

基于新型测试装置的网孔板层开孔率 对纤维厚度方向渗透率的影响

张浩¹, 李书欣², 王继辉^{*1}, 杨斌¹, 颜庆岩³, 吴明伟³

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070; 3. 贵阳中电环保发电有限公司, 贵阳 550000)

摘 要: 纤维预成型体厚度方向渗透率的准确表征是液体模塑成型工艺制备大厚度复合材料计算机优化的关键。网孔板层是布置在试样上下表面、用于控制纤维厚度并防止纤维变形的刚性构件, 其开孔率是纤维厚度方向渗透率 K_z 测量中的重要表征参数。本文首先通过实验对用于控制纤维预成型体厚度的垫圈进行校正; 然后在排除纤维体积分数误差的前提下, 通过金属网增大网孔板层的开孔率, 测量缎纹织物 SW220C-100b 在不同压力和纤维体积分数下的 K_z , 提出有效计算面积的概念并得到其变化规律; 最后, 基于测试结果, 研究注射压力和纤维体积分数对 K_z 的影响。结果表明: 有效计算面积随着注射压力和纤维体积分数的增加而减小; 纤维体积分数的增大会减小织物的 K_z 值, 网孔板层开孔率的增大会减小注射压力对 K_z 的影响。

关键词: 厚度方向渗透率; 开孔率; 有效计算面积; 纤维体积分数; 注射压力

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)05-1175-09

Influence of ratio of hole area for mesh plate layer on through-thickness permeability based on a new designed test bench

ZHANG Hao¹, LI Shuxin², WANG Jihui^{*1}, YANG Bin¹, YAN Qingyan³, WU Mingwei³

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Guiyang China Power Environment Protection Power Co. Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: The accurate characterization of the through-thickness permeability of fiber preforms is the key to the computer optimization of the preparation of composites with large thickness by liquid composite molding. Mesh plate layer is a rigid component for the control of fiber thickness and the prevention of fiber's deformation, which is placed on the upper and lower surface of the sample. The ratio of hole area for mesh plate layer is an important characteristic parameter in the measurement of through-thickness permeability K_z of fiber. Firstly, the shims used to control the thickness of fiber preforms were calibrated through experiments. On the premise of eliminating the error of fiber volume fraction, the ratio of hole area for mesh plate layer is increased through the metal mesh, the K_z of satin fabric SW220C-100b under different pressures and fiber volume fractions were measured, the concept of effective calculated area was proposed and the change rule of effective calculated area was obtained. Finally, based on the test results, the effects of injection pressure and fiber volume fraction on K_z were studied. The results show that the effective calculated area decreases with the increase of injection pressure and fiber volume fraction. The increase of fiber volume fraction will lead to the decrease of the K_z for fabric. The effect of injection pressure on K_z will be reduced by increasing the ratio of hole area for the mesh plate.

收稿日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-07-21; 网络出版时间: 2019-08-08 10:12:36

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190807.001>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2019-zy-037)

通信作者: 王继辉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为聚合物基复合材料 E-mail: jhwang@whut.edu.cn

引用格式: 张浩, 李书欣, 王继辉, 等. 基于新型测试装置的网孔板层开孔率对纤维厚度方向渗透率的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1175-1183.

ZHANG Hao, LI Shuxin, WANG Jihui, et al. Influence of ratio of hole area for mesh plate layer on through-thickness permeability based on a new designed test bench[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1175-1183(in Chinese).

Keywords: through-thickness permeability; ratio of hole area; effective calculated area; fiber volume fraction; injection pressure

复合材料产品质量优异^[1-3],成型方法多样,其中液体模塑成型工艺(LCM)凭借其优异的性能被广泛应用于航空航天、船舶和汽车等工业领域^[4-5]。LCM工艺中,纤维的渗透性能直接影响树脂的浸润效果,从而影响产品的质量^[6]。渗透率是反映流体在增强体中流动难易程度的参数,国内外学者已经对纤维面内渗透率的研究做了大量工作。对于大厚度复合材料制品,如船舶^[7]和大型风电叶片,其产品厚度大,厚度方向的渗透性对产品质量和生产效率有重要影响,因此,纤维厚度方向渗透率 K_z 的研究同样十分重要。

国内外研究人员对纤维厚度方向渗透率 K_z 的研究主要采取实验和数值仿真的方法。张盛等^[8]、张璇等^[9]、耿奕等^[10]和蒋金华等^[11]通过自制的玻璃渗透率测试装置,对织物 z 向不饱和渗透率进行了测量;张娜等^[12]、董梦瑶等^[13]和刘刚等^[14]选用液压油、树脂等流体对织物 z 轴方向的渗透率进行了测试;Wang等^[15]利用真空辅助结合计算机数据监控,测量了碳纤维无屈曲双轴向织物的面内渗透率和厚度方向渗透率,发现其面内渗透率要比厚度方向渗透率大了一个数量级;Ouagne等^[16]通过实验测试了连续法和离散法下纤维厚度方向渗透率 K_z ,发现连续法所测 K_z 一般要低于离散法得到的 K_z ,且两者的差值会随着纤维压实速度和纤维体积分数的增大而减小;Klunker等^[17]对不同纤维体积分数和不同注射压力下的碳纤维的厚度方向渗透率 K_z 进行测量,发现低纤维体积分数下,压力对 K_z 值有明显影响,而随着纤维体积分数的增大,影响逐渐减弱。

数值仿真预测厚度方向渗透率的方法也被广泛使用。王燕辉等^[18]建立平纹织物的单胞模型,结果显示,纤维厚度方向渗透率 K_z 随纤维体积分数的增加而减小,符合Kozeny-Carman方程;Antonucci等^[19]借助PAM-RTM仿真软件拟合了带有传感装置的不同面密度和缝合间距的碳纤维织物的流动,发现纤维厚度方向渗透率 K_z 随面密度和缝合间距的增加而增大,与实验结果基本吻合;Xiao等^[20]采用能量最小化法对致密织物和疏松织物的面外形变进行建模,并建立了织物的动态渗透率作为载荷和织物变形函数,结果表明,随载荷的增加,致密织物的纤维厚度方向渗透率 K_z 减小,而疏松织物的 K_z 增大,与实验结果基本吻合。

然而在厚度方向渗透率 K_z 的研究实验中存在以下问题:(1)模具材料刚度不足导致系统变形严重,影响渗透率的测定;(2)测试流体选择多样,如玉米糖浆、植物油等,大多流体的黏度随温度变化大,流体中悬浮颗粒会被纤维过滤而变性,导致结果差异较大;(3)纤维体积分数无法精确控制,大多数文献中,未能提出一种控制预成型体厚度的方法,进而导致纤维体积分数无法精确确定;(4)网孔板层(其他文献又称铝网板^[8]、筛板^[21]、分置层^[22]等)中未开孔部分会阻碍流体通过,使流体在增强体中不再是理想一维流动,这类问题尚未有人研究,均直接以试样面积作为计算面积,致使 K_z 值存在较大偏差。

本文采用刚性模具和稳定流体,在精确控制纤维厚度和消除纤维体积分数带来的误差基础上,使用金属导流网增大网孔板层开孔率,模拟理想的一维流动,并定义了网孔板层一定开孔率下厚度方向渗透率的有效计算面积;通过测试缎纹织物SW220C-100b在不同压力和纤维体积分数下的纤维厚度方向渗透率 K_z ,得到不同条件下有效计算面积的大小及变化规律;通过实验研究了压力和纤维体积分数对 K_z 的影响,并验证了网孔板层开孔率对其 K_z 值的影响程度。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

增强材料:玻璃纤维缎纹织物(SF),织物的结构如图1所示,相关参数如表1所示。

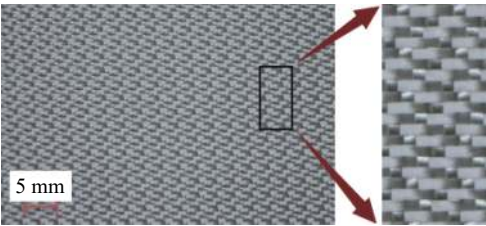


图1 缎纹织物(SF)局部放大图

Fig.1 Partial enlarged view of stain fabric (SF)

表1 增强材料和流体相关参数

Table 1 Relevant parameters of reinforcements and liquid			
Type	Name	Areal density/ (g·m ⁻²)	Volume density/ (kg·m ⁻³)
SF	SW220C-100b	220	2 550
Silicone oil	PMX-200	—	960

测试流体: PMX-200-100cs 二甲基硅油。该流体具有黏度随温度变化小、质地均匀等优点, 适合大量的渗透率重复试验^[23], 相关参数如表 1 所示。

实验仪器及辅助材料: RGM30 万能试验机, 深圳瑞格尔仪器有限公司。TS-BXGSW 金属网, 同事五金公司。

1.2 测试方法

一维 Darcy 定律的数学表达式为

$$v=\frac{Q}{A}=\frac{k\Delta P}{\mu L}$$
 (1)

变换后得到渗透率 K 为

$$K=\frac{\mu QL}{A\Delta P}$$
 (2)

式中: v 为流体流速 (m/s); Q 为体积流速 (m³/s); A 为模腔横截面积 (m²); K 为渗透张量 (m²); μ 为流体黏度 (Pa·s); ΔP 为测试方向的压力差 (Pa); L 为预成型体厚度 (m)。

曾采用自制渗透率测试装置对厚度方向渗透率 K_z 进行过研究^[23], 装置如图 2 所示, 压力罐中的硅油在注射压力的驱动下首先穿过模具底部到达模腔, 流经试样后从装置上方流出。通过压力传感器采集装置顶部和底部的压力, 利用出口处的高精度数采天平采集流体的质量流速, 经数据处理后便可得到试样的 K_z 值。

2 实验内容

2.1 织物试样厚度校正

纤维体积分数决定了纤维预成型体的孔隙率, 直接影响着流体在增强体中的流动, 因此控制纤维体积分数是渗透率测试中的必要步骤。纤维体积分

数的计算公式如下:

$$V_f=\frac{n\varepsilon}{\rho t}$$
 (3)

式中: V_f 为纤维体积分数; n 为织物层数; ε 为纤维织物的面密度 (kg/m²); ρ 为纤维织物体积密度 (kg/m³); t 为增强体厚度 (m)。变换后得到厚度 t 为

$$t=\frac{n\varepsilon}{\rho V_f}$$
 (4)

由式 (3) 可知, 在层数确定的前提下, 纤维体积分数的取值取决于预成型体厚度。新型测试装置采用垫圈组控制厚度, 图 3 为自制渗透率测试装置和垫圈组工作原理示意图, 该装置可利用垫圈组和合模力挤压内部预成型体, 使预成型体达到预设厚度, 设 H 为模腔总深, l 为网孔板层厚度, 则垫圈厚度 h 为

$$h=H-t-l$$
 (5)

当某一纤维体积分数确定时, 选择厚度为 h 的垫圈组, 保证纤维体积分数的准确性。在实际实验当中, 垫圈是以组合的方式存在于模腔内部, 模具的变形、垫圈的弯曲和磨损等因素都会对厚度的确定产生干扰。因此, 有必要探究垫圈组实际厚度与单个垫圈厚度叠加值的差异。

设垫圈组名义厚度为 h_0 , 实测厚度为 h_1 , 则误差百分比 δ 为

$$\delta=\frac{h_1-h_0}{h_0}$$
 (6)

本文首先采用万能试验机对单个垫圈进行厚度测试, 加载速度为 0.3 mm/min, 终止力为 100 N; 然后再将不同厚度下的垫圈组合在实验机上进行测试, 考虑到实际操作中模具的变形, 本次实验在测

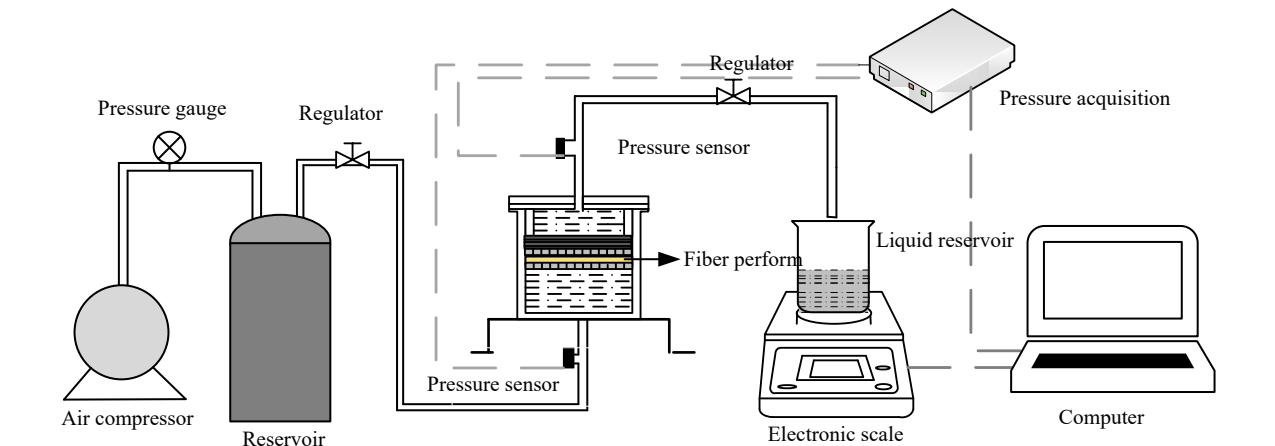


图 2 渗透率测试装置原理示意图

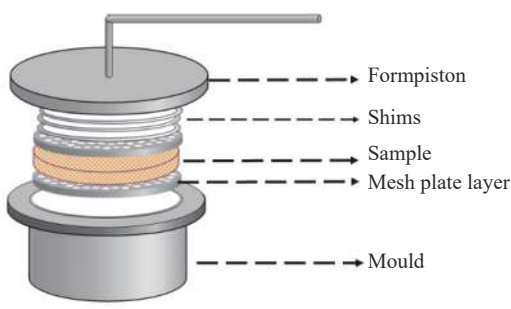
Fig. 2 Device schematic of permeability testing device

试过程中，将垫圈组与模具一起测试，并比较垫圈组整体厚度与垫圈组中单个垫圈厚度叠加值的偏差，

以检验测试方法的可靠性。单垫圈和垫圈组在实验机上的测试过程如图 4 所示。



(a) Homemade mould for permeability test



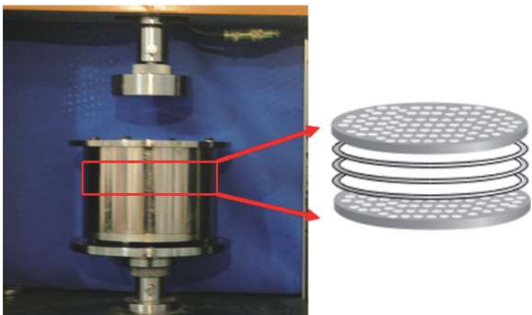
(b) Shims used in experiment

图 3 自制渗透率测试模具和垫圈组工作示意图

Fig. 3 Homemade mould and schematic diagram of shims



(a) Schematic diagram of thickness test for single shim



(b) Schematic diagram of thickness test for shims group

图 4 实验机测量垫圈厚度

Fig. 4 Testing machine measuring thickness of shims

2.2 有效计算面积

设某纤维的厚度方向渗透率 K_z 为 K_1 ， A_1 为试样横截面积，由式 (2) 可得

$$K_1 = \frac{\mu Q L}{A_1 \Delta P} \tag{7}$$

其他条件不变，若流体在该纤维中的流动为一维理想状态，设其 K_z 值为 K_0 ，则

$$K_0 = \frac{\mu Q L}{A_0 \Delta P} \tag{8}$$

联立式 (7) 和式 (8)，使实验测得的 K_1 与理想状态下的 K_0 相等，则有效计算面积 A_0 为

$$A_0 = \frac{K_1 A_1}{K_0} \tag{9}$$

本文采用蜂窝状不锈钢穿孔板作为网孔板层，如图 5 所示。流体从网孔板层孔洞通过后，与试样接触，进而进行渗透。若网孔板层开孔率大，则刚度降低且孔隙面积增大，导致试样变形严重；若网孔板层开孔率小，则会阻碍流体流动。在保证试样形状稳定的前提下，增大网孔板层的开孔率，网孔

尺寸为 $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ (40 目) 的金属网 TS-BXGSW 铺设在 SF 织物与穿孔板之间，经过计算，得到穿孔板开孔率约为 58%，金属网开孔率约为 82%。Imagej 计算穿孔板孔隙度流程图如图 6 所示。

高开孔率和渗透率的金属网具有导流作用，当流体穿过网孔板层后，迅速在金属导流网上扩散，



图 5 穿孔板实物图

Fig. 5 Physical drawing of perforated board

本文将铺设金属网后流体在增强体中的流动视为理想一维流动,这种方法可近似地将试样的横截面积

作为计算面积。理想一维渗流和实际情况中液体渗流如图7所示。

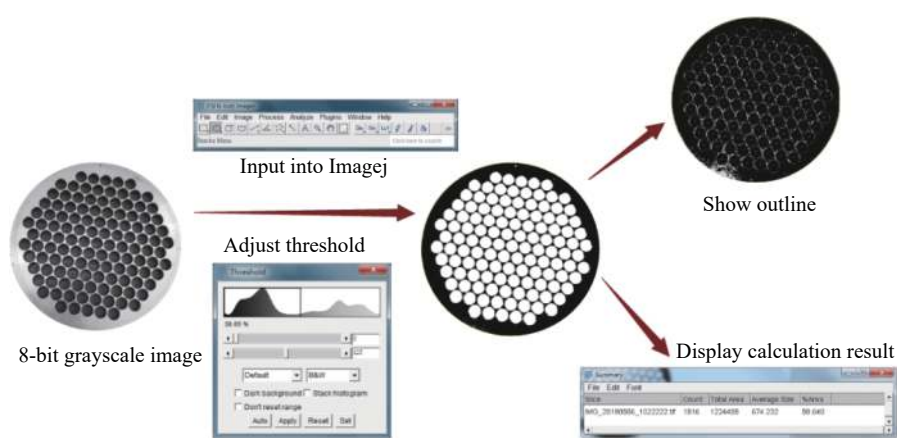


图6 Imagej 计算穿孔板孔隙度流程图

Fig. 6 Flow chart for calculating porosity of perforated plate by Imagej

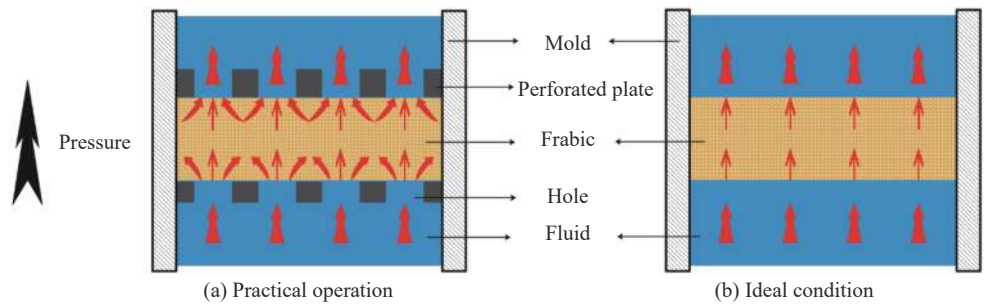


图7 理想状态和实际操作下液体的流动示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of flow of liquid under ideal condition and practical operation

在网孔板层的两种开孔率下,对17层SF织物在不同纤维体积分数和压力下的厚度方向渗透率 K_z 进行测量,定量表征了纤维体积分数和压力对有效计算面积的影响规律。实验分组见表2所示。

表2 17层级织物厚度方向渗透率 K_z 测试实验分组

Table 2 Experimental groups of through-thickness permeability K_z testing for SF with 17 layers

	Fiber volume fraction/vol%	Pressure/MPa					
		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
With metal mesh	46	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	48	—	0.1	—	—	—	—
	50	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	52	—	0.1	—	—	—	—
	54	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
Without metal mesh	46	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	48	—	0.1	—	—	—	—
	50	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	52	—	0.1	—	—	—	—
	54	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

3 结果与讨论

3.1 模腔厚度校正

本文通过实验,测定的14个垫圈A~N的单片厚度如表3所示。

选取了名义厚度在1~22 mm之间的垫圈组进行测试,实验结果如表4所示。可知,单垫圈厚度的叠加不等于垫圈组实测的厚度,两者的差值最大为0.2 mm,最大误差百分比为3.82%。由于垫圈数目多,垫圈组合值不稳定,因此直接测试垫圈组厚度为最优方法。若实验对纤维厚度的精确度要求不高,可考虑使用单垫圈进行叠加以代替垫圈组合。

3.2 有效计算面积

将SF织物正交铺层,分别对有铺设和无铺设金属网条件下厚度方向渗透率 K_z 进行测量,通过改变注射压力和纤维体积分数,得到的实验结果如图8所示。与两条实线对应的虚线分别代表其网孔板层开孔率的大小,实线数值与左端Y轴对应,虚线数值与右端Y轴对应。本文所有图形中的误差线皆代

表 3 试验机测试垫圈厚度
Table 3 Thickness values of shims tested in testing machine

Sequence numbers	A	B	C	D	E	F	G
Thickness/mm	2.944	4.933	1.865	0.181	0.183	0.181	0.187
Sequence numbers	H	I	J	K	L	M	N
Thickness/mm	0.231	0.181	0.186	4.918	0.233	27.944	9.986

表 4 垫圈组名义厚度和实验机所测厚度
Table 4 Nominal thickness and thickness measured by experimental machine of shims group

Nominal thickness/mm	Selected shims	Actual thickness/mm	Error value/mm	Percentage error/%
21.7008	BCKN	21.803	0.1022	0.47
14.3570	ABDEFGHIJKL	14.559	0.2020	1.40
10.7750	EGJLN	10.793	0.0180	0.17
8.2971	ABGL	8.283	-0.0141	-0.17
6.7821	CK	6.710	-0.0721	-1.06
5.8739	DEFHIK	5.955	0.0811	1.38
4.5070	ADEFGHIJL	4.634	0.1720	3.82
3.6698	ADEFI	3.624	-0.0458	1.25
2.8759	CDFHJL	2.877	0.0011	0.04
1.0988	DEFGIJ	1.132	0.0332	3.02

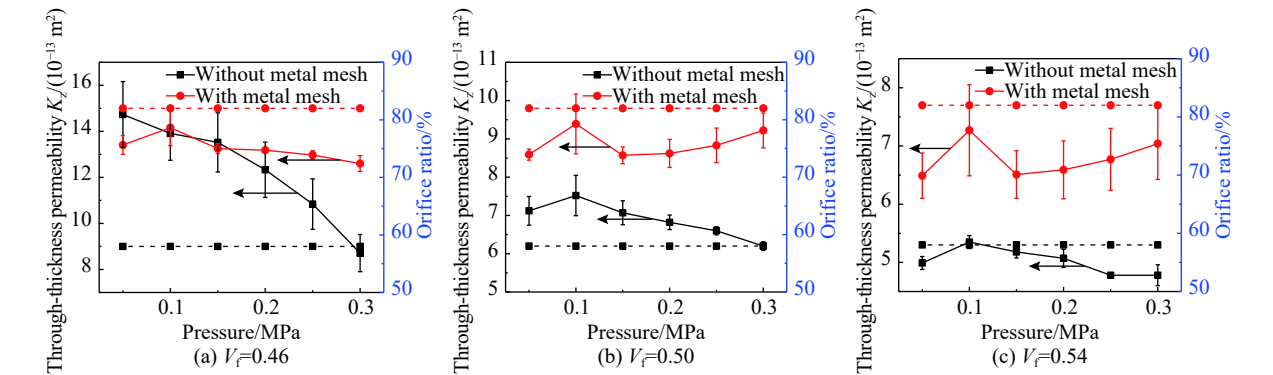


图 8 两种网孔板层开孔率和不同注射压力下织物厚度方向渗透率 K_z 的测量值

Fig. 8 Measurement of through-thickness permeability K_z of SF under two different ratios of hole area and different injection pressures (V_f —Fiber volume fraction)

表对应数值的标准误差，下文不一一说明。可知，未铺设金属网时，纤维与网孔板层孔洞发生嵌套，另外，网孔板层的金属骨架部分也会使流道堵塞，二者的耦合作用使测量的 K_z 值减小；铺设金属网后，由于金属网较小的单孔面积和隔离作用，纤维-金属网和纤维-网孔板层之间的嵌套不易发生，高渗透率的金属网将试样面积定义为计算面积，对测量的 K_z 值影响较小，因此相同实验条件下，高开孔率(铺设金属网)下的 K_z 大于低开孔率(未铺设金属网)下的 K_z 。

图 9(a) 为注射压力为 0.1 MPa 时纤维体积分数对有效计算面积的影响。可知，随着纤维体积分数的增大，有效计算面积呈减小趋势。这是由于无金属网条件下，随着纤维体积分数的增大，纤维内部孔隙的排除和纤维-网孔板层的嵌套程度进一步加深，

由图 7(a) 可知，流体通过网孔板层孔洞进行流动，若冲开孔洞附近或与金属骨架部分贴合的纤维，则需克服较大阻力，根据式 (2) 可知，无金属网条件下计算所取面积 A 远大于实际有效面积，因此厚度方向渗透率 K_z 测量值大幅减小；而铺设金属网后，纤维-网孔板层的嵌套不易发生，随着纤维体积分数的增大， K_z 的减小主要是由于纤维内部孔隙的排除，因此 K_z 受到的影响相对较小，根据式 (9) 可知，实验测得的厚度方向渗透率 K_1 与理想状态下的厚度方向渗透率 K_0 的比值随纤维体积分数的增加逐渐减小，因此有效计算面积呈下降趋势。

图 9(b) 为不同纤维体积分下注射压力对有效计算面积的影响。可知，随着注射压力的增大，有效计算面积呈下降趋势。由图 7(a) 可知，未铺设金

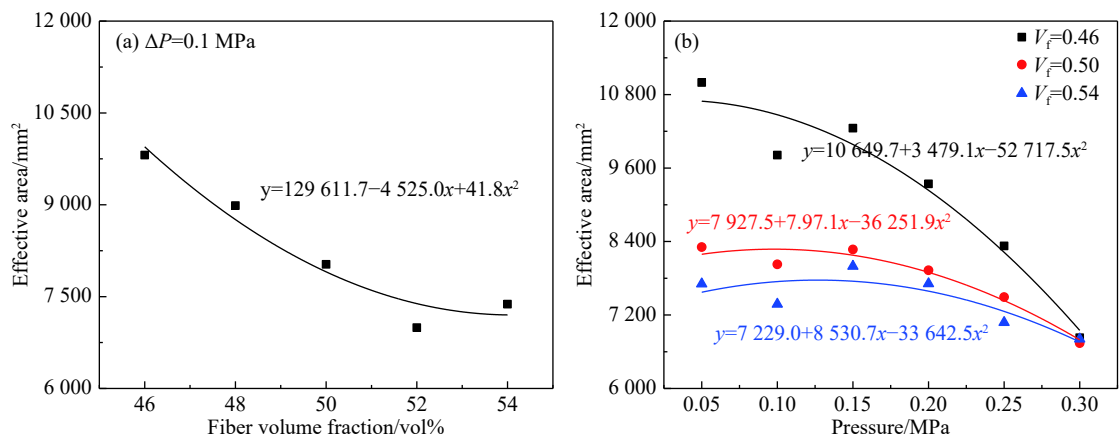


图 9 纤维体积分数和注射压力对织物有效计算面积的影响

Fig. 9 Effects of fiber volume fraction and injection pressure on effective calculated area of SF (ΔP —Pressure)

属网时，流体自网孔板层孔洞向 z 轴和平面扩散，随着注射压力的增大，面内流体的横向弥散使纤维进一步聚拢收缩，且网孔板层金属骨架部分与纤维紧密贴合，导致流道堵塞，根据式 (2) 可知，体积流速与压力差的比值 $Q/\Delta P$ 随注射压力的增大而减小，因此所测 K_z 值将大幅减小；由图 7(b) 可知，铺设金属网后，由于金属网的隔离和面内流体的迅速扩散，纤维-网孔板层间不易产生作用，且纤维在面内不易压缩变形，纤维扩散后在 z 轴单向渗流，随压力的增大，纤维产生滑移，单丝之间出现空隙而形成流道，因此 K_z 测量值所受的影响较未铺设金属网时小。根据式 (9) 可知，实验测得的厚度方向渗透率 K_1 与理想状态下的厚度方向渗透率 K_0 的比值随注射压力的增大而减小，有效计算面积呈下降趋势。

3.3 纤维体积分数对织物厚度方向渗透率 K_z 的影响

图 10 为纤维体积分数对厚度方向渗透率 K_z 的影响。可知，无论压力高低、有无金属网，随着纤维

体积分数的增大， K_z 均减小，这是由于随着纤维体积分数的增大，纤维被进一步压缩，导致纤维层与层和束与束之间的间隙被排除，流体通过增强体时遇到阻碍，根据式 (2) 可知，体积流速 Q 随纤维体积分数的增大而减小，进而使 K_z 值不断减小。

3.4 注射压力对织物厚度方向渗透率 K_z 的影响

注射压力可以改变纤维预成型体的纤维分布状态，由于纤维层数多，其层与层之间的相互影响非常复杂，纤维层与层或束与束之间会出现不同程度的嵌套。

3.2 节中已分析了注射压力对铺设金属网和未铺设金属网条件下厚度方向渗透率 K_z 的影响。图 11 为注射压力对厚度方向渗透率 K_z 的影响。可以看出，不铺设金属网时， K_z 值随注射压力的增大而减小，铺设金属网后， K_z 值随注射压力的变化不大。

为探究厚度方向渗透率 K_z 在不同网孔板层开孔率条件下对注射压力的响应，绘制了不铺设金属网和铺设金属网两种情况下测试结果如图 12 所示，观

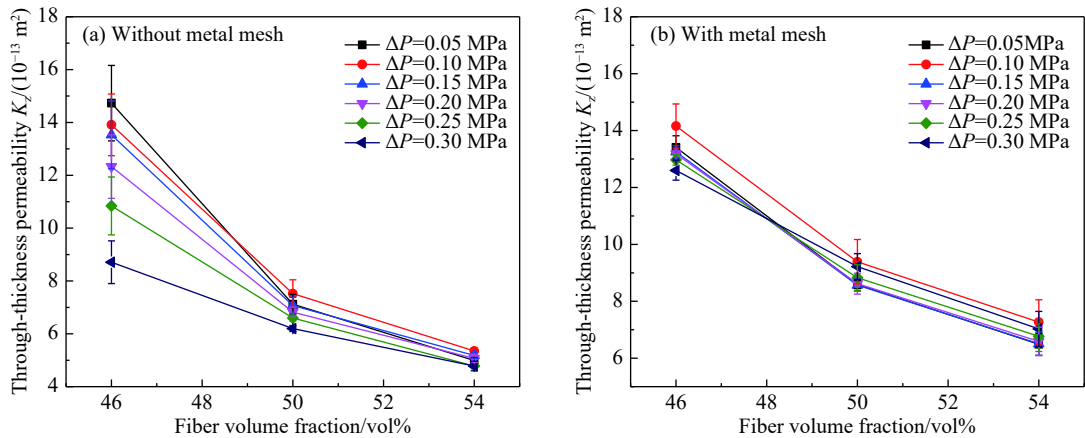


图 10 纤维体积分数对织物厚度方向渗透率 K_z 的影响

Fig. 10 Effect of fiber volume fraction on the through-thickness permeability K_z of SF

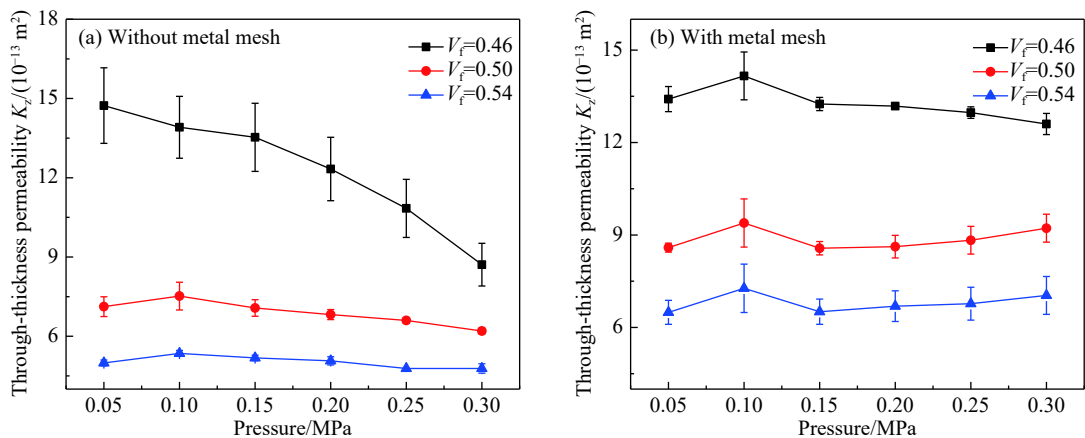


图 11 注射压力对织物厚度方向渗透率 K_z 的影响

Fig. 11 Effect of injection pressure on through-thickness permeability K_z of SF

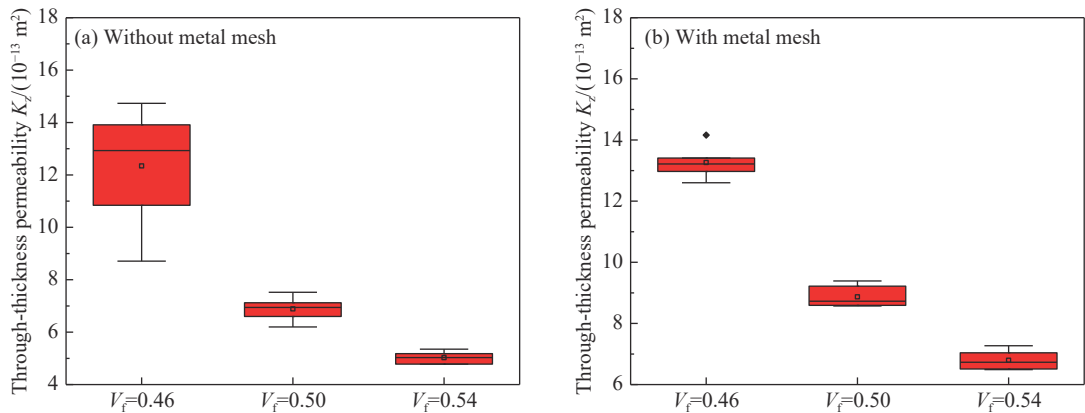


图 12 织物厚度方向渗透率 K_z 在不同纤维体积分数下的数值范围

Fig. 12 Numerical range of through-thickness permeability K_z of SF under different fiber volume fractions

察两种状态下数据的离散程度。可知，在低纤维体积分数下，压力对不铺设金属网试样的 K_z 影响程度较大，以致数据偶然性大；而无论低纤维体积分数或高纤维体积分数下，铺设金属网均可以很好地减小压力对 K_z 带来的影响，为今后的工作提供了保障，避免了繁琐的重复测试。

4 结论

本文通过对预成型体厚度的精准控制，消除了由纤维体积分数带来的误差，从而深入研究了由网孔板层开孔率带来的有效计算面积和厚度方向渗透率 K_z 随纤维体积分数和注射压力的变化规律。通过对缎纹织物 SW220C-100b 上下两面铺设金属网的方法，模拟理想一维流动，测试了不同压力和纤维体积分数下的有效计算面积，并表征了有效计算面积随二者的变化规律；对不铺设金属网和铺设金属网两种条件下 K_z 值进行分析，得出了纤维体积分数和

注射压力对 K_z 值的影响规律。

(1) 在纤维与流体接触的上下两面添加金属导流网来增大网孔板层开孔率，从而近似地模拟理想的一维流动。通过这种方式与低开孔率网孔板层测试条件下 K_z 值对比分析，得出了注射压力和纤维体积分数与有效计算面积之间的关系，即有效计算面积随纤维体积分数和注射压力的增大而减小。

(2) 无论网孔板层开孔率的高低，纤维体积分数的增大都会使 K_z 值减小，且 K_z 值的下降趋势随着纤维体积分数的减小趋于明显；低开孔率下试样的 K_z 值随着注射压力的增大而减小，高开孔率下试样的 K_z 值随注射压力的变化不大。

(3) 网孔板层开孔率较高时，数据的整体离散度较小；反之，在纤维体积分数较低时注射压力对 K_z 值的影响十分明显，数据的整体离散度大。实验表明：增大网孔板层开孔率可降低数据偶然性，提高测试结果的稳定性。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 12-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 12-12(in Chinese).
- [2] DING A, LI S, WANG J, et al. A new path-dependent constitutive model predicting cure-induced distortions in composite structures[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 95: 183-196.
- [3] DING A, LI S, WANG J, et al. A new analytical solution for spring-in of curved composite parts[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 142: 30-40.
- [4] ERMANNI P, FRATTA C D, TROCHU F. Molding: Liquid composite molding (LCM)[M]//NICOLAIS L. Wiley Encyclopedia of Composites. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [5] 邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 1-9.
XING Liying, JIANG Shicai, ZHOU Zhenggang. Progress of manufacturing technology development of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 1-9(in Chinese).
- [6] 张默. 真空辅助树脂成型实时监测技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
ZHANG Mo. Study on real-time monitoring of vacuum-assisted resin transfer molding[D]. Shanghai: Donghua University, 2011(in Chinese).
- [7] 朱锡, 黄若波, 石勇, 等. 安静型夹芯复合材料舵设计及其力学性能分析[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(4): 90-93, 110.
ZHU Xi, HUANG Ruobo, SHI Yong, et al. Design and mechanical analysis of quiet type of sandwich composite rudder[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2007, 19(4): 90-93, 110(in Chinese).
- [8] 张盛, 祖磊, 王继辉, 等. VIMP工艺中纤维增强体Z向渗透性分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(s1): 160-164.
ZHANG Sheng, ZU Lei, WANG Jihui, et al. Analysis of the Z direction permeability of the fiber reinforcement in VIMP[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(s1): 160-164(in Chinese).
- [9] 张璇, 白国娟, 王星星, 等. 三维织物厚度方向渗透率研究[J]. 中国胶粘剂, 2017, 26(5): 26-29.
ZHANG Xuan, BAI Guojuan, WANG Xingxing, et al. Study on the thickness-permeability of three-dimensional fabric[J]. *China Adhesives*, 2017, 26(5): 26-29(in Chinese).
- [10] 耿奕, 蒋金华, 陈南梁. 经编四轴向玻璃纤维织物的渗透行为和渗透率[J]. 纺织学报, 2017, 38(10): 49-56.
GENG Yi, JIANG Jinhua, CHEN Nanliang. Permeation behavior and permeability of warp-knitted quadri-axial glass fiber fabric[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(10): 49-56(in Chinese).
- [11] 蒋金华, 汪泽幸, 陈南梁. LCM中织物结构对3D渗透性的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(5): 9-18.
JIANG Jinhua, WANG Zexing, CHEN Nanliang. Effects of fabric structure on 3D permeability in LCM[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012(5): 9-18(in Chinese).
- [12] 张娜, 赵子为, 刘春太, 等. 风力发电机叶片用玻璃纤维织物的渗透率[J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 245-249.
ZHANG Na, ZHAO Ziwei, LIU Chuntai, et al. Permeability of glass fabric for wind turbine blades[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 245-249(in Chinese).
- [13] 董梦瑶, 鲁智力, 吕广超, 等. 喷涂碳纳米纤维对玻纤预制品渗透率的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(11): 100-106.
DONG Mengyao, LU Zhili, LV Guangchao, et al. Effects of the glass fiber preforms' permeability for spraying carbon nanofiber[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2016(11): 100-106(in Chinese).
- [14] 刘刚, 张朋, 李伟东, 等. 结构化增韧层增韧RTM复合材料预成型体的渗透特性[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 73-80.
LIU Gang, ZHANG Peng, LI Weidong, et al. Infiltration characteristics of the preform of structured toughening layer toughening RTM composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(1): 73-80(in Chinese).
- [15] WANG C, BAI G, WANG Y, et al. Permeability tests of fiber fabrics in the vacuum assisted resin transfer molding process[J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 22(4): 363-375.
- [16] OUAGNE P, OUAHBI T, PARK C H, et al. Continuous measurement of fiber reinforcement permeability in the thickness direction: Experimental technique and validation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 609-618.
- [17] KLUNKER F, DANZI M, ERMANNI P. Fiber deformation as a result of fluid injection: modeling and validation in the case of saturated permeability measurements in through thickness direction[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(9): 1091-1105.
- [18] 王燕辉, 吴晓青. 单胞法预测玻璃纤维平纹织物的渗透率[J]. 纤维复合材料, 2014(3): 14-16.
WANG Yanhui, WU Xiaoqing. Prediction permeability of glass fiber plain fabric by unit cell method[J]. *Fiber Composites*, 2014(3): 14-16(in Chinese).
- [19] ANTONUCCI V, ESPOSITO M, RICCIARDI M R, et al. Permeability characterization of stitched carbon fiber preforms by fiber optic sensors[J]. *Express Polymer Letters*, 2011, 5(12): 1075-1084.
- [20] XIAO X, LONG A, ZENG X. Through-thickness permeability modelling of woven fabric under out-of-plane deformation[J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(21): 7563-7574.
- [21] 阳小林, 晏石林, 杨云飞. 玻璃纤维平面织物法向渗透率实验研究[C]//第十五届全国复合材料学术会议. 哈尔滨: 中国力学学会, 2008: 1092-1096.
YANG Xiaolin, YAN Shilin, YANG Yunfei. Experimental study on normal permeability of glass fiber plane fabric[C]//The 15th National Academic Conference on Composite Materials. Harbin: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2008: 1092-1096 (in Chinese).
- [22] 简抗抗, 张佐光, 顾铁卓, 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): 1-11.
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): 1-11(in Chinese).
- [23] 李香林, 王继辉, 倪爱清, 等. 液体模塑成型工艺用纤维织物厚度方向饱和渗透率的预测模型[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1428-1437.
LI Xianglin, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. Prediction model of through-thickness saturated permeability of fabric for liquid composite molding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1428-1437(in Chinese).