

DOI: 10.11779/CJGE2016S1025

# 双向拉应变对有纺织物孔径参数影响的研究

唐 琳<sup>1</sup>, 唐晓武<sup>2</sup>, 曲绍兴<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209; 2. 浙江大学建筑工程学院滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江大学工程力学系, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 有纺织土工织物反滤应用常处于双向受拉状态。孔径特征是有纺织物反滤设计的重要参数。由于双向拉应变引起孔径的变化显著, 导致原本满足孔径指标的有纺织物时常反滤失效。根据有纺织物的微观结构及受力特点, 分析双向拉应变导致条膜及孔径变化的机理, 建立有纺织物单孔结构模型, 推导孔径特征参数随双向拉应变变化的理论解, 包括开孔面积率 (POA, percent open area) 及理论孔径 ( $O^{bi}$ ) 等。以等轴双向拉伸为例验证理论解。采用数字图像法在拉伸试验进行的同时, 测试各级拉应变下 3 种单丝条膜有纺织物的孔径参数, 包括开孔面积率、孔径分布曲线、等效孔径 ( $O_{95}$ ), 分析各项孔径参数随拉双向应变的变化规律, 并与理论解的预测结果进行对比。通过试验结果可见, 理论解较好地预测了开孔面积率 (POA) 及等效孔径 ( $O_{95}$ ) 随双向拉应变的增大趋势, 对变化斜率及数值的预测较准确, 并得出孔径参数与等轴双向拉应变的近似线性关系, 为反滤设计中预测孔径特征变化提供了理论依据。

**关键词:** 有纺织物; 孔径特征; 双向拉应变; 理论解; 数字图像法

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0134-07

**作者简介:** 唐琳(1986-), 女, 讲师, 主要从事土工合成材料和边坡工程等方面的教学和科研工作。E-mail: tanya\_tang3@163.com。

## Influence of biaxial tensile strains on pore size parameters of woven geotextiles

TANG Lin<sup>1</sup>, TANG Xiao-wu<sup>2</sup>, QU Shao-xing<sup>3</sup>

(1. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering,

College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Department of Engineering Mechanics,

Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The filtration applications of woven geotextiles are typically subjected to biaxial tensile strains. The pore size characteristics are important parameters in filtration design. Biaxial tensile strains can cause variations of pore size characteristics, which results in the failure of filtration. Depending on the microstructure of woven geotextiles, the variations of slit-films and pore sizes are analyzed. The mathematical model for strained microstructure of geotextiles is established. The analytical solutions of several pore size parameters corresponding to biaxial strains are proposed, including percent open area and analytical equivalent opening size. The equal biaxial tensile tests are carried out to verify the analytical solutions. The pore size parameters of three slit-film woven geotextiles subjected to different levels of strains are measured and analyzed through digital image analysis, including percent open area, pore size distributions and  $O_{95}$ . The experimental results are compared with the analytical predictions. The analytical results correlate well with the experimental values and the rates of variations, and the pore size parameters change approximately linearly with the equal biaxial tensile strains.

**Key words:** woven geotextile; pore size characteristic; biaxial tensile strain; analytical solution; digital image analysis

## 0 引 言

有纺织土工织物作为一种新兴反滤材料, 具有允许水流通过, 阻挡土粒迁移, 消减冲蚀动力等作用<sup>[1]</sup>。目前, 有纺织物在海洋、水利、土木工程中应用广泛。例如, 围海造陆中, 使用有纺织物管袋构筑围堰<sup>[2]</sup>; 污染物治理中, 常用有纺织物包裹污染泥浆<sup>[3]</sup>, 净化渗出水; 岸坡防护工程中, 以有纺织物制成“软体沉排”

覆盖坡面, 或构筑防洪防浪堤<sup>[4]</sup>。国内外大型工程建设中, 有纺织物的应用屡见不鲜。例如, 韩国仁川大

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目 (ZR2015PE006); 哈尔滨工业大学(威海) 校科学研究基金项目 (HIT (WH) 201423); 山东省蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心项目; 哈尔滨工业大学科研创新基金项目 (HIT.NSRIF.2017018)

**收稿日期:** 2015-11-30

桥在有纺织物构筑的施工平台上建成<sup>[4]</sup>; 中国天津海岸生态城使用有纺织物处理污染淤泥, 构筑人工岛<sup>[3]</sup>; 长江口整治工程中, 有纺织物“软体沉排”有效保护了堤岸工程及受冲刷区域的建筑物稳定<sup>[1]</sup>。

实际工程中, 有纺织物往往处于双向拉应变状态。例如, 纽约港污染淤泥处理中, 测得土工管袋顶部织物的纵向应变为 4%, 横向应变为 1.5%, 底部织物最大双向应变 5%<sup>[3]</sup>。双向拉应变会引起有纺织物孔径变化, 进而导致反滤失效。目前反滤设计准则及产品规格均以未受拉孔径为标准, 导致原本满足孔径要求的有纺织物反滤失效, 引起防护体掏空、岸坡塌陷、决堤、污染物扩散等事故<sup>[1]</sup>。因此需从孔径受拉变化这一微观角度入手, 解决有纺织物受拉反滤失效的问题。

由于双向拉伸试验条件较单向拉伸复杂, 目前双向拉伸条件下, 有纺织物的孔径特征研究较少, 试验成果存在矛盾。Fourie 等<sup>[5]</sup>采用动力水筛法测得: 双向应力 1:1 受拉使较薄条膜有纺织物等效孔径  $O_{95}$  增大, 较厚织物的  $O_{95}$  减小。Edwards<sup>[6]</sup>采用简易渗透仪测得双向应力 1:4 受拉使通过条膜有纺织物的水流流速增大。Zhang 等<sup>[7]</sup>采用双向拉伸机, 一个方向夹持不动, 另一个方向进行拉伸, 测得经向受拉使流速显著减小, 纬向受拉使流速持续增大。刘伟超<sup>[8]</sup>开展室内有纺织物管袋模型充填试验, 土工管袋所受张力、底部压力和排水速率随充填的进行而增加, 但未建立张力与排水速率或孔径的对应关系。

理论研究方面, Dierickx<sup>[9]</sup>提出无应变状态下, 有纺织物单个孔洞等效孔径计算方法。Tang 等<sup>[10]</sup>、唐琳<sup>[11]</sup>提出单向应变状态下, 有纺织物孔洞单元数学模型。目前缺乏有纺织物孔径特征与双向拉应变关系的理论公式。

本文根据有纺织物微观结构及受力特点, 推导双向应变下有纺织物孔径参数变化的理论解, 以等轴双向拉伸试验为例, 采用图像法测试了 3 种不同规格的条膜有纺织物在双向拉应变下的孔径变化, 并与理论公式预测结果进行对比, 总结各项孔径参数随双向应变的变化规律。

## 1 数学模型及理论解

### 1.1 单孔模型

尽管工程中, 有纺织物受力是三维问题, 但作为长宽尺寸远大于厚度的卷材, 其水平渗透系数非常小, 工程中主要利用其垂直渗透性能完成反滤作用, 织物的平面应变是影响其反滤性能的决定因素。因此本文将有纺织物受力简化成平面应力问题, 将孔洞结构简化为二维结构, 也为今后建立详尽的三维受力结构模

型奠定基础。

选取工程常用的单丝条膜有纺织物为代表进行建模。有纺织物是由经、纬向条膜编织成的平面结构, 经、纬向条膜基本垂直, 孔洞即条膜间的空隙。因此取两根相邻经向条膜和两根相邻纬向条膜围成一个孔单元, 通过孔单元受拉变化反映整个织物的变化, 称之为单孔模型, 如图 1。

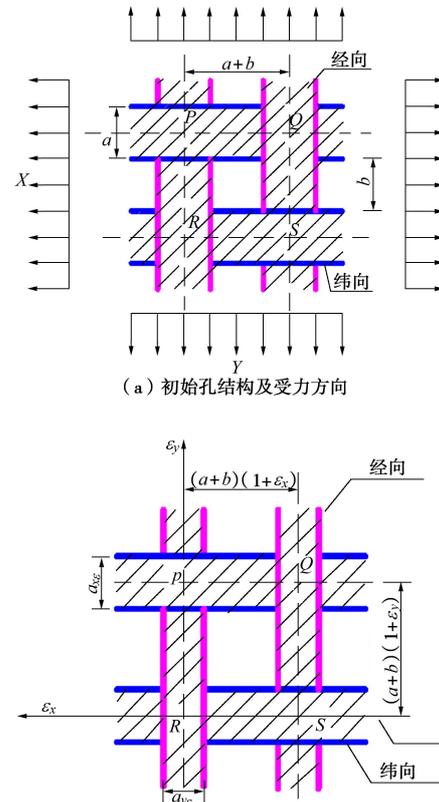


图 1 有纺织物双向拉伸单孔模型

Fig. 1 Model of biaxial strained pore of woven geotextiles

假设经、纬向条膜垂直, 未受拉的初始孔为正方形, 设等效正方形孔边长为  $b$  (m), 如图 1 (a)。条膜宽度为  $a$  (m), 条膜厚度为  $t$  (m), 条膜密度为  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 织物单位面积质量为  $\mu$  ( $\text{g}/\text{m}^2$ )。经、纬向条膜接触点为  $P, Q, R, S$ , 取  $PQRS$  为代表单元, 则织物单位面积质量  $\mu$  可由其他基本物理参数表示:

$$\mu = \frac{2a(a+b)t\rho}{(a+b)^2} \quad (1)$$

由于  $b$  是一个等效的理论参数, 无法直接测得, 因此推导过程中将  $b$  用其他直接可测的物理参数  $a, t, \rho, \mu$  表达, 将式 (1) 变化为

$$b = \frac{2at\rho}{\mu} - a \quad (2)$$

Giroud<sup>[12]</sup>提出通过施加相互垂直、适当大小的两个力, 可以模拟土工织物各种平面受拉状态。将条膜受拉视为平面应力问题, 设双向受力方向为经、纬向

条膜轴线方向，如图 1 (a)。假设纬向为  $x$  方向，经向为  $y$  方向，则纬向应变为  $\varepsilon_x$ ，经向应变为  $\varepsilon_y$ ，如图 1 (b)。在双向受拉过程中，不考虑条膜在平面内的旋转，即经、纬向条膜始终垂直，且接触点不变，始终为  $PQRS$ ，则双向拉应变  $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_y$  下有纺织物单孔模型如图 1 (b)。

由于经、纬向条膜间无黏结，当织物双向受拉时，每根经、纬向条膜各自沿受力方向产生单向拉应变。因此织物双向受拉状态下，孔径变化由经、纬向条膜的轴向及侧向变形造成。当有纺织物纬向应变  $\varepsilon_x$ 、经向应变  $\varepsilon_y$  时，条膜中轴线间距变为  $(a+b)(1+\varepsilon_x)$  和  $(a+b)(1+\varepsilon_y)$ ，经、纬向条膜宽度及厚度方向的应变分别为

$$\varepsilon_{x1} = \varepsilon_{x2} = -v\varepsilon_x \quad (3)$$

$$\varepsilon_{y1} = \varepsilon_{y2} = -v\varepsilon_y \quad (4)$$

式中， $v$  为条膜泊松比。则不等轴双向应变  $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_y$  状态下，经、纬向条膜的宽度变为  $a_{y\varepsilon}$ ， $a_{x\varepsilon}$ ，厚度变为  $t_{y\varepsilon}$ ， $t_{x\varepsilon}$ ，分别表示为

$$a_{y\varepsilon} = a(1 - v\varepsilon_y) \quad (5)$$

$$a_{x\varepsilon} = a(1 - v\varepsilon_x) \quad (6)$$

$$t_{y\varepsilon} = t(1 - v\varepsilon_y) \quad (7)$$

$$t_{x\varepsilon} = t(1 - v\varepsilon_x) \quad (8)$$

1.2 开孔面积率 (POA) 理论解

开孔面积率 (POA, percent open area) 是单丝有纺织物的特有参数，其值为织物开孔面积与总面积的比值。开孔面积率是反映有纺织物渗透性能的重要参数，开孔面积率越大，织物渗透性能越好<sup>[1]</sup>。在未受拉的有纺织物单元中，开孔面积用  $A_0$  表示，织物单元总面积  $PQRS$  用  $A_s$  表示。双向应变  $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_y$  状态下，开孔面积  $A_0^{bi}$ ，织物总面积  $A_s^{bi}$ ，则未受拉伸状态下的开孔面积率  $POA_0$ ，双向拉应变下的开孔面积率  $POA_\varepsilon^{bi}$  表达式分别为

$$A_0^{bi} = [(b+a)(1+\varepsilon_x) - a(1-v\varepsilon_y)] \times [(b+a)(1+\varepsilon_y) - a(1-v\varepsilon_x)] \quad (9)$$

$$A_s^{bi} = (b+a)^2(1+\varepsilon_x)(1+\varepsilon_y) \quad (10)$$

$$POA_0 = \frac{A_0}{A_s} = \left(\frac{b}{a+b}\right)^2 = \left(\frac{2t\rho - \mu}{2t\rho}\right)^2 \quad (11)$$

$$POA_\varepsilon^{bi} = \frac{[(b+a)(1+\varepsilon_x) - a(1-v\varepsilon_y)][(b+a)(1+\varepsilon_y) - a(1-v\varepsilon_x)]}{(b+a)^2(1+\varepsilon_x)(1+\varepsilon_y)} \quad (12)$$

将式 (9) ~ (12) 中初始理论正方形孔径  $b$  用式 (2) 替代。当假设有纺织物条膜是不可压缩材料时，Giroud<sup>[13]</sup> 提出土工合成材料泊松比随拉应变的变化公式如下：

$$v = \frac{1}{\varepsilon} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}}\right) \quad (13)$$

将式 (2)、(13) 代入式 (12)，得出

$$POA_\varepsilon^{bi} = \left[1 - \frac{\mu}{2t\rho(1+\varepsilon_x)^{\frac{3}{2}}}\right] \left[1 - \frac{\mu}{2t\rho(1+\varepsilon_y)^{\frac{3}{2}}}\right] \quad (14)$$

则式 (14) 即双向应变  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  下，开孔面积率  $POA_\varepsilon^{bi}$  的理论公式。式中计算开孔面积率所需的参数均具有实际物理意义，且容易测量。

等轴双向拉伸是双向拉伸的特例，即  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$ 。则等轴双向应变  $\varepsilon$  下的开孔面积率  $POA_\varepsilon^{bi}$  可简化为应变  $\varepsilon$  的函数：

$$POA_\varepsilon^{bi} = \frac{A_0^\varepsilon}{A_s^\varepsilon} = \left[1 - \frac{\mu}{2t\rho(1+\varepsilon)^{\frac{3}{2}}}\right]^2 \quad (15)$$

1.3 孔径理论解

由于实际孔径形状复杂多变，需采用一个值代表不规则孔洞的孔径值。Dierickx<sup>[9]</sup> 提出通过孔洞面积来计算等效孔径，即取与实际孔径有相同面积的正方形边长  $\sqrt{A}$  为孔径值，如图 2。当孔为正方形，正方形的边长  $\sqrt{A}$  等于其内切圆直径，即刚好允许直径为  $\sqrt{A}$  的球形颗粒通过孔。当孔非正方形时，考虑到相同面积的各种图形，圆形周长最短，面积为  $A$  的非圆形孔径周长一定大于直径为  $\sqrt{A}$  的圆形周长，在实际工程压力及水动力等外力作用下，认为球形颗粒可以通过孔。

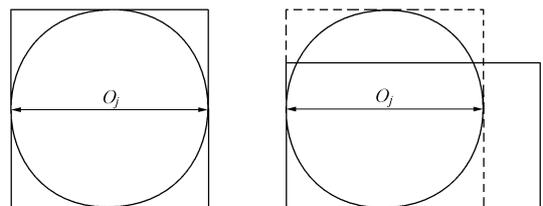


图 2 等效孔径算法<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Calculation of equivalent pore size<sup>[9]</sup>

采用此种方法推导不等轴双向应变  $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_y$  下的等效孔径公式。则未受拉时理论等效孔径为  $O_0$ ，在有纺织物模型中与  $b$  值相等，即

$$O_0 = \sqrt{A_0} = b = \frac{2at\rho}{\mu} - a \quad (16)$$

当不等轴双向应变  $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_y$  下，理论孔径  $O^{bi}$  可表示成双向拉应变的函数：

$$O^{bi} = \sqrt{A_0^{bi}} = a \sqrt{\left[ \frac{2t\rho}{\mu}(1+\varepsilon_x) - \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon_y}} \right] \left[ \frac{2t\rho}{\mu}(1+\varepsilon_y) - \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon_x}} \right]} \quad (17)$$

将试验测得的有纺织物基本物理参数代入式

(17), 即可预测任意不等轴双向应变  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  下, 条膜有纺织物理论孔径  $O^{bi}$  随双向应变的变化规律。理论孔径  $O^{bi}$  是反映有纺织物孔径随双向应变变化的理论参数, 其数值可作为实际孔径变化范围的参考, 其函数曲线可用于预测工程中的孔径变化规律。但  $O^{bi}$  并不直接与有纺织物的某一特征孔径 (例如,  $O_{95}, O_{50}$  或  $O_{30}$ ) 相对应。

在等轴双向拉应变  $\varepsilon$  下, 孔径  $O^{bi}$  理论解可简化为

$$O^{bi} = \sqrt{A_o^{bi}} = \frac{2at\rho}{\mu}(1+\varepsilon) - \frac{a}{\sqrt{1+\varepsilon}} \quad (18)$$

## 2 图像法测试

### 2.1 图像采集

为验证双向拉应变下的孔径参数理论解, 采用图像法测试了 3 种聚丙烯条膜有纺织物双向受拉的孔径变化。等轴双向拉伸是双向拉伸的一种特例, 也是最基本的双向拉伸状态。以等轴双向拉伸试验为例, 测试各级双向拉应变下的有纺织物孔径参数。3 种有纺织物的单位面积质量分别近似为 120, 150, 250  $g/m^2$ , 将 3 种材料分别命名为  $W_{120}, W_{150}, W_{250}$ 。

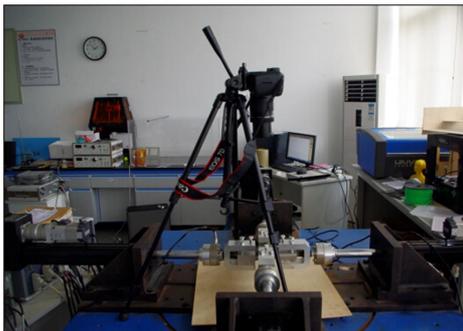


图 3 双向拉伸仪

Fig. 3 Biaxial tensile tester

试验所用双向拉伸仪如图 3 所示。最大拉力为 2000 N, 精度为 5 N, 将双向拉伸速度均设为 10 mm/min, 双向同时对织物进行拉伸。选取等轴双向应变 0%, 3%, 6%, 9%, 12%、15%进行研究, 当织物拉伸至指定应变时, 采用架设在拉伸仪上方的数码相机进行图像采集, 实现了拉伸同步采集图像, 避免试样回弹。

张思云等<sup>[14]</sup>针对不同形状的土工膜及无纺布试样, 进行双向拉应变下试样受拉特征研究, 得出采用十字型试样双向拉伸, 十字交叉处采用圆角过度, 能最好地消除应力集中作用效果最好, 使试样中部处于较均匀的双向受拉状态。邓国红等<sup>[15]</sup>运用 ANSYS 对十字形双向拉伸试验进行有限元分析。模拟结果表明, 十字型试件中心区域的应力应变分布均匀。因此本次双向拉伸采用十字型圆角过度试样, 试样尺寸如

图 4 所示。夹具夹持处织物宽 50 mm, 夹持深度 37 mm。初始试验状态, 同方向夹具间距离为 100×100 mm, 图像采集区域为中间 50×50 mm 应变均匀区。为防止织物与夹具间滑动, 采用 VHB (very high bond) 双面胶将 ABS (acrylonitrile butdiene styrene) 板固定在夹持区防滑, 并保持夹持区受力均匀, 试样制成后如图 4。有纺织物  $W_{120}, W_{150}, W_{250}$  的各项基本物理力学参数如表 1。有纺织物条膜接近不可压缩材料, 3 种织物的初始泊松比取为 0.5。

表 1 有纺织物物理力学性质

Table 1 Properties of woven geotextiles

名称	织物厚度 $T$ /mm	单位面积质量 $\mu$ /( $g \cdot m^{-2}$ )	双向受拉强度 /( $kN \cdot m^{-1}$ )	条膜密度 $\rho$ /( $kg \cdot m^{-3}$ )	条膜宽度 $a$ /mm	条膜厚度 $t$ /mm
$W_{120}$	0.25	125.5	20	900	1.920	0.089
$W_{150}$	0.27	159.4	30	900	2.060	0.102
$W_{250}$	0.58	245.5	55	900	2.120	0.152

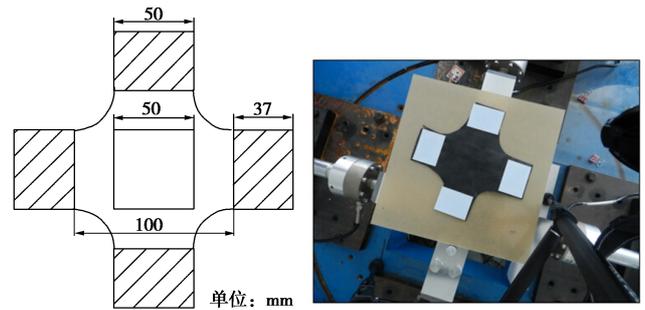
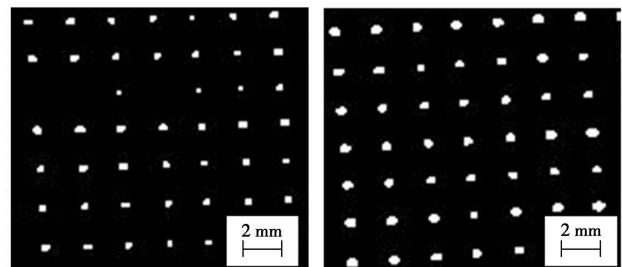


图 4 双向拉伸试样

Fig. 4 Sample of biaxial tensile test

### 2.2 数字图像法处理

运用 MATLAB 软件将拍摄的彩色图像转换为只有黑、白像素组成的二值图 (黑色像素值为 0, 代表条膜; 白色值为 1, 代表孔洞)<sup>[16]</sup>。根据相机拍摄的比例尺, 换算每个像素代表的实际尺寸, 从而通过对像素数统计运算得出各项孔径参数。双向受拉前后, 有纺织物的二值图如图 5, 可见双向拉伸使孔洞变圆变大, 孔洞长宽比变化较小。未受拉条件下闭合的条膜间隙, 在双向拉应变下张开并可测。



(a) 0% (b) 等轴双向应变12%

图 5 双向受拉前后有纺织物  $W_{120}$  二值图

Fig. 5 Binary images of biaxial strained and unstrained woven geotextiles  $W_{120}$

### 3 试验结果及理论分析

#### 3.1 开孔面积率 (POA)

开孔面积率即开孔面积与织物总面积的比值,对数字图像法的运算,即为图片中白色像素总数与图片总像素数的比值。运用  $W_{120}$ 、 $W_{150}$ 、 $W_{250}$  的基本物理参数,通过式 (15) 计算各级双向应变下的开孔面积率,并与图像法得出的试验结果进行比较,开孔面积率理论值与试验值随双向应变的变化如图 6。

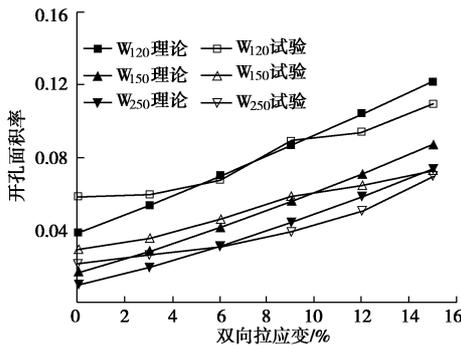


图 6 双向拉应变开孔面积率理论与试验变化

Fig. 6 Comparison between analytical and experimental POAs

由图 6 可见,有织物单位面积质量越小,厚度越薄,纺织越稀疏,开孔面积率越大。图像法试验测得 3 种有纺织物的开孔面积率均随双向拉应变增加而增大,双向应变由 0% 增大到 15%,  $W_{120}$  开孔面积率试验值由 5.9% 增大到 11.0%,  $W_{150}$  开孔面积率试验值由 3.0% 增大到 7.3%,  $W_{250}$  开孔面积率试验值由 2.2% 增大到 7.0%。理论值与试验值的增长趋势一致,预测数值吻合较好。但 3 组试验值的平均增长速率都比理论值小。首先,这与双向拉伸中织物和夹具间有轻微打滑有关。其次,织物拉应变取夹具位移与两夹具间的织物初始长度之比,而非织物表面各部分的平均位移,实际织物表面的平均应变会小于理论应变,这是导致理论值变化率偏大的另一原因。 $W_{120}$ 、 $W_{150}$  与  $W_{250}$  开孔面积率 POA 试验值与理论值之间的决定系数分别为 0.95, 0.98, 0.96, 证明理论解较好地预测了开孔面积率随双向应变的变化规律。

从式 (15) 可以看出,开孔面积率与等轴双向拉应变之间不是线性关系。当拉应变值较大时,非线性关系表现明显, $W_{120}$ 、 $W_{150}$  和  $W_{250}$  的理论曲线如图 7。但实际有织物受拉破坏时,拉应变水平不可能达到图 7 所示范围。实际工程中有织物应变在 15% 左右,织物就已破坏,在较小应变范围内,理论曲线与试验曲线接近线性关系。用线性关系拟合开孔面积率变化的理论曲线与试验曲线, $k$  (无量纲) 为线性拟合斜率, $R^2$  为线性拟合的相关系数,得到表 2。由表 2 可见,理论值斜率与试验值斜率相近,但 3 组理论值曲线斜

率均比对应的试验曲线斜率大,与图 6 表现出的规律相同。四组线性拟合决定系数均大于 0.90,证明在有纺织物工作应变范围内,开孔面积率与等轴双向拉应变近似呈线性关系。

表 2 双向拉伸开孔面积率线性拟合

开孔面积率曲线	$k$	$R^2$
$W_{120}$ 试验值	0.36	0.930
$W_{120}$ 理论值	0.58	0.998
$W_{150}$ 试验值	0.30	0.986
$W_{150}$ 理论值	0.49	0.993
$W_{250}$ 试验值	0.31	0.903
$W_{250}$ 理论值	0.45	0.989

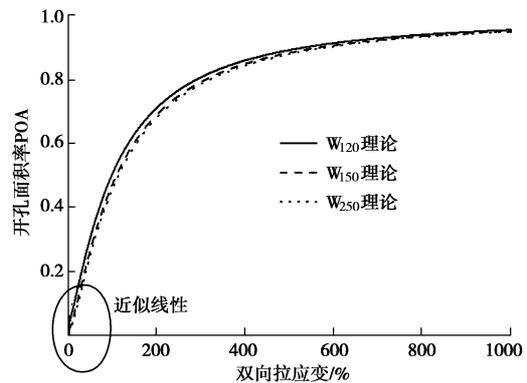


图 7 双向拉伸开孔面积率理论曲线

Fig. 7 Analytical curves of POAs under biaxial tensile strains

#### 3.2 孔径分布曲线

孔径分布曲线 (PSD, pore size distributions) 是小于某孔径的孔数占总孔数的百分率与孔径的关系曲线,类似于土的颗粒分析曲线。根据图像中拍摄 1 cm 比例尺的像素数,换算出每个像素代表的实际尺寸。通过累计每个孔内白色像素数,计算每个孔的实际面积  $A$ ,按 Dierickx<sup>[9]</sup> 提出的等效孔径计算方法,取  $\sqrt{A}$  为每个孔的等效孔径值。统计小于各孔径的累积百分数,绘出孔径分布曲线,如图 8。 $W_{120}$ 、 $W_{150}$ 、 $W_{250}$ 、3 种不同厚度有纺织物的孔径分布曲线均随双向拉应变的增大,向孔径增大的方向移动,即有织物表面不同大小的孔均随双向应变的增大而增大。由于测试应变从 3% 至 15% 呈等差数列增长,各应变对应的孔径分布曲线间距近似相等。

#### 3.3 孔径变化

为了验证孔径变化理论公式,需选取一个特征孔径代表有织物孔径的变化趋势,与理论结果对比。等效孔径  $O_{95}$  在反滤设计中最为常用,意为织物中 95% 的孔径小于该孔径。据统计较大孔径的变化率可以稳定地反映织物孔径随应变的变化趋势,又不受试验中新拉小孔径的干扰<sup>[17]</sup>。因此选取较大特征孔径  $O_{95}$  为代表,将其试验值与理论孔径  $O^{bi}$  进行对比。

从各级拉应变的孔径分布曲线图 8 上,读取 95%

累积频率对应的  $O_{95}$  孔径值。从初始未受拉状态到等轴双向应变 12%， $W_{120}$  的  $O_{95}$  由 0.51 mm 增长到 0.78 mm，变化率 53%； $W_{150}$  的  $O_{95}$  由 0.40 mm 增长到 0.66 mm，变化率 65%； $W_{250}$  的  $O_{95}$  由 0.31 mm 增长到 0.62 mm，变化率 100%。可见等轴双向拉应变对  $O_{95}$  的数值影响显著，初始孔径越小，变化率越大。

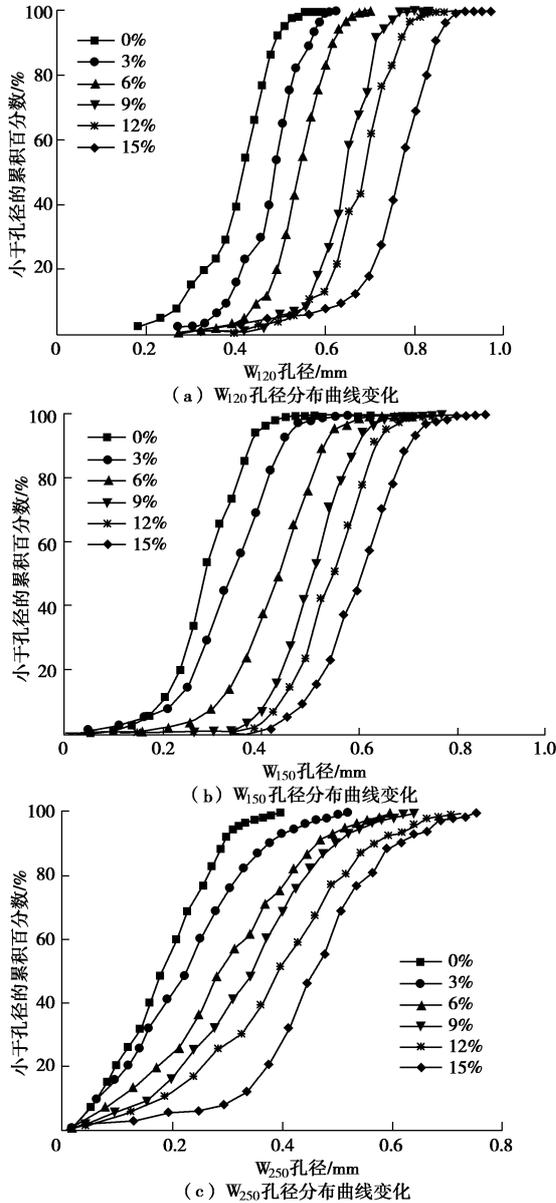


图 8 等轴双向应变下有纺织物孔径分布曲线变化

Fig. 8 Pore size distributions under equal biaxial tensile strains

将应变值及有纺织物的物理力学参数代入式 (18)，计算出各应变下的理论孔径  $O^{bi}$ ，并与图像法测得的  $O_{95}$  试验值进行对比，如图 9。由图 9 可见，图像法试验测得 3 种有纺织物的  $O_{95}$  均随拉应变增加而增大，理论值与试验值较为吻合，增长趋势一致，但 3 组理论值孔径的增长率均比试验值  $O_{95}$  的增长率大。此现象与双向受拉开孔面积率的变化趋势一致。 $W_{120}$ 、 $W_{150}$  与  $W_{250}$  的  $O_{95}$  试验值与理论值的相关系数  $R^2$  分别为 0.99, 0.99, 0.97。说明理论公式比较好地

预测了双向应变下等效孔径  $O_{95}$  的变化规律。

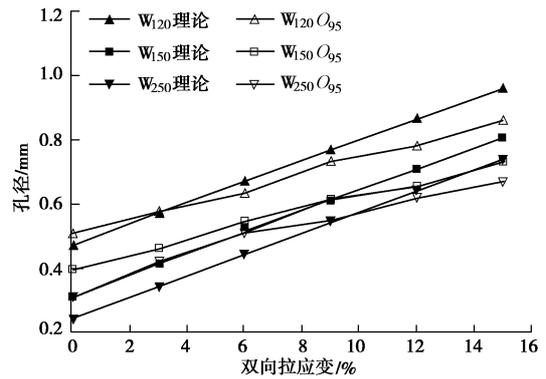


图 9 等轴双向应变下图像法  $O_{95}$  与理论值对比

Fig. 9 Comparison between analytical and experimental  $O_{95}$

在试验应变范围内，图 9 中的孔径变化曲线近似直线，因此用线性关系拟合理论孔径值  $O^{bi}$  及  $O_{95}$  试验值随等轴双向拉应变的变化，得到拟合曲线斜率  $k$  (mm) 如表 3。由表 3 可见，理论值与试验值斜率基本一致，但 3 组理论值曲线斜率均比对应的试验曲线斜率大，与图 9 反映规律一致。对于同样是聚丙烯制成的条膜有纺织物，不同厚度的  $W_{120}$ 、 $W_{150}$ 、 $W_{250}$  曲线斜率相近，可见织物孔径随拉应变的变化率与织物材料及编织工艺相关，受织物规格影响较小。四组数据线性拟合决定系数  $R^2$  均大于 0.96，证明在工作应变范围内，孔径与等轴双向拉应变近似呈线性关系。

表 3 双向拉伸孔径变化线性拟合

Table 3 Linear fitting of pore size variations

双向拉并孔径	线性拟合斜率 $k/mm$	线性拟合决定系数 $R^2$
$W_{120}$ 试验值	2.36	0.993
$W_{120}$ 理论值	3.35	0.999
$W_{150}$ 试验值	2.23	0.990
$W_{150}$ 理论值	3.40	0.999
$W_{250}$ 试验值	2.30	0.967
$W_{250}$ 理论值	3.42	0.999

## 4 结 论

本文基于有纺织物平面二维结构，建立了有纺织物单孔结构模型。分析得出双向拉应变下的孔径变化主要由经、纬向条膜的轴向及侧向变形造成，分别推导了有纺织物理论开孔面积率 (POA) 和理论孔径 ( $O^{bi}$ ) 随双向拉应变变化的理论解，以等轴双向拉伸试验为例，通过数字图像法测试了 3 种单丝条膜有纺织物的孔径，验证理论解，得出如下 3 点结论。

(1) 双向拉应变下孔径变化显著。理论解较好地预测了开孔面积率 POA 及等效孔径  $O_{95}$  曲线随双向拉应变的变化斜率及数值范围。此公式可用于反滤设计中的孔径参数预测。

(2) 等轴双向拉应变逐级增大，孔径分布曲线向

孔径增大的方向移动,即不同大小的孔径均随双向应变的增大而增大;有纺织物开孔面积率(POA)与等效孔径 $O_{95}$ 均随拉应变的增加而增大。在有纺织物工作应变范围内,理论解与试验值均显示孔径参数与拉应变间存在近似线性关系。在今后的研究中,可将理论公式进一步简化为线性公式。

(3) 织物单位面积质量越大,初始孔径越小,孔径变化率相对较大。对于同种材质及制造工艺的有纺织物,不同规格试样的孔径参数与拉应变关系曲线的斜率近似,说明受拉变化斜率是同种材料的一种性质。

#### 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: 中国水利电力出版社, 2008. (BAO Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [2] CHU J, YAN SW, LI W. Innovative methods for dike construction-an overview [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **30**(S1): 35 - 42.
- [3] YEE T W, LAWSON C R, WANG Z Y, et al. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **32**: 39 - 50.
- [4] 刘伟超. 土工织物管袋充填特性及计算理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (LIU Wei-chao. Study on properties and computation of filling geotextile tube[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [5] FOURIE A B, ADDIS P C. Changes in filtration opening size of woven geotextiles subjected to tensile loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, **17**(5): 331 - 340.
- [6] EDWARDS M, HSUAN G. Permittivity of geotextiles with biaxial tensile loads[C]// 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010: 1135 - 1140.
- [7] ZHANG Y P, LIU W C, SHAO WY, et al. Experimental study on water permittivity of woven polypropylene geotextile under tension[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **37**: 10 - 15.
- [8] 刘伟超, 张仪萍, 杨广庆. 土工管袋充填特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(12): 2544 - 2549. (LIU Wei-chao, ZHANG Yi-ping, YANG Guang-qing. Model experimental study Filling Property of Geotextile Tube[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(12): 2544 - 2549. (in Chinese))
- [9] DIERICKX W. Opening size determination of technical textiles used in agricultural applications[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, **17**(4): 231 - 245.
- [10] 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 - 80.
- [11] 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 Xiao-wu, 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. (in Chinese))
- [12] GIROUD J P. Biaxial tensile state of stress in geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, **11**(3): 319 - 325.
- [13] GIROUD J P. Poisson's ratio of unreinforced geomembranes and nonwoven geotextiles subjected to large strains. Geotextiles and Geomembranes, 2004, **22**(4): 297 - 305.
- [14] 张思云, 张艳, 靳向煜. 土工膜和非织造土工布单向与双向拉伸机理对比试验研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, **40**(2): 220 - 224. (ZHANG Si-yun, ZHANG Yan, JIN Xiang-yu. Comparison studies on unilateral and biaxial strength mechanism of geomembrane and nonwoven geotextiles[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2014, **40**(2): 220 - 224. (in Chinese))
- [15] 邓国红, 余雄鹰, 汤爱华. 十字形双向拉伸试验有限元模拟及分析[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007, **5**(2): 15 - 17, 46. (DENG Guo-hong, YU Xiong-ying, TANG Ai-hua. FEM Simulation and Analysis of Cruciform Biaxial Tensile Test[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2007, **5**(2): 15 - 17, 46. (in Chinese))
- [16] 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 Xiao-wu. Research on changes 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. (in Chinese))
- [17] 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. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)