性能,且最优抽滤真空负压约为 70 kPa。

2.3 铁尾矿-滤布土工织物滤层

由图 5 可知,常水头作用下铁尾矿-滤布土工织物滤层的渗透系数在试验过程中一直稳定在 5.14×10^{-6} cm/s 左右。后续在不同真空负压的作用下,滤层的渗透系数均有较为明显的提升。在 40~70 kPa 真空负压作用下,滤层渗透系数随试验时间的持续呈波动式增大并最终分别稳定在 2.74×10^{-5} 、 3.07×10^{-5} 、 4.87×10^{-5} 、 7.48×10^{-5} cm/s 左右。在 80 kPa 真空负压作用下,滤层渗透系数随试验时间的持续呈现波动式减小的变化趋势,并最终稳定在 3.07×10^{-5} cm/s 左右。与真空负压对铁尾矿-短纤土工织物滤层和铁尾矿-长丝土工织物滤层渗透性能的作用效果相似,真空负压对于提升铁尾矿-滤布土工织物滤层的渗透性能同样具有良好的效果,且其最优真空负压也为 70 kPa 左右。

2.4 真空负压对不同土工织物滤层渗透系数的影响

由图 6(图中真空负压为 0 对应常水头)可知,铁尾矿-长丝土工织物滤层在真空负压作用下的渗透系数达到 10^{-4} cm/s 的数量级,远大于短纤和滤布土工织物滤层。铁尾矿-短纤土工织物滤层的渗透系数在较低真空负压下没有明显的变化,当真空负压达到 70 kPa 时渗透系数开始增大,从无真空时的 0 cm/s 增大到 7.67×10^{-5} cm/s 左右。滤布和长丝土工织物滤层渗透系数均先随真空负压的升高而增大,于 70 kPa 真空负压时达到最大值,随后下降,相较于常水头作用下,真空作用下最大渗透系数分别增大了 14.2 倍和 94.6 倍。发生该现象的原因:随着真空负压的增大,细颗粒通过土工织物孔隙流失,使得渗流通道被打开,渗透系数增大;而随着真空负压越来越大,达到 80 kPa 时更大粒径的土颗粒被带动向下迁移,将已打开的渗流通道和部分土工织物孔道堵塞导致渗透系数减小。因此,对于此种铁尾矿泥浆而言,滤布和长丝土工织物的最佳抽滤负压为 70 kPa 左右。而短纤土工织物由于其有效孔径较小,其渗透系数在较高的真空负压下才得以增大。铁尾矿-长丝土工织物滤层总体表现出更大的渗透系数,可能与该试验过程中颗粒运移情况有关。

2.5 铁尾矿-土工织物滤层渗透特性变化机理探讨

土工织物滤层的渗透性能,在很大程度上受反滤过程中的颗粒堵塞作用影响^[12-13],而细颗粒在迁移过程中大量聚集会引起堵塞^[14],因此试验过程中装置内部土颗粒的运移情况是影响铁尾矿-土工织物滤层渗透系数变化的原因之一。为进一步揭示铁尾矿-土工织物滤层在不同真空负压下的渗透系数变化机理,分别在试验结束后的泥柱高度(从上到下)的 0%、25%、50%、75%、100% 截面中心处取铁尾矿土样,并使用 BT 9300 智能激光分析仪器对试验后的尾矿土样品进行颗粒粒径分布测试,结果如图 7 所示。此外,对图 7 中的颗粒级配数据进行分析,得到不同深度测点处黏粒、粉粒和砂粒的含量(图 8)。

由图 8 可知,铁尾矿-短纤土工织物滤层上方的泥柱从上至下其黏粒含量基本一致,但是粉粒含量逐渐减小,而砂粒含量则逐渐增大。铁尾矿-长丝土工织物滤层上方的泥柱从上至下其黏粒和粉粒含量总体上呈现逐渐减小的变化趋势,而砂粒含量呈现出逐渐增大的变化趋势,并且增大程度相较于短纤土工织物滤层渗透试验中表现得更显著。铁尾矿-滤布土工织物滤层上方的泥柱从上至下其黏粒含量逐渐增大,粉粒含量基

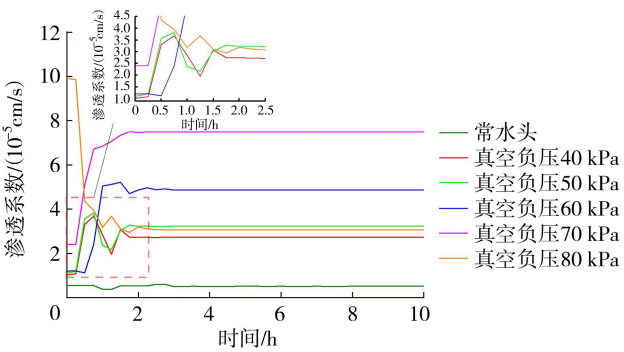


图 5 铁尾矿-滤布土工织物层渗透系数随时间变化曲线
Fig. 5 Variation curves of permeability coefficient of iron tailings-filter cloth geotextile filter with time

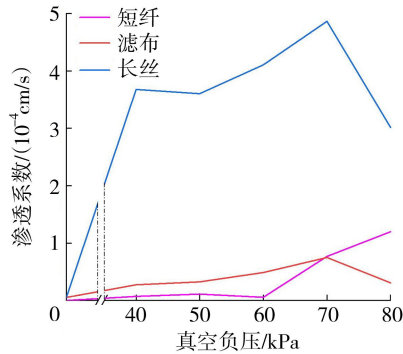


图 6 不同织物滤层稳定渗透系数随真空负压变化关系
Fig. 6 Variation of stable permeability coefficients of different fabric filters with vacuum negative pressure

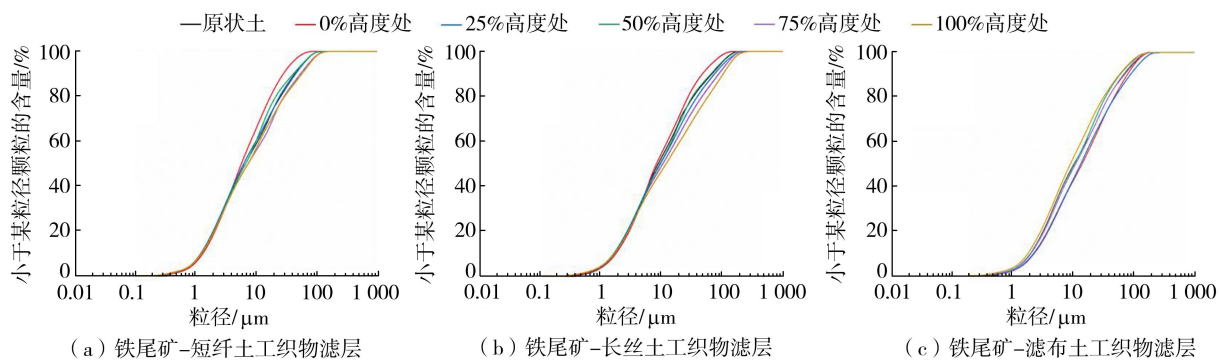


图 7 泥浆柱各测点处颗粒级配分布曲线

Fig. 7 Particle size distribution curves at different measurement points in slurry column

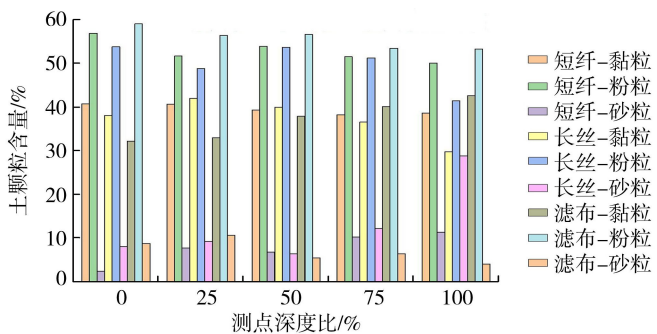


图 8 不同深度测点处黏、粉、砂粒的含量

Fig. 8 Contents of clay, silt, and sand particles at measurement points of different depths

本一致,而砂粒含量表现出逐渐减小的变化趋势。由此可知,铁尾矿-长丝土工织物滤层的渗透系数较大主要是因为其在真空负压作用下仪器底部砂粒含量较大,且黏粒、粉粒、砂粒的含量较为接近,因此土工织物附近黏粒、粉粒和砂粒含量较为接近时不易造成土工织物淤堵,并有助于土工织物层形成良好的反滤结构。

坝内细尾矿砂较多是造成尾矿坝中土工织物滤层渗透性能降低的一个重要原因,其在渗流力的作用下会沉积在土工织物表面,甚至渗透进土工织物内部,进而堵塞土工织物孔径^[7,15]。为进一步分析铁尾矿-土工织物滤层的渗透特性变化的机理,试验结束后对土工织物的淤堵情况进行了微观结构观察分析。利用 Nikon LV150 型显微镜拍摄得到了 3 种土工织物试验前后不同放大倍数下的微观图像,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在真空负压作用下,3 种土工织物均出现了不同程度的土颗粒附着情况。其中,短纤土工织物内部土颗粒附着最严重,在 40 倍放大倍数下大部分区域已被尾矿泥浆堵塞,在 100 倍放大倍数下则几乎没有可见区域。长丝土工织物中附着的土颗粒量最少,且附着程度较为均匀和松散。滤布土工织物中的土颗粒集中附着在滤布本身纤维较为密集的区域,造成这些区域淤堵严重,但其余纤维稀疏区域可见空隙较为清晰。此外由 3 种土工织物的微观结构可知,相较于短纤和长丝,滤布织物的纤维较粗。

在整个真空负压作用过程中长丝土工织物滤层的渗透系数最大,且试验后泥柱测点深度 100% 层处的黏粒和粉粒含量大幅度减少,因此可以认为长丝土工织物滤层的渗透系数较大的原因可能是大量的黏粒、粉粒尾矿透过了织物的孔隙,因此该滤层虽然渗透系数较大,但该滤层的保土性较差。在较低真空负压下短纤土工织物滤层的渗透系数极小,说明较低真空负压无法打开短纤土工织物滤层的渗透通道。而在真空负压达到 70 kPa 后渗透系数骤增,这主要是因为短纤织物的纤维较细,无法承受较高的真空负压,从而破坏了短纤土工织物的局部反滤结构,形成了图 9 中所示的局部通道。滤布织物由于纤维较粗,在随着真空负压逐渐加大的过程中织物与铁尾矿泥浆组成的反滤结构较为稳固,并且滤布的有效孔径较大,不易发生整体淤堵,因此表现出较为稳定的渗透系数。

3 结 论

a. 真空负压可不同程度提高铁尾矿-土工织物滤层的渗透性能,改善效果从大到小依次为长丝、滤布、短纤,因此在尾矿坝真空排渗的工程设计中应优先考虑长丝和滤布土工织物。

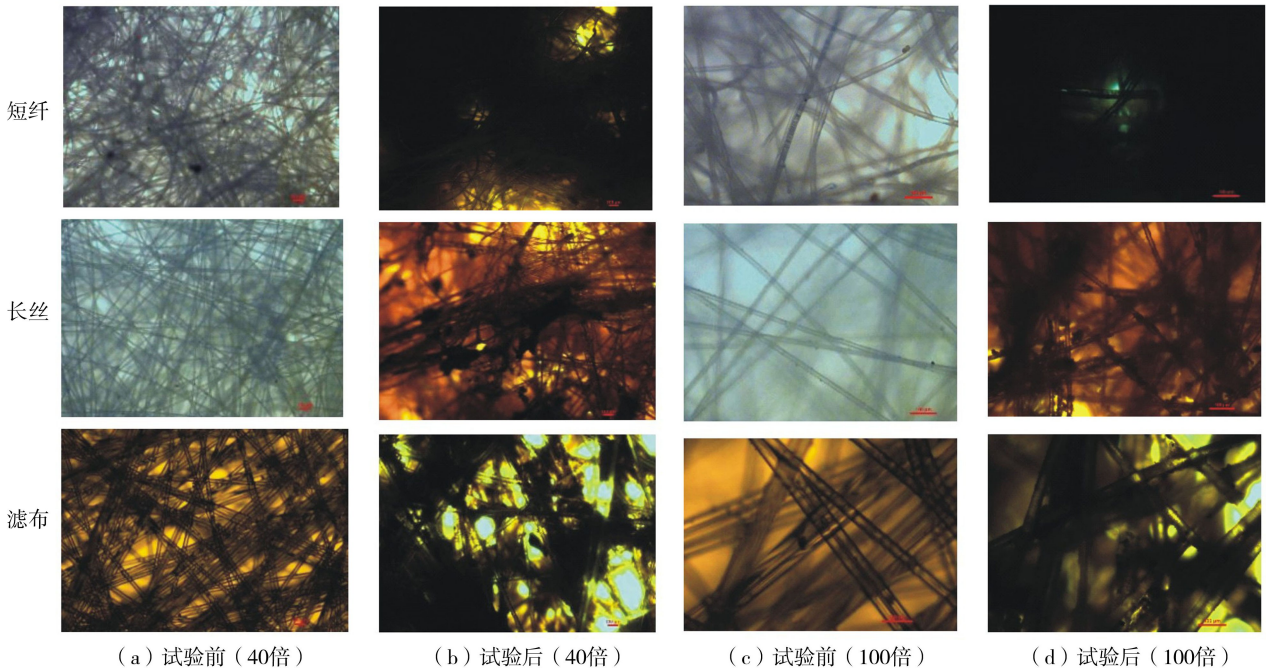


图 9 试验前后 3 种土工织物微观结构对比

Fig. 9 Comparison of microscopic structures of three types of geotextiles before and after test

b. 在 40~80 kPa 的真空负压作用下,随着真空负压值的增大,长丝和滤布土工织物滤层的渗透系数表现出先增再减的变化趋势,在 70 kPa 真空负压作用下渗透系数达到最大值,最大渗透系数相较于无真空作用下分别增大了 94.6 倍和 14.2 倍。而短纤土工织物滤层的渗透系数则先保持平稳后从 70 kPa 开始明显增大,此时短纤土工织物滤层渗透系数相较于无真空作用时增加了 7.67×10^{-5} cm/s。

c. 在本文真空范围内,短纤土工织物滤层所对应的最优真空负压值应是越高越好,而长丝和滤布土工织物滤层的最优真空负压值为 70 kPa 左右。

d. 由于真空作用所产生的压差力会对土工织物自身结构有一定的影响,因此真空负压对铁尾矿-土工织物滤层渗透特性的改善效果受土工织物纤维的粗细以及织物厚度的影响,对由较粗纤维组成的土工织物或较厚土工织物滤层的渗透特性具有很好的改善效果。

e. 本文仅进行了 40~80 kPa 的真空渗透试验,对于真空负压大于 80 kPa 时,铁尾矿-土工织物滤层渗透系数的变化情况以及其渗透系数是否会在真空负压增大到某值后趋于稳定等问题未能在本文中得以解决。因此,在后续的研究中应进一步增大真空负压范围,探究更大真空压力下土工织物滤层渗透规律。

参考文献:

[1] 王凤江. 国外尾矿坝事故调查分析[J]. 金属矿山,2004(增刊 1):49-52. (Wang Fengjiang. Investigation and analysis of tailings dams accidents abroad[J]. Metal Mine,2004(S1):49-52. (in Chinese))

[2] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报,2013,44(5):594-600. (Zhang Liting. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(5):594-600. (in Chinese))

[3] 姜清辉,胡利民,林海. 尾矿库溃坝研究进展[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):77-86. (Jiang Qinghui, Hu Limin, Lin Hai. Advances in research of tailings dam failures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):77-86. (in Chinese))

[4] 梁越,何慧汝,许彬,等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):60-66. (Liang Yue, He Huiru, Xu Bin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(5):60-66. (in Chinese))

[5] 杨春波,王树和,王媛,等. 尾矿库槽孔管外包土工布径向渗流试验模型及其渗透特性分析[J]. 中国矿业,2019,28(11):175-180. (Yang Chunbo, Wang Shuhe, Wang Yuan, et al. Radial seepage test model and analysis of seepage characteristics of geotextile wrapped in slotted tube of tailings reservoir[J]. China Mining Magazine,2019,28(11):175-180. (in Chinese))

[6] 李国栋,王媛,刘胜,等. 尾矿坝中土工织物滤层反滤试验研究[J]. 水电能源科学,2021,39(3):45-49. (Li Guodong, Wang Yuan,Liu Sheng,et al. Experimental study on filtration properties of geotextile filter in tailings dams[J]. Water Resources and Power,2021,39(3):45-49. (in Chinese))

[7] Veylon G,Stoltz G,Mériaux P,et al. Performance of geotextile filters after 18 years’ service in drainage trenches[J]. Geotextiles and Geomembranes,2016,44(4):515-533.

[8] 杨春和,李泽华,冒海军,等. 尾矿坝排渗系统淤堵机理试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019,44(3):845-854. (Yang Chunhe,Li Zehua,Mao Haijun,et al. Experimental study on the clogging mechanism of drainage system in tailings dam [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2019,44(3): 845-854. (in Chinese))

[9] 李国栋,王媛,刘胜,等. 不同水压下尾矿库中土工织物滤层反滤特性试验研究[J]. 水电能源科学,2022,40(11):98-102. (Li Guodong, Wang Yuan, Liu Sheng, et al. Experimental study on reverse filtration characteristics of geotextile filter in tailings pond under different water pressures[J]. Water Resources and Power,2022,40(11):98-102. (in Chinese))

[10] 崔旋,李亚. 细粒尾矿库中土工织物反滤设计初探[J]. 有色金属工程,2021,11(9):107-112. (Cui Xuan,Li Ya. Preliminary study on geotextile filter design in fine tailings reservoir [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11 (9) : 107-112. (in Chinese))

[11] 汪泉,付文堂,邢爱国,等. 赤泥尾矿库气驱排渗降水试验研究[J]. 金属矿山,2021(10):186-191. (Wang Quan, Fu Wentang, Xing Aiguo, et al. Experimental study on dewatering of red mud tailings pond by gas-driven drainage [J]. Metal Mine, 2021(10):186-191. (in Chinese))

[12] 吴纲,雷国辉,姜红. 有纺土工织物覆土条件下的渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(增刊 1):161-165. (Wu Gang,Lei Guohui,Jiang Hong. Experimental study on permeability of woven geotextile covered with soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(S1):161-165. (in Chinese))

[13] 吕从聪,刘名广,卢晓春,等. 不同因素作用下的土-土工织物反滤体系渗透淤堵机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022,53(12):47-55. (Lyu Congcong, Liu Mingguang, Lu Xiaochun, et al. Study on infiltration clogging mechanism of soil-geotextile filtration system under different factors[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(12):47-55. (in Chinese))

[14] 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):82-88. (Chen Liang,Teng Yaozong,Cai Guodong,et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):82-88. (in Chinese))

[15] Watson P D J,John N W M. Geotextile filter design and simulated bridge formation at the soil-geotextile interface[J]. Geotextiles and Geomembranes,1999,17(5/6):265-280.

(收稿日期:2024 - 10 - 27 编辑:刘晓艳)