

RTM 工艺增强纤维渗透率测量方法研究

李海晨, 张明福, 王 彪

(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了树脂传递模塑工艺过程及特点。在达西定律的基础上建立了树脂流动过程控制方程。通过各向异性介质系统与各向同性介质系统之间的变换关系, 提出了一种测量二维各向异性增强纤维渗透率的新方法, 并结合实验数据及树脂、纤维特性对二维正交各向异性纤维渗透率进行了计算, 计算结果与已知数据吻合良好。

关键词: 树脂传递模塑; 渗透率; 各向异性; 复合材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-5053(2001)01-0051-04

RTM (Resin Transfer Molding) 即树脂传递模塑工艺已有近五十年的发展历史^[1]。70 年代, RTM 工艺主要用于航空领域, 如生产雷达罩, 航空飞行器螺旋桨叶片等^{[2][3]}。80 年代中期以后, 随着增强纤维, 树脂基体, 树脂注射技术等工艺的不断发展和完善, RTM 技术开始大量应用于航空, 汽车, 电子, 体育设备等领域^[4]。由于 RTM 工艺具有成本低, 产品质量高, 易于实现过程自动

化等优点, 因而在复合材料成型领域获得了广泛应用。

RTM 工艺是在一定的温度及压力下把低粘度的树脂注入置有增强材料坯的模具中, 然后加热并固化成型的一种复合材料成型方法。其过程可分为以下几个阶段: (1) 增强纤维准备过程; (2) 树脂注射过程; (3) 固化过程; (4) 产品脱模过程。如图 1 所示。

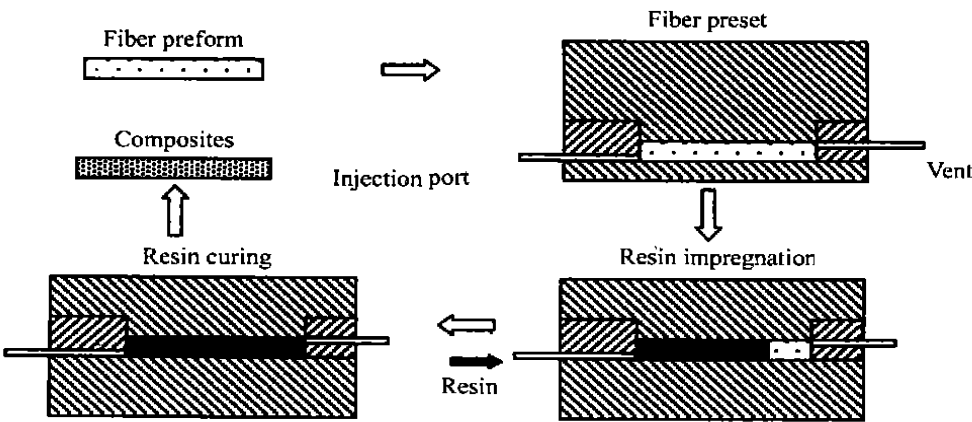


图 1 RTM 工艺过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the process of RTM

在 RTM 工艺中, 提高树脂/纤维润湿效果, 可以减少气泡和空洞的形成, 提高固化后产品强度, 因此, 合理地控制树脂流动过程是一个关键问题。影响树脂流动的主要因素之一是增强纤维渗

透率。本文在达西定律的基础上建立了树脂流动过程控制方程, 通过各向异性介质系统与各向同性介质系统之间的变换关系, 介绍了一种增强纤维渗透率测量新方法, 为更好地控制树脂流动过程提供了物性参数。由于 RTM 工艺主要应用于薄板构件, 本文只考虑二维情况, 增强纤维分为各向同性, 正交各向异性, 各向异性三种情形。

收稿日期: 2000-10-11; 修订日期: 2001-01-03
基金项目: 国家杰出青年科学基金(19725209)
作者简介: 李海晨(1971-), 男, 博士研究生。

1 控制方程

树脂在纤维中的流动过程可认为是流体(树脂)在多孔介质(纤维)中的渗流过程,由 Darcy 定律表示如下:

$$v^r = -\frac{k}{\epsilon\eta} \nabla p \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (1)$$

式中 v^r 是树脂达西渗流速度, $k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix}$ 是渗透率,为一二阶对称张量($k_{xy} = k_{yx}$), ϵ 是纤维孔隙率, η 是树脂粘度, ∇p 是流体压力梯度,本文假定树脂为不可压缩流体,可得到:

$$\nabla \cdot v^r = 0 \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,并假定树脂粘度和纤维空隙率为常量,得到:

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla p) = 0 \quad (3)$$

(3)式为树脂流动连续性方程。

2 增强纤维渗透率测量方法

2.1 各向同性多孔介质

各向同性多孔介质情况下,渗透率为常量,树脂流动前沿曲线为圆形,控制方程用极坐标表示为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} p = p_0 & r = R_0 \\ p = 0 & r = R_f \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_f 为流动前沿半径, R_0 为注射口半径,解得:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{\Delta p}{r \ln(\frac{R_0}{R_f})} \quad (6)$$

式中 Δp 为注射口与流动前沿之间压力差,树脂渗流速度可写为:

$$v^r = \frac{dR_f}{dt} = -\frac{k}{\epsilon\eta} \frac{\Delta p}{R_f \ln \frac{R_0}{R_f}} \quad (7)$$

积分上式得到:

$$k = \left[R_f^2 [2 \ln(R_f/R_0) - 1] + R_0^2 \right] \frac{\epsilon\eta}{4t\Delta p} \quad (8)$$

式中 t 为到达 R_f 的时间,通过测量 R_f , R_0 , Δp 与时间 t ,即可计算出渗透率 k 。

2.2 正交各向异性多孔介质

正交各向异性多孔介质情况下,渗透率 $k_{xy} = k_{yx} = 0$,流动前沿曲线为椭圆形,连续性方程可写为:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

正交各向异性多孔介质渗流模型可通过等效变换与各向同性多孔介质渗流模型相联系^[3],计算得到:

$$y = \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{1/2} x \quad (10)$$

$$k_e = (k_x k_y)^{1/2} \quad (11)$$

$$x_e = \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{1/4} x \quad (12)$$

式中下标 e 表示等效系统,得到正交各向异性多孔介质渗透率计算过程为:

(1)在每一时刻 t 绘制出 R_x (椭圆短轴), R_y (椭圆长轴)点坐标,做直线拟合,设直线斜率为 m_1 ,由式(10)可知:

$$m_1 = \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{1/2} \quad (13)$$

(2)将 R_x , R_0 以下式做等效变换:

$$R_{xe} = \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{1/4} R_x \quad (14)$$

可计算出 R_{xe} , R_{0e} ,则由式(8)可得到:

$$F = \phi t \quad (15)$$

式中 $F = \left(\frac{R_{xe}}{R_{0e}}\right)^2 [2 \ln(\frac{R_{xe}}{R_{0e}}) - 1] + 1$,

$$\phi = \frac{4k_e \Delta p}{R_{0e}^2 \epsilon \eta}$$

设 F , t 曲线斜率为 m_2 ,则有:

$$m_2 = \frac{4k_e \Delta p}{\epsilon \eta R_{0e}^2} \quad (16)$$

由式(16)可得到 k_e 。

(3)由式(10), (11)得到

$$\begin{cases} m_1 = \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{1/2} \\ k_e = (k_x k_y)^{1/2} \end{cases} \quad (17)$$

则有:

$$k_x = \frac{k_e}{m_1}, k_y = m_1 k_e \quad (18)$$

本文结合文献[6]的实验数据(如表1所示),对正交各向异性增强纤维渗透率进行了计算。

表 1 树脂流动前沿位置与时间对应关系^[9]

Table 1 Experimental flow front position and time data

T_s	R_x/m	R_y/m
55.	0.015	0.012
105.	0.018	0.015
150.	0.020	0.017
250.	0.023	0.020
318.	0.025	0.022
471.	0.028	0.025
522.	0.030	0.026
768.	0.035	0.030
1104.	0.040	0.035

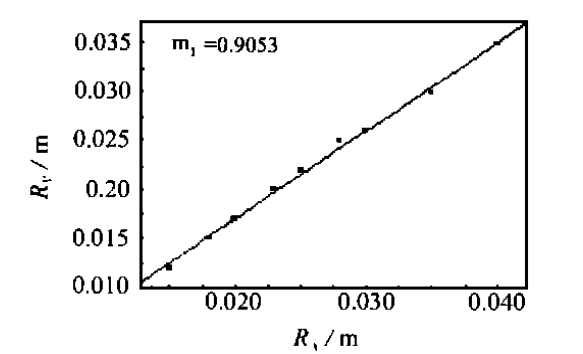


图 2 R_x 与 R_y 直线拟合示意图

Fig. 2 Line fit diagram of R_x and R_y

文献[6]实验条件:树脂为地乐酚环氧树脂(DER317),树脂粘度 14.5Pa·s,增强纤维为平面编织玻璃纤维,纤维空隙率为 0.647,树脂注射口半径为 0.005m,注射压力梯度 20kPa,实验温度控制在 22.0~29.9℃之间。 R_x 与 R_y , F 与 t 直线拟合结果如图 2,图 3 所示,计算得到: $k_x=5.42\times 10^{-10}\text{m}^2$, $k_y=4.45\times 10^{-10}\text{m}^2$,与文献[6]实验结果: $k_x=5.27\times 10^{-10}\text{m}^2$, $k_y=3.90\times 10^{-10}\text{m}^2$ 吻合良好。

2.3 各向异性多孔介质

各向异性多孔介质渗透率张量为 $k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix}$,其中 $k_{xy}=k_{yx}\neq 0$,假设渗透率主轴方向为 $\zeta-\eta$,与实际坐标系关系如图 4 所示。

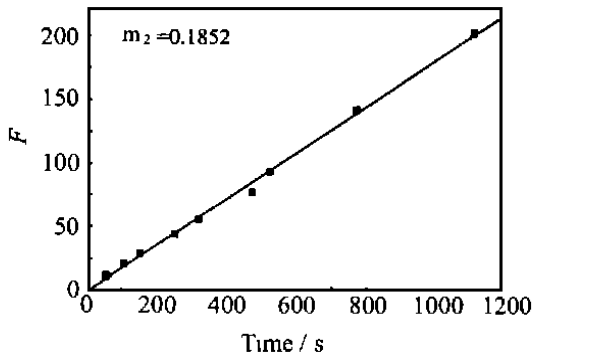


图 3 F 与 t 直线拟合示意图

Fig. 3 Line fit diagram of F and t

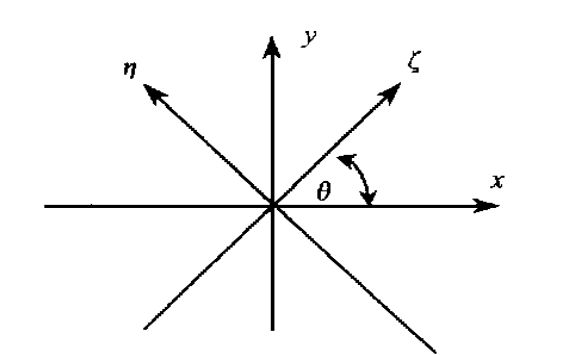


图 4 渗透率主轴方向与坐标系关系图

Fig. 4 Relation between principal axes of permeability tensor and coordinate axes

在 $\zeta-\eta$ 坐标系可写为:

$$\begin{bmatrix} v_\zeta \\ v_\eta \end{bmatrix} = -\frac{1}{\epsilon\eta} \begin{bmatrix} k_\zeta & 0 \\ 0 & k_\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial p}{\partial \eta} \end{bmatrix} \tag{20}$$

由二阶张量的变换性质得到:

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} = [C]^T \begin{bmatrix} k_\zeta & 0 \\ 0 & k_\eta \end{bmatrix} [C] \tag{21}$$

式中 $[C] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 为坐标系 (x, y) 与 (ζ, η) 之间的变换矩阵。

计算可得:

$$\begin{cases} k_{xx} = k_\zeta \cos^2\theta + k_\eta \sin^2\theta \\ k_{xy} = k_{yx} = (k_\zeta - k_\eta) \cos\theta \sin\theta \\ k_{yy} = k_\zeta \sin^2\theta + k_\eta \cos^2\theta \end{cases} \tag{22}$$

由式(22)可知,各向异性多孔介质的渗透率 k 可由 k_ζ, k_η, θ 计算得到,而 k_ζ, k_η 可由正交各向异性多孔介质的渗透率计算方法求得。

3 结 论

- (1) 在达西定律基础上建立的树脂流动控制方程能较好地描述 RTM 工艺中的树脂渗流过程。
- (2) 通过各向异性介质系统与各向同性介质系统之间的变换关系, 对二维正交各向异性增强纤维渗透率进行了计算, 计算结果与实验结果吻合良好。
- (3) 利用各向异性介质系统与正交各向异性介质系统之间的变换关系, 本文采用的方法可以计算二维各向异性增强纤维渗透率。

参考文献

[1] CPPPER G. Forming processes for metal matrix com-

posites[J] . Composites, 1970(1): 153—159.

[2] CRAY M. Development of a polymeric resin injection process for advanced composite structures. Proc. Symposium: Fabrication techniques for advanced reinforced plastics, April, Salford; IPC Science and Technology [C] , 1984: 35—39.

[3] MCCARTHY R, HAINES G, NEWLEY R. Polymer composite applications to aerospace equipment[J] . Composites Manufacturing, 1994, 5(2): 83—93.

[4] KEVIN POTTER. Resin transfer molding london[M] . Chapman & Hall Press, 1997

[5] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[C] . American Elsevier, Environmental Science Series, 1972

[6] ADAMS K L, RUSSEL W B, REBENFELD L. Anisotropic In-plane permeability of fabric media[J] . Int. J. Multiphase Flow, 1988, 14: 203—210.

Method on measuring fibre permeabilities
in resin transfer molding

LI Hai-chen, ZHANG Ming-fu, WANG Biao

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract This paper introduces the processes and characterizations of the resin transfer molding briefly. The governing equations of resin flow are presented on the base of Darcy's law. By the transformation of the anisotropic system and its equivalent isotropic system, a novel method is proposed for measuring the in-plane permeabilities of the anisotropic fibre preform. The in-plane permeabilities of the orthotropic fabric media are calculated from fluid and fibre properties together with data from the mold filling experiment, and good agreement is found between the results and the quoted datas.

Key words resin transfer molding; permeability; anisotropic; composites