复 合 材 料 学 报　　第 20 卷　第 4 期　8 月　2003 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　Vol. 20　No. 4　August　2003

文章编号: 1000-3851(2003) 04-0077-04

RTM 工艺树脂流动过程数值模拟及实验比较

秦　伟[1], 李海晨[2], 张志谦[3], 吴晓宏[3]

(1. 哈尔滨工业大学 空间材料与环境工程实验室, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工业大学 应用化学系, 哈尔滨 150001)

摘　要: 树脂充模是 RTM 工艺成型过程中的重要一环。研究了 RTM 工艺树脂流动过程的特点, 建立了树脂渗流控制方程。采用贴体坐标/ 有限差分法模拟了树脂渗流过程, 给出了不同时刻树脂流动前沿曲线及终止时刻压力场分布, 计算结果与试验结果吻合良好。

关键词: RTM; 树脂流动; 数值模拟; 贴体坐标

中图分类号: TB12　　**文献标识码:** A

COMPARISON BETWEEN NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULT OF RESIN FLOW IN RTM

QIN Wei[1], LI Haichen[2], ZHANG Zhiqian[3], WU Xiaohong[3]

(1. Space Materials and Environment Engineering Lab., Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The molding filling process is a very important phase in RTM. This paper studies the RTM process and its resin flow process. The governing equations of resin flow are built up. The boundary-fitted coordinate system and the finite difference method are employed for simulating the resin flow process. The successive resin flow front position and the pressure distribution at the final stage are obtained, and good agreement is found between the numerical simulation and experimental results as well as other investigations.

Key words: RTM; resin flow; numerical simulation; boundary-fitted coordinate system

RTM 工艺以其环境污染小, 生产效率高、设备简单及模具投资少, 大型复杂结构制品可一次成型等特点, 在国内外得到越来越广泛的应用。RTM 工艺是将树脂体系在一定的压力下, 注入预先铺放好纤维增强体的闭合模腔内, 树脂在模腔内浸润纤维增强材料后固化成型[1, 2]。

RTM 工艺的主要任务之一是确定树脂注射口及排气孔位置, 以使增强纤维充分润湿, 树脂注射压力合适。因此, 预先了解 RTM 工艺树脂流动过程, 特别是树脂流动前沿曲线对模具设计非常重要。

RTM 工艺数值模拟的难点是求解区域随着树脂的注入不断发生变化, 模拟方法主要有有限元/ 控制体积法[3, 4]和贴体坐标/ 有限差分法[5]。有限元法适合解决复杂边界情况, 但程序不易编制, 计算过程复杂。贴体坐标/ 有限差分法可以把不规则的边界问题变换到规则区域去求解, 程序相对易于编制, 是解决复杂边界问题的一种有效手段[6]。笔者采用贴体坐标/ 有限差分法模拟了 RTM 工艺树脂流动过程, 给出了不同时刻树脂流动前沿曲线及终止时刻的压力场分布, 并将数值模拟结果与实验结果做了比较。由于 RTM 工艺主要应用于薄板构件, 因而只考虑了二维情形; 由于旨在模拟树脂流动过程, 因而未考虑温度变化及树脂化学反应产生的影响。

1　树脂流动控制方程

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, 选择渗透率主轴方向为坐标系方向, Darcy 定律可表示为

收稿日期: 2002-01-14; 收修改稿日期: 2002-03-27
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59833110)
作者介绍: 秦　伟, (1972-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为先进复合材料成型、改性及其在空间环境中的评价。
通讯作者: 秦　伟, E-mail: wxhqw@ 263. net

$$k_i p_{,i} + _u_i = 0 \qquad (i = x, y) \qquad (1)$$

式中: k_x, k_y 为纤维主轴方向渗透率, u_i 为树脂流动速度, p 为树脂压力, _ 是树脂粘度。假定树脂为不可压缩流体, 根据不可压缩流体连续性方程得到

$$u_{i,i} = 0 \qquad (i = x, y) \qquad (2)$$

将式(1)代入式(2), 得到

$$k_x p_{,xx} + k_y p_{,yy} + (k_{x,x} - \frac{k_x}{_}__{,x}) p_{,x} + (k_{y,y} - \frac{k_y}{_}__{,y}) p_{,y} = 0 \qquad (3)$$

式(3)即为树脂流动控制方程。不考虑树脂流动前沿表面张力, 边界条件可写为

$$\begin{aligned} p &= p_0 \qquad (\text{注射口}) \\ p_{,n} &= 0 \qquad (\text{模具边界}) \\ p &= 0 \qquad (\text{流动前沿}) \end{aligned} \qquad (4)$$

2　网格生成

贴体坐标法可把不规则的物理域问题变换到规则的计算域去求解, 如图 1 所示。

用贴体坐标生成网格主要有三种方法: 代数法, 微分方程法及保角变换法, 笔者采用微分方程法。设在物理域中形成的贴体坐标系为 a, Z, 应用 Possion 方程求解 a, Z 的方程为

$$\begin{aligned} {}^2a(x, y) &= P(x, y) \\ {}^2Z(x, y) &= Q(x, y) \end{aligned} \qquad (5)$$

式中: ${}^2 = \frac{5^2}{5x^2} + \frac{5^2}{5y^2}$, 由于在物理域中求解 a, Z 很不方便, 实际求解时采用式(5)的逆变换形式

$$Tx_{i,jj} - 2Ux_{i,jk} + Vx_{i,kk} + J^2(Px_{i,j} + Qx_{i,k}) = 0 \quad (i = 1, 2)(x_i = x, x_2 = y)(j = a, k = Z) \qquad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} T &= x_{,Z}^2 + y_{,Z}^2, \quad U = x_{,a}x_{,Z} + y_{,a}y_{,Z} \\ V &= x_{,a}^2 + y_{,a}^2, \quad J = x_{,a}y_{,Z} - x_{,Z}y_{,a} \end{aligned} \qquad (7)$$

源项 P, Q 用于调节网格疏密程度, 文中取为零。

3　方程变换及求解过程

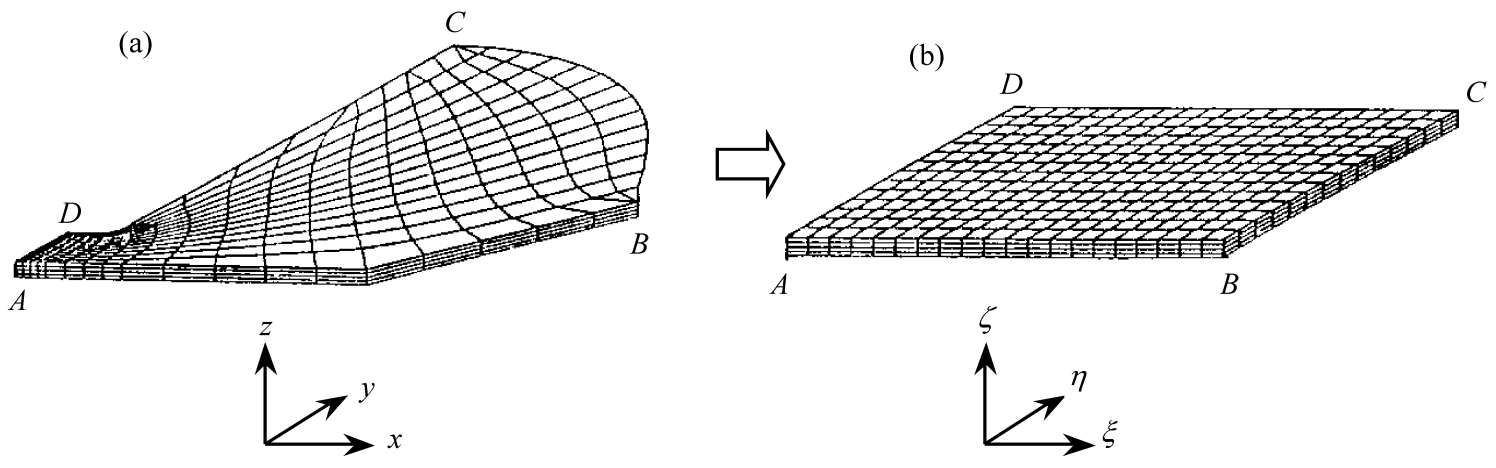
网格生成后, 控制方程及边界条件也应变换到计算域去求解。树脂渗流控制方程变换到计算域为

$$c_{11}p_{,aa} - 2c_{12}p_{,aZ} + c_{22}p_{,ZZ} + c_1 p_{,a} - c_2 p_{,Z} = 0 \qquad (8)$$

式(8)中各系数如下:

$$\begin{aligned} c_{11} &= k_x y_{,Z}^2 + k_y x_{,Z}^2 \\ c_{12} &= k_x y_{,a}y_{,Z} + k_y x_{,a}x_{,Z} \\ c_{22} &= k_x y_{,a}^2 + k_y x_{,a}^2 \\ d_1 &= c_{11}y_{,aa} - 2c_{12}y_{,aZ} + c_{22}y_{,ZZ} \\ d_2 &= c_{11}x_{,aa} - 2c_{12}x_{,aZ} + c_{22}x_{,ZZ} \\ d_3 &= k_{x,a} - \frac{k_x}{_}__{,a} \\ d_4 &= k_{x,Z} - \frac{k_x}{_}__{,Z} \\ d_5 &= k_{y,a} - \frac{k_y}{_}__{,a} \\ d_6 &= k_{y,Z} - \frac{k_y}{_}__{,Z} \\ c_1 &= \frac{1}{J}(d_1 x_{,Z} - d_2 y_{,Z}) + d_3 y_{,Z}^2 - d_4 y_{,a}y_{,Z} + d_5 x_{,Z}^2 - d_6 x_{,a}x_{,Z} \\ c_2 &= \frac{1}{J}(d_1 x_{,a} - d_2 y_{,a}) + d_3 y_{,a}y_{,Z} - d_4 y_{,a}^2 + d_5 x_{,a}x_{,Z} - d_6 x_{,a}^2 \end{aligned}$$

边界条件变换到计算域为



(a) Physical domain　　(b) Calculation domain

图 1　物理域和计算域的坐标系变换

Fig. 1　Coordinate transformation of physical plane and transformed plane

$$\begin{aligned} & p = p_0 && \text{(注射口)} \\ & (k_x y_{,a}^2 + k_y x_{,a}^2) p_{,z} - \\ & (k_x y_{,a} y_{,z} + k_y x_{,a} x_{,z}) p_{,a} = 0 && \text{(模具边界)} \\ & p = 0 && \text{(流动前沿)} \end{aligned} \tag{9}$$

采用有限差分法求解坐标变换方程、控制方程、速度方程过程为

(1) 在每一个时间步内求解坐标变换方程, 得出计算域各点对应的 x, y 坐标。

(2) 求解控制方程, 得出流场内各点压力值。

(3) 求解速度方程, 确定边界各点速度。

(4) 选择合适的时间步长, 得到新的计算域及物理域。

(5) 重复第一步计算, 直到流体充满整个物理域为止。

4　算例及实验结果

笔者对室温下的树脂注模过程进行了实验研究及数值模拟, 采用的树脂为环氧树脂, 树脂粘度 $\eta = 0.5$ Pa·s, 增强纤维为各向同性玻璃纤维布, 纤维空隙率为 0.5, 树脂注射压力 $p = 0.03$ MPa, 模具大小为: 0.12 m × 0.1 m, 增强纤维渗透率为: $k = 2.15 \times 10^{-9}$ m^2, 得到的不同时刻树脂流动前沿曲线如图 2所示。

笔者采用贴体坐标法对上述树脂流动过程进行了数值模拟, 得到的不同时刻树脂流动前沿曲线如图 3 所示。可见: 树脂开始时刻流动前沿曲线为半圆形, 然后逐渐过渡成直线, 数值模拟结果与实验结果吻合良好。终止时刻树脂压力场分布灰度图如图 4 所示, 可以看出, 树脂压力场等压线形状与树脂流动前沿曲线相似。

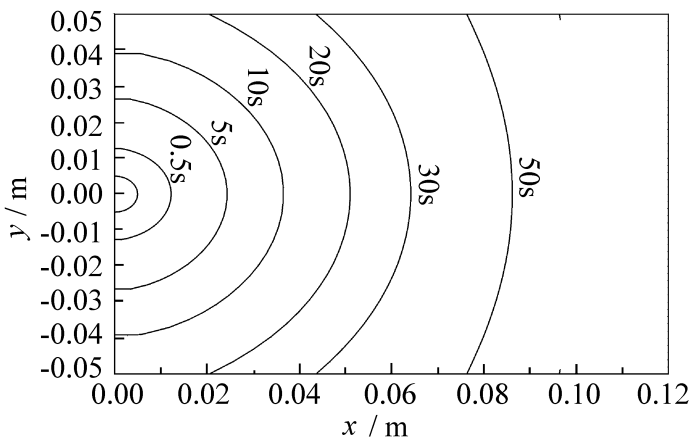


图 3　不同时刻树脂流动前沿数值模拟曲线

Fig. 3　The simulated resin flow front position at different times

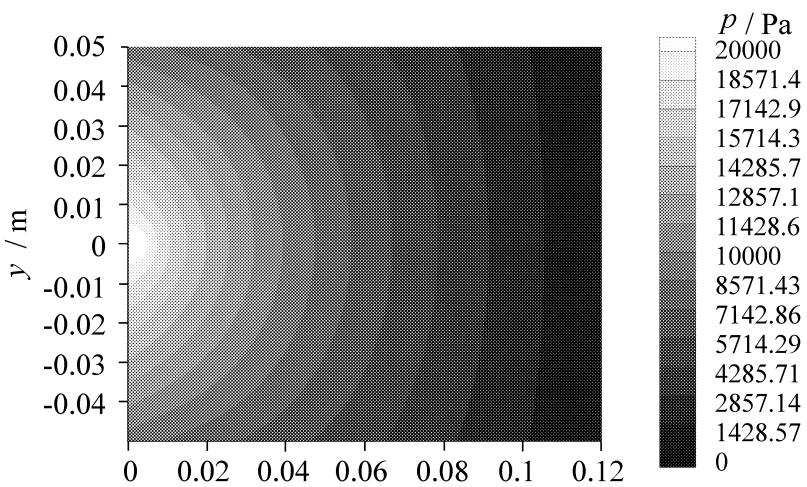


图 4　终止时刻树脂压力场分布

Fig. 4　The resin pressure field at final stage

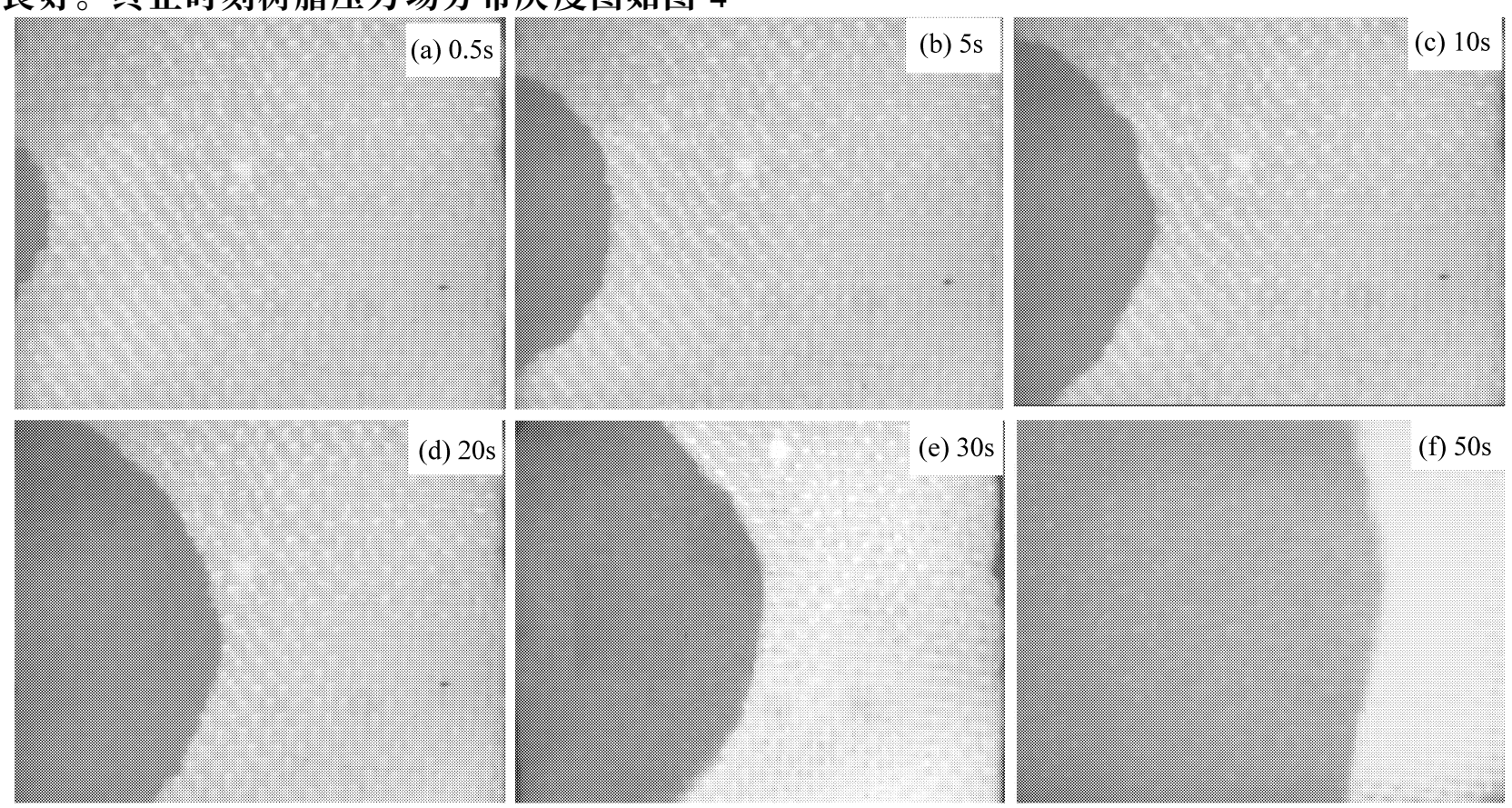


图 2　不同时刻树脂充模实况

Fig. 2　Successive resin flow from position in RTM filling experiment

5 结　论

(1) 采用贴体坐标/有限差分法编制较简单的程序即可模拟出单点注射树脂流动的前沿曲线及树脂压力场分布。

(2) 文中的计算结果与实验结果吻合良好,从而为 RTM 工艺模具设计、优化工艺参数提供了理论基础。

参考文献:

[1] 顾　宜,钟赤峰,谢美丽. 用于 RTM 成型工艺的口恶　树脂及其复合材料 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 32- 37.

[2] 秦　伟, 张志谦, 黄玉东,等. 冷等离子体处理对 PET 纤维/环氧复合材料界面改性的研究 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(4): 25- 28.

[3] Chan A W, Morgan R J. Tow impregnation during resin transfer molding of bi-directional nonwoven fabrics [J]. Polymer Composites, 1993, 14(4): 334- 340.

[4] Lin R J, Lee J L. Mold filling and curing analysis in liquid composite molding [J]. Polymer Composites, 1993, 14(1): 71- 81.

[5] Coulter J P, Güceri S I. Resin impregnation during the manufacturing of composite materials subject to prescribed injection rate [J]. J of Reinforced Plastics and Composites, 1988, 7(5): 200- 219.

[6] Trochu F, Gauvin R. Limitation of a boundary-fitted finite difference method for the simulation of the resin transfer molding process [J]. J of Reinforced Plastics and Composites, 1992, 11(7): 772- 786.