

土工织物孔径特征数字图像方法研究进展

李柯毅^{1,2}, 唐晓武^{1,2*}, 仇健³, 夏庆云³, 向青青^{1,2}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 孔径特征是土工织物的重要参数, 一方面, 众多交通、水利等工程标准都将土工织物孔径特征作为必须考虑的关键设计参数, 另一方面, 土工织物孔径特征对于土工织物的性能和功能发挥具有直接影响。本文介绍了土工织物传统测试方法的试验原理以及优缺点, 回顾了主要研究进展。随着时代发展, 数字时代呼唤数字技术, 文章重点介绍了若干为提高土工织物孔径特征测试可视化、可重复性发展的数字图像新技术, 包括有纺织物数字图像方法、无纺布物二维图像方法和无纺布物三维图像方法。最后针对土工合成材料领域的若干工程和研究需求, 探讨了土工织物孔径特征测试领域的发展趋势。

关键词: 土工织物; 孔径特征参数; 数字图像法; 土工合成材料; 研究进展

中图分类号: TU531.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0425-09

Research progress on digital image methods for pore size characteristics of geotextile

LI Keyi^{1,2}, TANG Xiaowu^{1,2*}, QIU Jian³, XIA Qingyun³, XIANG Qingqing^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: The pore size characteristics are important parameters of geotextile. On the one hand, many engineering standards in fields such as transportation and water conservancy consider the pore size characteristics of geotextiles as key design parameters that necessitate consideration. On the other hand, the pore size characteristics of geotextile directly influence their performance and functionality. This paper presents an overview of the foundational principles, advantages, and drawbacks of conventional testing methods for geotextile. Additionally, it offers a comprehensive review of the primary research advancements. In the contemporary era, the digital age necessitates the integration of digital technology. The primary focus lies in introducing a range of emerging digital image technologies designed to enhance the visualization and reproducibility of pore size characteristic testing for geotextile. These encompass digital image methods for woven geotextile, two-dimensional and three-dimensional image methods for nonwoven geotextile. Ultimately, while addressing diverse engineering and research requirements in the domain of geosynthetic materials, this paper explores the developmental trends related to pore size characteristic testing for geotextile.

Key words: geotextile; pore size characteristics; digital image methods; geosynthetics; research progress

0 引言

土工织物作为一种重要的建筑材料, 广泛应用

于软土地基处理、防洪减灾、围海造陆等领域。在实际工程中, 织物可以起到过滤、排水、增强和隔离等作用。例如, 大坝中应用织物提供排水路径,

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 浙江省水利科技计划重点项目 (RB2027); 浙江省基础公益研究计划 (LGG22E080002); 同济大学岩土及地下工程实验室开放基金 (KLETJGEB2202); 浙江省文物保护科技项目 (2023006)。

作者简介: 李柯毅 (1998—), 男, 浙江台州人, 博士研究生, 主要从事土工合成材料研究。E-mail: 20lky@zju.edu.cn。

*通信作者: 唐晓武 (1966—), 男, 浙江杭州人, 博士, 教授, 主要从事土工合成材料、软土地基以及土遗址保护等方面的研究。E-mail: tangxiaowu@zju.edu.cn。

同时阻止土颗粒流失；路堤底部铺设织物用于消散孔隙水压力；用于加筋提高土体抗拉强度，从而建造土挡墙。土工织物的孔径特征是其性能评估和应用设计中的重要参数，直接关系到这些功能的实现^[1-2]。因此，准确、可靠地测试土工织物孔径特征对于工程实践和研究具有重要意义。

随着科学技术的不断进步，土工织物孔径特征的测试方法也在不断发展和完善。传统的测试方法主要基于实验室试验和手工测量，存在操作复杂、时间耗费长以及主观误差等问题^[3-4]。近年来，随着数字图像处理技术的快速发展，土工织物图像法在土工织物孔径特征测试中得到广泛应用，为实现快速、准确的孔径特征测量提供了新的途径。

本文全面总结了传统土工织物孔径特征测试的原理、方法及优缺点。围绕数字图像技术，介绍了

若干为提高土工织物孔径特征测试可视化、可重复性发展的数字图像新技术。最后，探讨了土工织物测试方法的发展趋势，旨在为土工织物工程领域的研究人员和工程师提供有关孔径特征测试的最新方法和技术，促进土工织物的设计、应用和质量控制。

1 土工织物孔径特征传统测试方法

目前国内外土工织物孔径特征测试方法各有差异，主要有干筛法、湿筛法、泡点法、数学模型法等，不同的试验原理、试验方法和优缺点如表1所示。

由表1可见，孔径特征传统测试方法各自具有一定的优缺点，但均采用的是间接手段，即无法直接提供织物内部结构、特征的定量表征，从而导致测试结果有限或存在较大误差。

表1 土工织物孔径特征测试方法汇总

Table 1 Summary of test methods for pore size characteristics of geotextile

测试方法	试验原理	试验方法	优缺点
干筛法 ^[5-6]	使用土工织物作为筛布，将已知粒径的标准颗粒材料进行振筛，记录通过织物的颗粒材料重量，并计算过筛率。更换不同粒径的颗粒材料，重复上述步骤，最终绘得土工织物孔径分布曲线，并从曲线中求得有效孔径 O_{95} 值或 O_{90} 值。其中，有效孔径指能有效通过土工织物的近似最大颗粒直径，例如， O_{90} 表示织物中90%的孔径低于该值。	(1)将洗净烘干的颗粒材料用筛析法分为若干组；(2)安装并固定试样于筛网之上，称量50 g较细粒径标准颗粒材料均匀撒布试样表面，振筛10 min；(3)停机后，称量通过试样的颗粒材料质量，计算过筛率；(4)采用下一组较粗粒径标准颗粒材料重复上述步骤，直至取得不少于3组连续分级颗粒的过筛率，且有1组过筛率低于5%；(5)以颗粒材料粒径下限值作为横坐标，对应过筛率作为纵坐标，绘制孔径分布曲线。曲线上过筛率10%所对应的横坐标即为 O_{90} ，过筛率5%所对应的为 O_{95} 。	优点：操作方便、使用设备简单、数据易分析，为国内众多规范和工程应用所采用，是一种较为成熟的土工织物孔径特征测试方式。 缺点：由于静电吸附作用的影响，测试结果的离散性较大。只能测得单一有效孔径（ O_{90} 或 O_{95} ），而无法得到完整的孔径分布曲线 ^[3-4,7-9] 。
湿筛法 ^[10]	使用土工织物作为筛布，在规定振动频率和幅度下，对试样和级配颗粒材料进行喷水，使颗粒材料通过织物。以通过的颗粒材料的特定粒径表示试样的有效孔径。	(1)制备无黏性、连续级配且 $3 \leq C_u \leq 20$ 的颗粒材料；(2)安装并固定试样于筛网之上，将颗粒材料均匀撒于试样之上，保证用量为 $(7.0 \pm 0.1) \text{ kg/m}^2$ ；(3)在对试验均匀喷水状态下启动筛分装置振筛600 s，记录颗粒材料通过量；(4)在半对数坐标纸上，以颗粒材料的累积通过率 and 相应的筛子尺寸分别为纵横坐标绘制颗粒尺寸分布曲线，曲线纵坐标90%所对应的横坐标即为 O_{90} 。	优点：连续级配颗粒材料和水流能够有效模拟实际工况，消除静电干扰以及减少颗粒材料淤堵的可能性，从而保证试验结果的准确性和可重复性。 缺点：操作过程繁杂、工作量大且只能测得单一有效孔径，无法获得完整孔径分布曲线 ^[3-4,7-9] 。

续表

测试方法	试验原理	试验方法	优缺点
泡点法 ^[11]	采用浸润液浸润待测样品, 使用不与浸润液及样品发生反应的气体对孔隙中的液体进行挤压。随着压力增加, 最大通孔内浸润液首先被排空, 随后通孔从大到小依次被排空。基于压力变化与空气流速之间的关系, 根据 Washburn 方程 ($D = 4\gamma \cos\theta / p$) 获得孔径分布数据。式中: D 为孔隙直径; γ 为液体表面张力; θ 为接触角; p 为压差。	(1) 使用浸润液浸润待测样品后, 置入试样放置室; (2) 打开气阀并开始增加压力, 并在该过程中经由程序自动换算得到孔径数据; (3) 最终得到完整的孔径分布曲线。	优点: 操作简单, 测试速度快, 且能够得到准确和可重复的完整孔径分布曲线, 全面准确地反映织物整体的孔径特征, 为美国材料与试验协会 (ASTM) 所采用并编制成规范。 缺点: 测试原理与传统干筛法、湿筛法有所不同, 导致测试结果有所差异, 且浸润液和测试设备会对测试结果产生影响 ^[12] , 有待进一步研究 ^[3,8] 。
数学模型法	有织物: 针对有织物平面二维结构, 建立织物不同拉伸状态下单元孔模型。根据织物基本物理力学参数和拉应变值, 推导特征孔径及开孔面积率随拉应变变化的理论解 ^[13-17] 。 无织物: (1) 将无织物简化为多方向纤维排列的几何模型, 推导能通过的球体颗粒直径公式, 在此基础上发展为无织物等效孔径 O_{95} 理论解, 并扩展至不同平面应力状态 ^[18-21] 。 (2) 将无织物视作纤维纵向 (垂直织物平面方向) 缠绕的纵向多孔模型, 基于泊松多面体理论, 考虑纤维取向, 推导得到孔径分布曲线理论解, 并扩展至不同平面应力状态 ^[20-25] 。	将试验测得的有织物基本物理参数 (条膜宽度、厚度、密度、织物单位面积质量) 代入理论公式, 即可预测任意平面应力状态下织物特征孔径及开孔面积率变化率 ^[13-17] 。 将试验测得的织物单位面积质量、孔隙率、厚度、纤维直径、密度、取向参数等代入理论公式, 即可预测任意平面应力状态下的织物等效孔径 O_{95} 或孔径分布曲线变化率 ^[20-26] 。	优点: 对于深入理解土工织物在实际反滤、加固等应用中的作用机理及预测极限工况下的织物性能有着重要的作用。 缺点: 存在简化假设、忽略复杂因素、纺织品多样性等缺点, 需谨慎考虑这些因素, 并结合实际情况进行评估和解释。

2 数字图像测试方法介绍

土工织物的数字图像测试方法是一种基于现代数字相机或其他高分辨率的图像采集设备获取土工织物的高质量图像, 并通过一系列图像处理和分析步骤, 提取出关键的特征参数, 从而定量评估土工织物相关特性的方法。该方法具有处理速度快、精度高和试样无损伤等优势, 因此被广泛应用于土工织物孔径特征的研究^[3-4,27]。以下分别介绍有织物和无织物数字图像测试方法。

2.1 有织物数字图像方法

针对有织物的平面二维结构, 数字图像方法不仅可以定量测量其孔洞特征参数, 还可以精准测得每个孔洞在受拉过程中的形态及尺寸变化^[27]。AYDILEK 等^[28]首次提出采用图像方法对无应变状态下的编织土工布孔径参数进行测量。通过阈值分割运算将所采集的图像转化为黑白二值图像 (白色为孔洞, 黑色为条膜), 经开运算、闭运算、降噪处理等操作使得图像中孔径与条膜边界划分清晰。最终, 通过统计白色像素获得各个孔洞尺寸, 得到开孔面积率、孔径分布曲线和特征孔径 (如图 1~2 所示)。李

富强等^[29]使用形态学方法,建立了一种基于干筛定义的孔径分布曲线获取方法,通过Matlab软件编制程序,测得有纺织物的孔径分布曲线。后续,众多学者^[17,30-32]将该方法应用于不同拉伸状态下(单向拉伸、双向拉伸、侧限拉伸)的有织物孔径特征测试,并以此分析平面拉伸应变对织物孔径特征的影响。

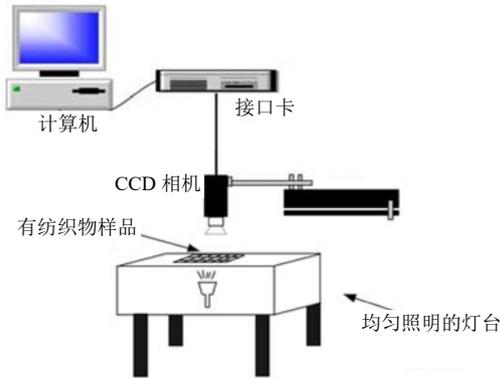
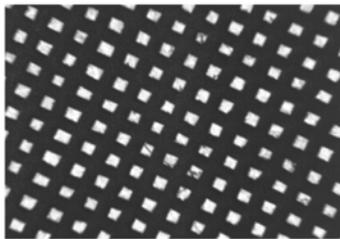
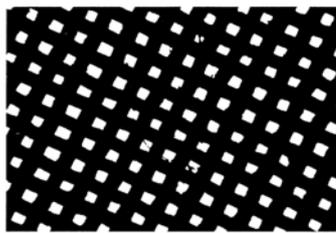


图1 有织物数字图像法设备^[33]

Fig. 1 Equipment of digital image method for woven geotextile^[33]



(a) 原始图像



(b) 阈值分割后图像

图2 有织物图像^[28]

Fig. 2 Image for woven geotextile^[28]

随着对于有织物作用机理的深入认识,对于有织物数字图像法的测量精度及测试参数多样性提出了新的要求。唐晓武等^[34-35]在数字图像法织物成像和特征分析两方面改进传统方法,采用照度衡量光源距离和光源亮度对织物图像的影响,通过与显微镜测试结果对比确定试验最佳光照度,从而减少误差。同时,采用拓扑排序纠正了传统方法中的排序错误,基于像素统计和最小面积外接矩形准确获取各孔洞的面积、长、宽,实现有织物孔洞面积和任意角度孔洞长、宽的大规模精确追踪。

2.2 无织物二维图像方法

无织物是一种由纤维随机排列成的三维网状立体结构。在无织物的孔径特征测试中,常用方法包括二维图像法和三维图像法。

二维图像法是一种使用电荷耦合器件(CCD)相机、显微镜或扫描电子显微镜(SEM)等设备对无织物样品进行成像和图像分析的方法。该方法可以提供有关无织物表面形貌、纤维分布和结构特征等信息。AYDILEK等^[36]对经环氧树脂浸渍、切割、研磨和抛光处理后的无织物分别在平行和垂直织物平面的方向进行切片,经研磨和抛光制成试样,对光学显微镜成像后的图像进行阈值分割、形态学滤波处理等操作,生成无织物孔径分布曲线。KOTHARI和AGARWAL^[37]采用种子生长算法处理经CCD相机采集的无织物平面视图,获得孔径分布曲线和孔隙参数,但是该方法仅适用于较薄织物。CHEN等^[38]采用基于非下采样剪切波变换(NSST)的多焦点图像融合算法,使图像景深展示无织物中的所有纤维,基于融合后的图像,通过Hough变换和图像预处理自动获得纤维直径、取向和织物孔隙率。

由于受无织物纤维表面粗糙、亮度不均等因素影响,织物二维图像存在局部灰度异常现象,从而导致上述方法在图像分割方面面临困难。为解决该问题,近年来,E SILVA等^[39]开发了一个基于支持向量机和数字图像处理技术的程序(GeotexInspector),用于识别织物CCD图像中的纤维和孔隙。此外,采用全自动算法,考虑最大内切圆概念对处理后的图像进行参数提取,获得孔径分布曲线,该结果与理论公式较为接近。LI等^[40]提出一种基于机器学习的图像分析方法(如图3所示),通过SEM对织物进行成像,采用训练后的分类器识别纤维和孔隙,进而获得织物纤维取向分布和孔径特征参数。对于长丝织物,该方法所测得的结果与泡点法结果误差在23.00%~23.62%;对于短纤维织物,误差在54.16%~56.31%。

2.3 无织物三维图像方法

三维图像法是一种使用计算机断层扫描(CT)技术对无织物样品进行立体成像和三维重建的方法。该方法可以提供无织物的内部孔隙孔径和纤维特征及其他内部微观结构特征参数。JESON等^[41]采用CT扫描对针刺无织物的微观结构进行了表征,其中,通过分析CT图像2D(Two-Dimensional)截图获得纤维取向和体积分数,分析3D(Three-Dimensional)图像获得纤维接触效

率, 基于CT分析所得的微观参数, 较好地预测了织物的拉伸强度。MAKSIMCUKA等^[42]在拉伸过程中对聚酯纤维进行了原位CT扫描, 基于三维图像, 获得了纤维变形机理、直径分布和取向分布。XIE等^[43]使用Micro-CT技术研究了无纺布的内部纤维结构, 包括纤维长度、取向和聚集。ESKANDARNIA等^[44]使用CT技术获得了无纺布的真实三维图像, 并定

量测定了样品的孔隙度、纤维直径、面内渗透率、面外渗透率以及纤维取向等形态特征。LI等^[40]采用显微CT实现了无纺布内部孔隙率、孔径分布、孔径特征以及纤维取向的定量表征(如图4所示)。对于长丝和短纤两种织物, 经泡点法实验结果对比, 误差分别在8.26%~15.36%以及5.71%~18.44%, 验证了三维图像法测试孔径特征的准确性。

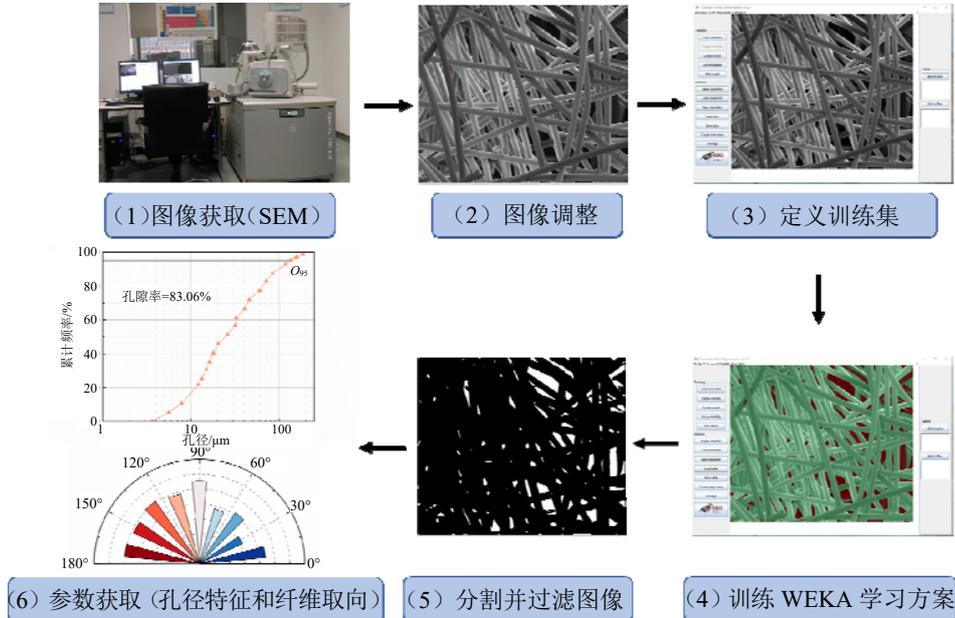


图 3 二维图像法流程示意图^[40]

Fig. 3 Process of 2D digital image method^[40]

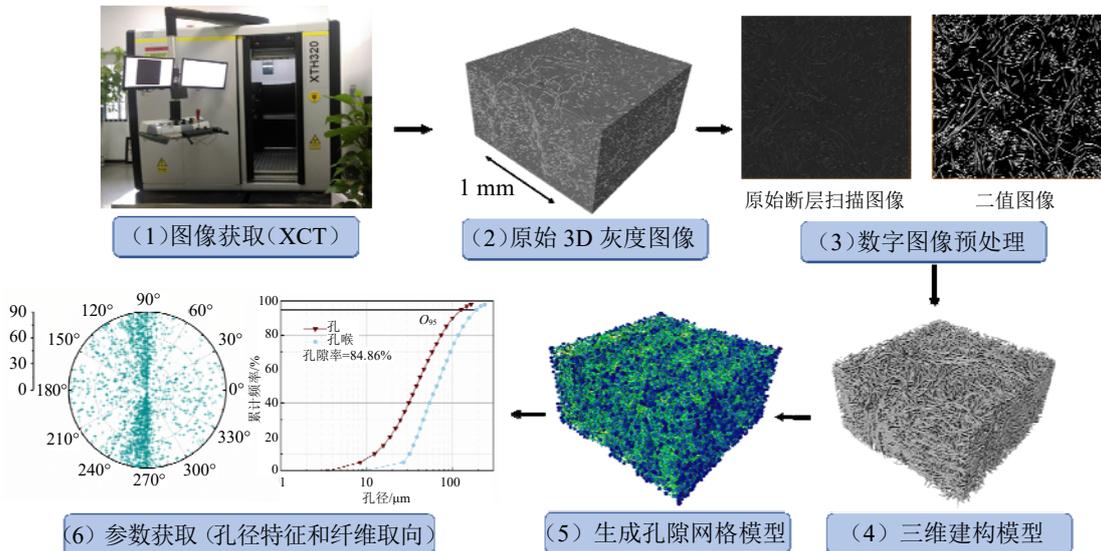


图 4 三维图像法流程示意图^[40]

Fig. 4 Process of 3D digital image method^[40]

3 研究需求和发展趋势

当前土工织物孔径特征测试方法得到了长足的发展, 对织物实际应用中作用机理的研究和工程应用起到了很大的推动作用。鉴于土工织物在国内

外工程建设中的重大需求, 该领域尚存在若干需要解决的重要问题:

- (1) 土工织物孔径特征规范测试方法的改进
作为国内外规范广为采用的3种测试方法, 干筛法、湿筛法以及泡点法如前文已分别论述其优缺点。首先, 干筛法较为适用于有纺织物孔径特征

测试。对于无纺布物, 尽管规范中已考虑静电作用及堵塞影响, 建议进行去静电处理以及一布一筛^[6], 然其测试结果仍不理想。从干筛试验获得的有效孔径结果决定了众多反滤标准^[45-47]。其次, 湿筛法对于2种类型的土工织物均有较好的应用性, 但目前国内仅有部分规范采用。同样, 对于泡点法, 尽管其于2002年被ASTM批准, 但仍未得到广泛使用, 均只应用于科研场景。目前在部分学者的研究中, 对于3种方法测试结果的说法不一。BHATIA等^[48]采用干筛法、湿筛法以及泡点法对22种无纺布物(共188个试样)的等效孔径及孔径分布曲线进行测定, 测值中泡点法大于湿筛法, 湿筛法则大于干筛法。杨艳^[3]采用干筛法、湿筛法以及泡点法对针刺无纺布物进行测试, 结果表明湿筛法测值高于干筛法, 而泡点法所得测值小于干筛法。FATEMA和BHATIA^[12]对51种有纺织物、无纺布物和复合土工织物分别采用干筛法和泡点法测得其等效孔径, 结果表明两者之间具有良好的相关性($R^2=0.78$)。苏树清等^[7]的测试结果表明, 湿筛法与干筛法2种方法得出的试验数据偏差较大。

因此, 需要针对不同的土工织物类别开展相关试验, 探明3种方法的具体适用范围, 探究三者之间更为确切的对应关系, 为孔径特征测试标准的制定及改进提供科学依据。

(2) 土工织物孔径数学模型方法的完善

土工织物数学模型方法已取得一系列进展, 然其还需要进行相应完善。一方面, 理论方法应服务于实际应用, 若将理论方法纳入相关规范和标准中, 则需对当前方法进行相应简化, 并通过对已有试验数据的分析比对、与现有规范方法的对比以及模型验证等手段对其进行评估和验证准确性、可靠性和适用性。另一方面, 在科学研究导向上, 借助先进的材料表征技术, 如SEM、CT等, 可获得更精确的织物内部结构参数, 从而改进或开发数学模型。同样, 织物孔隙结构、纤维间距以及孔隙多尺度分布等因素均亟待科研人员进一步考虑。

(3) 土工织物数字图像测试方法的应用及推广

在有纺织物数字图像法方面, 目前相关设备技术已较为成熟且成本较低、操作便捷。当前有待进一步完善该方法的标准流程, 将其大规模应用于实际工程项目中, 通过与规范中的方法进行对比, 验证其准确性和可行性。以期在与相关行业组织、研究机构和标准化委员会的合作下, 将该方法纳入相关标准和规范中, 促进该方法的推广应用, 并确保其在工程实践中得到普遍认可和采纳。在无纺布物

数字图像法方面, 目前相关研究已分别证明二维图像法和三维图像法的适用性。无纺布物数字图像法能够提供对于织物纤维形态、孔隙结构等结构特征的准确描述和表征, 有助于理解其极限状态、宏观性能及微观结构三者间的关系。并且通过该方法可模拟无纺布物的结构和性能, 为无纺布物的设计和优化提供重要支持。因此, 需要发展无纺布物数字图像分析方法, 促进无纺布物领域的科学研究, 从而指导实际设计、生产及工程应用。

4 结 论

本文简要阐述了土工织物孔径特征传统测试原理、方法及优缺点, 并介绍了土工织物孔径特征数字图像测试方法的具体进展, 主要结论如下:

(1) 数字图像方法适用于具有二维平面结构的有纺织物, 一方面可以定量测量其孔洞特征参数, 另一方面可精确测得并追踪各孔洞在受拉过程中的形态和尺寸变化。

(2) 基于二维成像的无纺布物二维图像法, 通过算法改进能够解决图像灰度异常问题, 实现织物孔径和纤维特征的定量测量; 基于CT三维成像的无纺布物三维图像法, 能够提供可靠的无纺布物内部孔隙孔径和纤维特征参数。

(3) 干筛法、湿筛法及泡点法各有其适用范围及优缺点。需要进一步针对不同的织物开展试验和探索三者之间的对应关系, 为规范的修订提供科学依据。理论模型方法是研究织物孔径特征的有效手段, 一方面可以通过对现有方法的改进和验证, 将其提炼纳入相关规范和标准中; 另一方面可借助先进表征技术改进理论, 考虑多因素影响。

(4) 有纺织物数字图像方法有待进一步完善, 验证其准确性和可行性, 促进该方法的推广应用。无纺布物数字图像方法对于深入理解织物作用机理以及极限状态变化规律具有重要作用, 需要进一步发展该方法, 为无纺布物实际设计、生产及工程应用研究提供科学手段。

参考文献

- [1] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
BAO Chenggang. The Principle and Application of Geosynthetics in Engineering Principle and Application of Geosynthetics in Engineering[M]. Beijing: China

- Water & Power Press, 2008.
- [2] KOERNER R M. Designing with Geosynthetics[M]. 4th Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [3] 杨艳. 土工织物等效孔径测定方法的分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- YANG Yan. Analysis of methods to test the equivalent opening size of geotextiles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [4] 庄艳峰, 王钊. 土工织物的孔径测试方法[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(3): 33-36.
- ZHUANG Yanfeng, WANG Zhao. Measuring methods of opening size of geotextile[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(3): 33-36.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土工布及其有关产品有效孔径的测定 干筛法: GB/T 14799—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geotextiles and Geotextile-Related Products—Determination of the Effective Opening Size—Dry Sieving Method: GB/T 14799—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [6] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL 235—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for Test and Measurement of Geosynthetics: SL 235—2012[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.
- [7] 苏树清, 吴伟俊. 土工织物有效孔径测定方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 156-159.
- SU Shuqing, WU Weijun. Determination methods for effective opening size of geotextiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 156-159.
- [8] 方远远. 土工织物孔径测试方法研究[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(4): 50-53.
- FANG Yuanyuan. Study on the methods for testing the pore size of geotextiles[J]. Technical Textiles, 2019, 37(4): 50-53.
- [9] 丁志勇, 王凌云. 土工织物孔径试验方法研究[J]. 公路与汽运, 2003(4): 47-49.
- DING Zhiyong, WANG Lingyun. Study on aperture test method of geotextile[J]. Highways & Automotive Applications, 2003(4): 47-49.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 土工布及其有关产品有效孔径的测定 湿筛法: GB/T 17634—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geotextiles and Geotextile-Related Products—Determination of the Characteristic Opening Size—Wet Sieving Method: GB/T 17634—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [11] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test: D6767—12[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [12] FATEMA N, BHATIA S K. Comparisons between geotextile pore sizes obtained from capillary flow and dry sieving tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2020, 43(4): 853-876.
- [13] TANG X W, TANG L, SHE W, et al. Prediction of pore size characteristics of woven slit-film geotextiles subjected to tensile strains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 38: 43-50.
- [14] 唐琳, 唐晓武, 王艳, 等. 不等轴双向拉应变下有纺织物孔径变化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1535-1540.
- TANG Lin, TANG Xiaowu, WANG Yan, et al. Experimental study on pore size characteristics of woven geotextiles subjected to unequal biaxial tensile strains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1535-1540.
- [15] 唐琳, 唐晓武, 曲绍兴. 双向拉应变对有纺织物孔径参数影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 134-140.
- TANG Lin, TANG Xiaowu, QU Shaoxing. Influence of biaxial tensile strains on pore size parameters of woven geotextiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 134-140.
- [16] TANG L, TANG X W, LIU Y, et al. Prediction of pore size characteristics of woven slit-film geotextiles subjected to unequal biaxial tensile strains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(5): 724-734.
- [17] 郭文琪. 侧限单向拉应变对土工织物孔径特征影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- GUO Wenqi. Pore size characteristics of geotextiles subjected to lateral limited uniaxial tensile strains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

- [18] LEFLAIVE E, PUIG J. L'emploi de textiles dans les travaux de terrassement et le drainage[R]. Bull Liaison Lab Ponts Chaussees, 1974: 69, 61-79.
- [19] GIROUD J P. Granular Filters and Geotextile Filters[M]. Montreal: Bitech Publications, 1996.
- [20] 唐琳, 唐晓武, 余巍, 等. 单向拉伸对土工织物反滤性能影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 785-788.
- TANG Lin, TANG Xiaowu, SHE Wei, et al. Influence of uniaxial tensile strain on filtration characteristics of geotextiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 785-788.
- [21] 唐琳, 唐晓武, 孙凯. 不等轴双向拉伸无纺布孔径变化理论研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3597-3603.
- TANG Lin, TANG Xiaowu, SUN Kai. Analytical solutions for pore size of nonwoven geotextiles under unequal biaxial tensile strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3597-3603.
- [22] RAWAL A. Structural analysis of pore size distribution of nonwovens[J]. Journal of the Textile Institute, 2010, 101(4): 350-359.
- [23] RAWAL A, AGRAHARI S K. Pore size characteristics of nonwoven structures under uniaxial tensile loading[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(13): 4487-4493.
- [24] LOMBARD G, ROLLIN A, WOLFF C. Theoretical and experimental opening sizes of heat-bonded geotextiles[J]. Textile Research Journal, 1989, 59(4): 208-217.
- [25] FAURE Y H, GOURC J P, GENDRIN P. Structural study of porometry and filtration opening size of geotextiles[M]//PEGGS I D. Geosynthetics: Microstructure and Performance. Philadelphia PA, USA: ASTM International, 1990: 102-119.
- [26] 赵文芳, 唐晓武, 郭文琪, 等. 侧限拉伸对无纺土工布孔径概率分布的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(8): 120-126.
- ZHAO Wenfang, TANG Xiaowu, GUO Wenqi, et al. Variation in pore size probability distribution of nonwoven geotextiles under laterally constrained uniaxial tension[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(8): 120-126.
- [27] 唐琳. 拉应变对土工织物孔径特征及反滤性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- TANG Lin. Pore size characteristics and filtration properties of geotextiles subjected to tensile strains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [28] AYDILEK A H, EDIL T B. Evaluation of woven geotextile pore structure parameters using image analysis[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(1): 1-12.
- [29] 李富强, 王钊, 陈轮, 等. 用数字图像技术测定反滤材料孔径分布曲线[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 857-860.
- LI Fuqiang, WANG Zhao, CHEN Lun, et al. Digital image analysis to determine pore size distribution of filtration materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 857-860.
- [30] 余巍, 唐晓武. 用图像分析法研究有纺土工织物单向受拉时孔径的变化[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1522-1526.
- SHE Wei, TANG Xiaowu. Change of pore size of woven geotextiles affected by uniaxial tension using image analysis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1522-1526.
- [31] 白彬. 双轴拉应变对土工织物孔径特征及反滤性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- BAI Bin. Pore size characteristics and filtration properties of geotextiles subjected to biaxial tensile strains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [32] TANG L, TANG X W, LIU Y, et al. Prediction of pore size characteristics of woven slit-film geotextiles subjected to unequal biaxial tensile strains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(5): 724-734.
- [33] SUITS L D, SHEAHAN T C, AYDILEK A H, et al. Comparative evaluation of geotextile pore sizes using bubble point test and image analysis[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(3): 100663.
- [34] 唐晓武, 李柯毅, 赵文芳, 等. 不同光照度下有织物孔径变化试验研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(5): 94-99.
- TANG Xiaowu, LI Keyi, ZHAO Wenfang, et al. Experimental study on pore size characteristics of woven geotextiles under different illuminance[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(5): 94-99.
- [35] 唐晓武, 李柯毅, 赵文芳, 等. 基于拓扑排序的编织土工布孔洞特征分析方法[J]. 纺织学报, 2023, 44(4): 92-99.
- TANG Xiaowu, LI Keyi, ZHAO Wenfang, et al. Analysis

- on pore characteristics of braided geotextiles based on topological sorting method[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(4): 92-99.
- [36] AYDILEK A H, OGUZ S H, EDIL T B. Digital image analysis to determine pore opening size distribution of nonwoven geotextiles[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, 16(4): 280-290.
- [37] KOTHARI V K, AGARWAL G. Determination of pore size parameters and its distribution of hydroentangled fabrics by image processing[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2008, 99(4): 317-324.
- [38] CHEN Y, DENG N, XIN B J, et al. Nonwovens structure measurement based on NSST multi-focus image fusion[J]. *Micron*, 2019, 123: 102684.
- [39] E SILVA R A, NEGRI R G, DE MATTOS VIDAL D. A new image-based technique for measuring pore size distribution of nonwoven geotextiles[J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(3): 261-272.
- [40] LI K Y, TANG X W, ZHAO W F, et al. Microstructure characteristics of nonwoven geotextiles using SEM and CT methods[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(2): 293-302.
- [41] JESON S Y, YU W R, KIM M S, et al. Predicting the tensile strength of needle-punched nonwoven mats using X-ray computed tomography and a statistical model[J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(6): 1202-1210.
- [42] MAKSIMCUKA J, OBATA A, SAMPSON W W, et al. X-ray tomographic imaging of tensile deformation modes of electrospun biodegradable polyester fibers[J]. *Frontiers in Materials*, 2017, 4: Article 43.
- [43] XIE J B, FANG J, CHEN L, et al. Micro-scale modeling of 3D needled nonwoven fiber preforms[J]. *Composite Structures*, 2022, 281: 114995.
- [44] ESKANDARNIA G, SOLTANI P. Effect of fabric structure on in-plane and through-plane hydraulic properties of nonwoven geotextiles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(4): 1-14.
- [45] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土工合成材料应用技术规范: GB/T 50290—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Application of Geosynthetics: GB/T 50290—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [46] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程土工合成材料应用技术规范: JTS/T 148—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Code for Application of Geosynthetics for Port and Waterway Engineering: JTS/T 148—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [47] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工合成材料应用技术规范: JTG/T D32—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specifications for Application of Geosynthetics in Highway: JTG/T D32—2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [48] BHATIA S K, SMITH J L, CHRISTOPHER B R. Geotextile characterization and pore-size distribution: Part III. Comparison of methods and application to design[J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(3): 301-328.