复合材料学报 第20卷 第6期 12月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 6 December 2003

文章编号: 1000-3851(2003)06-0109-06

浸渍过程中树脂流体在纤维集合体内的流动行为

丁 辛, 钟 闻, 翁 鸣, 张志奋
(东华大学 纺织学院, 上海 200051)

摘 要: 建立了浸渍过程中树脂基体在纤维集合体内流动的统计力学模型。将树脂流体的流动过程视为纤维/树脂系统降低能量达到平衡的过程,从微观角度研究树脂流体在纤维集合体内的流动行为。在建模中,不仅考虑了代表系统内能的 Hamilton 函数和界面张力及驱动流体的压力对系统所作的功,还考虑了流动过程中纤维集合体对流体的摩擦阻力所作的功,完整地反映了在流体的流动过程中系统能量的变化。模拟了水在聚酯纤维非织造织物内及不饱和聚酯树脂在玻纤机织布内的平面径向流动,并设计了相应的实验,以检验模型对不同流动性能流体和不同结构纤维集合体的适应情况。实验与模拟结果良好的一致性表明,所建立的模拟能正确地反映流体在纤维集合体内的流动特征。

关键词: 树脂流体; 浸渍; 流动行为; 统计力学; 纤维集合体
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

FLOW PERFORMANCE OF RESIN FLUID INSIDE FIBROUS ASSEMBLIES

DING Xin, ZHONG Wen, WENG Ming, ZHANG Zhifen
(College of Textiles, Dong Hua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: A statistical model is developed to study the flowing performance of resin fluid inside fibrous assemblies during the impregnation process. The probability of a fluid move is the function of the variation of a fiber/resin system's energy before and after moving. The energy of the fiber/resin system includes its internal energy, which is the Hamiltonian, and the work done by the interfacial tension between the fiber and resin, by the pressure driving the resin, and by the friction loss when the resin flows through fibrous assemblies, which is expressed in thermodynamic terms as pressure. Simulation is performed to study the performances of a selected fluid flows through fibrous assemblies, i. e. water through nonwoven PET fiber mats and unsaturated polyester resin through glass woven fabrics. To verify the model, a set of experiments illustrates the water through the fiber mats with different fiber volume fractions and the resin through the woven fabric with different influxes. Simulation results are in good agreement with experiments, indicating good prospect of the model used in this area.

Key words: resin fluid; impregnation; flowing performance; statistical mechanics; fibrous assembly

流体在纤维集合体内的流动现象是材料及界面科学诸多研究领域内常见的现象,如纤维材料的吸湿和传湿过程,过滤材料的分离和渗滤过程。在复合材料固化成型过程中,树脂基体对增强纤维的浸渍,是一典型的流体在纤维集合体内的流动过程。在此过程中,树脂基体的流动行为对复合材料成品的质量起着重要的作用。由于纤维集合体通常可视为一种多孔介质,因此大多数此类研究都建立在描述多

收稿日期: 2002-09-23; 收修改稿日期: 2003-03-10
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20010255004); 上海市重点学科建设项目资助课题
通讯作者: 丁 辛, 博士, 教授, 从事纺织复合材料的制备和性能研究 E-mail: xding@dhu.edu.cn

孔介质流体力学的经典定律,即 Darcy 定律[1~5]的基础上。Darcy 定律在宏观尺度上表达了在流动方向上的压力梯度和流体平均速度之间的关系,可用来描述牛顿流体在一定速度范围内通过纤维集合体的流动行为。倘若研究对象为非牛顿流体,或流体的流速较高时,Darcy 定律需经过修正才能使用[6~8]。并且,迄今为止的研究多从宏观角度出发分析流体在纤维集合体内的平均流动现象,因此难以准确描述纤维集合体内流体流动的细节。然而,纤维间树脂基体的流动细节将决定后者对前者的浸渍质量,是影响复合材料性能的关键因素。

从能量的角度出发,树脂在纤维集合体内的流动是纤维/树脂系统通过树脂的流动而降低系统能量以达到平衡的过程,这提供了分析树脂流体在纤维集合体内流动行为的研究思路。本文将在统计力学中的 Ising 模型[9]的基础上,建立流体在纤维集合体内平面流动的模型。通过树脂在流动过程中系统能量的变化,从细观角度讨论流体在纤维集合体内的流动行为。

1　模型的建立

统计力学因其提供了从微观量的统计平均来推算体系平衡性质的统计方法,成为联系客观现象宏观状态和微观状态的桥梁。根据统计力学的原理,由纤维和流体所组成的系统可划分为由大量正方形微单元所组成的子系统[10],每个单元具有两种可相互转变的状态,即:被流体占据的状态和被空气占据的状态。当处于不同状态的相邻单元交换其状态时,就意味着流体由一个单元流入相邻单元,而这种流动的概率由流动后与流动前系统的能量差决定。通过对子系统的细化,可以在细观尺度上显示浸渍过程中树脂流体在纤维集合体内的流动行为[11]。

然而,通常统计力学理论所研究的总是处在平衡状态下的对象或系统,而压力作用下流体的流动过程一般属于流体力学范畴,其中流动过程中由于纤维集合体对流体摩擦阻碍作用所造成的能量损失是不可逆的。因此,在采用统计力学方法处理这一问题时,在系统的能量表达式中,除考虑系统内能(即 Hamilton 函数)、界面张力和外加压力对系统作功的贡献之外,还需加入机械能的表达项。其中,由于纤维集合体对流体摩擦阻碍作用所造成的能量损失项可用压力这一热力学量来表达。在这样一个假设的准平衡状态下,就可以将Ising模型的建模思想推广至压力作用下流体在纤维集合体内的流动过程的研究。

流体在纤维集合体内的流动过程中,界面张力所作的功 E_V 和流体压力对系统作功 $E_p(-pV)$ 将改变系统的内能,其关系式为

$$E_{in} = H + E_V + E_p = H + E_V - pV \quad (1)$$

式中:E_{in} 为考虑了界面张力和流体压力后的系统总内能,p 为流体压力,V 为流体体积,H 为 Hamilton 函数,即不考虑界面张力和流体压力的系统内能,其表达式为

$$H = -B_0\sum_i s_i F_i + B_1\sum_{i,j} s_i F_j - C\sum_{i,j} s_i s_j + G_g\sum_i s_i z \quad (2)$$

其中:s(s = 1 或 0)是表征系统中某一微单元是否被流体占据的参数,F(F = 1 或 0)是表征该单元是否有纤维存在的参数,系数 B_i(i = 0, 1)为纤维和流体间的粘附能,系数 C 代表流体的内聚能,G_g 为重力场强,z 为该单元格的纵坐标。系统 Hamilton 函数的计算方法详见文献[11]。

系统和外界环境间的界面包括:纤维/空气(界面张力为 V_{fg})、流体/空气(界面张力为 V_{lg})和纤维/流体(界面张力为 V_{fl})。假设浸渍为一铺展过程,则该过程中系统的单位面积能量变化为

$$dE_V = V_{fl} + V_{lg} - V_{fg} = V_{lg}(1 - \cos[) \quad (3)$$

其中 [为纤维/流体的接触角。

此外,根据修正的 Bemoulli 方程,在流动过程中的任一流线上,有

$$e_m = z_0 + \frac{p_0}{dg} + \frac{u_0^2}{2g} = z + \frac{p}{dg} + \frac{u^2}{2g} + e_f \quad (4)$$

式中:e_m 为单位重量的流体所具有的机械能,z、p 和 u 分别为流体所在位置的水平高度、流体静压力和流速,z_0、p_0 和 u_0 分别为入口处流体所在位置的水平高度、静压力和流速,d 为流体密度,g 为重力加速度,e_f 为摩擦阻力对单位重量流体所做的功。将纤维集合体对流体摩擦阻碍作用而造成的能量损失项用压力这一热力学量来表达,有

$$e_f = T_0(p_0 - p)/dg \quad (5)$$

式中 T_0 为常数,取值范围为 0~1。

系统的总能量应为总内能和机械能之和,即

$$E = E_{in} + dgVe_m = H + E_V - pV + dgV\left(z_0 + \frac{p_0}{dg} + \frac{u_0^2}{2g} - e_f\right)$$

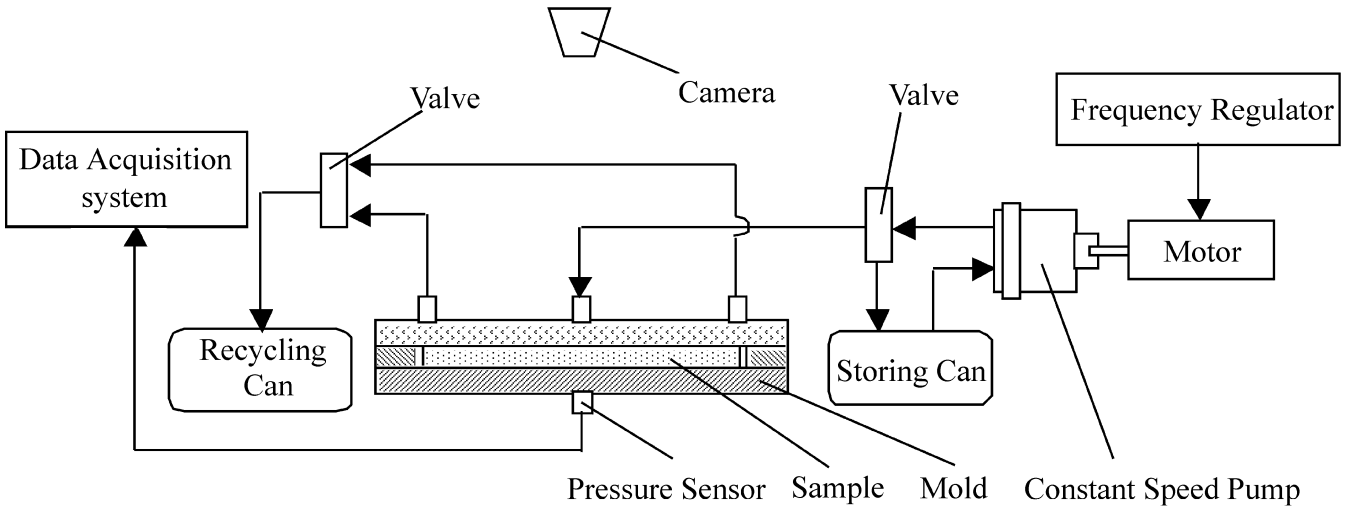

图 1　实验装置

Fig. 1　Schematic of the experimental setting

$$= H + E_V + dgV\ z_0 + \frac{u_0^2}{2g} + TV(p_0 - p) \tag{6}$$

式中 $T(= 1 - T_0)$ 定义为结构系数, 数值由实验给出, 反映了纤维集合体在平面内的某一方向上对流体流动的摩擦阻碍作用。若纤维集合体为各向同性, T 为一常数; 对于各向异性的纤维集合体, 则 T 为一张量。

根据 Darcy 定律, 对于给定的流量下在平面内作径向流动的二维流体, 有

$$\frac{U}{2\pi rh} = \frac{K}{\eta}\frac{dp}{dr} \tag{7}$$

式中: U 为流体的流量, h 为流体的厚度。将式(7)积分, 同时设流体前沿处压力为大气压, 代入式(6)并计算, 得

$$E = H + E_V + dgV\ z_0 + \frac{u_0^2}{2g} + TV(p_0 - p_a)\frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_a/r_0)} \tag{8}$$

式中: r_0 为流体注入口半径, r 为流场中任意点距入口中心点的距离, 流体前沿距入口中心点的距离为 r_a, 该处的压力为大气压 p_a。令 E_p 代表式(8)的末项, 对于平面流动, z_0 为常数, 对式(8)微分, 有

$$dE = dH + dE_V + dE_p \tag{9}$$

由式(9)可知, 纤维/流体系统的能量变化, 实质上是系统内部微单元所具有能量以及外加压力共同作用的结果。式(9)中给出的能量差可用 Monte Carlo 模拟来给出压力作用下流体在纤维集合体内的流动过程[11], 即根据统计力学的原理, 由系统中的任一给定微单元在流体沿某方向上可能移动的前后系统能量差异, 来确定该方向上流体的流动可能性。

2　实　验

实验装置如图 1 所示。该装置包括一个由上下两块模板组成的模具, 其中下模板为钢制, 上模板为透明有机玻璃板, 可供从模具上方观察并拍摄流体的流动过程。纤维集合体试样放置在尺寸为300 mm×200 mm×3 mm 的模腔中。合模后, 流体通过一计量泵从位于上模板中心的注入口注入。上模板的四周有四个出口, 注模时可将多余的流体和空气排入回收罐。在下模板的中心处安装一个压力传感器, 以采集注入口处流体的压力数据。

试样为 PET 纤维非织造织物, 纤维的平均长度为 38 mm, 平均直径为 28.6 μm。纤维在平面内随机分布, 使试样具有面内各向同性的特征。实验选择了纤维体积分数不同的 3 种试样, 以考察流体的流动行为。试验中, 流体为水, 流量恒定为 5.6 mL/s。

图 2 为一典型实验结果, 显示了流体在试样(V_f= 26.7%)中的流动前沿随时间的变化图像。流动前沿(细实线)是在 Photoshop 中抓取实验所拍摄照片中流体所占据区域的边缘而得到的, 虚线为模型的模拟结果。图中, 从标记"+"处的注入口中心点向外, 依次为流体在不同时间后的前沿轮廓。实验结果表明, 所建立的模型能够合理地反映流体在纤维集合体内平面径向的流动过程。从图中可见, 在各向同性的纤维网中, 流体在各个方向上的流动行为基本一致, 所以流体的前沿大致呈圆形。随着流体前沿离中心点的距离增加, 试样对流体的流动阻力势必增加。为了确保流体在恒定流量下的流动, 其注入压力将逐渐上升。通过图 1 所示的压力传感器采集到的信号, 可获得流体前沿处压力(大气压力)和流体注入口处压力之间的关系。

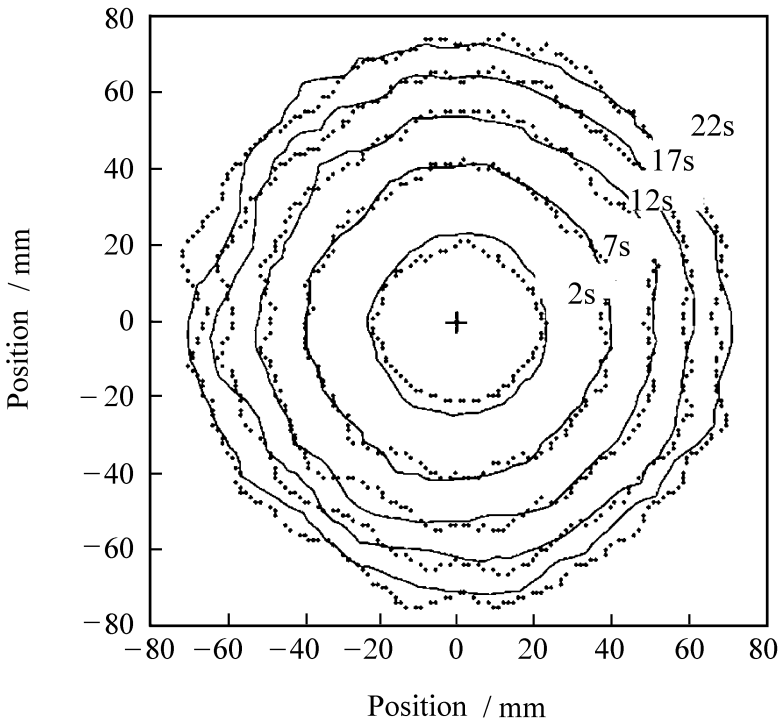

图 2　流体的流动前沿

Fig. 2　Profile of the flow front

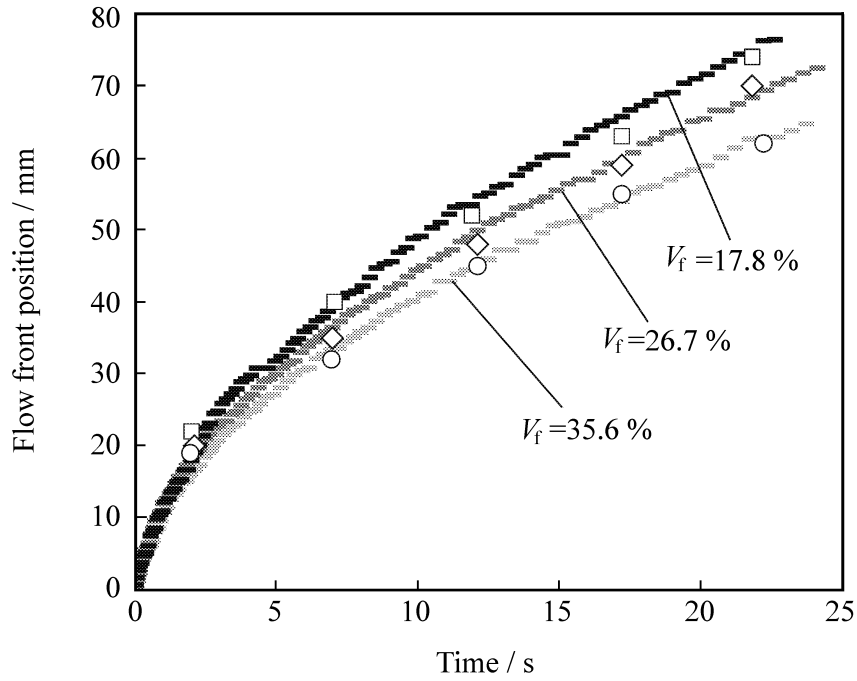

图 3　纤维体积分数对流体前沿移动的影响

Fig. 3　The flow front vs. fiber volume fraction

图 3 为流动过程的一流线上, 3 种不同 V_f 值的试样在等注入流量下, 流体前沿的模拟值和实测(每个试样 5 个测试点) 结果。在注入口处相应的流体压力如图 4 所示。根据流体前沿位置、时间及压力差之间的关系, 由式(9) 可获得结构系数 T[12]。对应于 V_f = 17. 8%, 26. 7% 和 35. 6% 的试样, T 值分别为 0. 76、0. 58 和 0. 34。一旦确定了流体和纤维材料, V_f 值越高, 则 T 值越低, 表示通过纤维集合体的流动阻力越大。

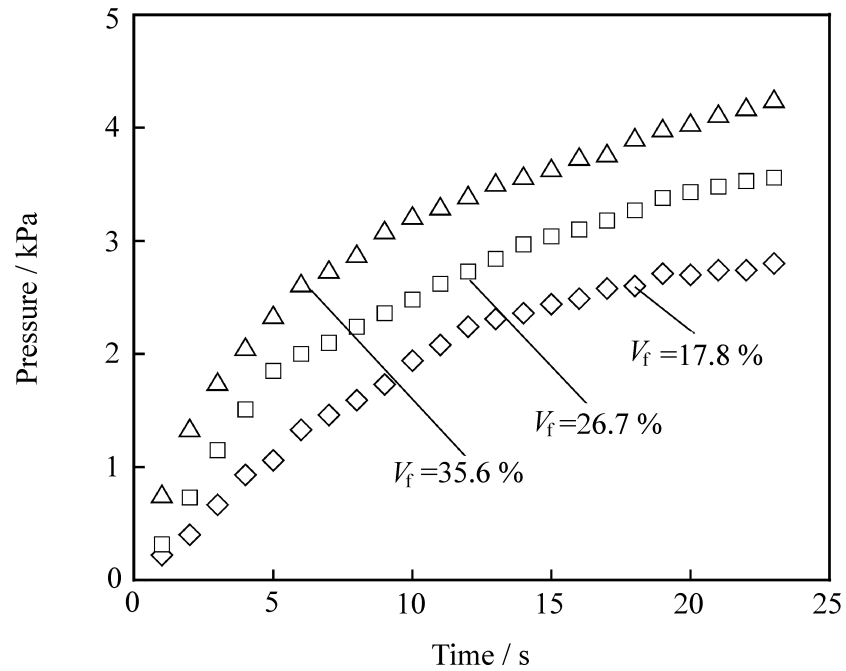

图 4　注入口处的流体压力

Fig. 4　Pressure of fluid at the inlet

进一步的实验为模拟压力驱动下、具有较高粘度的树脂流体在玻纤机织布中的流动行为。实验用树脂为邻苯二甲酸聚酯, 苯乙烯为交联剂。玻纤机织布的经密为 45 根/ 10 cm, 纬密为 34 根/ 10 cm, 织物厚度 0. 4 mm, 重量 400 g/ m^2, 玻纤粗纱细度为 310 tex, 单丝根数 560 根, 单丝细度 0. 55 tex, 单丝直径 16. 6 μm。

图 5 是玻纤机织布中聚酯树脂流动前沿随时间变化的图像。图中, 细实线为不同时间段实测的流体前沿轮廓, 虚线为相应的模拟值。树脂注入流量为 5. 4 mL/ s。图中所示的模拟结果与实际情况吻合良好, 表明所建立的模型也适用于描述较高粘度树脂流体的流动行为。由于纤维在平面内的取向不再是各向同性, 图 5 所示的流体前沿的轮廓也不再是圆形, 沿纬向的树脂流动速度明显高于沿经向的流动速度。

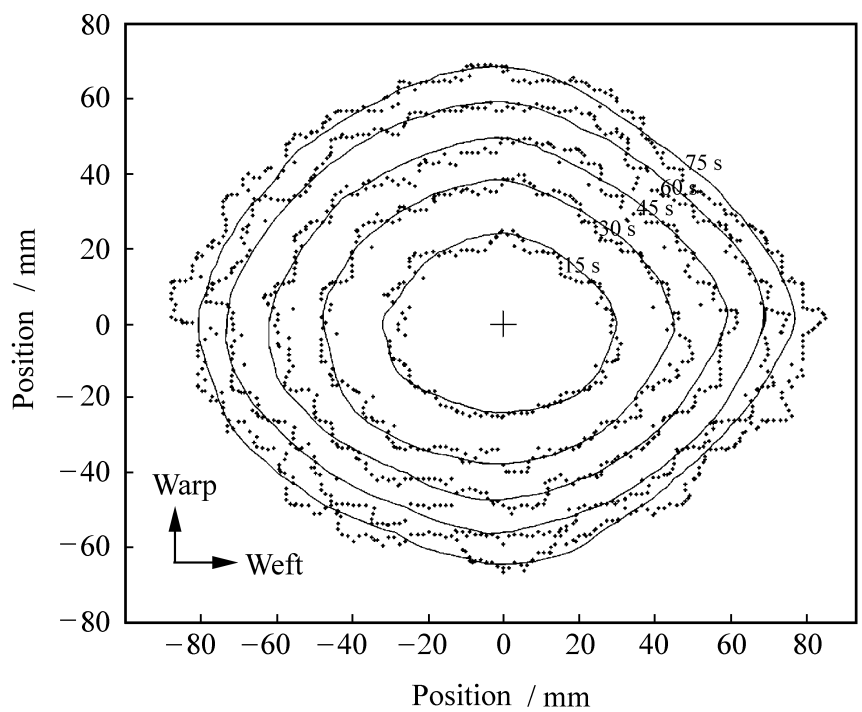

图 5　玻纤机织布中的树脂流体前沿

Fig. 5　The flow front position of resin in glass woven fabrics

对于具有面内各向异性结构的纤维集合体，表征试样对流体流动阻碍作用的结构系数 T 为一张量。根据实验结果，由式(9)可以获得[12]

$$\text{燧}=\begin{matrix}\alpha_1 & \alpha_2\\ \alpha_1 & \alpha_2\end{matrix}=\begin{matrix}0.65 & 0.40\\ 0.40 & 0.20\end{matrix} \tag{10}$$

式(10)中张量 燧的各个分量反映了流体沿不同方向流动的难易程度，表征流体沿纬向流动难易程度的 T_{11} 大于沿经向流动的 T_{22}，说明沿纬向的流动阻力小，这与实验情况相符。

应用所获得的结构系数，在与图 5 相同的实验条件下，模拟了 3 种不同注入流量(q= 2.7 mL/s、5.4 mL/s、8.1 mL/s)下树脂前沿的位置。为了直观起见，仅将经向和纬向流线上的流体前沿分别示于图 6(a)和 6(b)。对应于不同的流量，流体在注入口处的压力值如图 7 所示。实验结果与模拟值的良好吻合表明，所取的结构系数能准确地反映纤维集合体对树脂流体的流动影响，也表明所推荐的模型可以用来研究浸渍过程中树脂基体相对于纤维集合体的流动行为。

3　结　论

在统计力学的基础上，本文中建立了流体在纤维集合体内平面流动的模型，从微观角度上研究复合材料浸渍过程中树脂基体在纤维集合体内的流动行为。在建模中，不仅考虑了代表系统内能的 Hamilton 函数和界面张力对系统所作的功、驱动流体的压力所作的功，还考虑了流体在流动过程中纤维集合体对其摩擦阻力所作的功，完整地反映了在流体的流动过程中系统能量的变化。基于系统的能量变化，讨论了纤维集合体内树脂基体的浸渍流动行为。这种建模的特点是，无论纤维集合体与流体之间界面如何复杂，流体的流动性能如何特殊，均不会增加模拟计算负担。

将纤维集合体对流体摩擦阻碍作用造成的能量损失用压力这一热力学量来表达，并通过在模型中引入结构系数 T，可以准确描述纤维集合体对流体流动行为的影响。结构系数通过实验来确定，反映了流体通过纤维集合体的难易程度。结构系数越大，表示对流体的流动阻碍越小。对于面内各向同性的纤维集合体，结构系数是一在 0 和 1 之间的常数。随纤维体积分数的增加而减少；对于面内各向异性的纤维集合体，结构系数为一张量。

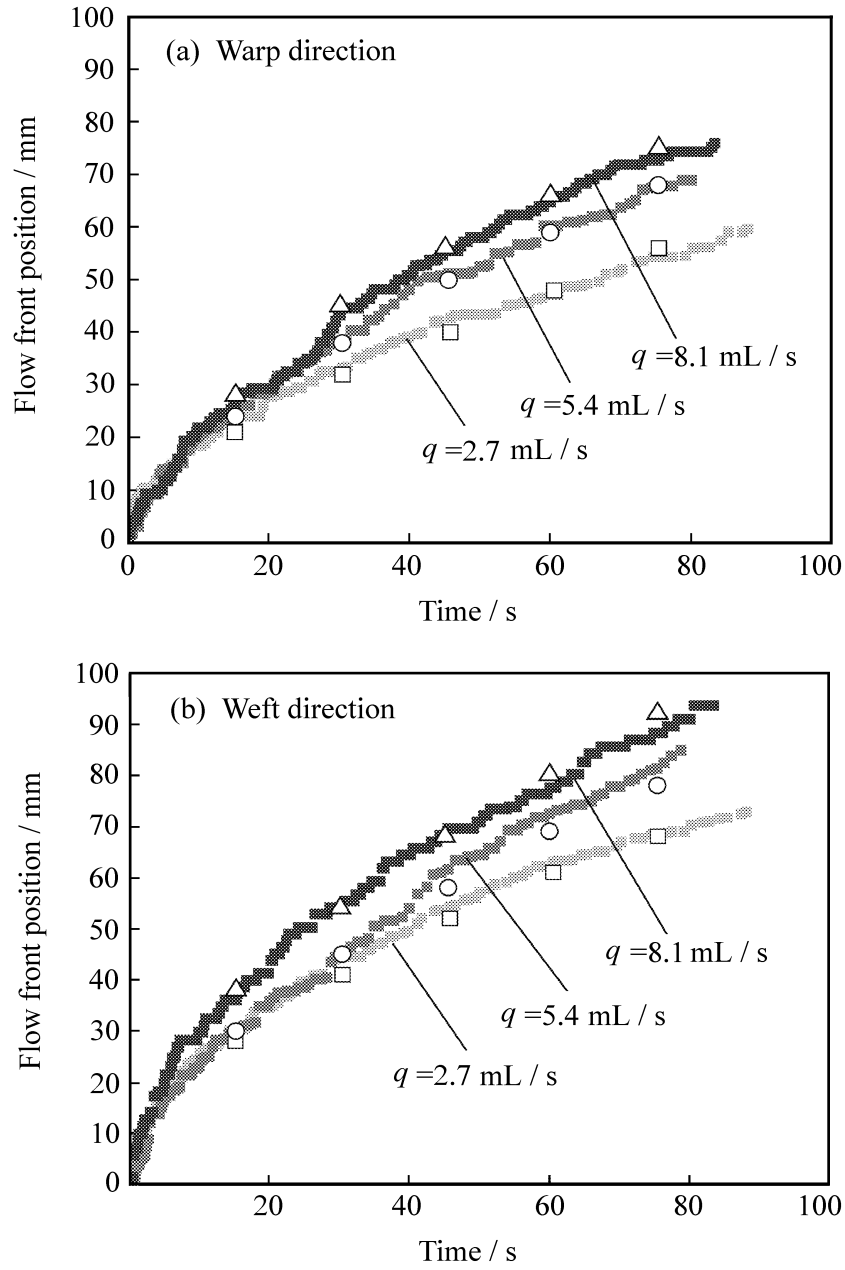

图 6　经纬向流线上树脂流体的前沿位置

Fig. 6　The flow front positions of resin fluid in warp and weft directions

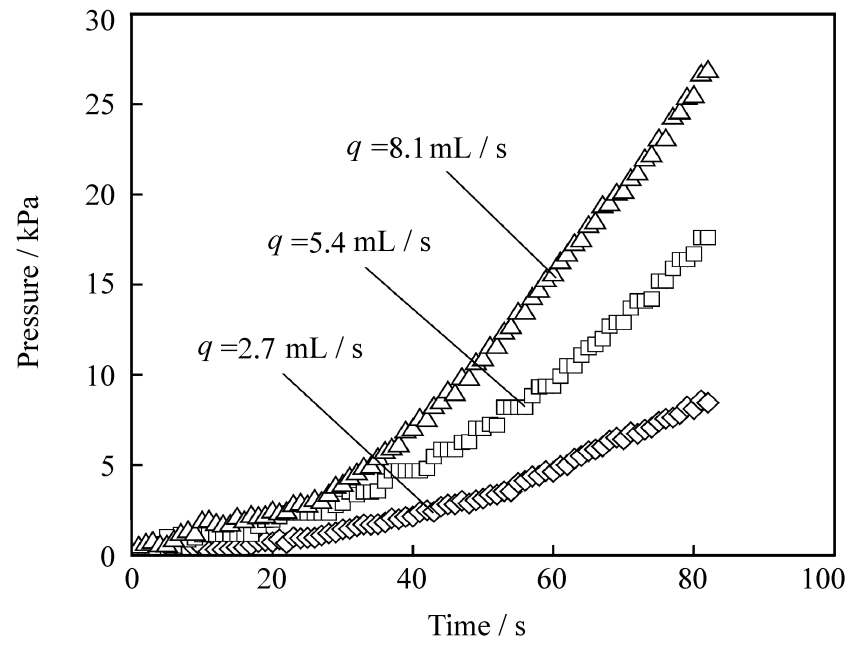

图 7　注入口处流体的压力

Fig. 7　Pressure of fluid at inlet

模拟了水在聚酯纤维非织造织物以及聚酯树脂在玻纤机织布内的平面径向流动。在面内各向同性的非织造纤维网中，流体在各个方向上的流动行为基本一致，流体的前沿大致呈圆形。在纤维沿经纬方

向取向的机织物中,流体的前沿不再呈圆形。在纤维排列密度较低的方向上,流体具有较高的流速。模拟结果和实验吻合良好,表明所推荐的模型可用以研究浸渍过程中树脂基体相对于纤维集合体的流动行为。

参考文献:

[1] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 31- 39.

[2] 江顺亮. RTM 加工工艺充模过程的计算机模拟 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 13- 17.

[3] 李海晨, 王　彪, 周振功. RTM 工艺树脂流动过程树脂模拟 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 18- 23.

[4] 尹明仁, 段跃新, 李　丹, 等. 视窗化 RTM 工艺冲模过程模拟仿真技术研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(4): 17- 22.

[5] 吕　昶, 薛元德. RTM 工艺冲模过程数值模拟及实验比较 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 131- 136.

[6] Seo J W, Lee W I. A model of the resin impregnation in thermoplastic composites [J]. Journal of Composites Materials, 1991, 25(9): 1127- 1142.

[7] Ingham D B, Pop, I. Transport Phenomena in Porous Media [M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1998. 5- 18.

[8] Ahmed N, Sunada D K: Non-linear flow in porous media [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1969, 95: 1847- 1858.

[9] Wilde R E. Statistical Mechanics—— Fundamentals and Modern Applications [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998. 85- 87.

[10] Baxter R J. Exactly Solved Models in Statistical Mechanics [M]. London: Academic Press, 1982. 32- 38.

[11] 钟　闻, 丁　辛, 唐志廉. 纤维集合体内液体浸润的统计力学模型 [J]. 物理化学学报, 2001, 17(8): 682- 686.

[12] 钟　闻. 基于统计力学的流体在纤维集合体内流动的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2001.