复 合 材 料 学 报　　第 18 卷　第 1 期　2 月　2001 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　Vol. 18　No. 1　February　2001

文章编号: 1000-3851(2001) 01-0030-04

铺层方式对织物渗透率的影响

陈　萍, 李宏运, 陈祥宝
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘　要:　增强材料的渗透率是研究和模拟 RTM 工艺的关键参数。采用单向玻璃纤维织物, 在恒定的注射压力下, 通过记录树脂在织物内流动前缘椭圆长、短轴随时间的变化, 利用 Darcy 定律测定了不同铺层方式下织物的渗透率, 研究了铺层方式对织物渗透率的影响。实验证明, 铺层方式改变时, 织物的渗透率大小和主轴方向发生改变, 其关系符合椭圆的叠加原理。

关键词:　渗透率; 铺层方式; 纤维织物
中图分类号:　TB332　　**文献标识码:** A

EFFECT OF LAYERS ON PERMEABILITY

CHEN Ping, LI Hong-yun, CHEN Xiang-bao
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The permeability of fibrous reinforcement is the important parameter for studying and simulating RTM process. In this paper, the unidirectional glass fabric was used to determine the permeability of different kinds of layers under constant injection pressure. During the experiment, the long axis and the short axis of the ellipse, which was formed by the resin flowing in the fabric, were recorded, and the Darcy's law was used to calculate the permeability. The effect of layers on permeability was studied. The results indicate that the orientation of layers influences the value and principal direction of permeability, and it can be determined by the superposition of the ellipse of each single layer.

Key words: permeability; layer; fabric

树脂传递模塑(RTM) 技术是一种低成本、高效率的新型复合材料制造技术。由于其具有重复性好、尺寸精度高、制品表面精良、环境污染小等优点, 近年来已经被广泛应用于航空、航天、汽车、造船等领域, 并取得了显著的效果[1]。

RTM 工艺中最关键的过程是树脂在增强材料内的流动, 它的好坏决定了最终制件的性能。目前, 国外有很多计算机程序用来模拟树脂在增强材料内的流动, 以便预先了解充模过程的好坏, 控制制件性能。计算机模拟的一个关键参数是增强材料的渗透率, 它决定了模拟的可靠性。影响渗透率的因素很多, 如增强材料的类型, 纤维的体积含量, 铺层方式等[2, 3], 本文中主要讨论铺层方式对渗透率的影响。

1　实　验

1.1　实验材料

本文中所用的增强材料为单向玻璃纤维织物, 所用的注射树脂为有机硅树脂。

1.2　实验设备

所用实验设备为自行研制的, 其基本结构如图 1 所示。

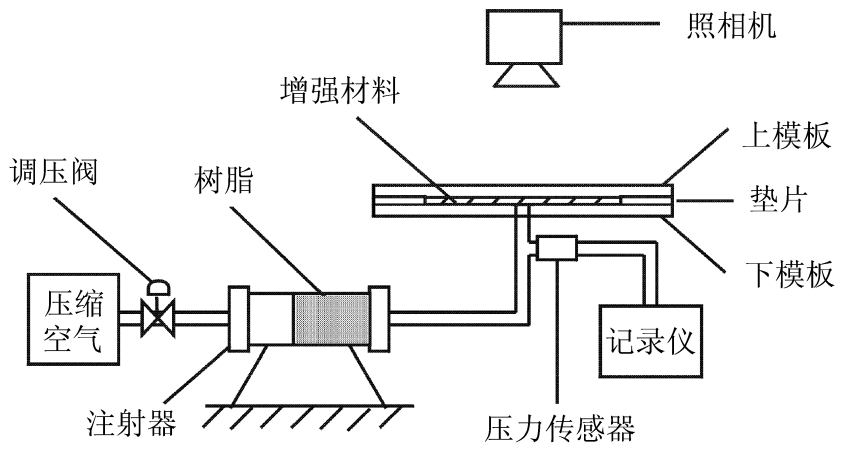


图 1　实验设备示意图

Fig. 1　The sketch map of equipment

收稿日期: 1999-06-24; 收修改稿日期: 1999-09-13
作者介绍: 陈　萍(1973), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事复合材料制件成型工艺方面的研究。

1.3　实验方法

将两层预先裁好的单向玻璃纤维织物分别以0/0°、0/90°、0/45°的铺层方式放入模具内，通过调节模具的型腔厚度，保持纤维体积含量不变，在恒定的压力下将有机硅树脂从模具的中心注入，注射过程中记录树脂流动前沿对时间的关系，计算出不同铺层方式下增强材料的渗透率，研究铺层方式对渗透率的影响。

2　结果与讨论

2.1　试验分析与数据处理

树脂在织物内的流动服从 Darcy 定律，将之写成理论公式为

$$\vec{v} = -\frac{8}{Z}\nabla \qquad (1)$$

式中：$\vec{v}$是速度矢量，8 是渗透率张量，Z是液体粘度，∇ = 是压力梯度。由于 RTM 制件多为薄壁件，厚度方向的尺寸与平面相比要小得多，所以将树脂在织物内的流动简化为二维流动。此时，(1) 式具有下面的形式：

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{Z}\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

当树脂从半径为 R_0 的注入口流入各向异性织物后，它以椭圆的形状向前渗透，流动前缘可表示为图 2，图中 x-y 坐标系表示织物的经向和纬向，即材料坐标系，x'-y'为流动前缘椭圆长短轴所在的坐标系，即渗透率的主坐标系，两坐标系夹角为 [。

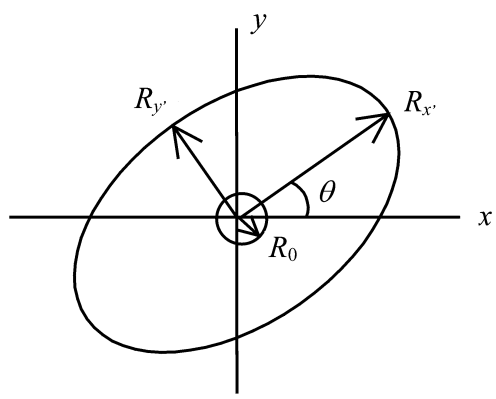


图 2　树脂在织物内的流动示意图

Fig. 2　The flow mode of resin in woven fabric

当织物为各向同性或准各向同性时，流动前缘为圆形，此时渗透率简化为

$$8 = k\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

根据恒压注射的边界条件及不可压缩液体的连续性方程，求解式(2)得[4]

$$\left(\frac{R_f}{R_0}\right)^2 2\ln\frac{R_f}{R_0} - 1 + 1 = \frac{4P_{in}k}{OZR_0^2}t \qquad (4)$$

式中：R_f 为流动前缘半径，P_{in}为注入压力，O为孔隙率，t 为时间。实验中记录下流动前缘半径随时间的变化关系，用(4)式的左边对时间 t 作图，应得一直线，直线的斜率可求出渗透率 k。

当织物为正交各向异性时，渗透率的主坐标系与材料坐标系重合，渗透率具有下面的形式：

$$8 = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \qquad (5)$$

为了求解式(2)，将坐标系转换成等效各向同性坐标系，在等效各向同性坐标系内，渗透率具有式(3)的形式。此时，点(x，y)与等效各向同性坐标系内的点(x_e，y_e)存在下面的关系：

$$x_e = \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^{1/4}x\ ,\quad y_e = \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{1/4}y \qquad (6)$$

并且

$$R_y = \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^{1/2}R_x \qquad (7)$$

$$K_e = (K_x \cdot K_y)^{1/2} \qquad (8)$$

因此，先根据式(7)及流动前缘椭圆长、短轴随时间的变化，用 R_y 对 R_x 作图，得一直线，直线的斜率为 $m=(K_y/K_x)^{1/2}$；再利用式(6)将 R_x 转换成等效各向同性坐标系内的值，代入式(4)，求出 K_e 值；最后，结合式(8)及 m，求出

$$K_x = \frac{K_e}{m}\ ,\quad K_y = K_e \cdot m \qquad (9)$$

当织物为各向异性时，渗透率的主坐标系与材料坐标系成 [角。此时，可利用上面的方法求出主坐标系内的值 K_x'，K_y'。材料坐标系内的渗透率可按下式计算：

$$K_{xx} = \frac{K_x' + K_y'}{2} + \frac{K_x' - K_y'}{2}\cos 2[$$

$$K_{yy} = \frac{K_x' + K_y'}{2} - \frac{K_x' - K_y'}{2}\cos 2[\qquad (10)$$

$$K_{xy} = \frac{K_x' - K_y'}{2}\sin 2[$$

2.2　铺层方式对渗透率的影响

当两层单向玻璃纤维织物以不同的铺层方式放入模具中，用有机硅树脂进行注射时，得到有机硅树脂在其中的流动形式如图 3 所示。

实验时记录下不同时刻树脂流动前缘椭圆长、短轴的变化，利用上面所述的方法，计算出不同铺层方式下渗透率主坐标系内的值如表 1 所示。

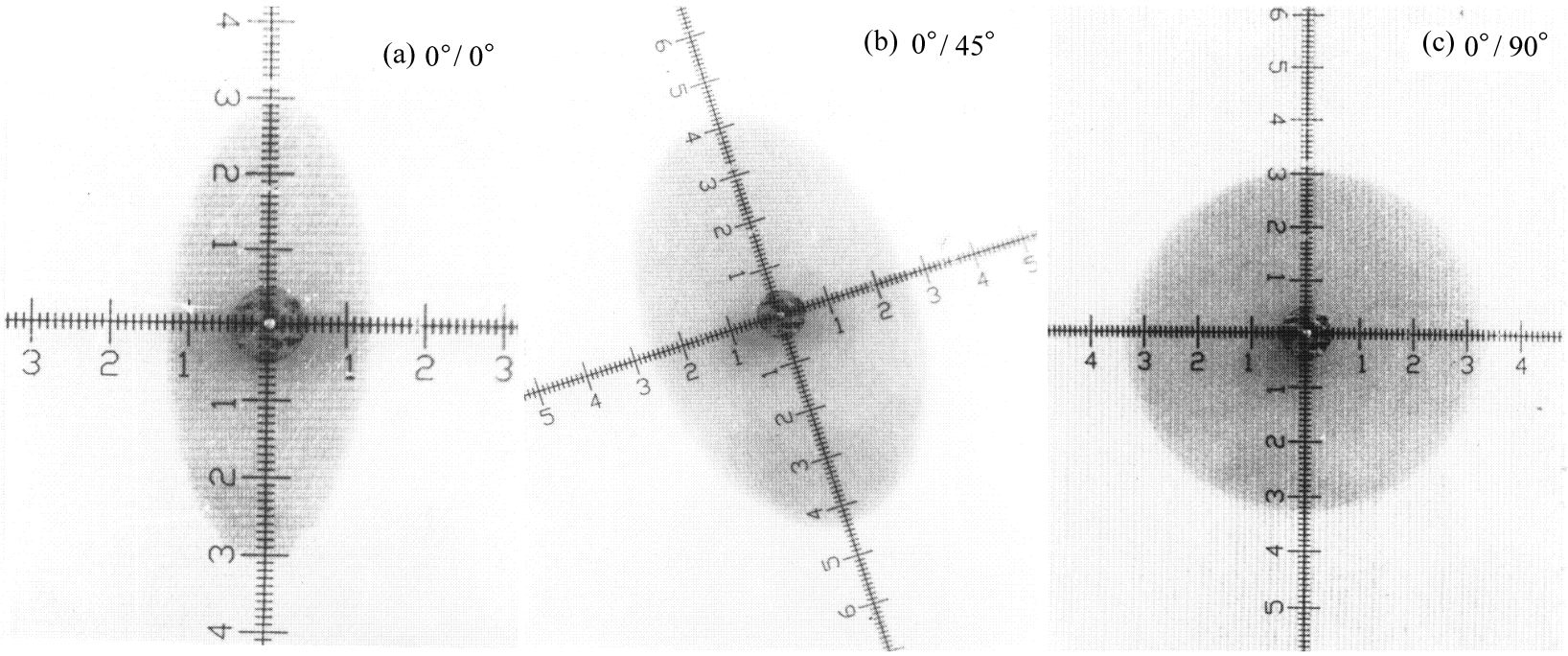


图 3　不同铺层时树脂的流动形状

Fig. 3　The flow shape of resin in different layers

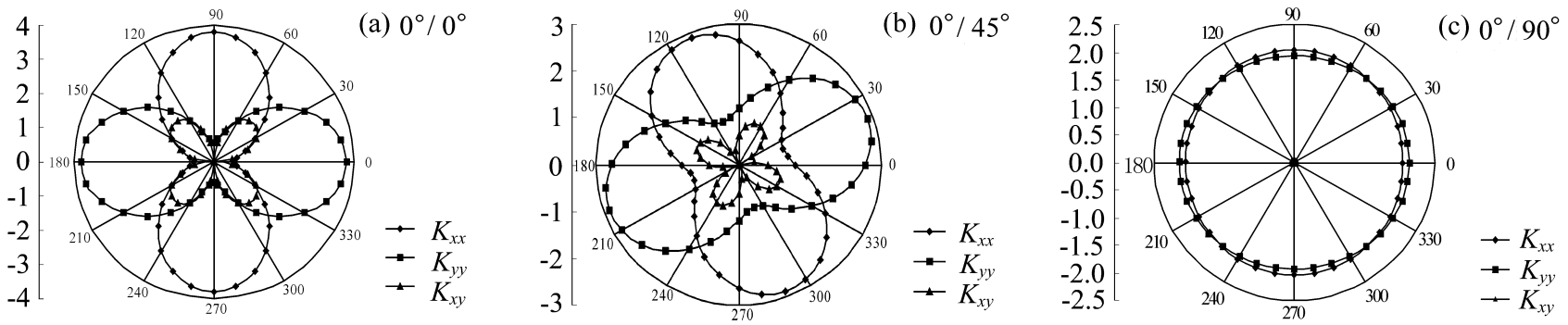


图 4　不同铺层时的渗透率

Fig. 4　The permeability of different layers

表 1　两层单向玻璃纤维织物在不同铺层方式下的渗透率

Table 1　The permeability of woven fabric under different layers

铺层方式	0°/0°	0°/45°	0°/90°
K_x'/m^2	3.80×10^{-10}	2.88×10^{-10}	2.05×10^{-10}
K_y'/m^2	5.73×10^{-11}	9.99×10^{-11}	1.93×10^{-10}
[/(°)	90	110	90
T	0.15	0.35	0.94

表中 T为各向异性度，即 K_y'/K_x'。

根据表 1 中的数据，画出这三种情况下材料坐标系中的渗透率曲线，如图 4 所示。

从图 3、图 4 中可以看出，当上、下两层的铺层方向垂直时，整个铺层表现为各向同性，流动前沿接近于圆形，此时的渗透率值介于同向织物的最大值和最小值之间；当上、下两层的铺层方向夹角为 45°时，整个铺层的渗透率主轴方向介于上、下两层的渗透率主轴方向之间，并且长轴的值要小于同向织物的长轴值，而短轴的值要大于同向织物的短轴值。本文作者认为此现象可以用椭圆的叠加原理来进行解释。

当两层织物分别以 0°/90°和 0°/45°方向铺在一起时，上、下两层各自的流动情况可以用图 5(a)及图 6(a)表示。

因为两层之间互相接触，所以流动较快的一层要向流动较慢的一层渗透，以保持流动前沿的一致。于是，最终的流动形式应是两个椭圆的叠加，即图 5(b)及图 6(b)所示。

假设铺层方向成 T角的两个单层织物的流动椭圆方程分别为

$$\frac{r^2\cos^2[}{a^2}+\frac{r^2\sin^2[}{b^2}=1 \tag{11}$$

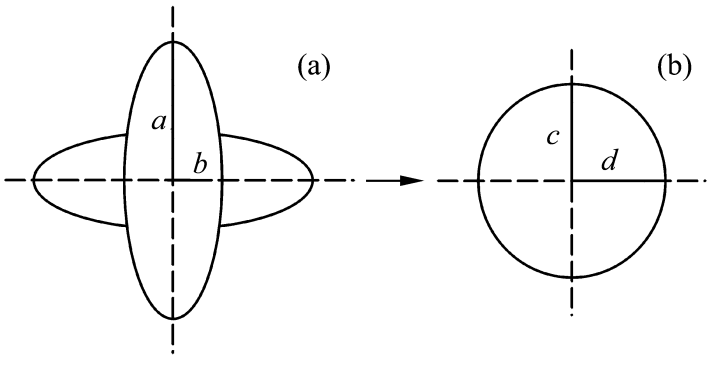
$$\frac{r^2\cos^2([-T)}{a^2}+\frac{r^2\sin^2([-T)}{b^2}=1 \tag{12}$$

则叠加后的流动椭圆方程为

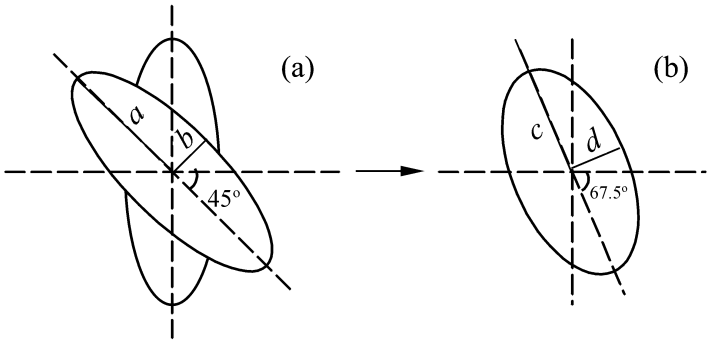
$$\frac{r^2\cos^2\left[-\frac{T}{2}\right.}{a^2b^2}+\frac{r^2\sin^2\left[-\frac{T}{2}\right.}{a^2b^2}=1 \tag{13}$$

$$b^2\cos^2\frac{T}{2}+a^2\sin^2\frac{T}{2}\qquad b^2\sin^2\frac{T}{2}+a^2\cos^2\frac{T}{2}$$

于是，根据式(7)，整个铺层的主渗透率分量之间存



(a) The individual flow of each lay
(b) The flow shape after superposition
图 5　0°/90°铺层时的流动情况
Fig. 5　The flow shape of 0°/90° layers



(a) The individual flow of each lay
(b) The flow shape after superposition
图 6　0°/45°铺层时的流动情况
Fig. 6　The flow shape of 0°/45° layers

在下面的关系:

$$\frac{K_y'}{K_x'} = \frac{b^2\cos^2\frac{T}{2} + a^2\sin^2\frac{T}{2}}{b^2\sin^2\frac{T}{2} + a^2\cos^2\frac{T}{2}} \qquad (14)$$

根据表 1 中的数据, 当两层同向织物的 K_y'/K_x' = 0.15 时, 利用上面的方程, 得出两层织物成 45 角时 K_y'/K_x' = 0.31, 两层织物成 90 角时 K_y'/K_x' = 1, 这与实验得出的值比较吻合。因此, 用这种理论预计整个铺层的渗透率是合理的。

3　结　论

(1) 铺层方式改变时, 整个铺层的渗透率大小和主轴方向发生改变。

(2) 渗透率与铺层方向之间的关系满足椭圆的叠加原理。

参考文献:

[1] 徐敬一, 马玉录. 树脂传递模塑(RTM)成型工艺及应用[J]. 中国塑料, 1992, 6(2): 9- 16.

[2] 吴　军, 程晓宁. 工艺参数对 RTM 模制品质量的影响[J]. 纤维复合材料, 1991, 3: 43- 49.

[3] Chan A W, Hwang S T. Modeling of the impregnation process during resin transfer molding[J]. Polym Eng And Sci, 1991, 31(15): 1149- 1156.

[4] Adams K L, Russel W B, Rebenfeld L. Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium[J]. Int J Multiphase Flow, 1988, 14(2): 203- 215.