

# RTM 工艺数值模拟技术研究进展

彭超义 曾竟成 肖加余 张长安 杜 刚

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

**文 摘** 阐述了几种 RTM 工艺树脂浸润过程的模拟模型,同时介绍了数值模拟方法和数值模拟软件用于 RTM 工艺研究的进展和应用情况。

**关键词** 树脂传递模塑工艺,数值模拟,模型,软件

## Research Progress in Numerical Simulation of RTM Process

Peng Chaoyi Zeng Jingcheng Xiao Jiayu Zhang Changan Du Gang

(Astronautics and Materials Institute, National University of Defence and Technology, Changsha 410073)

**Abstract** Several process models for RTM are proposed to simulate the resin flowing and wetting out process. Progress and application of numerical simulation methods for RTM are also introduced.

**Key words** RTM, Numerical simulation, Model, Software

### 1 前言

树脂传递模塑(RTM)工艺是在一定的温度和压力下把低粘度的树脂注入放置有增强材料的模具中,然后常温或加热固化成型复合材料。其过程主要有:(1)模具制备;(2)增强纤维预成型体制备;(3)注射树脂;(4)固化(加热或不加热);(5)脱模和修边。树脂注入模腔浸润纤维增强体的过程是 RTM 工艺中非常重要的一个环节,树脂对纤维增强体的浸润过程是粘性流体向各向异性的多孔介质中进行长程渗流的复杂过程,其技术难点在于这个动态过程无法观察,难以进行预测和控制,从而容易导致模塑过程中树脂的流动不均衡,易产生气泡、干纤维等缺陷,最终对产品质量产生很大影响。从工艺上解决这个难题目前主要有两种途径:一是利用传感器置入增强体或者模腔中,监控树脂的流动过程<sup>[1~3]</sup>;二是利用计算机建立树脂流动过程的模型进行数值

模拟,预先了解树脂流动规律,特别是树脂流动前沿曲线及压力场分布等,从而可以对树脂注射口和排气孔的位置进行优选,以利于树脂充分浸润纤维增强体,并可选择合适的注射压力<sup>[4~7]</sup>。随着 20 世纪 90 年代以来计算机技术的迅猛发展,鉴于 RTM 工艺过程数值模拟对模具设计、工艺过程控制和参数优化的重要性,使得数值模拟技术成为近来 RTM 技术研究的一个热点,国内外研究者在这方面做了大量卓有成效的工作,并开发了不少模拟软件投入到实际应用当中<sup>[3,8,9]</sup>。本文阐述了数值模拟的几种常用模型以及国内外 RTM 工艺计算机数值模拟技术的研究状况。

### 2 RTM 工艺数值模拟模型

RTM 工艺的关键环节之一是确定模具的注射口和排气孔位置及充模时间。为了优化模具设计,降低试验成本,许多研究人员对 RTM 成型过程进行

收稿日期:2002-10-30;修回日期:2003-06-10

彭超义,1977 年出生,博士研究生,主要从事聚合物基复合材料、RTM 成型工艺研究工作

宇航材料工艺 2003 年 第 4 期

了数值计算和计算机模拟,并提出了许多模拟模型。这些模型主要可分为两类:一类只考虑树脂的流动,大部分模型都属于这类,称之为单相流动模型;另一类同时考虑树脂的流动和空气流动,称之为两相流动模型。单相流动模型和两相流动模型都可以分为1D(一维)、2D(二维)和3D(三维)模型,其中,1D模型只考虑树脂沿纤维轴向的流动,2D模型同时考虑树脂沿纤维轴向和垂直于轴向方向的流动,3D模型在2D模型的基础上还考虑了树脂在垂直于2D平面方向上的层间流动。所有这些模型都是基于Darcy定律对模腔内的树脂流动进行模拟。1D模型极大地简化了研究对象,使用简单快捷,但结果不够准确<sup>[10,11]</sup>,2D和3D模型可以更真实准确地模拟RTM成型过程,但模型所用参数较多,处理起来较为复杂<sup>[12~14]</sup>。

## 2.1 单相流动模型

RTM工艺中树脂对纤维增强体的浸润过程是一个典型的粘性流体向各向异性的多孔介质中进行长程渗流的过程,液相(树脂)和多孔介质(纤维预成型体)之间存在着不同程度的相互作用,单相流动模型主要用于从宏观上了解树脂的流动规律和树脂流动前沿状态以及确定压力场的分布。单相流动模型不考虑膜腔内气体的流动状况,从而简化了研究对象,有助于研究者使用相对简单的模型处理树脂流动问题,可以节省大量的时间和精力。尽管单相流动模型不考虑空气的流动问题,其过程仍然十分复杂,研究者在建立一个模型的时候仍然需要进行一些必要的假设,忽略一些相对不重要的工艺参数的变化,并采用有限元方法等手段来求解数值方程。

为了进一步简化RTM工艺流动模型,Cai<sup>[10]</sup>等人采用1D模型来模拟树脂的流动过程,可以较好

地估算RTM工艺的一些重要参数如充模时间和注射压力等,但其处理方法却要简单得多。对于1D模型,基于Darcy定律,Cai提出了下列一组方程:

$$q = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = q \quad (2)$$

$$q_0 A_0 = qA \quad (3)$$

式中, $q$ 是流动速率, $K$ 是流动方向的渗透率, $\mu$ 是树脂粘度, $\mu$ 、 $K$ 视为常数, $P$ 是树脂压力, $x$ 是树脂流动前沿位置, $A$ 是树脂流过的截面积, $t$ 是时间, $q_0$ 是某一界面处的流动速率, $A_0$ 是对应于 $q_0$ 处的截面积,如果纤维含量比较低, $q_0$ 可保持为常数。

由(2)式和(3)式可以解出充模时间或者树脂流动前沿位置。如果纤维含量较高,则引入模具形状因子 $F(x) = A/A_0$ 。假设树脂前沿压力 $P=0$ ,则由(1)式和(3)式可得:

$$\frac{P_0 K}{\mu} = q_0 \int_{x_0}^x F(x) dx \quad (4)$$

式中, $P_0$ 和 $x_0$ 分别为(3)式中 $A_0$ 处的树脂压力和流动前沿位置,由(2)式和(4)式可推出:

$$t - t_0 = \frac{\mu}{P_0 K} \int_{x_0}^x \frac{F(x) dx}{F(x)} \quad (5)$$

式中, $t_0$ 为树脂流动到(3)式中 $A_0$ 处的时间。

(5)式表明了树脂压力和充模时间之间的关系,由此可以求解充模时间。Cai采用数值解析法来求解该1D模型,并将建立1D模型的思想推广到2D和3D模型中去。例如,在2D模型中,假设宽度方向的尺寸与树脂流动方向存在着线性关系,则2D模型的充模时间为:

$$t_f = t_0 + \frac{1 - [1 + a(x_f - x_0)/h_0]^2 \{1 + \lg[1 + a(x_f - x_0)/h_0]\}^2}{4a^2/h_0^2} \quad (6)$$

式中,下标 $f$ 表示树脂流动的前沿位置, $h_0$ 表示 $t$ 时刻树脂流过2D平面的宽度, $a$ 表示2D平面宽度随着树脂流动前沿位置而变化的线性系数。

对于更复杂模具形状,Cai建议把模具分成若干简单的部分,并且可以假设树脂是先充满其中一个

部分,再依次充满其他部分,则可分别使用上述1D或者2D模型予以处理。在Cai研究的基础上,Velten<sup>[11,15]</sup>进一步提出了一些假设:树脂粘度为常数,压力为常数,每个部分的流动速率和渗透率为常数,建立了Velten模型。Velten模型是对Cai模型的推

广,求解压力分布和充模时间的方程如下:

$$P(x, t) = \frac{P(x_0, t_0) + \int_{x_0}^x \frac{\mu}{K} dx + P(x, t_0) \int_{t_0}^t \frac{\mu}{K} dt}{\int_{x_0}^x \frac{\mu}{K} dx} \quad (7)$$

$$t(x) = t_0 + \frac{\int_{x_0}^x \frac{\mu}{K} dx + (P_0/c)^2 - P_0/c}{c} \quad (8)$$

式中,  $F$  为形状因子,  $t(x)$  相当于 Cai 模型中树脂前沿位置  $x$ ,  $x_0$  为  $t_0$  时刻树脂前沿位置,  $t_0$  为与  $x$  正交方向的树脂前沿位置,  $c$  为树脂流经区域与  $x$  相关的比例系数。

Velten 模型相比于 Cai 模型具有不少优点:如果 Velten 的假设成立,就可以对充模时间和压力分布进行更精确的估算,而且对于复杂型腔的模具无需

$$\frac{\partial S}{\partial t} - \frac{K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left[ \frac{\partial S}{\partial x} \right] - \frac{K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \left[ \frac{\partial S}{\partial y} \right] - \frac{K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \left[ \frac{\partial S}{\partial z} \right] = S \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right] \quad (9)$$

式中,  $S$  为树脂密度,  $S$  和  $\mu$  分别为体积元中的树脂浸润度和孔隙率,  $\mu$ 、 $K$  和  $P$  分别表示树脂粘度、树脂渗透率和树脂压力。(9)式几乎无法求解,为简化方程,可假设树脂流动速率和渗透率为常数,从而(9)式简化成:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (K_{e_x} \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{e_y} \frac{\partial P}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{e_z} \frac{\partial P}{\partial z}) \right] \quad (10)$$

式中,  $K_{e_x}$ 、 $K_{e_y}$ 、 $K_{e_z}$  是  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上的有效渗透率(此处假设为常数)。Dave 模型给 RTM 工艺成型的树脂模型提供了巨大的灵活性,因为研究人员可以基于自己研究的具体情况赋予该模型相应的限制条件。但由 Dave 模型的自由性太大,在使用该模型的时候可能会给研究人员增加额外的难度。

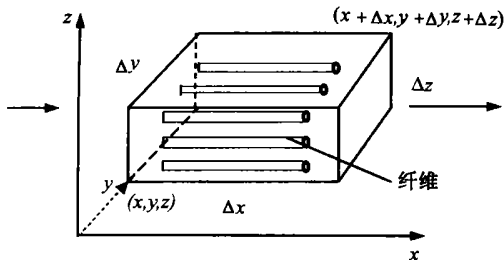


图 1 典型体积元示意图

Fig. 1 Sketch map of typical volume element

再分成若干个部分来处理。只是 Velten 模型所需的计算量比 Cai 模型要大得多。由于在 1D 模型中,树脂是假设沿一个方向流动(通常沿纤维轴向流动),因而不能反映树脂的真实流动状况,于是 2D 和 3D 模型被用来处理树脂的横向流动甚至是层间流动。Dave<sup>[13]</sup>提出对所有复合材料成型过程的树脂流动模型进行统一,从复合材料中取出一个典型的体积元(见图 1)来反映树脂的流动状况,并将树脂流动在直角坐标系中的连续性方程表述为:

## 2.2 两相流动模型

两相流动模型考虑了树脂、空气和纤维之间的相互作用,Chui 等<sup>[16]</sup>提出两相流动模型以估算 RTM 工艺成型过程中所形成孔洞的体积分数。为了简化研究的问题,做了以下假设:浸润和固化过程中假设空气和树脂各自以独立相存在,这意味着空气和树脂不相溶(事实上二者之间一般都存在着一定的相容性);厚度方向上所有参数都假设为常数,这意味着使用该模型来处理较大厚度的构件时将会出现严重偏差;忽略毛细管作用。基于这些假设,并考虑质量守恒定律和 Darcy 定律(对不可压缩液体,质量守恒等价于体积守恒),所以有:

$$\begin{aligned} \partial_r S_r + \nabla q_r &= 0 \\ \partial_r S_a + \nabla q_a &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $S_r$  和  $S_a$  分别代表树脂相和空气相的浸润度,

表示预成型体纤维之间的空隙率,  $q_r$  和  $q_a$  分别表示树脂和空气的流动速率,可用 Darcy 定律描述:

$$\begin{aligned} q_r &= - \frac{K_{rel,r}}{\mu_r} K \nabla P \\ q_a &= - \frac{K_{rel,a}}{\mu_a} K \nabla P \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $\mu_r$  和  $\mu_a$  分别表示树脂相和空气相的粘度,  $K_{rel,r}$  和  $K_{rel,a}$  分别表示树脂相和空气相的相对渗透

率,  $P$  和  $K$  是压力和预成型体的绝对渗透率。Chui 认为通过相关渗透率的模型可以从纤维束的长度规模对 RIM 工艺进行模拟。相关渗透率参数测定后, 就可以根据 (11) 式和 (12) 式求解浸润度或者压力分布。Chui 模型由于引进了相关渗透率(受空气相和树脂相的饱和度影响以及相应压力影响)的概念, 可以表述空气泡的特点和树脂流动浸润预成型体时空气和树脂的相互作用。根据这种关系, 由空气泡导致的孔隙可以借助局部加压来减少。

上述模型中, 单相模型中的 1D 模型大大简化了实际问题, 可以省去繁琐的计算, 然而精确度不高, 可用于 RIM 工艺的粗略估算, 如果需要进行更精确的模拟计算, 则需要采用 2D 或者 3D 模型或两相模型。

### 3 RIM 工艺计算机模拟研究与应用

#### 3.1 常见的数值模拟方法

上述 RIM 工艺模拟模型或仿真平台, 都是在 Darcy 定律的基础上, 赋予模型一定的边界条件或者限制条件, 采用某种数值手段来处理模型方程进行求解。这些模型通常应该满足的边界条件有三方面: (1) 注射口处, 注射压力或注射流量为一定值, 或为一预定义的方程; (2) 树脂流体流动前锋的边沿处(已填充和未填充区域的分界线) 压力为 0; (3) 模腔壁或其他非渗透性表面处树脂流体流速设置为 0, 压力值为 0。在这些边界条件以及针对不同模型所作的假设条件的基础上, 通常要建立其树脂流动前沿位置的方程、压力分布场的方程等, 再采用有限差分法(FD)、边界元素法(BE)和有限元法(FE)等数值计算方法进行计算求解。RIM 工艺数值模拟的难点主要在于求解区域随着树脂的注入不断发生变化, 压力场、温度场及固化度场互相耦合。许多研究者采用了有限元/ 体积控制法和贴体坐标/ 有限差分法<sup>[17~19]</sup>来进行模拟。有限元法适合解决复杂模具边界情形, 而且不需要对边界面进行网格的重新划分, 因而应用广泛, 但程序不易编制, 计算过程复杂, 对树脂流动前沿跟踪不准确。有限元/ 体积控制法绝大多数采用的是三角形有限元网格, 有的研究者发现使用四边形网格更加有效, 并通过例子分析了三角形单元、四边形单元及其混合使用情况下的计算结果; 表明四边形单元计算精度高、速度快, 与三角形混合使用情况良好<sup>[7]</sup>。贴体坐标/ 有限差分法

由于适合解决复杂边界问题, 程序相对易于编制而在计算流体力学领域有着广泛应用, 特别是对于动边界问题, 计算过程需要重新生成网格, 计算量大, 但贴体坐标/ 有限差分法都是单一网格划分法, 不适合模具内有插入物情形下的树脂流动过程<sup>[20]</sup>。有的研究者则把贴体坐标/ 有限差分法和网格划分法结合起来, 模拟了模具内有插入物情形下的树脂流动过程, 给出了不同时刻树脂流动前沿曲线、计算网格和终止时刻压力场分布<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 国内外研究应用现状

国外学者从 20 世纪 80 年代后期开始从事 RIM 工艺的数值模拟研究工作, 并取得了重大进展<sup>[10, 17~19, 21]</sup>, 进入 90 年代以后, 已经陆续有不少对 RIM 工艺进行设计的软件投入到生产实践当中<sup>[4~7]</sup>。这些软件模拟 RIM 成型过程, 可以在实物制造之前对产品进行设计和测试, 不但可以优化产品性能而且可以节约试验成本。可以对成型温度、流动速率、注射压力等成型参数进行优化, 可以优选注射口和排气口, 还可以模拟在模腔内埋入传感器对成型过程进行检测和控制。其中较为成功的有美国 Delaware 的 LIMS, 密歇根州立大学的 LMPC, 福特公司开发的 CFILL 和 R. Gauvin 等人的 RIM - FLOT 等<sup>[22~25]</sup>。国外的 RIM 数值模拟水平也逐渐由 1D、2D 向 3D 方向发展, 同时在等温模型的基础上发展了非等温模型工艺模拟仿真平台。福特汽车和贝尔直升机等公司都已经采用了这样的软件进行产品和模具的分析设计, 不但降低了加工成本, 而且减轻了模具的质量, 减少了树脂用量, 提高了产品质量并缩短了模具设计和生产周期。

国内从 20 世纪 90 年代中期开始研究 RIM 的数值模拟技术, 并作了大量卓有成效的工作, 目前主要还处于理论方面的探索和研究, 在实际应用上远远落后于国外先进水平, 只有北京航空航天大学材料学院等少数单位在做这方面的工作<sup>[26]</sup>。

#### 4 结束语

目前, 借助于强大的计算机处理手段, 许多研究人员根据 RIM 各种工艺条件的需要, 建立了许多数值模拟模型, 开发不少可实际应用的模拟软件或仿真平台, 对 RIM 工艺的发展起到了很大的指导作用, 数值模拟手段仍是目前 RIM 工艺研究的一个热点。

## 参考文献

- 1 Nielsen D, Pitchumani R. Intelligent model-based control of preform permeation in liquid composite molding processes, with online optimization. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001; 32(12): 1789 ~ 1803
- 2 Heme M, Leppin C H, Gotschi C. Isothermal RTM simulation of GFRP parts for automotive applications. *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 2001; 46(1): 335 ~ 347
- 3 Skordos A A, Partridge I K. Dielectric flow sensing in resin transfer molding with switching and feedback strategies. *Plastics, Rubber and Composites*, 2000; 29(80): 391 ~ 394
- 4 李海晨, 王彪, 周振功. RTM 工艺树脂流动过程数值模拟. *复合材料学报*, 2002; 19(2): 18 ~ 23
- 5 Byoung Yoon Kim, Gi Joon Nam, Jae Wook Lee. Optimization of filling process in RTM using a genetic algorithm and experimental design method. *Polymer Composites*, 2002; 23(1): 73 ~ 86
- 6 江顺亮. 树脂传递成型加工溢料口位置的快速确定法. *复合材料学报*, 2002; 19(3): 29 ~ 32
- 7 江顺亮. RTM 加工工艺充模过程的计算机模拟. *复合材料学报*, 2002; 19(2): 13 ~ 17
- 8 仲伟虹, 梁志勇等. RTM 工艺及其在我国航空工业中的应用. *材料工程*, 1995; (1): 24 ~ 27
- 9 Walsh S. Artificial intelligence: its application to composite processing. In: *proc. of the 35<sup>th</sup> international SAMPE symposium*, 1990: 1280 ~ 1291
- 10 Cai Z. Simplified mold filling simulation in resin transfer molding. *J. of Composite Materials*, 1992; 26: 2606 ~ 2630
- 11 Velten K. Inverse problems in resin transfer molding. *J. of Composite Materials*, 1998; 32: 2178 ~ 2202
- 12 Cairns D S, Humbert D R, Mandell J F. Modeling of resin transfer molding of composite materials with oriented unidirectional plies. *Composites: Part A*, 1999; 30: 375 ~ 383
- 13 Dave R. A unified approach to modeling resin flow during composite processing. *J. of Composite Materials*, 1990; 24: 22 ~ 41
- 14 Pillai K M, Advani S G. A model for unsaturated flow in woven fiber preforms during mold filling in resin transfer molding. *J. of Composite Materials*, 1998; 32: 1753 ~ 1783
- 15 Velten K. Quantitative analysis of the resin transfer molding process. *J. of Composite Materials*, 1998; 32: 1865 ~ 1892
- 16 Chui W K, Gimm J, Tangerman F M, Jardine A P, Madsen J S, Donnellan T M, Leek R. Process modeling in resin transfer molding as a method to enhance product quality. *SIAM Rev.*, 1997; 39: 714 ~ 727
- 17 Li S, Gauvin R. Numerical analysis of the flow in resin transfer molding. *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 1990; 10(3): 317 ~ 327
- 18 Gauvin R, Chibani M, Lafontaine P. Numerical analysis of the resin transfer molding. *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 1987; 6(4): 367 ~ 372
- 19 Coulter J P, Gucer S I. Resin impregnation during the manufacturing of composite materials subject to prescribed injection rate. *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 1988; 7(5): 200 ~ 219
- 20 Francois Trochu, Raymond Gauvin. Limitation of a boundary-fitted finite difference method for the simulation for the resin transfer molding process. *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 1992; 11(7): 772 ~ 786
- 21 Marhur R, Fink B K, Advani S G. Use of genetic algorithms to optimize gate and vent location for the resin transfer molding process. *Polymer Composites*, 1999; 20(2): 167 ~ 178
- 22 Liu Baichen, Bickerton S, Advani S G. Molding and simulation of resin transfer molding (RTM)-gate control, venting and dry spot prediction. *Composites Part A*, 1996; 27(2): 135 ~ 141
- 23 Rudd C D, Long A C, Kendall K N et al. *Liquid molding technologies*. England: Woodhead Publishing Limited, 1997: 254 ~ 293
- 24 Lin M, Hahn H T, Huh H. A finite element simulation of resin transfer molding based on partial nodal saturation and implicit time integration. *Composites Part A*, 1998; 29: 541 ~ 550
- 25 Gauvin R, Trochu F, Diallo L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. *Polymer Composites*, 1996; 17(1): 149 ~ 158
- 26 尹明仁, 段跃新, 李丹等. 视窗化 RTM 工艺充模过程模拟仿真技术研究. *复合材料学报*, 2001; 18(4): 17 ~ 22

(编辑 李洪泉)