复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 6 期 12 月 2009 年
Vol. 26 No. 6 December 2009

文章编号：1000-3851(2009)06-0072-06

测试条件对集束纤维单向渗透率的影响

李 敏*，马晓星，王绍凯，张佐光
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100191）

摘 要： 为掌握渗透率测试的影响因素，自行研制了单向纤维集束的浸渗特性测试系统，对比了液体沿单向纤维集束的饱和与非饱和渗透特性，分析了不同压力作用形式、纤维体积分数、液体种类对非饱和渗透率测试结果的影响。结果表明：相同条件下纤维集束的饱和渗透率大于非饱和渗透率测试结果；当外压较小时毛细作用对非饱和渗透率测试结果的影响显著；当纤维体积分数增加时集束纤维的渗透率呈减小趋势；相同压力差下真空驱动测得的渗透率比正压驱动测试结果大。

关键词： 复合材料；渗透率；纤维集束；真空压；正压
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Permeability analysis of unidirectional fiber assembly under different testing conditions

LI Min*, MA Xiaoxing, WANG Shaokai, ZHANG Zuoguang
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An apparatus was designed and constructed capable of measuring the permeability of unidirectional fiber bundles. In order to analyse the axial permeation, saturated and unsaturated permeabilities were compared, and the influences of pressure type, fiber volume fraction and types of liquid on the unsaturated permeability were investigated. It is found that the saturated permeability is bigger than unsaturated permeability under the same test condition, and the influence of capillary force on unsaturated permeability reduces with increasing the external pressure. Besides, as the fiber volume fraction increases, the permeability declines and the permeability from the vacuum drive test is larger than that from the air drive test under the same pressure.

Keywords: composites; permeability; fiber bundles; vacuum pressure; air pressure

液体成型工艺具有制件精度高、工艺设备简单、制造成本低、适于制备大型复杂构件等特点，而且便于实现计算机辅助成型，成为航空航天先进复合材料结构的重要制造技术之一[1]。在液体成型工艺计算机模拟过程中，纤维渗透率是一个重要参数。渗透率是影响树脂流动状态的重要因素之一，反映了树脂在预成型体中流动的难易程度，主要受纤维种类、织物结构、铺层方式等因素影响。渗透率可通过建立数学模型计算得到[2-3]，然而，由于预成型体结构的复杂性，渗透率多通过实验研究结合理论模型计算获得[4]。因此，深入研究渗透率测试的影响因素对液体成型工艺的优化与高性能构件的研制具有重要意义。

树脂分别流过未浸润或已浸润的纤维体，测得的渗透率相应地称为非饱和渗透率和饱和渗透率。Ma[5]等考察了纤维增强体的饱和与非饱和渗透率，发现两者之间存在差异。并且由于毛细效应等影响，测试流体等因素对非饱和渗透率测试具有一定的影响[6]。Amico[7]和李敏[8]等分别考察了环氧树脂等对玻纤机织物和玻纤集束的毛细浸润特性，并分别基于 Darcy 定律和 Poiseuille 方程建立了浸润流动模型，并确定了渗透率。Ahn[9]等考察了正压驱动下液体在平纹织物内渗透的渗透率与毛细压力。

本文中重点研究了纤维集束方向的渗透率测试影响因素，考察饱和与非饱和渗透率测试结果的差异，研究不同压力驱动方式、纤维体积分数、液体种类对渗透率测试结果的影响规律。研究结果对复

收稿日期： 2008-10-16；**收修改稿日期：** 2009-02-18
基金项目： 航天支撑技术基金项目；航空科学基金项目(2008ZE51072)
通讯作者： 李 敏，副教授，从事先进树脂基复合材料的研究 E-mail：Leemy@buaa.edu.cn

合材料液体成型工艺的模拟与优化具有指导意义。

1　实　验

1.1　实验材料

实验用纤维：S－2 玻璃纤维(南京玻璃纤维研究设计院)；实验用液体：二甲基硅油(北京化工试剂公司)、丙三醇(北京化工试剂公司)。

1.2　实验方法

纤维集束毛细浸润实验采用本实验室研制的 BH3152W01 型浸润测试系统[10]。

真空压作用下液体沿纤维集束渗透的测试装置原理如图 1 所示。液体在真空压作用下沿集束上升，容器内液体质量减小，电子天平通过实时采集容器内液体质量的变化，反映液体在集束内的渗透情况。实验中对纤维集束进行了有效的限位，确保实验过程中无滑移。该装置可实现饱和与非饱和渗透率的测试，其中饱和渗透实验需预先将纤维集束完全浸润，至液体饱和流动稳定后采集质量的变化。

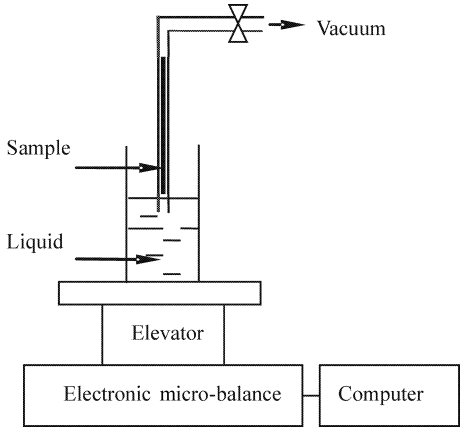

图 1　真空压驱动渗透测试原理图

Fig. 1　Schematic diagram of vacuum drive infiltration

正压驱动渗透测试装置原理如图 2 所示，利用压缩空气产生的正压，驱动密闭容器内液体沿纤维集束上升，通过实时记录液体前锋的高度反映渗透情况。系统密封性及压力的稳定精确控制是关键。

1.3　集束试样的制备

集束试样制备的关键是体积分数的控制与边缘效应的消除。实验主要依据纤维单丝直径、纤维束单丝根数、纤维集束固定器的内径及目标体积分数计算所需的纤维束数目。为防止边缘效应，装填集束前，在固定器内壁涂覆密封剂，并且对集束进行

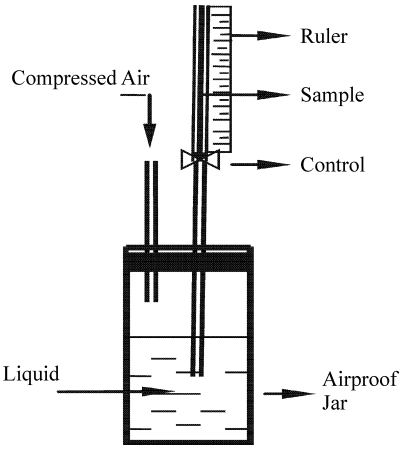

图 2　正压驱动渗透测试原理图

Fig. 2　Schematic diagram of air pressure drive infiltration

分散处理。边缘效应消除前后的金相照片如图 3(a)、3(b)所示。

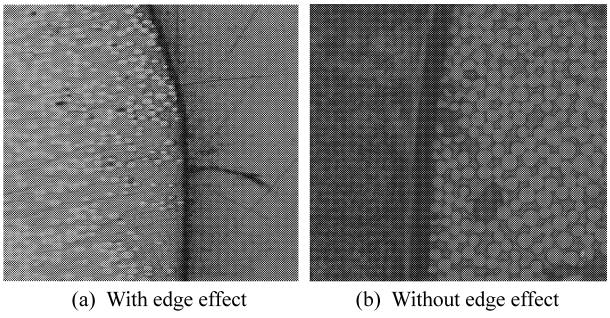

图 3　纤维集束试样截面图

Fig. 3　Cross section of fiber bundle

2　数据分析方法

真空压驱动渗透时，为消除集束尺寸、纤维体积分数对结果分析的影响，将获得的渗透质量按下式转化为渗透高度：

$$h = \frac{m}{\rho_l S(1 - V_f)} \tag{1}$$

式中：h 为渗透高度；m 为液体渗透质量；S 为集束的横截面积；ρ_l 为液体密度；V_f 为纤维体积分数。

实验用测试液体为小分子液体，且渗透过程中速率变化不大，为此，假设测试液体为牛顿流体，纤维堆积体在整个渗透过程中不可压缩，则流体在其中的渗透过程可由 Darcy 定律进行描述。液体在玻纤集束中的渗透是一维稳定流动。由于流程较短，忽略重力作用，液体渗透过程可用一维 Darcy 定律描述：

$$\frac{Q}{S}=\frac{K}{\eta}\cdot\frac{\Delta P}{h_0} \tag{2}$$

式中：Q 为体积流速；K 为渗透率；η 为黏度；ΔP 为流体通过 h_0 长度时的压力差。

对于饱和渗透过程，仅存在液、固两相，不存在毛细作用，即毛细压力 $P_c=0$。将体积流速转化为等效渗透高度，式(2)整理后得到

$$h=\frac{K_s\Delta P}{\eta\varepsilon h_0}\cdot t \tag{3}$$

式中：h 为时间段 t 内液体流过集束的等效浸渗高度；ε 为纤维集束的孔隙率。因此，在恒定外压驱动下，h 与 t 呈线性关系，由其斜率即可求得饱和渗透率 K_s[11]。

对于非饱和渗透，根据式(2)得到

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}=\frac{K_{us}}{\eta\varepsilon}\cdot\frac{P+P_c}{h} \tag{4}$$

式中：K_{us}、P、P_c、h 分别为纤维堆积体非饱和渗透率、外加压力(真空压或正压)、毛细压力及实际渗透高度。

将式(4)积分整理得

$$h=\sqrt{\frac{2K_{us}(P+P_c)}{\eta\varepsilon}}\cdot\sqrt{t} \tag{5}$$

即渗透高度与时间的平方根呈正比关系，其斜率 k 可以反映液体渗透高度随时间增长的快慢，因而可用其来表征浸渗速率的大小：

$$k=\sqrt{\frac{2K_{us}(P+P_c)}{\eta\varepsilon}} \tag{6}$$

将式(6)整理得

$$k^2=\frac{2K_{us}}{\eta(1-V_f)}\cdot P+\frac{2K_{us}}{\eta(1-V_f)}\cdot P_c \tag{7}$$

k^2 与 P 呈线性关系，由其斜率即可计算获得纤维集束非饱和渗透率 K_{us}。

真空压驱动下硅油沿 S-2 玻璃纤维集束渗透的典型曲线如图 4 所示。渗透高度和时间的平方根在短暂的不稳定变化后呈现线性关系，与 Darcy 定律分析结果吻合。并且，可以看到通过质量采集方法获得的曲线与直接采集高度获得的曲线斜率分别为 0.165 和 0.160 cm/s$^{1/2}$，基本平行，不影响稳定阶段浸渗速率的量化，因此，2 种方法结果具有一致性。采集结果绝对值的差异主要由液体对纤维集束固定器的表面张力作用引起。

3　结果与讨论

3.1　饱和与非饱和渗透对比分析

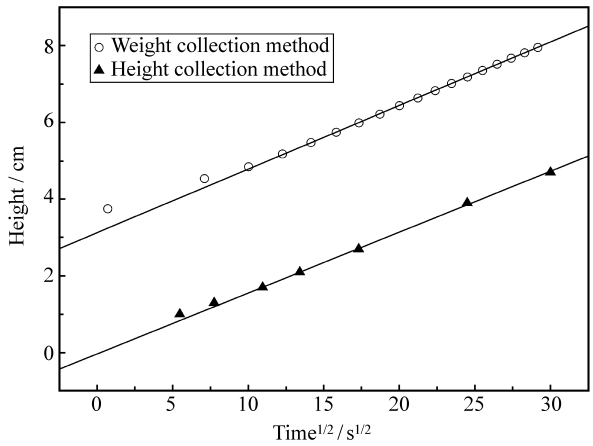

图 4　硅油沿 S-2 玻纤集束渗透高度与时间平方根曲线

Fig. 4　Impregnation height and square root of time curves of silicone oil through S-2 glass fiber bundles

为考察纤维集束内饱和与非饱和渗透特性的差异，实验采用真空驱动测试了硅油对 60% S-2 玻纤集束的饱和与非饱和渗透规律，其中，饱和渗透实验中流体通过集束长度 7 cm，压力差分别为 20、40 和 60 kPa。获得渗透曲线如图 5 所示。

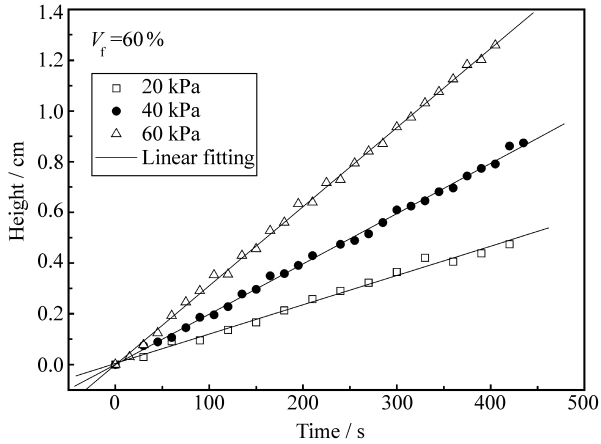

图 5　硅油饱和浸渗高度-时间曲线

Fig. 5　Height - time curves of silicone oil saturated permeation

由图 5 可知，饱和渗透过程中，在恒定的外压作用下，等效渗透高度与时间呈线性关系，与式(3)理论分析结果吻合。非饱和渗透测试中，随着时间的延长，渗透高度增长趋势变缓，见图 6。主要因为随着时间的延长，渗透高度增加，驱动液体渗透流动的压力梯度减小。利用公式(3)与(7)的数据分析方法，分别对饱和与非饱和实验结果进行处理，计算得到不同条件下的渗透率，见表 1。测得的集束纤维饱和渗透率大于非饱和渗透率，这与毛

细作用、流动通道等直接相关。同时，对比忽略毛细作用的非饱和渗透率 K'_{us} 和考虑毛细作用的非饱和渗透率 K_{us}，前者随着压力增大逐渐趋近后者，即随着外加压力的增加，毛细作用的影响变小。

3.2　压力作用方式对非饱和渗透率测试的影响

为考察不同压力作用方式下，液体沿纤维集束的非饱和渗透特点，以及其对非饱和渗透测试的影响，实验分别对真空压、气压驱动及自发毛细作用下硅油沿 S－2 玻纤集束的浸渗规律进行了研究。

图 6 为纤维体积分数 60％条件下，液体在不同压力作用方式下的浸渗曲线，对其进行处理获得浸渗高度与时间平方根的关系曲线如图 7，图中线性关系表明不同压力作用方式下，测试数据均符合一维 Darcy 定律。

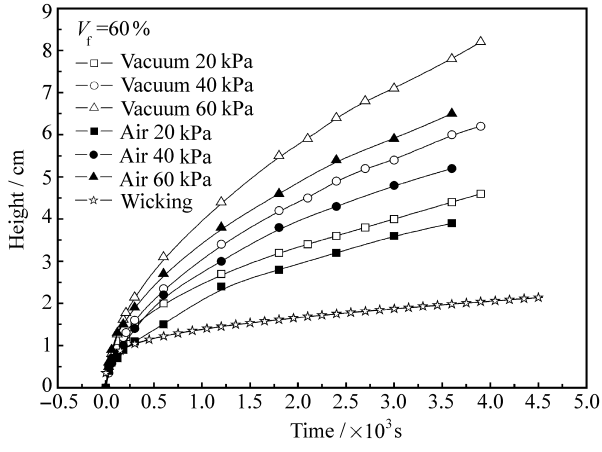

图 6　硅油非饱和浸渗高度-时间曲线

Fig. 6　Height－time curves of silicone oil unsaturated permeation

由图可知，随着压力的增加，硅油在集束内的浸渗速率增大，尤其与毛细浸润相比，外压驱动下液体浸渗速率显著提高。并且相同压力梯度下，真空压驱动浸渗速率较正压驱动快。可能由于正压驱动下，局部流动不匹配导致气泡缺陷，从而产生附加阻力造成；而真空压下，局部流动不匹配产生的

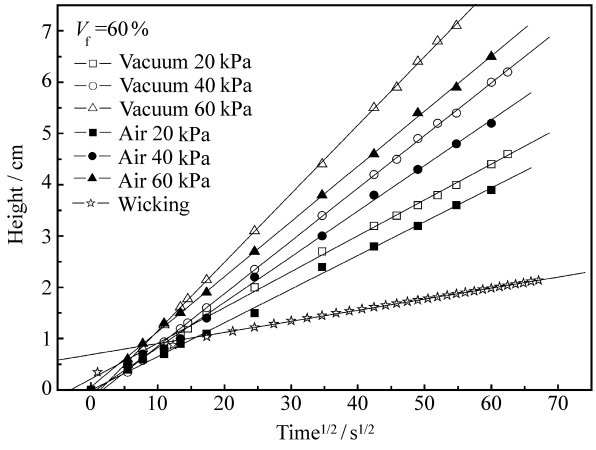

图 7　硅油沿 60％S－2 玻纤浸渗的高度-时间平方根曲线

Fig. 7　Height－time's squat plots of silicone oil unsaturated permeation

非饱和区内部具有一定的真空度，仍可在渗透过程中逐渐接近饱和。

依据数据分析方法，处理得到浸渗速率的平方 k^2 与外压 P 关系如图 8 所示，真空压、正压驱动 k^2 与 P 均呈现较好的线性关系。纤维体积分数为 60％时，真空压驱动和正压驱动测得的渗透率分别为 1.56×10^{-12} 和 8.66×10^{-13} m²，真空压驱动下测得的非饱和渗透率比正压驱动测试结果大，这可能与流动前锋非饱和区裹入气泡有关。

3.3　不同纤维体积分数的非饱和渗透率测试

为考察纤维集束不同孔隙率下液体的渗透行为，实验分别考察了纤维体积分数 50％、60％、70％下硅油沿 S－2 玻璃纤维集束的渗透特性，处理得到不同体积分数下浸渗速率的平方 k^2 与外压 P 关系如图 8 所示。由图可见，随着体积分数的增大，浸渗速率减小，并且 k^2－P 呈较好的线性关系，测得的渗透率见表 2。

随着纤维体积分数的增加，流道尺寸减小，导致集束方向的渗透率减小。并且通过对比真空驱动

表 1　真空压下集束饱和渗透率与非饱和渗透率实验结果对照表(V_f＝60％)

Table 1　Saturated permeability and unsaturated permeability of fiber bundle under vacuum (V_f＝60％)

Vacuum pressure/kPa	Volume fraction/％	Saturated permeability K_s/×10^{-12}m²	Unsaturated permeability calculated by neglecting capillary pressure K'_{us}/×10^{-12}m²	Unsaturated permeability K_{us}/×10^{-12}m²
20	60	2.89	1.20	
40	60	2.48	1.26	1.56
60	60	2.60	1.42	

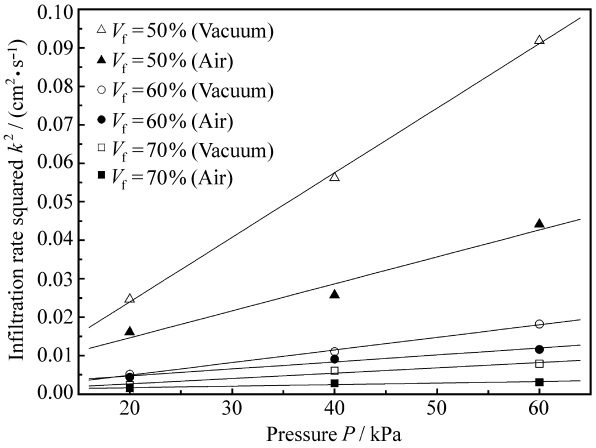

图 8　真空压和正压作用下不同体积分数 k^2-P 曲线

Fig. 8　k^2-P plots for different fiber volume fractions under vacuum and air pressure

表 2　真空压与正压驱动下非饱和渗透率实验结果

Table 2　Unsaturated permeability under vacuum and air drive

Fiber volume fraction V_f/%	Unsaturated permeability K_{us}/×10^{-12}m^2	
	Vacuum	Air
50	11.00	4.17
60	1.56	0.87
70	0.49	0.18

与正压驱动数据可知，真空驱动下非饱和渗透率测试结果均大于正压驱动测试结果。

3.4　液体种类对非饱和渗透率测试的影响

液体沿纤维集束的非饱和渗透过程除受到外压作用驱动外，还受到毛细作用的影响。不同液体与纤维之间的界面作用不同，导致毛细作用存在差异，造成不同液体的渗透特性不同，从而对非饱和渗透率测试产生影响。

为此，实验对比研究了硅油、丙三醇 2 种液体对 S-2 玻璃纤维集束的非饱和渗透的影响，纤维体积分数为 60%，采用真空和外加正压渗透 2 种方式，其浸渗速率的平方 k^2 与外压 P 关系如图 9 所示。相同压力条件下，硅油的浸渗速率比甘油大，主要由于测试温度下硅油黏度为 0.238 Pa·s，小于甘油 0.530 Pa·s，流动性更好，在纤维集束内的渗透更容易。由图 9 斜率获得的渗透率见表 3。

对于相同体积分数的纤维集束，真空驱动下，液体种类对渗透率测试结果的影响不大，而正压驱动下甘油为测试流体测得的渗透率较硅油大，硅油

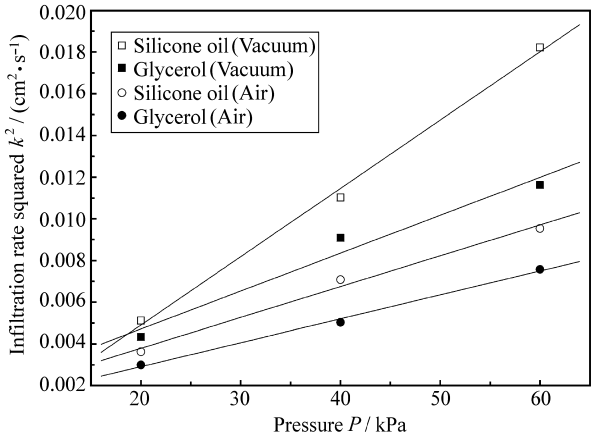

图 9　硅油与丙三醇浸润的 k^2-P 图

Fig. 9　k^2-P plots of permeation of silicone oil and glycerol

表 3　硅油与丙三醇测得的非饱和渗透率

Table 3　Unsaturated permeability with silicone oil and glycerol

Test liquids	Unsaturated permeability K_{us}/×10^{-12}m^2	
	Vacuum	Air
Silicone oil	1.56	0.87
Glycerol	1.57	1.22

真空压与正压驱动下，渗透率测试结果差异比甘油大。结果表明，真空驱动下非饱和渗透率测试受液体种类的影响较小，而正压驱动的差异可能因为甘油的表面张力 0.0637 N/m，硅油 0.0213 N/m，毛细效应不同所致。

4　结　论

（1）实验条件下测得的纤维集束的非饱和渗透率小于其饱和渗透率，并且液体在纤维中的毛细作用对其非饱和渗透率测试结果的影响随外压增加而减小。

（2）集束纤维的非饱和渗透率随纤维体积分数增加而减小，在相同驱动压力条件下真空测得的渗透率比正压测试的数值大。

（3）集束纤维的非饱和渗透率测试结果受流体种类影响较大，尤其在正压驱动条件下，由甘油测得的渗透率大于硅油，但真空压驱动条件下由 2 种液体所得的渗透率结果差异不明显。

参考文献：

[1]　Berglund L A, Kenny J M. Processing science for high performance thermoset composites [J]. SAMPE Journal, 1991, 27(2): 27-37.

[2] Gebart B R. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM [J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(8): 1100-1133.

[3] Westhuizen J V D, Du P J P. Quantification of unidirectional fiber bed permeability [J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(7): 619-637.

[4] Han K K, Lee C W, Rice B P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(12/13): 2435-2441.

[5] Ma Y L, Shishoo R. Permeability characterization of different architectural fabrics [J]. Jounral of Composite Materials, 1999, 33(8): 729-750.

[6] Steenkamer D A, Mcknight S H, Wilkins D J, et al. Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding [J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(12): 3207-3215.

[7] Amico S, Lekakou C. An experimental study of permeability and capillary pressure in resin - transfer moulding [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(13): 1945-1959.

[8] 李　敏. 树脂在增强纤维集合体中毛细润湿行为实验与理论分析 [D]. 北京：北京航空航天大学，2005.

[9] Ahn K J, Seferis J C, Berg J C. Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting mat rices in woven fabric reinforcement [J]. Polymer Composites, 1991, 12(3): 146-152.

[10] 陈　亮. 纤维集束浸润测试方法与单向浸润特性研究 [D]. 北京：北京航空航天大学，2005.

[11] 简抗抗，张佐光，顾轶卓，等. 不同纤维堆积状态下饱和渗透率实验研究 [J]. 复合材料学报，2006，23(1)：31-36.
Jian Kangkang, Zhang Zuoguang, Gu Yizhuo, et al. Experimental research of saturated permeability with different fiber stacking states [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 31-36.