

DOI: 10.11779/CJGE201510020

# 无纺织物单向拉伸孔径变化试验与理论预测对比分析

唐琳<sup>1</sup>, 唐晓武<sup>2</sup>, 赵庆丽<sup>1</sup>, 王艳<sup>3</sup>, 白彬<sup>2</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. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 无纺织物作为反滤材料, 常处于单向受拉工作状态。单向拉伸引起无纺织物孔径变化, 易导致反滤工程失效。通过控制织物应变的干筛试验, 定量测试了无侧限单向拉应变逐级增大的过程中, 两种不同厚度短纤针刺无纺织物的孔径分布曲线变化。采用干筛试验结果, 对现有两种体系的单向应变下无纺织物孔径预测理论解进行验证: 一类是余巍等效孔径  $O_{95}$  理论解, 一类是 Rawal 孔径分布曲线理论解。通过对比两种理论解对各级拉应变下的  $O_{95}$  值预测, 归纳二者的预测误差规律, 从理论假设出发分析误差原因。同时采用前人图像法测得的热粘无纺织物  $O_{95}$  变化验证两类理论解。两种理论解均能较好地预测无侧限单向拉应变下无纺织物  $O_{95}$  的变化规律。 $O_{95}$  随单向拉应变呈近似线性减小的规律。对于  $O_{95}$  变化斜率的预测, 余巍解较准确, Rawal 解偏大。对于  $O_{95}$  数值预测可结合两类理论解给出变化范围。

**关键词:** 无纺织物; 无侧限单向拉应变;  $O_{95}$ ; 孔径分布曲线; 理论解; 干筛

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)10-1910-07

作者简介: 唐琳 (1986-), 女, 讲师, 主要从事土工合成材料等方面的教学和科研。E-mail: tanya\_tang3@163.com。

## Analytical prediction and experimental research on pore size of nonwoven geotextiles under unconfined uniaxial tensile strain

TANG Lin<sup>1</sup>, TANG Xiao-wu<sup>2</sup>, ZHAO Qing-li<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>3</sup>, BAI Bin<sup>2</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. Architectural Engineering and Environment College, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** The filtration applications of nonwoven geotextiles are usually subjected to uniaxial tensile strain, resulting in the variation of pore sizes and failure of filtration engineering. The pore-size distributions of two needle-punched nonwoven geotextiles subjected to unconfined uniaxial tensile strains are measured by using the strain-controlled dry sieving tests. The experimental results of the dry sieving tests are compared with the predictions of two analytical solutions. One is the analytical solution of equivalent opening size  $O_{95}$  proposed by She Wei. The other is the analytical solution of pore-size distribution proposed by Rawal et al. The experimental values of  $O_{95}$  of two thermally bonded nonwoven geotextiles tested by previous studies are used to confirm the validity of the two analytical solutions. By comparing the predictions of  $O_{95}$ , the accuracy and the error of two analytical solutions are analyzed.  $O_{95}$  decreases approximately linearly with unconfined uniaxial tensile strains. The prediction of the variation rate by She Wei is accurate, while that by Rawal et al. is larger than the experimental rate. The prediction of the value of  $O_{95}$  should be done considering the results of She Wei solution and Rawal solution.

**Key words:** nonwoven geotextile; unconfined uniaxial tensile strain;  $O_{95}$ ; pore size distribution; analytical solution; dry sieving test

## 0 引言

无纺织物作为一种新兴反滤材料, 在堤岸护坡、围海造陆、软基固结、垃圾填埋场等工程中应用广泛, 起到保持水土、防止管涌等重要作用<sup>[1-2]</sup>。由于受到土体下滑力等外力作用, 无纺织物经常处于单向拉应变下工作。Rowe 等<sup>[3]</sup>测得垂直堤岸走向的土工织物拉应变超过 10%。单向拉应变使织物孔径发生变化, 进而

影响织物反滤性能<sup>[4-5]</sup>。Fourie 等<sup>[6]</sup>分析了南非某地下金矿由于土工织物受拉导致反滤失效的案例。因此,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308310); 山东省自然科学基金项目 (ZR2015PE006); 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(威海)校科学基金项目 (HIT(WH)201423)

收稿日期: 2015-01-04

研究单向拉应变下的无纺织物孔径变化机理及规律, 是保证反滤工程长期可靠的理论依据。

无纺织物由于其三维分层立体结构, 其等效孔径定义为可以通过各层纤维的颗粒直径<sup>[1-2]</sup>。现有根据单向拉应变预测无纺织物孔径变化的理论基本分两大体系: 一类是以 Giroud 等<sup>[7]</sup>纤维等效开孔孔径为基础的几何模型, 余巍等<sup>[8]</sup>基于 Giroud 模型提出了单向受拉状态下等效孔径  $O_{95}$  理论公式; 另一类是 Rawal 等<sup>[9-13]</sup>的三维空间概率模型, 考虑了单向拉伸使结构中纤维排列方式变化, 提出预测单向拉应变下无纺织物孔径分布曲线的理论公式。后文中将两类理论解简称为余巍解和 Rawal 解。

目前, 对上述两种单向应变下无纺织物孔径理论解的试验验证较少, 余巍等<sup>[8]</sup>采用动力水筛法测试了 3 种针刺无纺织物孔径变化, 验证其  $O_{95}$  理论解。Rawal 等<sup>[13]</sup>采用图像法测试 2 种热粘无纺织物孔径变化, 验证其孔径分布曲线理论解。缺乏对两种体系理论解预测准确度的对比。两种理论解各自适用于哪种孔径测试方法的试验结果、对哪类无纺织物的孔径预测有效等问题都值得深入研究。

实际工程中, 无纺织物与土颗粒接触, 织物单向受拉过程具有一定的侧向约束。无侧向约束的单向拉伸作为一种简单的单向拉伸状态, 具有基本的研究必要及价值。因此, 本文开展无侧限单向拉伸下无纺织物孔径变化研究。通过应变控制的干筛法试验, 将两种规格的短纤针刺无纺织物无侧限单向拉伸至各级应变, 采用自制夹具固定拉应变, 进行干筛试验, 测试不同应变水平下的孔径分布曲线变化。通过试验结果分析无侧限单向拉应变下, 无纺织物孔径分布曲线变化规律。运用试验结果分别验证余巍解预测的  $O_{95}$  值, 及 Rawal 解预测的孔径分布曲线的准确度。并从 Rawal 解预测曲线上读取  $O_{95}$ , 对两种体系理论解的  $O_{95}$  预测效果进行对比。同样, 采用前人图像法测试的热粘无纺织物孔径数据, 对比二者预测效果, 分析误差原理, 验证二者对不同测试方法、测试材料的适用性。

## 1 单向拉伸干筛试验

Rawal 等<sup>[13]</sup>用光学显微镜测试了热粘无纺织物的孔径, 如图 1 (a)。通过光学显微镜观察本次测试的  $100 \text{ g/m}^2$  针刺无纺织物, 放大 40 倍其结构如图 1 (b)。对比可见, 热粘无纺织物厚度较薄, 各层纤维可呈像到二维平面, 从而测定其孔径。针刺无纺织物具有一定厚度, 光学显微镜只能对某层织物对焦, 未对焦的纤维层显示为模糊阴影, 无法直接测量其孔径。Aydilek 等<sup>[14]</sup>用环氧树脂饱和凝固较厚针刺无纺织物,

切片后运用图像法测试了其孔径, 但操作复杂, 对设备要求较高。

因此本文采用夹具固定应变的干筛法, 对各级无侧限单向拉应变下的无纺织物孔径分布曲线进行测试。针对前人提出的干筛试验弊端, 采取如下方法避免: ①杨艳<sup>[15]</sup>试验结果表明, 用静电消除剂处理织物可有效消除干筛静电效应, 因此本次试验前用抗静电剂处理无纺织物及筛析玻璃珠; ②为避免玻璃珠卡在织物中产生误差, 采用“一布一筛”; ③为减小测试结果离散性, 获得完整的孔径分布曲线, 选用磨圆度好, 颗粒级配多, 粒径范围广的玻璃珠进行干筛试验。

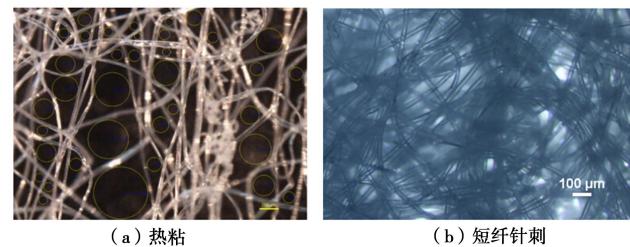


图 1 无纺织物光学显微镜呈像

Fig. 1 Light microscope image of nonwoven geotextiles

### 1.1 试验设备及材料

本次干筛试验按照《土工合成材料测试规程 SL 235—2012》<sup>[16]</sup>执行:

- (1) 标准试验筛, 直径 200 mm。
- (2) 自制应变控制夹具, 内径 200 mm, 可与标准筛扣合进行振筛, 如图 2。上下两片夹具间设橡胶层, 防止织物滑脱, 以螺丝拧紧固定应变。
- (3) 万能试验机。
- (4) DBS—300 型顶击式标准筛振筛机。
- (5) 振筛用的颗粒材料。玻璃珠级配范围如下:  $0.425 \sim 0.25$ ,  $0.25 \sim 0.212$ ,  $0.212 \sim 0.150$ ,  $0.150 \sim 0.106$ ,  $0.106 \sim 0.095$ ,  $0.095 \sim 0.075$ ,  $0.075 \sim 0.054$ ,  $0.054 \sim 0.033 \text{ mm}$ , (级配共 8 级)。

选取了两种不同厚度的涤纶短纤针刺无纺织物, 生产标定单位面积质量为  $100 \text{ g/m}^2$  和  $200 \text{ g/m}^2$ , 分别命名为 NW<sub>100</sub> 和 NW<sub>200</sub>, 主要物理力学参数见表 1。

表 1 针刺无纺织物物理力学参数

Table 1 Properties of needle-punched nonwoven geotextiles

物理力学参数	NW <sub>100</sub>	NW <sub>200</sub>
单位面积质量/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	107	225
厚度 $t_{\text{GT}}/\text{mm}$	0.86	1.69
断裂强力/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	2.5	6.5
纤维密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.32	1.32
纤维直径 $d_f/\mu\text{m}$	23	23
初始泊松比	2.6	2.6

### 1.2 试验步骤

(1) 试验前采用抗静电剂洗涤并阴干无纺织物及玻璃珠。

(2) 在无纺织物试样表面绘制方格, 根据方格距离变化确定应变值, 避免通过试验机的夹具确定应变造成误差。分别将织物无侧限单向拉伸至 3%, 5%, 10% 应变, 停止拉张并维持至应力值稳定, 再用自制环形夹具在万能试验机上固定拉应变, 如图 2。

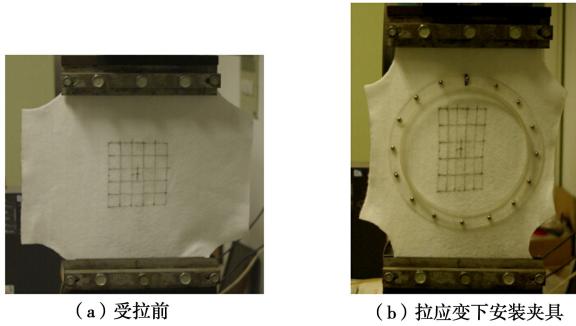


图 2 自制环形夹具固定拉应变

Fig. 2 Tensile strain fixed by fixture

(3) 应变固定好后将试样剪下, 用应变维持的织物作为筛布, 将夹具与标准筛扣好置于振筛机上, 进行干筛试验并测试数据。《土工合成材料测试规程 SL 235—2012》<sup>[16]</sup>中, 每一级颗粒直径以颗粒上下限值和过筛率进行线性内插得到, 取代了《土工合成材料测试规程 SL/T 235—1999》中各级颗粒取上下限的平均值。平均筛余率与对应颗粒粒径的关系即孔径分布曲线, 通过读取孔径分布曲线上 95% 筛余率对应的孔径值即等效孔径  $O_{95}$ 。

### 1.3 试验结果

干筛试验测得的在单向拉应变 0%, 3%, 5%, 10% 时, 针刺无纺织物  $NW_{100}$ ,  $NW_{200}$  的孔径分布曲线如图 3。静电吸附影响存在时, 干筛法测得的孔径分布曲线小孔径端上折。由于静电吸附对粒径越小的颗粒影响越大, 使小粒径土的筛余率反而增大, 因此受静电影响的曲线小孔径端上折。抗静电剂在织物纤维表面形成保护膜, 减少纤维缠结, 大大降低了静电在织物上的累积, 从而有效降低静电吸附。从图 3 可见, 本次干筛试验测得的孔径分布曲线末端上翘现象消除, 证明静电问题得到有效处理。且工程实际中一般只需测得  $O_{95}$  值作为等效孔径, 曲线下部对测值影响不大。采用“一布一筛”, 试验中未出现前组颗粒卡住, 造成后组过筛量减小的现象。磨圆度不好, 含片状或针状的云母和长石的颗粒会使试验结果离散性大, 本次试验采用磨圆较好的玻璃珠, 每组试验标准差不超过平均值的 1/3, 离散性较为合理。

由图 3 可见无侧限单向拉应变下, 孔径分布曲线向着孔径减小的方向移动, 说明拉应变增大不同大小

的无纺织物孔径同时减小。由于无纺织物在无侧向约束条件下单向受拉, 颈缩现象较明显, 如图 2。受拉导致纤维缠结点的间距加大, 纤维间距变狭窄, 使可以透过的玻璃珠直径减小, 即无纺织物孔径变小, 原理示意如图 4。此测试规律与前人反滤试验结果一致。Fourie 等<sup>[6]</sup>、Edwards 等<sup>[17]</sup>测得单向拉伸使通过无纺织物的流速变小, 唐琳等<sup>[5]</sup>测得的单向拉伸使通过无纺织物的流速减小、漏土量减小、梯度比值变大, 间接证明单向拉应变下无纺织物孔径减小。

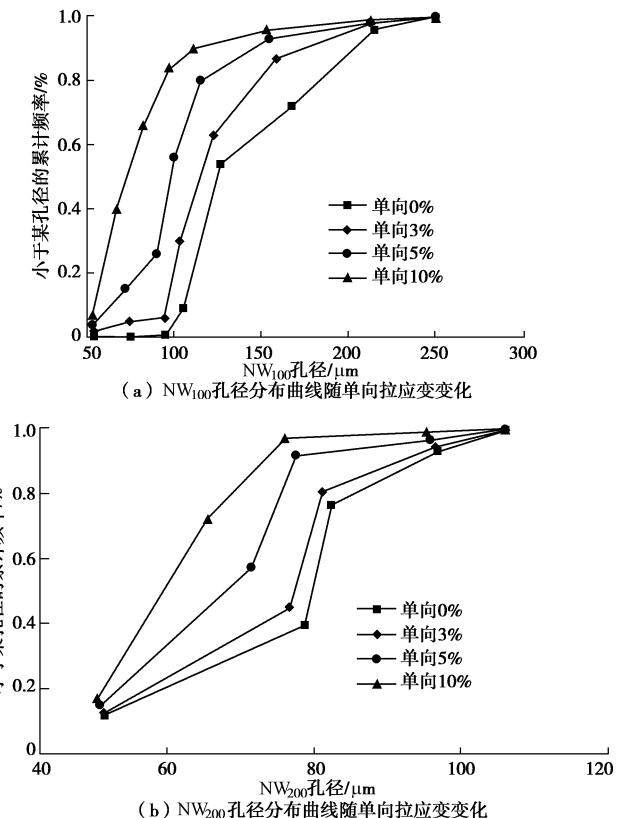


图 3 针刺无纺织物孔径分布曲线随单向拉应变变化

Fig. 3 Variation of pore-size distributions of needle-punched nonwoven geotextiles with uniaxial tensile strain

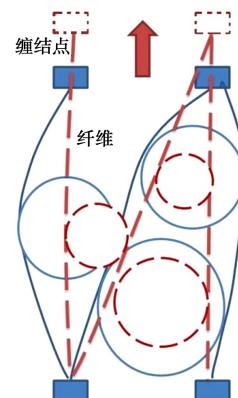


图 4 单向受拉孔径减小原理

Fig. 4 Decrease of pore size with uniaxial tensile strain

## 2 现有无纺织物孔径研究

目前, 预测单向拉应变下, 无纺织物孔径变化的理论解大致可分为两类体系: 一类是以无纺织物孔径几何形态为基础的等效孔径  $O_{95}$  理论解, 其中代表为余巍解; 另一类是基于空间网状概率模型为基础的孔径分布曲线理论解, 以 Rawal 解为代表。

### 2.1 余巍理论解

早期提出的一系列多方向纤维排列的简单几何模型, 均给出了可以通过纤维排列的球形颗粒直径理论解<sup>[7]</sup>。Giroud 等<sup>[7]</sup>将几何形态公式发展完善, 提出无应变状态下无纺织物过滤孔径  $O_{fmin}$  理论解:

$$\frac{O_{fmin}}{d_f} = \frac{1}{\sqrt{1-n}} - 1 + \frac{10n}{(1-n)t_{GT}/d_f} \quad (1)$$

余巍等<sup>[8]</sup>在 Giroud 公式基础上提出了无侧向约束的单向拉应变  $\varepsilon$  下, 等效孔径  $O'_{95}$  理论解:

$$O'_{95} = \left( \frac{\sqrt{1+\varepsilon(1-2\nu_0)}}{\sqrt{1-n}} - 1 \right) \times d_f + \frac{10d_f^2}{(1-n)t_{GT}} \quad (2)$$

$$[\varepsilon(1-2\nu_0) + n] \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{1+\varepsilon(1-2\nu_0)}} \quad (2)$$

则式 (2) 可用于预测单向应变达到  $\varepsilon$  时, 无纺织物的等效孔径  $O'_{95}$  值。式中  $\nu_0$  为无纺织物初始泊松比, 即零应变状态对应的织物泊松比。 $t_{GT}$  是土工织物初始厚度,  $n$  是织物初始孔隙率,  $d_f$  是纤维直径。

### 2.2 Rawal 理论解

另一类是基于空间网状概率模型为基础的孔径分布曲线理论解。最早从概率角度分析无纺织物孔径分布的是 Matheron 提出的 Poisson poly-hedron 理论<sup>[9]</sup>。Faure 等<sup>[18]</sup>在此基础上提出了空间网络概率模型, 并将织物孔径分布与纤维及材料特性建立关系。Rawal 等<sup>[13]</sup>对此模型进行了发展, 考虑到受拉后结构中纤维排列方式对孔径的影响, 提出单向拉应变下无纺织物孔径分布曲线理论解。该理论解由式 (3) ~ (7) 组成, 单向应变  $\varepsilon$  下直径为  $d$  的孔径累计概率表达为  $F_f(d)$ :

$$F_f(d) = 1 - \left[ \left( 1 + \omega d + \frac{\omega^2 d^2}{2} \right) e^{-\omega d} \right]^N, \quad (3)$$

$$\omega(\varepsilon) = \frac{4V_f(\varepsilon)K_a(\beta_f)}{\pi D_f}, \quad (4)$$

$$V_f(\varepsilon) = \frac{V_f}{(1+\varepsilon)(1-\nu\varepsilon)^2}, \quad (5)$$

$$K_a(\beta_f) = \int_{-\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}-\alpha} |\cos \beta_f| \chi(\beta_f) d\beta_f, \quad (6)$$

$$N = \frac{T_g}{D_f}. \quad (7)$$

其中式 (3) 为基本公式, 式 (4) ~ (7) 为式 (3) 中各项参数的值。将孔径数列  $d$  代入式 (3) 求出对应的累积概率数列  $F_f(d)$ 。以孔径数列  $d$  为横坐标, 对应的累积概率数列  $F_f(d)$  为纵坐标, 即可绘出孔径分布曲线图。

$N$  定义为织物中孔径结构的总层数 (无量纲), 如式 (7), 其取值为织物厚度  $T_g$  与纤维直径  $D_f$  之比。式 (4) ~ (6) 中, 单向应变下的尺度参数  $\omega(\varepsilon)$ 、纤维体积分数  $V_f(\varepsilon)$ 、方向参数  $K_a(\beta_f)$  均随拉应变变化。其中方向参数  $K_a(\beta_f)$  的测试需要将每根纤维投影到平面内, 通过统计每根纤维与机械方向的夹角求得。

### 2.3 图像法试验研究

目前对理论解的试验验证较少。Rawal 等<sup>[13]</sup>运用图像法, 以多边形内切圆原理计算各纤维间孔径, 测得两种热粘无纺织物 TB1, TB2 受单向拉应变 0%, 4%, 8%, 12% 时的孔径分布曲线, 与 Rawal 理论解进行了对比。TB1, TB2 的物理力学参数如表 2。

表 2 热粘无纺织物 TB1, TB2 物理力学参数

Table 2 Properties of thermally bonded nonwoven geotextiles

参数	TB1	TB2
单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> )	30	30
厚度/mm	0.44	0.43
纤维直径/μm	16.6	28
纤维密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.38	1.38
初始泊松比 $\nu_0$	2.90	3.81

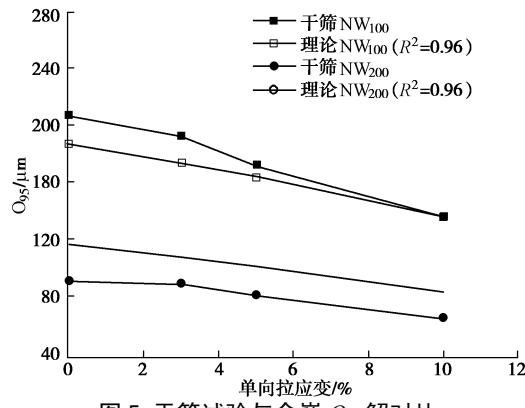
## 3 理论与试验对比

采用余巍解与 Rawal 解分别对同一组试验进行计算, 通过  $O_{95}$  的计算结果对比两种理论解的预测结果及误差规律。以干筛试验测得的针刺无纺织物 NW<sub>100</sub>, NW<sub>200</sub>, 及图像法测得的热粘无纺织物 TB1、TB2 为例, 分别对比两类理论解对两种无纺织物试验的理论计算结果。

### 3.1 对干筛试验的预测

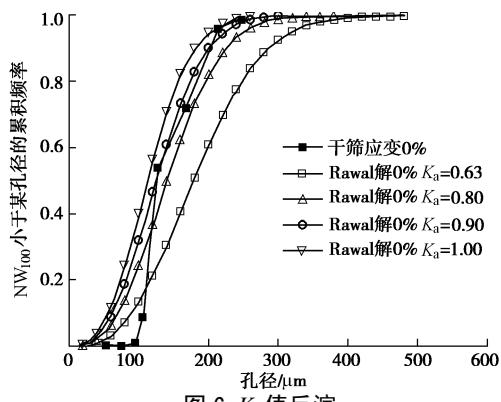
(1) 余巍解。采用余巍解计算干筛试验结果 NW<sub>100</sub>, NW<sub>200</sub> 单向拉应变下的  $O_{95}$  变化规律。基于两种针刺无纺织物的基本物理力学参数, 分别将单向拉应变 0%, 3%, 5%, 10% 代入式 (2), 计算出各个拉应变下的  $O_{95}$  理论值。并从干筛试验测得的孔径分布曲线上, 读出相应拉应变的  $O_{95}$  试验值, 二者对比如图 5。

由图 5 可见, 余巍  $O_{95}$  解较好地预测了干筛试验测得的两组针刺无纺织物  $O_{95}$  随应变的减小趋势, NW<sub>100</sub> 和 NW<sub>200</sub> 两组试验值与理论值间的决定系数  $R^2$  分别为 0.99 和 0.96。对  $O_{95}$  的数值预测结果也较好。

图 5 干筛试验与余巍  $O_{95}$  解对比Fig. 5 Experimental  $O_{95}$  of dry sieving and analytical prediction of She Wei solution

(2) Rawal 解。基于无纺织物 NW<sub>100</sub> 和 NW<sub>200</sub> 的基本物理力学参数, 运用 Rawal 理论解进行单向应变 0%, 3%, 5%, 10% 时的孔径分布曲线预测, 并与干筛试验测得的孔径分布曲线进行比较。

由于针刺无纺织物较厚, 无法像热粘无纺织物将每根纤维投影到平面内, 因此无法直接测得  $K_a$  值。根据受拉后  $0.63 \leq K_a \leq 1$ <sup>[13]</sup> 的特点, 对  $K_a$  值进行反演。分别取不同  $K_a$  值计算 0% 应变下理论孔径分布曲线, 并与干筛结果进行对比, 如图 6。可见  $K_a$  值越小, 理论孔径越大; 对  $K_a$  取值优化,  $K_a=0.8$  时理论曲线与 0% 应变实测值较为接近。因此, 取单向应变下织物方向参数  $K_a=0.8$ , 用于计算 3%, 5%, 10% 应变下的理论孔径分布曲线。NW<sub>100</sub> 和 NW<sub>200</sub> 不同应变下的理论孔径分布曲线与干筛实测值对比如图 7。

图 6  $K_a$  值反演Fig. 6 Inversion values of  $K_a$ 

由图 7 可见, 随单向拉应变的增大, Rawal 理论解预测孔径分布曲线向孔径减小的方向移动, 与干筛法测得的试验规律一致。理论孔径分布曲线的分布形态与试验值基本吻合。

从 Rawal 解计算的理论孔径分布曲线上读取  $O_{95}$ , 与干筛试验测得的  $O_{95}$  进行对比, 如图 8。可见 Rawal 解虽然是孔径分布曲线解, 但较好地预测了  $O_{95}$  随应变的减小趋势, 对  $O_{95}$  的数值预测结果偏大。Rawal 以多边形内切圆为孔径计算原理, 尽管玻璃珠磨圆较

好, 干筛过程中颗粒未必能落到纤维间的最大直径处, 是可能造成理论比试验值偏大的原因。

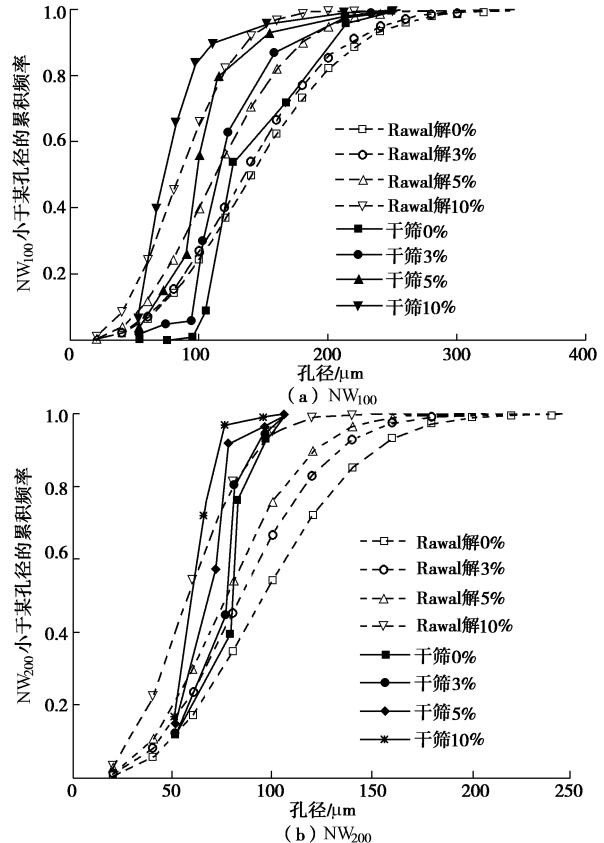
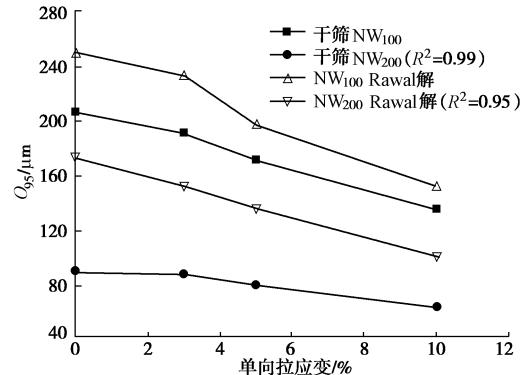


图 7 干筛试验与 Rawal 理论孔径分布曲线

Fig. 7 Experimental pore-size distributions of dry sieving and analytical prediction of Rawal solution

图 8 干筛试验  $O_{95}$  试验值与 Rawal 理论解对比Fig. 8 Experimental  $O_{95}$  of dry sieving and analytical prediction of Rawal solution

### 3.2 对图像法试验的预测

(1) 余巍解。Rawal 等<sup>[13]</sup>测试了两种热粘无纺织物 TB1, TB2 受单向拉应变 0%, 4%, 8%, 12% 时的孔径分布曲线, 从各级应变状态下的孔径分布曲线上读取各应变对应的  $O_{95}$  试验值。

将拉应变值及热粘织物 TB1, TB2 的参数带入余巍解, 计算  $O_{95}$  理论值与 Rawal 图像法测得的试验值对比, 如图 9。由图 9 可见, 余巍  $O_{95}$  解较好地预测了

TB1与TB2的变化规律。TB1的 $O_{95}$ 试验值与余巍 $O_{95}$ 理论解这两组数据的决定系数 $R^2$ 为0.98, TB2的决定系数为0.78。

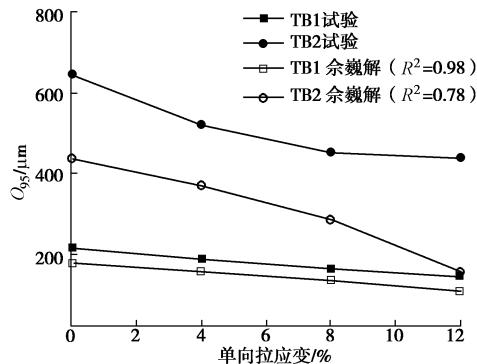


图9 图像法 $O_{95}$ 试验值与余巍理论解对比

Fig. 9 Experimental  $O_{95}$  of image analysis and analytical prediction of She Wei solution

通过余巍解对干筛法及图像法试验数据的预测,证明余巍解能够较好地预测无纺织物等效孔径 $O_{95}$ 随单向拉应变的变化规律。该公式适用于干筛法、图像法、动力水筛法的预测,对针刺无纺织物和热粘无纺织物的计算均可行。

但从预测孔径值来看,对于较薄无纺织物,例如:干筛试验中的NW<sub>100</sub>、余巍等<sup>[8]</sup>动力水筛试验测试的NW<sub>100</sub>、Rawal等<sup>[13]</sup>图像法测试的TB2,计算出的理论值比试验值均偏小。由于余巍公式基于Giroud公式推导,Giroud公式中 $O_{fmin}$ 意为无限厚无纺土工织物的过滤通道直径。在给定的渗径中,颗粒可以通过土工织物的粒径受到它必须通过的最小孔径控制。土工织物越厚,运动颗粒越有可能遇到理论公式所定义的最小孔径,因此余巍理论的这一预测误差由其理论假设决定,具有规律性。

(2) Rawal解。Rawal等<sup>[13]</sup>已给出理论预测的孔径分布曲线,但未对理论 $O_{95}$ 与试验 $O_{95}$ 进行对比,从其Rawal理论孔径分布曲线上读取 $O_{95}$ ,与图像法试验对比如图10。

由图10可见,Rawal解较好地预测了 $O_{95}$ 随应变的减小趋势,与TB1、TB2试验值的决定系数分别为0.99和0.67,但对 $O_{95}$ 数值的预测结果偏大,与干筛试验结果一致。

### 3.3 余巍解与Rawal解预测效果对比

从两个体系的理论公式看, $O_{95}$ 与单向拉应变之间不是线性关系。但试验应变范围内, $O_{95}$ 试验曲线及理论曲线接近直线。由于工程实际应变符合试验应变范围,因此对两种无纺织物的 $O_{95}$ 试验数据、及余巍 $O_{95}$ 解、Rawal理论解的预测值进行线性拟合,得到12组数据的线性拟合斜率 $k$ ,及线性拟合决定系数 $R^2$ ,如表3。由表3可见,余巍理论解对 $O_{95}$ 变化斜率的预测

较准确,Rawal理论解预测的 $O_{95}$ 变化斜率绝对值比试验值偏大,但理论值与试验值减小趋势基本一致。各组 $O_{95}$ 试验值随拉应变变化的线性拟合决定系数 $R^2$ 均大于0.82,证明 $O_{95}$ 与单向拉应变存在近似线性关系。

表3 单向拉伸无纺织物 $O_{95}$ 线性拟合

Table 3 Parameters of linearity of fitting of  $O_{95}$  curves

单向受拉 $O_{95}$ 曲线	$k/\mu\text{m}$	$R^2$
TB1 试验	-0.58	0.986
TB1 余巍解	-0.58	0.988
TB1 Rawal 解	-1.46	0.978
TB2 试验	-1.71	0.822
TB2 余巍解	-2.31	0.967
TB2 Rawal 解	-3.75	0.758
NW <sub>100</sub> 试验	-0.73	0.985
NW <sub>100</sub> 余巍解	-0.51	0.994
NW <sub>100</sub> Rawal 解	-1.01	0.967
NW <sub>200</sub> 试验	-0.27	0.920
NW <sub>200</sub> 余巍解	-0.34	0.997
NW <sub>200</sub> Rawal 解	-0.72	0.998

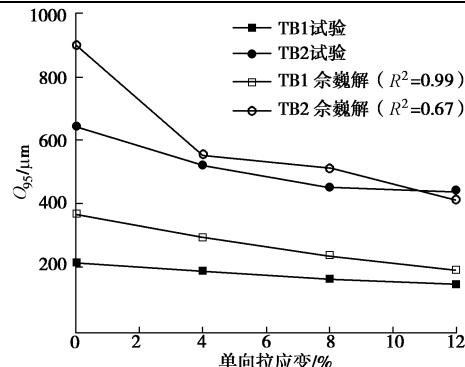


图10 图像法 $O_{95}$ 试验值与Rawal理论解对比

Fig. 10 Experimental  $O_{95}$  of image analysis and analytical prediction of Rawal solution

对于 $O_{95}$ 数值大小的预测,余巍 $O_{95}$ 解对于较薄织物的理论预测值往往比试验值偏小;Rawal理论值比试验结果偏大。因此对于单向拉应变无纺织物 $O_{95}$ 的数值预测,可以结合余巍及Rawal理论值的变化范围来预测 $O_{95}$ 数值。

从能够预测的参数来看,Rawal理论解的特点是可以完整预测整个孔径分布曲线数值及形态随应变的变化规律,也可预测不同特征孔径( $O_{95}$ ,  $O_{50}$ ,  $O_{30}$ 等)随单向拉应变的变化规律;余巍理论解则只能计算 $O_{95}$ 的变化规律,但对于设计、规范中常用的 $O_{95}$ 值预测,余巍理论解较Rawal理论解计算简便,也可得到更好地推广。

## 4 结论

通过控制应变的干筛法试验,测试了两种短纤针刺无纺织物在无侧限单向拉应变下的孔径分布曲线。分析孔径特征参数受拉变化规律,并与现有的余巍 $O_{95}$ 理论解、Rawal孔径分布曲线理论解的预测结果进

行对比, 得出如下结论:

(1) 无侧限单向拉伸使无纺织物孔径分布曲线向孔径减小的方向移动, 证明织物表面不同大小的孔径均随单向拉应变的增大而减小。

(2) 两种理论解均能较好的预测单向拉应变下无纺织物  $O_{95}$  的变化规律。对于  $O_{95}$  变化斜率的预测, 余巍解较准确, Rawal 解预测斜率的绝对值比试验值偏大, 但理论值与试验值减小趋势基本一致。对于  $O_{95}$  的数值预测, 可结合余巍解及 Rawal 解, 预测  $O_{95}$  的数值变化范围。通过线性拟合可见, 无纺织物  $O_{95}$  随无侧限单向拉应变呈近似线性减小的规律, 可在今后研究中将公式简化成线性公式, 便于工程应用。

(3) Rawal 解可以完整的预测整个孔径分布曲线随单向应变的变化规律, 余巍解只能预测  $O_{95}$  的变化规律, 但计算简便易行。两种理论解均适用于干筛法、图像法、动力水筛法等多种孔径试验方法, 同时适用于针刺无纺织物、热粘无纺织物的孔径预测。

## 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 Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 土工合成材料工程应用手册编写委员会. 土工合成材料工程应用手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Geosynthetics Engineering Application Manual Compilation Committee. Geosynthetics engineering application manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [3] ROWE R K, MYLEVILLE B L J. Implications of adopting an allowable geosynthetic strain in estimating stability[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Hague, 1990: 131 - 136.
- [4] 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.
- [5] 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, GAO Bo-song. Influence of uniaxial tensile strain on filtration characteristics of geotextiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 785 - 788. (in Chinese))
- [6] FOURIE A B, KUCHENA S M. The influence of tensile stresses on the filtration characteristics of geotextiles[J]. Geosynthetics International, 1995, 2(2): 455 - 471.
- [7] GIROUD J P, 吴昌瑜, 丁金华. 粒状滤层与土工织物滤层[C]// 全国第五届土工合成材料学术会议论文集. 宜昌, 2000: 62 - 151. (GIROUD J P, WU Chang-yu, DING Jin-hua. Particulate filter and geotextile filter[C]// The 5th Chinese Conference on Geosynthetics. Yichang, 2000: 62 - 151. (in Chinese))
- [8] 余巍, 唐晓武, 张泉芳. 无纺织物单向受拉时孔径变化研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊2): 9 - 12. (SHE Wei, TANG Xiao-wu, ZHANG Quan-fang. The influence of uniaxial tensile strain on the equivalent opening sizes of nonwoven geotextiles[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 9 - 12. (in Chinese))
- [9] RAWAL A, PRIYADARSHI A. Tensile behavior of nonwoven structures: comparison with experimental results[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(24): 6643 - 6652.
- [10] RAWAL A. Structural analysis of pore size distribution of nonwovens[J]. Journal of the Textile Institute, 2010, 101(4): 350 - 359.
- [11] RAWAL A, PRIYADARSHI A. Tensile behaviour of thermally bonded nonwoven structures: model description[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(9): 2274 - 2284.
- [12] RAWAL A, RAO P V K. Effect of fiber orientation on pore size characteristics of nonwoven structures[J]. Journal of Applied Polymer Scientists, 2010, 118(5): 2668 - 2673.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 equivalent opening size of Geotextiles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [16] SL 235—2012 土工合成材料测试规程[S]. 2012. (SL 235—2012 Specification for test and measurement of geosynthetics[S]. 2012. (in Chinese))
- [17] EDWARDS M, HSUAN G. Permittivity of geotextiles with biaxial tensile loads[C]// 9th International Conference on Geosynthetics. Brazil, 2010: 1135 - 1140.
- [18] FAURE Y, GOURC J P, MILLOT F, et al. Theoretical and experimental determination of the filtration opening size[C]// Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles. Vienna, 1986: 1275 - 1280.