

无纺土工织物孔径测量技术

吴凤彩

(南京水利科学研究院水工研究所, 江苏 南京 210029)

摘 要: 无纺土工织物的孔径大小及其分布是工程应用的重要技术指标, 本文提出这个指标在不同压力下的两种测量技术: ①负压法测孔技术, 根据毛管理论, 试验研究织物的亲水性 $\cos\theta$ 以解决测量技术的关键, 可测不同压力下织物孔径分布; ②渗透法测孔技术, 根据管道层流理论, 试验研究织物的水流阻力比 x 以解决测量技术的关键, 可测不同压力下织物特征孔径 O_{50} , O_{95} ; 这二种测孔技术其原理明确、方法简单、使用方便、测量可靠、通用性强。这项研究成果为国内外首创。

关键词: 无纺土工织物; 孔径; 测量

中图分类号: TV44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)04-0495-09

作者简介: 吴凤彩(1937-), 男, 高级工程师, 主要从事水工建筑物渗流控制和农田排水试验研究。

Measurement of pore size of geotextile under different pressures

WU Feng-cai

(Department of Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Pore size of geotextile was one of the important parameters for application in engineering practices. Two methods were presented for the measurement of geotextile pore size under different pressures: ①Negative pressure method: based on the capillary theory, hydrophilic nature of geotextile, $\cos\theta$, was determined by experiment, and then the pore size distribution of geotextile under different pressures could be obtained. ②Penetration method: based on the laminar flow theory, the ratio of flow resistance, x , was determined by experiment, and then the characteristic pore sizes of geotextile, O_{50} and O_{95} , could be obtained under different pressures. The two methods for measurement of pore size are of advantages of convenience, reliability and practicability.

Key word: geotextile; pore size; measurement

0 前 言

由高分子化学纤维构成的无纺土工织物具有良好的透水性和反滤作用, 以此代替传统的砂砾滤层, 不仅可以节省投资而且还能缩短施工周期。织物渗滤层设计及选用的重要依据是其透水能力和孔径大小, 有关孔径测量的方法较多^[1-6], 它们的测量原理、织物状态、存在问题如表1所示, 这些测量技术因方法本身的缺陷或因测量范围的局限尚不能满足测试要求, 目前仍以干筛法为国内外普遍采用, 我国则把干筛法列为国家测试标准和规范^[7-8]。

笔者从织物渗滤层使用出发曾提出受压无纺土工织物垂直渗透性测量技术^[9], 受压无纺土工织物孔径测量技术^[10], 这两方面的测量技术均系水利部科学基金关于“受压无纺土工织物水力特性和几何特性测量技术”项目的研究成果。本文则是该项研究成果并经适当补充的几何特性测量技术。

1 负压法测孔技术

采用负压法测量织物孔径分布其原理明确, 以水作为测孔介质既方便又无污染, 但要真正满足测量孔径要求还需要解决织物亲水性这一技术关键问题, 同时还需要建立包括加荷装置在内的高灵敏度测量系统, 使负压法测孔技术达到实际应用程度。

1.1 负压法测量织物孔径的原理

无纺土工织物是一种亲水性多孔介质, 水在孔隙中受到纤维表面吸附力和充水孔隙通道毛管力的作用, 形成水势, 为负压或吸力, 孔隙越小, 水势越低, 吸力越大, 持水性越强。织物厚度不大可忽略水在孔隙中的重力势作用, 当对饱和织物施加与织物吸力相等作用方向相反的某种压力, 则织物孔隙中吸力小于等于该压力的那部分孔隙水将被排出, 而吸力大于该

表 1 测试方法及其评价

Table 1 Different measurement methods and their comments

孔隙测量方法	测量原理	被测织物受压状态	方法存在的主要问题
干筛法	用标准砂组（或玻璃珠）在织物面上振筛，测量余筛量表示大于某孔径的孔隙比例（%）	无压	小于 0.06 mm 砂粒有静电吸附作用，砂粒淤堵孔眼，小颗粒可在大孔隙中通过，但方法简单
湿筛法	与干筛法基本相同，但振筛时在织物面上和标准砂上喷水，保持织物的砂样一定湿度	无压	由于水的表面张力堵塞现象比干筛严重，方法比较简单
动力水筛法	以织物为底其上放有砂样的滤框，用一定旋转速度将其浸入水中再离开水面，对通过织物的砂样进行筛分	无压	操作比较复杂，试验时间太长，但试验条件比较接近织物实际运用条件
水银压入法	根据压力与孔径关系，测量某一压力下水银进入织物孔隙的数量，算出与压力相应的织物孔径所占的比例（%）	无压 有压	方法比较复杂，水银蒸气对人体有害，小于 0.08 mm 孔径测量偏低
负压排水法	根据压力与孔径关系，测量某一负压下织物排水的水量，算出与负压相应的织物孔径所占的比例（%）	无压 有压	方法简单，对织物全亲水性假定尚需论证，有待进一步研究
单元体丝体结构模型法	单元体丝体结构受压发生平移和弯曲形变，求出孔径相对变化，用受压前后单元体孔径的变化率作为受压织物孔径计算的参数	有压	用参数计算受压织物孔径比较方便，但仍依赖于无压时织物孔眼测量结果。
计算法	根据织物的孔隙率和渗透系数，借助于非粘性土孔隙直径计算公式进行织物平均孔径计算	无压 有压	织物孔隙与非粘性土孔隙性状并不相同，计算织物平均孔径的方法缺乏考证
图像分析法	光线从织物孔眼穿过被相机捕捉形成光斑图像，输入计算机屏幕显示统计分析得到孔眼分布曲线	无压 有压	投影面上孔隙分布无法反映织物内部四通八达的结构，组织愈厚测孔偏小愈明显

压力的其它孔隙水仍保持在孔隙中，这就形成织物的孔隙、水势（即吸力）、持水量相互对应关系，这种对应关系即为织物孔径测量的基本原理。

利用织物孔隙、水势（或吸力）、持水量相互对应关系可寻求在某一水势（或吸力）下织物的孔径和小于等于该孔径的孔隙量的计算。

(1) 织物孔径计算

织物孔隙为不规则形状，按等值面积法将织物不规则孔隙折算成平直的圆形毛管，其水势（或吸力）与实际织物孔隙中的水势相同，折算后的圆形毛管直径称为当量（或等效）孔径。根据毛管理论，等效孔径 D 的计算，

$$D = \cos\theta \frac{4\sigma}{(-\psi)} = \cos\theta \frac{4\sigma}{S_m} \quad , \quad (1)$$

式中， σ 为水的表面张力（N/m）， ψ 或 S_m 为水势或吸力（kPa）， θ 为毛管水边界角。

对式（1）的应用，由于水的表面张力在常温下变化不大，可取 $\sigma=75\times10^{-3}$ N/m,而边界角 θ 的取值取决于高分子化纤丝体的亲水程度，若丝体完全亲水，则 $\theta=0^\circ$ ， $\cos\theta=1$ ，若丝体不完全亲水，则 $\theta\neq0^\circ$ ， $0<\cos\theta<1$ ，按这两种情况式（1）可写为

$$D^* = \frac{0.3}{(-\psi)} = \frac{0.3}{S_m} \quad , \quad (2)$$

$$D = \cos\theta \frac{0.3}{(-\psi)} = \cos\theta \frac{0.3}{S_m} \quad . \quad (3)$$

对应着某一水势（或吸力）的织物孔径计算，还有待本文对 $\cos\theta$ 值的确定。

(2) 织物孔隙量计算

某一水势（或吸力）织物持水的孔隙体积占总孔隙体积的比例，表示在该水势（或吸力）下小于等于某一孔径的孔隙含量，其计算为

$$\varepsilon_i = \frac{g_w - g_m}{ND_p S n \gamma_w} \quad , \quad (4)$$

式中， ε_i 为小于等于某一孔径的孔隙含量， g_m 为织物试样干重， g_w 为某一水势(或吸力)下织物试样湿重， S 为织物试样面积， D_p 为一块织物试样在压力 P 作用下的厚度， N 为织物试样块数， n 为织物孔隙率， γ_w 为水的比重。

1.2 负压法测孔仪的设计

负压法测量织物孔径分布的仪器总体设计由石英砂吸力平板装置和织物试样装置组成，如图 1 所示，这两个装置扼要介绍如下。

(1) 石英砂吸力平板装置

石英砂吸力平板装置为南京土壤研究所仿制英国专用于测量土壤孔隙的装置。该装置由石英砂浴、水位瓶、供水瓶、沉淀瓶 4 个部件组成，并用橡皮管及开关联成整体。供水瓶及开关 K_1 为保持砂浴内经常充

水而设置,沉淀瓶及开关 K_4 为真空排除石英砂中气体而设置,当关闭 K_1 及 K_4 , 打开 K_2 及 K_3 时,石英砂浴、沉淀瓶、水位瓶之间因水力联系而处于工作状态。

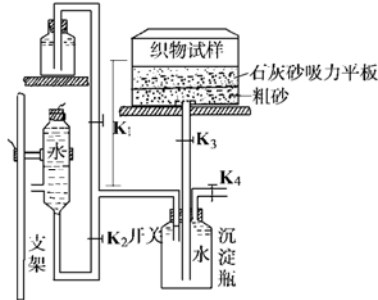


图1 石英砂吸力平板装置示意图

Fig. 1 Suction device for quartz sand

水位瓶上排水(进气)嘴中心线到土工织物试样中心线的垂直距离为水柱高 h 即为吸力 S_m 。当饱和后的织物试样放入砂浴后,织物水势小于水柱高 h 吸力的那部分孔隙水经排水嘴排出,而水势大于水柱高 h 吸力的其它孔隙水仍保持不变;相反,若织物的水势大于水柱高 h 吸力时,进气嘴进入空气,水位瓶中的水补给织物试样,直至织物的水势等于水柱高 h 的吸力为止。

石英砂浴中的石英砂粒吸力为 0~15 kPa 配制,这表明吸力水头 h 的调节范围为 0~150 cm 高度。

(2) 织物试样装置

织物试样装置如图2所示,它由凸形部件和凹形部件组成。

该装置设计要领如下:①透水石采用 320 目规格,它可测到织物最小孔径 0.005 mm;②凸形部件直接放置在直径为 8 cm 的织物试样上,织物受到标准压力(0.002 MPa)的作用;③采用 4 个对栓螺丝调节受压织物厚度,并用两个部件表面之间的距离 L 控制, L 的计算是

$$L = ND_p + (L_2 + L_3) - L_1, \quad (5)$$

式中, D_p 为单块织物在 P 压力下的厚度, N 为织物试样块数。本设计 $L_1 = L_2 = 9.0$ mm, $L_3 = 7.0$ mm, 将这些值代入式(5)得到试验织物厚度控制的表达式,

$$L = ND_p + 7.0. \quad (6)$$



图2 织物试样装置示意图

Fig. 2 Disposition of geotextile specimen in test

1.3 负压法测孔仪的使用

(1) 试验前准备

a) 检查石英砂吸力平板装置功能

经过真空排气的石英砂被水饱和,仪器处于工作状态,但经过较长时间试验,织物中的水分渗入石英砂中或多或少地释放微量气体,以致石英砂中聚集气泡,造成仪器灵敏度下降或失效,一般在连续使用 2 个月以上须要对仪器进行一次真空排气。

b) 试验织物制样

选取有代表性无纺土工织物按织物试样装置的口径 80 mm 进行制样,经过称重和测量标准压力下织物厚度,挑选重量、厚度相同或差异很小的样块若干,其中 2 块做孔隙率试验,2 块做压缩试验,2 块或 4 块做孔径测量试验;另备置 2 块或 4 块做渗透试验,用于渗透法测孔技术研究。

(2) 测量步骤

将织物试样装入凹形部件进行真空饱和 4 h,将其放入砂浴,再把凸形部件置于织物试样上,盖好砂浴盖防止蒸发,进行标准压力下不同吸级的测试,织物在每一吸级下作用 24 h 后取样称重,精度为 0.01 g,并按式(4)计算某一吸级下织物孔隙水体积占总孔隙体积的比例 ε_i (%)。

织物受压条件下孔径测量步骤与标准压力下测量步骤大体相同,只是用螺栓控制不同压力下所对应的织物试样厚度。根据测量需要确定不同压级,而每级压力条件下的吸力宜采用 0.3、0.5、1.5、2.0、3.0、6.0、10.0 kPa 等吸级,有利于孔眼分布曲线绘制和孔眼特征值 O_{95} , O_{50} 的确定。

(3) 孔径计算

用负压法测孔仪测量仅得到每一级吸力下织物孔隙水体积占总孔隙体积的比例,还需要用试验吸力 S_m 通过式(3)计算孔径大小,才能绘制孔径分布曲线,而式(3)计算有待于 $\cos\theta$ 值的确定。

1.4 无纺土工织物 $\cos\theta$ 值的确定

无纺土工织物是一种亲水性多孔介质,根据毛细管理论,织物的毛细管水平平均上升高度 H 与平均孔径 d_{cp} 的关系是

$$\bar{H} = \cos\theta \frac{0.3}{d_{cp}\gamma_w}, \quad (7)$$

式中, γ_w 为水的比重,平均孔径 d_{cp} 在数值上等于负压法并令 $\cos\theta=1$ 时的 O_{50}^* ,即 d_{cp} 可用 O_{50}^* 代替;毛细管水饱和和上升高度很小,平均上升高度 H 可用毛细管水最大上升高度 H_{max} 的一半,即 $H=H_{max}/2$ 。因此上式可写为

$$\cos\theta = \frac{H_{max} O_{50}^* \gamma_w}{0.6}. \quad (8)$$

式(8)表明, $\cos\theta$ 值的确定可通过织物由湿到干负压排水试验和由于干到湿毛细管水上升试验,求得

表 2 几种类型织物的 $\cos\theta$ 值
Table 2 Values of $\cos\theta$ for different types of geotextile

编号	产地	织物类型			织物规格			标准压力下			平均值	
		名称	含涤量/%	含丙量/%	单位面积质量/(g·m ⁻²)	厚度/mm	单丝组/旦	O_{50}^* /mm	$H_{\max}$ /cm	$\cos\theta$	$\cos\theta$	θ
1	石家庄	涤纶	100	—	299	2.29	6	0.16	4.2	0.1120	0.1192	83° 09′
2	石家庄	涤纶	100	—	318	2.44	6	0.17	4.1	0.1162		
3	石家庄	涤纶	100	—	633	3.96	6	0.17	4.0	0.1133		
4	辽阳	涤纶	100	—	262	2.91	6	0.23	3.0	0.1150		
5	辽阳	涤纶	100	—	420	3.89	6	0.24	2.9	0.1160		
6	辽阳	涤纶	100	—	471	3.89	6	0.22	3.5	0.1283		
7	辽阳	涤纶	100	—	478	4.00	6	0.22	3.5	0.1283		
8	桐乡	涤纶	100	—	454	2.81	4	0.20	3.5	0.1167	0.1383	82° 03′
9	扬中	涤纶	100	—	490	3.07	3	0.18	3.9	0.1170		
10	蚌埠	涤纶	100	—	343	2.72	1.5	0.16	4.5	0.1200		
11	上海	丙纶	—	100	627	5.30	6	0.28	2.8	0.1307		
12	淄博	丙纶	—	100	450	4.82	6	0.19	5.0	0.1583		
13	扬中	丙纶	—	100	349	3.83	4	0.28	2.7	0.1260		
14	石家庄	涤丙	75	25	603	4.70	6	0.20	3.9	0.1300	0.1341	82° 18′
15	石家庄	涤丙	75	25	495	4.02	6	0.23	3.4	0.1303		
16	石家庄	涤丙	75	25	432	4.07	6	0.26	3.3	0.1430		
17	石家庄	涤丙	75	25	374	3.40	6	0.26	3.2	0.1387		
18	石家庄	涤丙	75	25	305	3.77	6	0.24	3.3	0.1320		
19	石家庄	涤丙	75	25	289	3.10	6	0.29	2.7	0.1305		
20	上海	涤丙	50	50	511	4.56	5	0.23	3.5	0.1342		
21	上海	涤丙	50	50	469	3.41	6	0.20	4.0	0.1333	0.1351	82° 14′
22	上海	涤丙	50	50	405	3.45	6	0.23	3.6	0.1380		
23	仪征	涤丙	50	50	477	2.86	涤 2.5 丙 3	0.15	5.3	0.1325		
24	仪征	涤丙	50	50	400	2.66		0.15	5.5	0.1375		

注：23、24 号织物为热定型。

O_{50}^* 和 $H_{\max}$ 这两个参数计算 $\cos\theta$ 值的大小。试样采用国产涤纶、丙纶、涤丙混合 3 大类型不同规格的织物，它们的 $\cos\theta$ 值测试结果如表 2 所示。表 2 资料表明：

(1) 涤纶、丙纶、涤丙混合 3 大类型土工织物亲水性较大且比较接近，其边界角约为 82°~83°（它与粘性土的边界角几乎相同）， $\cos\theta$ 值约为 0.12~0.14。

(2) 涤纶织物的 $\cos\theta$ 平均值为 0.12，丙纶织物，涤丙织物的 $\cos\theta$ 值相当接近，它们的 $\cos\theta$ 平均值为 0.14，因而式（3）的计算可写为

$$D = \frac{0.036}{S_m} = 0.12D^* \text{ (适用涤纶织物)} \quad , \quad (9)$$

$$D = \frac{0.042}{S_m} = 0.14D^* \text{ (适用丙纶、涤丙混合织物)} \quad 。 \quad (10)$$

1.5 负压法测孔结果及其比较

用负压法测量的不同受压条件下织物的孔隙分布如图 3、4 所示，标准压力 and 不同压力下测量的 O_{50} 、 O_{95} 列入表 3、4，并用部分织物在标准压力下测量的 O_{95} 和零压力下干筛法测量的 O_{95} 列入表 5 进行比较，

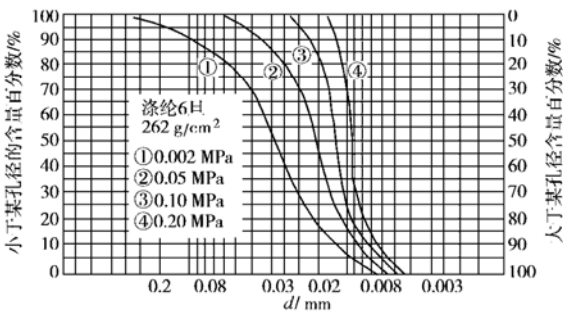


图 3 4 号织物不同压力下孔隙分布曲线

Fig. 3 Distribution of pore size for geotextile No.4 under different pressures

这些图表资料表明：

(1) 织物不同规格和生产质量的差异，特别是织物的均匀程度和厚度的不同对其孔隙分布有一定的影响。在标准压力下的 O_{50} 一般在 0.019~0.034 mm，但大多数织物的 O_{50} 在 0.02~0.03 mm 内变化；在标准压力下的 O_{95} 一般在 0.096~0.137 mm，但大多数织物的

表 3 标准压力下负压法测试织物的 O_{50} 、 O_{95} 值

Table 3 Values of O_{50} and O_{90} for several types of geotextile under standard pressure obtained by the negative pressure method

编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	标准压力下		编号	织物类型	重量/(g·m ⁻²)	标准压力下	
			O_{50}/mm	O_{95}/mm				O_{50}/mm	O_{95}/mm
1	涤纶	299	0.019	0.118	13	丙纶	349	0.039	0.126
2	涤纶	318	0.020	0.118	14	涤丙	603	0.028	0.112
3	涤纶	633	0.020	0.104	15	涤丙	495	0.032	0.112
4	涤纶	262	0.028	0.132	16	涤丙	432	0.036	0.137
5	涤纶	420	0.029	0.112	17	涤丙	374	0.036	0.119
6	涤纶	471	0.026	0.098	18	涤丙	305	0.034	0.123
7	涤纶	478	0.026	0.098	19	涤丙	289	0.041	0.125
8	涤纶	454	0.024	0.098	20	涤丙	511	0.032	0.123
9	涤纶	490	0.022	0.106	21	涤丙	469	0.028	0.137
10	涤纶	343	0.019	0.096	22	涤丙	405	0.032	0.113
11	丙纶	627	0.039	0.125	23	涤丙	477	0.021	0.105
12	丙纶	450	0.027	0.112	24	涤丙	400	0.021	0.111

表 4 不同压力下负压法测试织物的 O_{50} 、 O_{95} 值

Table 4 Values of O_{50} and O_{90} for several types of geotextile under different pressures obtained by the negative pressure method

编号	单位面积质量/(g·m ⁻²)	不同压力下							
		0.002 MPa		0.05 MPa		0.10 MPa		0.20 MPa	
		O_{50}/mm	O_{95}/mm	O_{50}/mm	O_{95}/mm	O_{50}/mm	O_{95}/mm	O_{50}/mm	O_{95}/mm
1	299	0.019	0.118	0.014	0.034	0.011	0.019	0.009	0.013
2	318	0.020	0.118	0.010	0.026	0.009	0.017	0.008	0.014
3	633	0.020	0.104	0.014	0.035	0.011	0.022	0.009	0.015
4	262	0.028	0.132	0.014	0.044	0.011	0.019	0.009	0.012

表 5 负压法干筛法测试 O_{95} 比较

Table 5 Comparison of the results obtained by the negative pressure method and dry screen method

编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	负压法	干筛法	编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	负压法	干筛法
			O_{95}/mm	O_{95}/mm				O_{95}/mm	O_{95}/mm
1	涤纶	299	0.118	0.128	5	涤纶	420	0.112	0.122
2	涤纶	318	0.118	0.125	6	涤纶	471	0.098	0.102
3	涤纶	633	0.104	0.103	7	涤纶	478	0.098	0.100
4	涤纶	262	0.132	0.125	8	涤纶	454	0.098	0.096

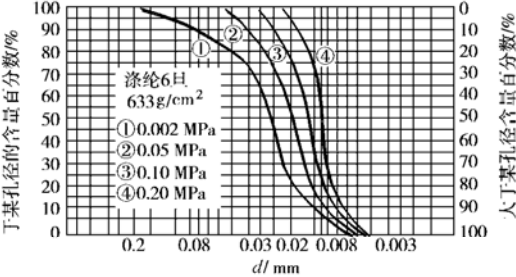


图 4 3 号织物不同压力下孔隙分布曲线

Fig. 4 Distribution of pore size for geotextile No.3 under different pressures

O_{95} 在 0.1 mm 左右。

(2) 受压织物的孔隙随厚度减小而减小，孔隙变化的总趋势：随着压力增大大孔隙含量明显减小，小孔隙含量有所增加。这种变化又随着压级逐步增大而相对减弱，其孔隙分布曲线斜率愈来愈小，当压力增加到 0.2 MPa 时不同规格织物孔隙分布趋向一致。

(3) 应承认零压力下干筛法能基本上正确反映织物的 O_{95} 值，而标准压力下负压法测量的 O_{95} 值与零压力下干筛法测量的 O_{95} 值相当一致，这表明负压法具有相同的测孔效果，但负压法能测量不同压力下孔隙分布而优于干筛法。

2 渗透法测孔技术

利用渗透试验测量无纺土工织物孔径宜称为渗透法，因为这称呼尚能反应试验手段。本节将讨论这种方法计算织物特征孔径 O_{50} 、 O_{95} ，以此发展渗透法测孔技术使之达到实际应用程度。

2.1 渗透法测孔技术回顾和评析

研究者直接用伊斯托米娜关于“非粘性土孔隙的平均直径”的公式计算织物的平均孔径，当渗透试验获得渗透系数 k_t ，计算得到孔隙率 n 这两个参数时，

织物的平均孔径 d_{cp} (即 O_{50}) 的计算,

$$\left. \begin{aligned} d_{cp} &= \sqrt{\frac{96\nu_t k_t}{gn'}}, \\ n' &= n(1 - 0.114 \frac{1-n}{n}), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, ν_t 为 $t^\circ\text{C}$ 下水的运动粘滞系数, g 为重力加速度, n' 为有效孔隙率。直接引用伊氏公式计算织物平均孔径 $d_{cp}(=O_{50})$ 尚无论证。

(1) 伊氏的平均孔径计算是在大孔隙充填小颗粒状态下推估孔隙通道面积与平直园管面积之比例为 2.5~3 倍时, 通过管道层流公式并采用面积比为 3 倍而建立的^[11], 但实际丝体交织, 孔隙率很大, 丝体交织不可能也与粘土颗粒堆积相同。

(2) 由于织物孔隙率很大算得的有效孔隙率并未明显减小, 如 $n=0.9$, 其 $n'=0.8856$, 直接采用织物孔隙率作为平均孔径计算的参数, 这可简化计算手续又不影响计算精度。

2.2 渗透法的平均孔径计算

从织物丝体摊铺针刺生产流程和从织物具有大孔隙率特点来看, 织物丝体交织既有接触点又有非接触点状态, 即形成无规则又类似“桁架式”孔隙通道状态, 这种四通八达的通道采用“通道面积比”的方法寻求织物平均孔径计算并不现实, 但可根据管道层流原理, 利用测试手段估算织物孔隙通道的水流阻力比

x 寻求平均孔径计算,

$$d_{cp} = \sqrt{\frac{32x^2\nu_t k_t}{ng}} = xd'_{cp} \quad (12)$$

式 (12) 表明, 织物孔隙通道水流阻力比 x 可采用渗透试验资料计算 d'_{cp} 和采用负压法测孔径资料获得 $O_{50}(=d_{cp})$ 这两个参数进行计算。标准压力 and 不同压力下的 x 值列入表 6, 7, 由此看出: 具有大孔隙率的织物, 在四通八达的孔隙体系下丝体对水流的阻力要比与孔隙尺寸相当的平直园管对水流的阻力小得多, 在标准压力下 24 种 (组) 织物的 x 值趋于一致, 平均为 0.048, 而受压 (0.05~0.2 MPa) 的 4 种织物 12 组的 x 值亦趋于一致, 平均为 0.095, 它比标准压力下的 x 值约大 2 倍。笔者注意到受压织物变形随压力增大而相对减弱, 丝体交织 (孔隙系统) 趋向相对稳定, 并相对保持较大孔隙特点亦是受压织物水流阻力比趋于一致的因素。将平均 x 值代入式 (12) 得到织物平均孔径的近似计算,

$$d_{cp} = O_{50} = \sqrt{\frac{0.074\nu_t k_t}{ng}} \text{ (标准压力)}, \quad (13)$$

$$d_{cp} = O_{50} = \sqrt{\frac{0.289\nu_t k_t}{ng}} \text{ (受压)} \quad (14)$$

2.3 渗透法的有效孔径 O_{95} 计算

通常把织物的 O_{95} 称为有效孔径, 并以 O_{95} 作为

表 6 标准压力下几种类型织物水流阻力比 x 值

Table 6 Flow resistance ratio x under standard pressure for several types of geotextile

编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	垂直渗透试验			负压法	$x=O_{50}/d'_{cp}$
			n	$K_{10}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	D'_{cp}/mm	$O_{50}=d_{cp}/\text{mm}$	
1	涤纶	299	0.9054	4.49×10^{-2}	0.402	0.019	0.0473
2	涤纶	318	0.9056	4.49×10^{-2}	0.402	0.020	0.0498
3	涤纶	633	0.8842	5.70×10^{-2}	0.459	0.020	0.0436
4	涤纶	262	0.9348	1.05×10^{-1}	0.606	0.028	0.0462
5	涤纶	420	0.9218	9.75×10^{-2}	0.588	0.029	0.0493
6	涤纶	471	0.9123	9.70×10^{-2}	0.589	0.026	0.0441
7	涤纶	478	0.9134	9.80×10^{-2}	0.592	0.026	0.0439
8	涤纶	454	0.8829	1.08×10^{-1}	0.632	0.024	0.0380
9	涤纶	490	0.8843	7.10×10^{-2}	0.512	0.022	0.0430
10	涤纶	434	0.9086	5.89×10^{-2}	0.460	0.019	0.0413
11	丙纶	627	0.8700	1.33×10^{-1}	0.707	0.039	0.0552
12	丙纶	450	0.8974	1.15×10^{-1}	0.647	0.027	0.0417
13	丙纶	349	0.8999	2.04×10^{-1}	0.860	0.039	0.0453
14	涤、丙	603	0.8984	5.20×10^{-2}	0.435	0.028	0.0644
15	涤、丙	495	0.9025	7.18×10^{-2}	0.510	0.032	0.0627
16	涤、丙	432	0.9159	8.99×10^{-2}	0.566	0.036	0.0636
17	涤、丙	374	0.9129	2.01×10^{-1}	0.848	0.036	0.0425
18	涤、丙	305	0.9359	1.31×10^{-1}	0.676	0.034	0.0503
19	涤、丙	289	0.9262	1.87×10^{-1}	0.812	0.041	0.0505
20	涤、丙	511	0.9021	1.47×10^{-1}	0.729	0.032	0.0439
21	涤、丙	496	0.8799	1.19×10^{-1}	0.665	0.028	0.0421
22	涤、丙	405	0.8975	1.42×10^{-1}	0.719	0.032	0.0445
23	涤、丙	477	0.8543	4.67×10^{-2}	0.422	0.021	0.0498
24	涤、丙	400	0.8687	5.00×10^{-2}	0.434	0.021	0.0484

表 7 不同压力下几种规格涤纶织物水流阻力比 x 值

Table 7 Flow resistance ratio x under different pressures for several types of geotextile

编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	压力/MPa	垂直渗透试验				$x=O_{50}/d'_{cp}$
				n	$K_{10}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	d'_{cp}/mm	$O_{50}=d'_{cp}/\text{mm}$	
1	涤纶	299	0.002	0.9054	4.49×10^{-2}	0.402	0.019	0.0473
			0.05	0.8554	5.10×10^{-3}	0.140	0.014	0.1000
			0.10	0.8265	3.75×10^{-3}	0.122	0.011	0.0902
			0.20	0.7895	2.51×10^{-3}	0.102	0.009	0.0882
			0.002	0.9056	4.50×10^{-2}	0.403	0.020	0.0496
2	涤纶	318	0.05	0.8376	3.49×10^{-3}	0.117	0.010	0.0855
			0.10	0.8011	2.59×10^{-3}	0.103	0.009	0.0874
			0.20	0.7546	1.99×10^{-3}	0.093	0.008	0.0860
			0.002	0.8840	5.70×10^{-2}	0.459	0.020	0.0436
			0.05	0.8314	3.90×10^{-3}	0.124	0.014	0.1129
3	涤纶	633	0.10	0.8030	2.48×10^{-3}	0.100	0.011	0.1100
			0.20	0.7646	2.29×10^{-3}	0.099	0.009	0.0909
			0.002	0.9348	1.05×10^{-1}	0.606	0.028	0.0462
			0.05	0.8665	5.40×10^{-3}	0.143	0.014	0.0979
			0.10	0.8261	3.19×10^{-3}	0.112	0.011	0.0982
4	涤纶	262	0.20	0.7822	2.36×10^{-3}	0.099	0.009	0.0909

表 8 标准压力下渗透法、负压法、干筛法测试 O_{50} 、 O_{95} 比较

Table 8 Comparison of O_{50} and O_{90} under standard pressure obtained by the negative pressure method, the penetration method and dry screen method

编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	孔隙率 n	渗透系数 $K_{10}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	在标准压力下（渗透法负压法）或零压力下（干筛法）				
					O_{50}/mm		O_{95}/mm		干筛法
					渗透法	负压法	渗透法	负压法	
1	涤纶	299	0.9054	4.49×10^{-2}	0.019	0.019	0.106	0.118	0.128
2	涤纶	318	0.9056	4.49×10^{-2}	0.020	0.020	0.106	0.118	0.125
3	涤纶	633	0.8842	5.70×10^{-2}	0.022	0.020	0.109	0.104	0.103
4	涤纶	262	0.9348	1.05×10^{-2}	0.029	0.028	0.116	0.132	0.125
5	涤纶	420	0.9218	9.75×10^{-2}	0.028	0.029	0.115	0.112	0.122
6	涤纶	471	0.9123	9.70×10^{-2}	0.028	0.026	0.115	0.098	0.102
7	涤纶	478	0.9134	9.80×10^{-2}	0.029	0.026	0.115	0.098	0.100
8	涤纶	454	0.8829	1.08×10^{-2}	0.030	0.024	0.117	0.098	0.096
9	涤纶	490	0.8843	5.89×10^{-2}	0.025	0.022	0.111	0.106	
10	涤纶	343	0.9086	7.10×10^{-2}	0.022	0.019	0.109	0.096	
11	丙纶	627	0.8700	1.33×10^{-1}	0.034	0.039	0.121	0.125	
12	丙纶	450	0.8974	1.15×10^{-1}	0.031	0.027	0.118	0.112	
13	丙纶	349	0.8999	2.02×10^{-1}	0.041	0.039	0.128	0.126	
14	涤、丙	603	0.8984	5.20×10^{-2}	0.021	0.028	0.108	0.112	
15	涤、丙	495	0.9025	7.18×10^{-2}	0.025	0.032	0.111	0.112	
16	涤、丙	432	0.9159	8.99×10^{-2}	0.027	0.036	0.114	0.137	
17	涤、丙	374	0.9129	2.01×10^{-1}	0.040	0.036	0.127	0.119	
18	涤、丙	305	0.9359	1.31×10^{-1}	0.033	0.034	0.119	0.123	
19	涤、丙	289	0.9262	1.87×10^{-1}	0.039	0.041	0.126	0.125	
20	涤、丙	511	0.9021	1.47×10^{-1}	0.035	0.032	0.122	0.123	
21	涤、丙	469	0.8799	1.19×10^{-1}	0.032	0.028	0.119	0.137	
22	涤、丙	405	0.8975	1.42×10^{-1}	0.035	0.032	0.121	0.113	
23	涤、丙	477	0.8543	4.67×10^{-2}	0.020	0.021	0.107	0.105	
24	涤、丙	400	0.8687	5.00×10^{-2}	0.021	0.021	0.107	0.111	

织物渗滤层设计的重要依据。本节在 d_{cp} 计算基础上进一步讨论 O_{95} 的计算。设 O_{95} 至 d_{cp} 的孔径差为 ΔO_{95-50} ，则 O_{95} 的计算

$$O_{95} = \sqrt{\frac{0.074v_t k_t}{ng}} + \Delta O_{95-50}(\text{标准压力}) \text{ , } \quad (15)$$

$$O_{95} = \sqrt{\frac{0.289v_t k_t}{ng}} + \Delta O_{95-50}(\text{受压}) \text{ . } \quad (16)$$

考察负压法测量孔径分布结果，发现各种织物在同一压力下 ΔO_{95-50} 大体相同，也就是 ΔO_{95-50} 值的大小主要取决于织物受压条件而与织物类别无明显关系，这一发现为渗透法计算 O_{95} 提供方便。根据负压法测

表 9 不同压力下渗透法负压法试验 O_{50} 、 O_{95} 比较

Table 9 Comparison of O_{50} and O_{90} under different pressures by the negative pressure method, penetration method and dry screen method									
编号	织物类型	单位面积质量/(g·m ⁻²)	压力/MPa	孔隙率 n	渗透系数 $K_{10}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	不同压力下			
						O_{50}/mm		O_{95}/mm	
						渗透法	负压法	渗透法	负压法
1	涤纶	299	0.002	0.9054	4.49×10^{-2}	0.019	0.019	0.106(0.107)	0.118
			0.050	0.8554	5.10×10^{-2}	0.013	0.014	0.035(0.031)	0.034
			0.100	0.8265	3.75×10^{-3}	0.012	0.011	0.020(0.022)	0.019
			0.200	0.7895	2.51×10^{-3}	0.010	0.009	0.014(0.015)	0.013
2	涤纶	318	0.002	0.9056	4.45×10^{-2}	0.019	0.020	0.106(0.107)	0.118
			0.050	0.8376	3.49×10^{-3}	0.011	0.010	0.033(0.029)	0.026
			0.100	0.8011	2.59×10^{-3}	0.010	0.009	0.018(0.020)	0.017
			0.200	0.7546	1.99×10^{-3}	0.009	0.008	0.014(0.014)	0.014
3	涤纶	633	0.002	0.8840	5.70×10^{-2}	0.022	0.020	0.109(0.110)	0.104
			0.050	0.8318	3.90×10^{-3}	0.012	0.014	0.034(0.030)	0.035
			0.100	0.8030	2.48×10^{-3}	0.010	0.011	0.018(0.020)	0.022
			0.200	0.7646	2.29×10^{-3}	0.010	0.009	0.014(0.015)	0.015
4	涤纶	262	0.002	0.9348	1.05×10^{-1}	0.029	0.028	0.116(0.117)	0.132
			0.050	0.8665	5.40×10^{-3}	0.013	0.014	0.035(0.031)	0.044
			0.100	0.8261	3.19×10^{-3}	0.011	0.011	0.019(0.021)	0.019
			0.200	0.7822	2.36×10^{-3}	0.10	0.009	0.014(0.015)	0.012

表 10 两种测试方法测量 $\cos\theta$ 值比较

Table 10 Comparison of $\cos\theta$ under standard pressure measured by use of two measurement methods							
编号	织物类型	试验组	压力/MPa	测试结果			
				负压排水法毛管水上升法		负压排水法渗透试验法	
				$\cos\theta$	θ	$\cos\theta$	θ
1-10	涤纶	10	0.002	0.1192	83° 09′	0.1288	82° 36′
11-13	丙纶	3		0.1383	82° 03′	0.1437	81° 45′
14-19	涤纶	6		0.1341	82° 18′	0.1239	82° 53′
20-24	涤纶	5		0.1351	82° 14′	0.1475	81° 31′

孔成果,不同压力下对应的 ΔO_{95-50} 的平均值用图 5 表示,它可作为某种压力式(15), (16)的计算。图 5 曲线为双曲线型,并可求得 ΔO_{95-50} 计算的经验公式,

$$\Delta O_{95-50} = \frac{1.05}{P+10} \quad , \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得到任一压力下织物 O_{95} 的经验计算,

$$O_{95} = \sqrt{\frac{0.289v_t k_t}{ng}} + \frac{1.05}{P+10} \quad (\text{受压}) \quad 。 \quad (18)$$

2.4 渗透法测量 O_{95} 、 O_{50} 结果及其比较

(1) 标准压力下渗透法、负压法测量结果和零压力下干筛法测量结果同列表 8,表中未列入零压力下干筛法测孔 O_{50} ,因为小颗粒可在大孔隙中通过, O_{50} 值并不可靠。统观表 8 中 2 种测孔方法测量的 O_{50} 或 3 种测孔方法测量的 O_{95} 都相当接近, O_{50} 最大相差为 0.009 mm,一般相差为 0.001~0.003 mm, O_{95} 最大相差为 0.022 mm,一般相差为 0.003~0.010 mm。

(2) 不同压力下渗透法和负压法测量结果同列表 9,表内渗透法测量 O_{95} 括号中的数值是式(18)计算结果,即式中 ΔO_{95-50} 是式(17)计算,没有括号的数

值是式(16)计算结果,即 ΔO_{95-50} 是采用负压法(参见图 5)测量结果。统观表 9 中 2 种测孔方法测量的 O_{50} 或 O_{95} 亦相当一致, O_{50} 最大相差为 0.002mm,一般相差为 0~0.001 mm, O_{95} 最大相差为 0.015 mm,一般为 0~0.005 mm。

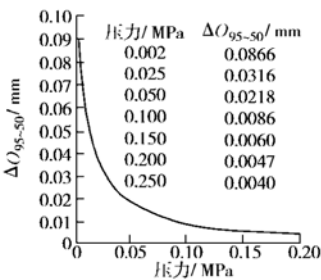


图 5 涤纶织物 ΔO_{95-50} 与压力关系曲线

Fig. 5 Relationship between ΔO_{95-50} of polyester geotextile and pressure

2.5 渗透法测孔技术评价

令式(3) $D=O_{50}=d_{cp}$, $D^*=O_{50}^*$, 则式(3)可写为

$$d_{cp}=\cos\theta O_{50}^* \quad , \quad (19)$$

式(19)表明, $\cos\theta$ 值的确定亦可通过织物渗透法和负压法试验求得。现将本法求得的 $\cos\theta$ 值和边界角 θ

值列入表 10, 由此 $\cos\theta$ 值确定得到佐证。

渗透法只能测量织物孔径 O_{50} 和 O_{95} , 测量结果与负压法, 干筛法测量结果几乎相同。该法采用不同压力下渗透试验一举获得相应压力下织物的渗透系数 k 和孔径 O_{50} , O_{95} , 这对于满足织物渗滤层设计指标来说, 显示出该法简单适用的优点。

3 结 论

(1) 无纺土工织物孔隙大小是工程应用的重要指标, 本文研究提出无纺土工织物的负压法和渗透法测孔技术, 已满足我国土工织物开发和工程应用的需要。

(2) 无纺土工织物是一种非完全亲水性物质, $\cos\theta$ 值的确定是负压法测孔技术关键, 用负压法测量 (令 $\cos\theta=1$) O_{50} 值和毛管水上升高度试验测量 $H_{\max}$ 值求得涤纶织物 $\cos\theta=0.12$, 丙纶、涤丙混合物 $\cos\theta=0.14$, 获得织物的 $\cos\theta$ 值使负压法测孔技术达到实际应用程度。标准压力下负压法 O_{95} 与零压力下干筛法测孔 O_{95} 相当吻合, 这表明负压法测孔效果与干筛法测孔一致, 但负压法能正确测量不同压力下织物孔隙分布要比干筛法优越。

(3) 渗透法作为一种测孔技术被提出, 该法根据管道层流原理, 利用测试手段估算织物孔隙通道的水流阻力比 x 寻求孔径 O_{50} 的计算, 在此基础上并利用测试手段估算织物孔径 O_{50} 至 O_{95} 增量 ΔO_{95-50} 寻求孔径 O_{95} 的计算。此法测孔技术是用不同压力下渗透试验一举获得相应压力下的织物渗透系数 k 和孔径 O_{50} , O_{95} , 其孔径测量效果与负压法、干筛法测孔一致, 方法简单省时, 可靠, 但它不能测量孔隙分布曲线不如负压法, 而它能测量不同压力下 O_{50} , O_{95} 又比干筛法更为适用。

(4) 本文提出受压无纺土工织物的负压法、渗透法测孔技术, 其方法简单, 原理明确, 使用方便, 测量可靠, 通用性强, 为我国测量技术选用提供了条件。

参考文献:

- [1] WANG H Q, et al. A method of measuring pore size in nonwoven needle geotextiles[C]// 5th International Conference Geotextiles Geomembranes and Related Products, 1994.
- [2] BHATIA S K, et al. Interrelationship between pore openings of geotextiles and methods of evaluation[C]// 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes Related Products, 1994.
- [3] HUANG Y-F, et al. Fractal geometry and fractal structure of non-woven needle geotextiles[C]// 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products, 1994.
- [4] 王 钊. 国外土工合成材料的应用研究[M]. 香港: 现代知识出版社, 2002. (WANG Zhao. Collection of papers abroad on researches and applications of geosynthetics[M]. Hong Kong: Modern Knowledge Press, 2002.)
- [5] 刘才良, 舒世馨. 土工织物孔隙分布的测定方法[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5). (LIU Cailiang, SHU Shi-xin. Measurement method of geotextile pore size[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(5).)
- [6] 吴凤彩. 受压无纺土工织物的孔眼及透水性和保砂性的计算[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(2). (WU Feng-cai. Calculations of pore size, permeability and retention for the geotextile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(2).)
- [7] GB/T14799-93 中华人民共和国国家标准[S]. (GB/T14799-93 Collection of standards of geosynthetics, National Standard of Peoples Republic of China, Measurement method of geotextile pore size, dry screen[S]. 1999.)
- [8] SL/T235-1999 土工合成材料测试规程[S]. (SL/T235-1999 Rules of measurement for geosynthetics, Industry Standard of Public Republic of China, Ministry of Water Resources[S]. 1999.)
- [9] 吴凤彩. 土工织物垂直渗透仪设计和使用[J]. 大坝观测与土工测试, 1992(4). (WU Feng-cai. Design and application of vertical permeameter for geotextile[J]. Dam Observation and Geotechnical test, 1992(4).)
- [10] 吴凤彩. 受压无纺土工织物孔径测量技术[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1994. (WU Feng-cai. Technique of measurement of geotextile pore size under different pressures [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994.)
- [11] Ц с т о м и н а э В С, Ф и г ъ т р а ц и о н н а я, у с т о й ч и в о с т ь э т р у н г о в, м о с к в а. 测试方法及其评价, 1957.