

# 渗透率测定中的毛细效应

陈萍 李宏运 陈祥宝

(北京航空材料研究院 北京 100095)

**摘 要** 通过恒压注射条件下,有机硅树脂及环氧树脂在两种不同结构玻璃纤维织物中的流动实验,利用 Darcy 定律测定了这两种织物的渗透率,研究了树脂类型对织物表观渗透率的影响。实验及分析结果表明:树脂类型不同,树脂与织物之间的微观浸润性也不同,使得树脂在织物内产生的毛细压力不同。因此,改变树脂类型,织物的表观渗透率也发生改变。

**关键词** 渗透率,毛细效应,纤维织物

## The Capillarity Effect on Determination of Permeability

Chen Ping Li Hongyun Chen Xiangbao

(Beijing Institute of Aeronautical Materials Beijing 100095)

**Abstract** In this paper, the permeability of two kinds of woven glass fabrics was determined using the Darcy's law through the experiment of silicon resin and epoxy resin flowing under constant injection pressure. Effects of resin type on the apparent permeability of woven fabrics were studied. Experimental results and analyses indicate that micro-infiltration between resin and fabric differs and the micro-pressure introduced by resin in the fabric is dependent on the type of resins. Therefore, the apparent permeability of woven fabric will be different when the type of resin changes.

**Key words** Permeability, Capillarity effect, Woven fabric

### 1 前言

树脂传递模塑(RTM)是一种低成本、高效率的先进复合材料制造技术,早在50年代就已经出现,但直到80年代才有了飞速的发展。目前,它已广泛应用于航空、航天、汽车、造船等领域,而且,随着人们对这种工艺的研究逐步深入,RTM技术已经日趋完善,国外复合材料界预计,到21世纪初,RTM技术将成为先进复合材料制造领域中的主导工艺之一。

RTM工艺中,树脂在增强材料内的流动是主要过程,它的好坏决定着制件质量的优劣。描述这一流动的最基本公式是 Darcy 定律<sup>[1]</sup>,其形式如下:

$$v = - \frac{K}{\eta} \nabla P \quad (1)$$

式中  $v$  是速度矢量,  $K$  是增强材料的渗透率张量,  $\eta$  是树脂粘度,  $\nabla P$  是压力梯度。渗透率  $K$  是表征树脂在增强材料中流动时,增强材料对流动阻力的一个参数。国外对渗透率的研究很多,到目前为止,建立了各种各样计算渗透率的方法,包括实验法、理论计算法和数值模拟法等<sup>[2~4]</sup>,这些方法大部分采用同一种树脂来研究增强材料的结构对渗透率的影响,而对渗透率与树脂类型的关系却研究得较少。本文利用两种树脂和同种材料、不同编织结构的增强材料,通过实验测定了增强材料的表观渗透率与树脂类型的关系,得出了树脂流动过程中,毛细效应对增强材料表观渗透率的影响。

收稿日期:1999-06-28

陈萍,1973年出生,硕士,主要从事成型工艺方面的基础理论研究工作

## 2 实验

### 2.1 实验材料

本文所用的增强材料为 8 缎纹玻璃布和 2 × 2 斜纹玻璃布,所用的树脂为有机硅树脂和环氧树脂。

### 2.2 实验方法

本文采用自制的实验设备进行渗透率的测定,该设备的大致结构如图 1 所示。首先将织物按一定的尺寸裁好,铺在模具内,并调节模具的型腔厚度,使织物的孔隙率保持不变。然后从模具的中心在恒定的压力下注入树脂,记录不同时刻树脂在织物内的位置,计算每种织物在不同树脂注射下的渗透率,研究树脂类型对织物表观渗透率的影响。

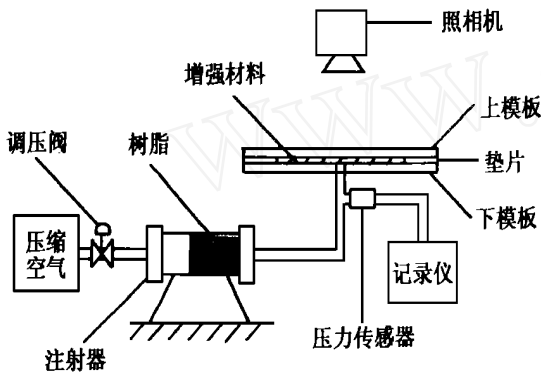


图 1 测定渗透率的实验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment measuring permeability

## 3 结果与讨论

### 3.1 理论计算

由于 RIM 制品多为薄壁件,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)式中的渗透率张量具有下面的形式<sup>[5]</sup>:

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

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  $\theta$ 。在主坐标系内,渗透率简化为:

$$K = \begin{pmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

当织物为各向同性时,流动前缘为圆形,此时渗透率  $K = k$ ,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(1)式得<sup>[6]</sup>:

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

式中  $R_f$  为流动前缘半径,  $P_{in}$  为注入压力,  $k$  为孔隙率,  $t$  为时间。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  $k$ 。当织物为各向异性时,上式仍然适用,只是半径  $R_f$  和渗透率  $k$  必须用等效各向同性系内的值

$$R_e = (K_y / K_x)^{1/4} R_x$$

$$K_e = (K_x K_y)^{1/2}$$

代替<sup>[7]</sup>。然后根据流动前缘的椭圆度得到主渗透率张量的两个分量的比值

$K_y / K_x = (R_y / R_x)^2$  (其中  $R_x$ 、 $R_y$  分别为椭圆的长、短轴),则可以计算出  $K_x$ 、 $K_y$ 。

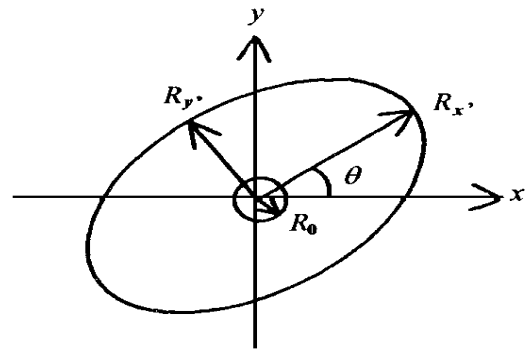


图 2 树脂在织物内的流动形式

Fig. 2 Flow mode of resin in woven fabric

### 3.2 树脂类型对渗透率的影响

实验得出 8 缎纹玻璃布和 2 × 2 斜纹玻璃布在不同树脂注射下测得的渗透率如表 1 所示。

表 1 8 缎纹玻璃布和 2 × 2 斜纹玻璃布在不同树脂注射下的渗透率\*

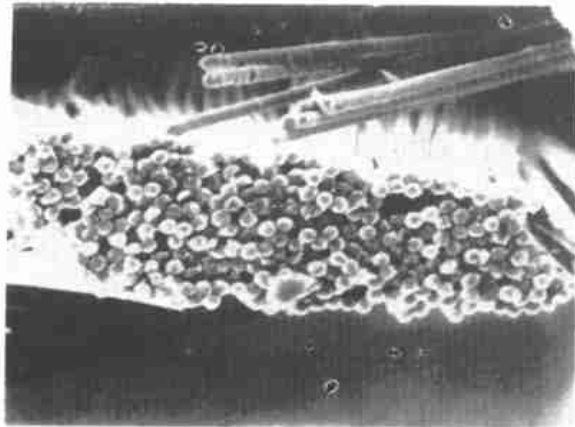
Tab. 1 The permeability of 8 satin and 2 × 2 damask woven fabrics under injection of two different resins

织物类型	树脂类型	注射压力/Pa	$K_x/m^2$	$K_y/m^2$
8 缎纹玻璃布	有机硅树脂	$6.2 \times 10^4$	$1.11 \times 10^{-10}$	$8.19 \times 10^{-11}$
	环氧树脂	$6.0 \times 10^4$	$1.45 \times 10^{-10}$	$1.06 \times 10^{-10}$
2 × 2 斜纹玻璃布	有机硅树脂	$6.6 \times 10^4$	$1.42 \times 10^{-10}$	$9.34 \times 10^{-11}$
	环氧树脂	$6.8 \times 10^4$	$1.83 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-10}$

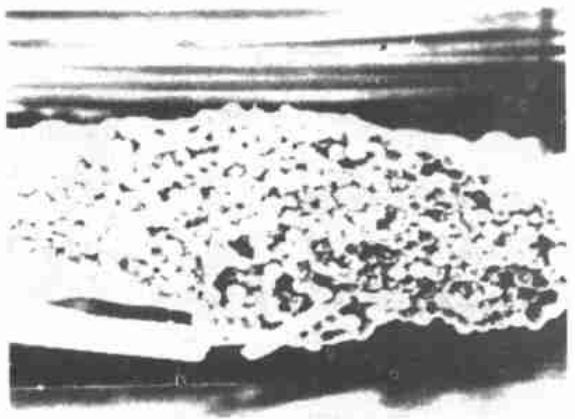
\*  $K_x$ 、 $K_y$  分别为织物沿  $x$ 、 $y$  方向的渗透率分量。

从表 1 看出,当用环氧树脂进行注射时,织物的渗透率值要高于用有机硅树脂注射时的渗透率值,这种现象与 Darcy 定律相矛盾。因为根据 Darcy 定律,织物的渗透率应是织物本身的函数,与注射树脂无关,这说明还存在一些影响因素 Darcy 定律没有考虑,本文认为树脂与织物之间的微观浸润性是导致这种现象的原因。

在织物中,每根纱束都是由很多根单丝组成,8 缎纹玻璃布和 2 × 2 斜纹玻璃布的一根纱束中单丝的分布情况分别如图 3(a)及图 3 (b) 所示。



(a) 8 缎纹玻璃布



(b) 2 × 2 斜纹玻璃布

图 3 纱束中单丝分布照片 200 ×

Fig. 3 Photographs of single fibers distributed in a yarn 200 ×

这些单丝之间会形成很小的毛细管道,当树脂在织物内的纱束之间的大孔隙中进行宏观流动时,在每根纱束内,还会产生毛细现象,因此有毛细压力存在,它的大小表示为<sup>[8]</sup>:

$$P_c = \frac{2 \cos \theta}{r} \quad (5)$$

式中  $P_c$  为毛细压力,  $\sigma$  为树脂的表面张力,  $\theta$  为树脂与纤维的接触角,  $r$  为毛细管半径。于是,织物内液体的实际压力为:  $P_{in} + P_c$  ( $P_{in}$  为树脂的注射压力)。这时,当我们仍用压力传感器测得的注口处注射压力值代入式 (4) 计算织物的渗透率,就会得出一个大于织物本身渗透率的表观渗透率值。如果用两种不同的树脂进行注射来测定织物的渗透率,则测得的表观渗透率值之间应存在如下关系:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{(P_{in1} + P_{c1}) P_{in2}}{(P_{in2} + P_{c2}) P_{in1}} \quad (6)$$

式中  $K_1$ 、 $K_2$  分别为两种树脂注射时测得的表观渗透率值,  $P_{in1}$ 、 $P_{in2}$  分别为两种树脂注射时的注射压力,  $P_{c1}$ 、 $P_{c2}$  分别为两种树脂在纤维内产生的毛细压力。

假设单丝在纱束内呈四方堆积,其示意图如图 4 所示,则根据数学分析,孔隙的等效圆直径与单丝的直径之间存在下面的关系:

$$d_e^2 = \frac{4}{\pi} d_f^2 \quad (7)$$

式中  $d_e$  为孔隙等效圆直径,  $d_f$  为单丝直径。于是,毛细管半径  $r$  应为  $0.26 d_f$ 。

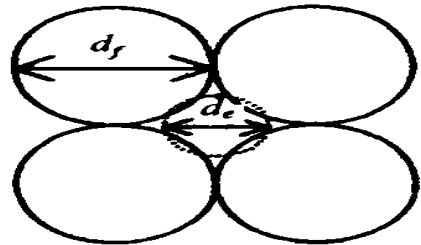


图 4 四方堆积示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cubic pile

通过实验测定,得出有机硅树脂和环氧树脂的表面张力以及它们与织物的接触角如表 2 所示。

表 2 两种树脂的物理参数

Tab. 2 Physical parameters of two kinds of resin

树脂类型	表面张力/ $N \cdot m^{-1}$	接触角/ $(^\circ)$
有机硅树脂	$19 \times 10^{-3}$	80
环氧树脂	$37 \times 10^{-3}$	63

利用 JSM—5600LV 型扫描电镜,随机测量每种织物中十根单丝的直径,然后求平均值,得出 8 缎纹玻璃布中单丝的直径平均值为  $11.7 \mu m$ , 2 × 2 斜纹玻璃布中单丝的直径平均值为  $10.4 \mu m$ ,因此,有机

硅树脂和环氧树脂在两种织物内的毛细压力如表 3 所示。

表 3 树脂在织物内的毛细压力

Tab. 3 Micro-pressure in woven fabric introduced by resin

织物类型	树脂类型	毛细压力/ Pa
8 缎纹玻璃布	有机硅树脂	$2.2 \times 10^3$
	环氧树脂	$1.1 \times 10^4$
2 × 2 斜纹玻璃布	有机硅树脂	$2.4 \times 10^3$
	环氧树脂	$1.2 \times 10^4$

于是,用环氧树脂注射时测得的织物表观渗透率应比用有机硅树脂注射时测得的织物表观渗透率高,对于 8 缎纹玻璃布,其比值为:  $K_1/K_2 = 1.14$ ,对于 2 × 2 斜纹玻璃布,其比值为:  $K_1/K_2 = 1.13$ 。这个值与实验测得的渗透率比值有一定的偏差,可以认为是由织物的不均匀性以及理论与实际的偏差造成的,但两者之间的趋势是一致的,说明树脂对织物的微观浸润性是导致这种现象的原因。从以上的讨论可知,流体对织物的浸润性不同,会造成测得的织物表观渗透率也不同。因此,流体种类、纤维类型以及织物处理剂等影响流体与织物浸润性的因素都将导致测得的织物表观渗透率出现差异。所以,在用实验测定织物的渗透率时,必须考虑这些因素的影

响。

#### 4 结论

(1) 织物的表观渗透率与注射树脂的种类有关。

(2) 树脂与织物之间的微观浸润性是导致织物的表观渗透率发生改变的原因。

#### 参考文献

- 1 毛昶熙. 渗流基本理论及计算. 1992: 25 ~ 58
- 2 Chan A W, Larive D E, Morgan R J. Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement. J. Compos. Mater., 1993; 27(10): 996 ~ 1 008
- 3 Bruschke M V, Advani S G. Flow of generalized newtonian fluids across a periodic array of cylinders. J. Rheol., 1993; 37(3): 479 ~ 498
- 4 Crochet M J. Numerical simulation of flow processes. Chem. Eng. and Sci., 1987; 42(5): 979 ~ 1 003
- 5 Greenkorn R A. Flow Phenomena in Porous Media. 1983: 467 ~ 491
- 6 Adams K L, Russel W B, Rebenfeld L. Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium. Int. J. Multiphase Flow, 1988; 14(2): 203 ~ 215
- 7 Parnas R S, Howard J G, Luce T L, Advani S G. Permeability characterization part 1: a proposed standard reference fabric for permeability. Polym. Compos., 1995; 16(6): 429 ~ 445
- 8 天津大学物理化学教研室. 物理化学(下册). 1989: 298 ~ 315

(上接第 24 页)

#### 4 结论

(1) 1 600 烧结时  $Al_2O_3$ —WC 陶瓷具比较有较优良的机械性能,其抗弯强度为 780 MPa;断裂韧性为  $7.2 MPa \cdot m^{1/2}$ 。

(2) 本试验条件下  $Al_2O_3$ —WC 陶瓷的耐磨性与抗弯强度和断裂韧性的变化趋势比较一致,而与弹性模量和硬度的变化趋势没有依赖关系。

(3) 温度超过 1 600,晶粒长大加剧了晶界的脆性而导致材料磨损加剧。

#### 参考文献

- 1 田雨霖. 陶瓷的韧化机理及其显微结构间的关系. 硅酸盐通报, 1988; 3: 43
- 2 陈志刚等. (Ce—TZP)— $Al_2O_3$  陶瓷力学性能及其增韧机理的研究. 硅酸盐学报, 1990; 18(3): 211 ~ 217
- 3 金志浩等.  $ZrO_2$  增韧  $Al_2O_3$  陶瓷耐磨性的研究. 硅酸盐学报, 1989; 17(5): 401 ~ 404
- 4 Kato K. Tribology of Ceramics. In: 5th Intern. Cong. On Tribology, 1989; 1: 75 ~ 93