

纤维预制体 (织物) 中反应性流体的流动行为

代晓青 肖加余 曾竟成 江大志 尹昌平

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

文 摘 反应性流体在纤维预制体 (织物) 中的流动行为对于优化工艺参数和模具设计、控制制品质量等具有重要意义。本文简述了 RTM 工艺的流体流动特点,介绍了 RTM 工艺过程中流体流动研究的理论基础,综述了 RTM 工艺中反应性流体流动的发展现状,并展望了其发展趋势。

关键词 反应性流体,流动行为,连续纤维,预制体

Flow Actions of Reactive Liquid Resin Within Fiber Preform

Dai Xiaoping Xiao Jiayu Zeng Jingcheng Jiang Dazhi Yin Changping

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Flow actions of reactive liquid resin in consecutive fiber preform are important for processing parameters optimization, mold design and quality control of parts. In this paper, the flow characteristics of RTM processes are described, the theory foundations of RTM process are introduced for the flow behavior, and then the development actuality of flow actions for reactive liquid resin is summarized. Finally, its development trends are prospected.

Key words Reactive liquid resin, Flow actions, Consecutive fiber, Fiber preform

1 前言

聚合物基复合材料的发展进步对于航空航天技术的发展具有重要意义,RTM 工艺成型航空航天用聚合物基复合材料具有广阔的应用前景。RTM 工艺是将专用液态低黏度树脂在一定压力下,注入预先铺放了纤维的闭合模腔,树脂流动、浸润纤维并固化成型的一种先进复合材料成型工艺方法^[1-2],其工艺流程如图 1 所示。树脂与固化剂、促进剂等混合后组成树脂体系,因该体系黏度随固化反应时间而变化,属于反应性流体。反应性流体在流动充模过程中同时发生宏观流动 (树脂在纤维束间的流动) 和微观流动 (树脂在纤维束内的流动),其流动行为深刻影响复合材料的制备工艺性和构件性能。

反应性流体在流动过程中容易产生气泡和浸渍不良等缺陷。文献 [3] 表明,对于环氧基复合材料,微孔含量每增加 1%,材料的层间剪切强度、弯曲强度和弯曲模量等力学性能下降 6%~8%。RTM 工艺过程在树脂充模阶段依赖于纤维渗透率、注射压力、

树脂黏度、模具温度、注射口形状及其大小、溢料口位置等工艺条件^[4-7]。深入了解反应性流体在连续纤维预制体 (织物) 中的流动行为,有利于提高 RTM 工艺的可重现性,解决生产中温度、压力和脱模时间等工艺参数控制的困难,实现 RTM 工艺的优化,同时为高性能、低成本、智能结构一体化先进复合材料的成型加工提供理论指导。

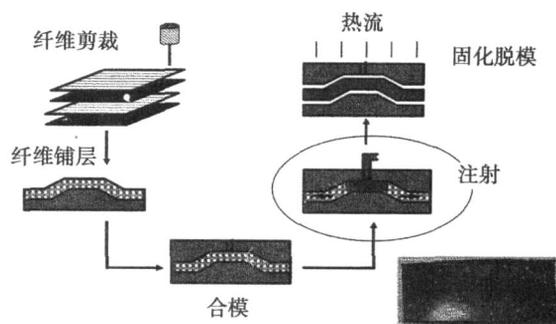


图 1 RTM 工艺示意图

Fig 1 Schematic diagram of RTM process

收稿日期:2008-09-16

作者简介:代晓青,1980年出生,博士研究生,主要从事树脂基复合材料的研究。E-mail:DXQ38@sohu.com

2 流动行为的分析

RTM工艺过程包含树脂充模流动、热传递和固化反应,其中热传递和固化反应是其他复合材料工艺所共有的,重点是充模流动问题。

在RTM过程中,模具型腔内充满着纤维预成型坯,其中包含有固体相-纤维和流动相-空气。树脂的充模流动过程就是保证树脂流过这些不规则的孔隙并将空气置换出去,使树脂充满孔隙。树脂在这些孔隙中的流动是非常复杂的。同时有两种类型的流动,一个是树脂通过整个模槽的流动,即宏观流动;另一种是树脂渗透到纤维束的流动,即微观流动。

树脂对纤维或预成型坯的渗透类似于水渗入土壤的过程,在这个过程中,润湿性流体(树脂)要流过原来包含有非润湿相(空气)的不饱和和多孔介质。润湿相渗透的过程实际上就是置换非润湿相的过程^[8]。在RTM的过程中,希望发生连续的非润湿相流动。但纤维床中的毛细孔隙大小不均匀,且互相连通,非润湿相的微观置换既可能在大的又可能在小的孔隙中发生。当润湿相浸入的速度大于等于自由浸入速度(即润湿相自发地置换非润湿相的速度)时,单位长度的粘结力大于由毛细管压力引起的毛细作用力,则润湿相就会通过大的毛细管,而较小的毛细管中的非润湿相就被封住了。相反当润湿相速度低时,毛细作用力大于粘结力,则润湿流体首先浸入较小的孔隙,非润湿相会被封于较大的毛细管中。被封住的非润湿相以“气泡”或“蛇形气管”形式存在于纤维预成型体(织物)中。

影响树脂流动的因素以及对树脂流动的控制都是非常复杂的。树脂在RTM模具内的流动由注射压力、树脂前面的空气压力(或真空度)、树脂温度、黏度、树脂与纤维间的表面动力学以及纤维预制品(织物)的浸润性所决定的,最后一个因素又是一个复杂因素^[9-10]:浸润性随着纤维类型、纤维的走向、不同平面上的纤维厚度、纤维体积、预成型坯的变形等都有关系。因此,在制定生产工艺时,需要综合考虑各个工艺参数之间的关系,以改善树脂流体与纤维表面之间的浸渍性能,减少树脂流体在纤维编织体内流动过程中产生宏观气泡与微观气泡等缺陷。

3 流动研究的理论基础

在RTM工艺中模具的设计、树脂和增强材料的选择、温度的控制、树脂在预成型体中的流动行为和树脂的固化反应等很多因素都将影响最终制件的性能。RTM工艺过程实际上是典型的非等温过程,是流体流动、热传递和树脂固化的复杂的交互作用^[11-12]。树脂流动过程中,如存在对流就会影响温度分布,温度变化会直接影响树脂的黏度,进而影响

树脂的流动。另外,温度的高低影响树脂的固化率,而热固性树脂固化过程中会放热,从而影响温度分布。树脂固化,黏度就会发生变化,又会影响树脂流动,其间的交互作用可简单表示为图2^[13]。

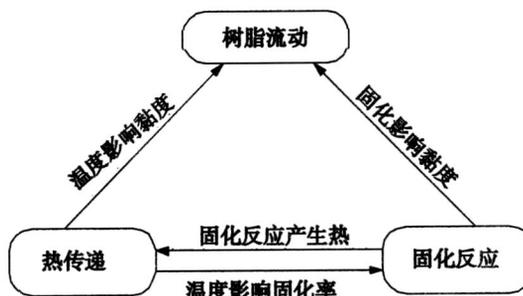


图2 RIM成型过程中平衡方程间的相互作用

Fig 2 Relationship of equilibrium equations for RIM progress

3.1 多孔介质里的流动

假设预先铺设在模腔中的纤维增强材料为刚性体,树脂为不可压缩牛顿流体,忽略表面张力的影响,由于模腔尺寸远大于纤维毡的孔隙,因此树脂在闭合模腔中的流动行为可用牛顿流体通过多孔介质的流动过程来描述,描述树脂流动行为的达西定律可表示为^[14-15]。

$$v = -\frac{K}{\mu} \cdot \nabla p \quad (1)$$

式中, v 为速度张量, K 为渗透率张量, p 为压力, μ 为树脂黏度。

为了保持树脂的质量平衡,速度场必须满足散度条件

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

联立方程(1)和方程(2)得

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} \cdot \nabla p \right) = 0 \quad (3)$$

记为模腔, d 为其边界,求解上述问题需要相应的边界条件。有2种类型的边界条件。Dirichlet条件,即恒压条件

$$p = f(x, y, z) \quad (4)$$

即在部分边界 d 上指定压力,如注射口的压力等于注射泵的额定压力。对于真空注射,注射口的压力就是大气压力。Neumann条件,即注射口恒流速条件。

$$|v \cdot S| = Q \quad (5)$$

式中, S 为注射口横截面积, Q 为流量。

3.2 树脂固化动力学

假设固化过程中产生的热量与固化反应成比例,则树脂的固化度定义为:

$$H = \frac{H(t)}{H_R} \quad (6)$$

式中, $H(t)$ 是从开始时刻到中间某一时刻 固化反应放出的热量, H_R 是整个固化过程放出的总热量。 d/dt 定义为反应率或固化率, 固化率是时间和固化度的函数, 则固化度可表示为:

$$= \int_0^t \frac{d}{dt} J dt \quad (7)$$

学术界根据固化机理的不同将热固性树脂固化动力学模型^[16-17]分为 n 级模型 $F_{(n)}$ 、自催化模型 $F_{(a)}$ 及 Kamal 模型 $F_{(k)}$ 。常用的热固性树脂固化反应模型和对应的动力学参数如表 1 所示。

表 1 常用热固性树脂固化反应模型方程及参数¹⁾

Tab 1 Curing reaction model equation and kinetic parameters of conventional thermal-setting resin

反应模型	模型名称	d/dt	动力学参数
n 级模型	$F_{(n)}$	$k_0(1 -)^n$	A, E_a, n, k_0
Kamal模型	$F_{(k)}$	$(k_1 + k_2^m)(1 -)^n$	A, E_a, m, n, k_1, k_2
自动催化模型	$F_{(a)}$	$k_3^m(1 -)^n$	A, E_a, m, n, k_3

注 1): m 和 n 为反应动力学级数。

3.3 树脂的黏度

热固性树脂的流变特性^[18]是温度、时间和反应转化率或固化度共同决定的。树脂加上固化剂、促进剂等构成的反应性流体体系, 在实际的浸渍过程中黏度随传热方式、温度 (加热时间、反应温区等) 以及树脂体系化学反应程度等发生变化。

通常假设树脂凝胶时黏度为无穷大, 因此树脂的黏度依赖于树脂转化率。树脂黏度与温度和树脂转化率的关系由本构关系确定。RTM 常用的几种黏度模型^[17]:

(1) 对指定模型, 黏度是温度的函数, A, B 是树脂性能的常数

$$\mu(T) = A e^{BT} \quad (8)$$

(2) 对指定模型, 黏度是温度和树脂转化率的函数^[19], R 为一般气体常数、 μ 、 E_v 、 k 为模型参数

$$\mu(T,) = \mu \exp\left[\frac{E_v}{RT} + k\right] \quad (9)$$

(3) 黏度 $\mu = f(T,)$ 是温度和树脂转化率的函数, 常用模型是

$$\mu = B e^{(T_b/T)} \left[\frac{ge1}{ge1 - } \right]^{C_1 + C_2} \quad (10)$$

式中, $B, T_b, ge1, C_1, C_2$ 是表征树脂性能的常数。

3.4 能量守恒方程

当树脂流经纤维预成型体时, 在模壁、纤维预成型体及树脂间将发生热传递。热传递现象显著影响树脂的充模和固化。由于热传导与所有现象有关^[20-21], 所以热的模拟非常复杂。首先是树脂与纤维之间的热传导, 然后是充模阶段树脂与模腔的对流

换热, 最后是树脂聚合反应产生反应热, 还有树脂流动时的黏性耗散产生的热等。

能量守恒方程是对一个物质系统或空间区域内能量守恒和转换规律的数学描述。为简化起见, 做如下假设:

(1) 固体骨架 (纤维) 关于流体 (树脂) 在化学上是不活泼的;

(2) 质量力做功略去不计;

(3) 忽略热辐射和黏性耗散作用的影响。

RTM 工艺过程是一个非等温渗流过程, 由于一个物质系统或空间体积内含有固体骨架 (纤维) 和流体 (树脂) 两部分, 而两者的热力学参数如比热容、热传导率等各不相同, 在渗流过程中固体骨架部分和流体部分温度不一致, 二者之间有热量传递, 这种研究系统称为非局部热平衡系统。两种非局部热平衡系统通过界面的热交换耦合在一起。

在非局部热平衡系统^[22]中, 纤维 (固体骨架) 和树脂 (流体) 之间有热量交换, 采用欧拉观点, 在流场中任取一微元控制体作为研究对象, 根据能量守恒定律, 可以得到纤维的能量守恒方程为:

$$(1 -) r C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} = (1 -) \nabla \cdot k_f \nabla T_f + h_f (T_r - T_f) \quad (11)$$

流体部分的能量守恒方程要复杂一些, 因为流体有流动, 控制体内流体的总能量包括机械能 (主要指动能) 和内能。流体部分的能量守恒可表述为: 单位时间由外界传递给控制体的热能与控制体内部热源产生的热能之和等于控制体内总能量对时间的变化率与通过控制体界面流出的能量之和。通过对微元控制体的能量规律研究, 可以得到树脂的能量守恒方程为:

$$r C_{pr} \frac{\partial T_r}{\partial t} + r C_{pr} (\bar{v} \cdot \nabla T_r) = \nabla \cdot k_r \nabla T_r + h_f (T_f - T_r) + h_w (T_w - T_r) + G \quad (12)$$

式中, \bar{v} 为多孔介质孔隙率, ρ 为密度, C_p 为比热容, \bar{v} 为树脂通过纤维的达西渗流速度, k 为热导率, h 是树脂和纤维、模具之间的热交换系数, 一般和流体流动速度有关。下标 f, r 和 w 分别代表纤维、树脂和模具。 G 是由树脂发生化学反应而引起的热产生率, 相当于一个内热源^[23], $G = r H m$, m 为质量产生率。在 RTM 工艺中, 树脂和纤维的热力学参数可能随位置和时间而变化, 为了简化起见, 假设这些热力学参数是各向同性的常量, 式 (11) 和式 (12) 可改写为:

$$(1 -) r C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} = (1 -) k_f \nabla^2 T_f + h_f (T_r - T_f) \quad (13)$$

$$r C_{pr} \frac{\partial T_f}{\partial t} + r C_{pr} (\bar{v} \cdot \nabla T_r) = k_r \nabla^2 T_r +$$

$$h_f (T_f - T_r) + h_w (T_w - T_r) + \dot{G} \quad (14)$$

在树脂注射速度小,流体渗流速度很慢,树脂和纤维之间热交换系数很大的情况下,可以认为纤维和流体瞬时温度一致,这种系统称为局部热平衡系统。在局部热平衡系统中,树脂和纤维的温度达到瞬时热平衡,如果忽略模具的影响,令 $T_r = T_f = T$,将式(13)和式(14)相加,可以得到能量守恒方程为:

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} + r C_{pr} (\bar{v} \cdot \nabla T) = k \nabla^2 T + \dot{G} \quad (15)$$

$$= (r C_{pf}) / (r C_{pr} w_r + C_{pf} w_f)$$

$$C_p = C_{pr} w_r + C_{pf} w_f$$

$$k = (k_r k_f) / (k_r w_r + k_f w_f) \quad (16)$$

式中:

$$w_r = \frac{r}{r + \frac{1}{f}}, w_f = 1 - w_r \quad (17)$$

3.5 物种守恒方程

RTM工艺是把单体聚合物注射到模具中,在树脂润湿纤维和固化过程中,单体聚合物不断发生化学反应而聚合成大分子化合物,某一时刻的树脂组成成份是单体聚合物和大分子聚合物的混合体。物种守恒方程也即单体聚合物和大分子聚合物组成成份之间的守恒方程,其关系式可写为:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla = \nabla \cdot D_m \nabla + m \quad (18)$$

式中, α 为树脂固化度, m 为单体聚合物聚合成大分子聚合物的质量产生率, D_m 为单体聚合物和大分子聚合物之间的质量扩散率。在实际工艺过程中,由树脂固化反应而引起的聚合物质量产生率要远大于组分之间的质量扩散率,以至于组分之间的质量扩散可以忽略不计。式(18)可以改写为:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla = m \quad (19)$$

树脂充满模具进入固化阶段以后,将不再流动,此时纤维的能量守恒方程与注射阶段相同,而树脂的能量守恒方程和物种守恒方程可以简化为:

$$r C_{pr} \frac{\partial T_r}{\partial t} = k_r \nabla^2 T_r +$$

$$h_f (T_f - T_r) + h_w (T_w - T_r) + \dot{G} \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = m \quad (21)$$

4 非等温 RTM 工艺过程中流体流动的研究现状

反应性流体在 RTM 工艺充模中涉及的因素较多,难度也比较大。有关 RTM 工艺树脂流动过程、热传递过程、固化过程、工艺参数优化等问题国内外已经做了大量研究工作^[24-26]。B ruschke 等^[27]考虑了热传递及固化现象对于流动过程的影响,采用有限元控制体积法模拟了具有剪切稀化特性的树脂流过纤维编织体时的流动前沿变化情况,并用有限差分/控制体积法分析了该工艺过程的热传递和固化现象。Chan 等采用有限元法,建立了一种具有轴对称截面的 RTM 模型,考虑了树脂的固化度、黏度和温度的变化对 RTM 工艺过程的影响,根据 Darcy 定律计算了树脂在纤维编织体中的流动过程,分别求解了纤维和树脂的能量方程,并通过热导率 k 将二者的温度耦合在一起,并采用每一时间步结束时在流动前沿处增加新的有限单元的方法模拟流动前沿^[28-29]。Lee 等采用显式的控制体积/有限元法,模拟非等温条件下的 RTM/SRM 充填过程^[30]。

Chang 等^[31]采用均质化理论,提出了非等温条件下 RTM 充模过程的“宏观”和“微观”控制方程,其中“宏观”控制方程用于描述压力分布和平均流场,“微观”控制方程则对应于纤维束内的渗透率。他们采用控制体积/有限元法,预测充填过程中的流动形态以及温度分布情况。Chang 等^[32]采用均质化理论,模拟了非等温条件下树脂在多孔介质中的流动过程,分析了在固化阶段由于树脂和纤维体积收缩不同而导致的残余应力。

Dessenberger 等^[33]发现:在 RTM 充模过程中热扩散效应对流动具有较大的影响,在用多孔介质理论分析 RTM 工艺时必须考虑热扩散的因素。研究结果表明,对于不同条件下的热扩散现象,可以用热扩散模型表示。但是 Dessenberger 等认为,已经提出的热扩散模型在佩克里数较小的区域与真实情况有些不同。

Ngo 等^[34]采用隐式纯有限元法模拟了三维的瞬态流动/热/固化反应等的耦合行为。在非等温条件下涉及固化反应,热模拟复杂。为了得到热、固化的稳定性结果,提出了应用 Petrov - Galerkin 权重函数代替标准的 Galerkin 权重函数的方法。Ngo 等^[35]把流动作为二维问题处理,而把温度和固化反应作为三维问题处理,用有限元法模拟了薄壳件在非等温条件下的充模过程,并进行了实验验证。

Shojaei 等^[36]采用控制体积/有限元法模拟了三维非等温条件下的充模过程,预测了在三维非等温条件下树脂流动前沿曲线和压力、温度及树脂转化率的分布情况,模拟结果与解析结果吻合得比较好。

Young等人^[37-40]考虑了树脂、纤维和模具之间的热传递效应,以及树脂润湿纤维过程中发生的化学反应。他们开发的数值模拟软件可模拟复杂边界条件下三维树脂流动过程,给出不同时刻树脂流动前沿曲线,以及压力场、温度场和固化度场随时间变化过程,对不同类型模具(环氧模具、金属模具)在RTM工艺热行为中产生的影响也做了深入分析。Young等人不但对树脂注射过程各物理量变化进行了数值模拟,而且对固化过程中树脂温度场和固化度场的变化历程也进行了深入研究,得到了模具内不同位置处树脂温度、固化度等随时间变化曲线。根据数值模拟结果,Young等人对模具加热率、加热温度、树脂注入温度等工艺参数进行了优化设计,但采用的能量守恒模型中没有考虑树脂和纤维之间的热量交换,而是认为树脂和纤维温度保持一致,这在树脂流动速度非常小,树脂和纤维之间的热交换系数非常大的情形下是合理的。

Lin等人^[41]采用有限元法模拟了非等温条件下的树脂注射和固化过程,对热平衡系统和非热平衡系统两种情况下的树脂流动过程分别进行了数值模拟,得到了不同时刻树脂流动前沿曲线以及压力场、温度场和固化度场随时间的变化历程,但没有考虑模具对RTM工艺过程产生的影响。

国内对反应性流体在非等温条件下的注射和固化过程的流动行为研究较少,主要集中在一系列恒定黏度下,树脂充模过程的研究。武汉理工大学邓京兰等^[20]详细探讨了RTM工艺中树脂流动充模过程,利用多孔介质流体动力学基本理论和达西定律对RTM充模过程进行数值分析,建立了模拟RTM成型工艺中树脂等温及非等温流动充模过程的数学模型。该非等温模型是建立在质量守恒原理上,求解各向异性多孔介质流动问题的有限元方程。该方程运用非规则控制体有限元法求解充模过程的流动压力场问题。在实例研究中只进行了黏度无变化的充模模拟,但无实验验证。

陈仁良等^[42]采用控制体/有限元方法建立了模拟RTM工艺制造薄壁零件时树脂流动和凝固过程的2.5维非等温仿真数学模型。该模型运用纤维、树脂的能量平衡和树脂凝固的质量平衡方程模拟树脂流动和凝固过程中的热量传递和温度变化过程,研究了树脂传递成型工艺过程中树脂流动、温度变化及树脂凝固的数值求解方法,计算结果表明所提出的仿真模型能有效模拟RTM工艺过程中树脂流动、温度变化及树脂凝固程度。

5 展望

(1)树脂流体在流动过程中将发生程度不等的宇航材料工艺 2008年 第6期

固化反应,流体的黏度会随反应的进行而发生变化,从而影响RTM充填过程。因此,根据化学反应动力学深入开展树脂在流动过程中的固化反应研究,有助于深入了解固化反应对RTM工艺过程的影响规律,改进理论模型,提高模拟精度。

(2)树脂的化学流变模型描述黏度同温度、时间或者转化率之间的函数关系,通过这种函数关系可以预测任意温度、时间或转化率下的树脂黏度。反应动力学研究是化学流变行为研究的基础,但是将化学流变模型的参数和反应动力学模型的参数联系起来十分困难,需要进行大量的实验工作和数据分析。深入了解反应性流体在纤维预制体(织物)中的流动行为,研究流体流变特性和固化反应动力学之间的关系,以及热传递及固化反应对连续纤维预制体(织物)中反应性流体流动行为的影响,对于减少树脂对纤维的浸渍不良、制品孔隙率较高和存在干纤维等缺陷,提高制品的纤维含量意义重大。

参考文献

- 1 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. 复合材料学报, 2000; 18(4): 17~22
- 2 秦伟,李海晨,张志谦等. RTM工艺树脂流动过程数值模拟及试验比较. 复合材料学报, 2003; 20(4): 77~80
- 3 Harber B D, Stab G H. Note on the effects of voids upon the hygral and mechanical properties of AS4/3502 graphite epoxy. Journal of Composites Material, 1987; 21(3): 280~288
- 4 Gokee A, Hsiao K T, Advani S G. Branch and bound search to optimize injection gate locations in liquid composite molding process. Composites Part A, 2002; 33: 1 263~1 272
- 5 Shojaei A, Ghaffarian S R, Karimian S M H. Numerical simulation of three-dimensional mold filling processing in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulation. Composites Science and Technology, 2002; 62: 861~879
- 6 Bickerton S, Stadfeld H C, Steiner K V et al. Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding. Composites Science and Technology, 2002; 61: 1 625~1 637
- 7 Lin M Y, Murphy M J, Hahn H T. Resin transfer molding processing optimization. Composites Part A, 2000; 31: 361~371
- 8 张刚翼,沈玉考. 浅谈RTM工艺中对树脂流动性的控制. 玻璃钢/复合材料, 1999; (5): 10~12
- 9 黄家康. 复合材料成型技术. 北京:化学工业出版社, 1999
- 10 Shaw S J, Kinloch A J. Toughened bismaleimide adhesives. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1985; 5(3): 123~127
- 11 Loos A C, MacRae J D. A process simulation model for the manufacture of a blade-stiffened panel by the resin film infusion process. Composites and Technology, 1996; 56: 273~289
- 12 江顺亮. RTM加工工艺冲模过程的计算机模拟. 复

合材料学报, 2002; 19(2): 13~17

13 晏石林, 杨梅, 谭华. 树脂膜熔渗工艺及其数值分析方法. 玻璃钢/复合材料, 2004; (2): 33~35

14 贝尔. 多孔介质流体动力学. 李竟生, 陈希译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998

15 Hammami A. Analysis of the infusion molding process. *Polymer Composites*, 2000; 21(1): 28~40

16 代晓青, 肖加余, 曾竟成等. 等温 DSC 法研究 RFI 用环氧树脂固化动力学. 复合材料学报, 2008; 25(4): 18~23

17 Tucker C L. Heat transfer and reaction issues in liquid composite molding. *Polymer Composites*, 1996; 17(1): 60~71

18 路遥, 段跃新, 梁志勇, 张佐光. 钎酚醛树脂体系化学流变特性研究. 复合材料学报, 2002; 19(5): 33~37

19 Park J, Kang M K A numerical simulation of the resin film infusion process. *Composite Structures*, 2003; 60: 431~437

20 邓京兰, 王继辉, 连军. RTM 充模过程 (): 数学模型的建立. 武汉理工大学学报, 2003; 25(7): 51~53

21 宋修官. RTM 工艺在线监控的研究. 武汉理工大学硕士学位论文, 2006

22 李海晨. 树脂传递模塑工艺过程数值模拟与固化过程监测研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2002

23 Reboledo M M, Rojas A J. Molding by reactive injection of reinforced plastics. *Polymer Engineering and Science*, 1988; 28(7): 485~490

24 Moon-Kwang U M, Woo L LEE A study on the mold filling process in resin transfer molding. *Polymer Composites*, 1991; 31(11): 765~771

25 Loos C A, Springer S G Curing of epoxy matrix composites. *Journal of Composite Materials*, 1983; (17): 135~169

26 贾玉玺, 原波, 杨俊英等. 树脂传递模塑过程的数学描述和数值模拟进展. 材料研究学报, 2005; 19(5): 449~456

27 Brusckhe M V, Advani S G Numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1994; 19(7): 575~603

28 Chan A W, Hwang S T Modeling resin transfer molding of axisymmetric composite parts. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 1992; 1(2): 105~118

29 Chan A W, Hwang S T Molding resin transfer molding of polyimide (PMR-15) / fiber composites. *Polymer Composites*, 1993; 14(6): 524~528

30 James Lee L, Young W B, Lin R J. Mold filling and cure modeling of RTM and SRM processes. *Composite Structures*, 1994; 27(1-2): 109~120

31 Chang W, Kikuchi N. Analysis of non-isothermal mold

filling process in resin transfer molding (RTM) and structural reaction injection molding (SRM). *Computational Mechanics*, 1995; 16(1): 22~35

32 Chang W, Kikuchi N. Analysis of composite molding using the homogenization method. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 1996; 7(1-2): 49~77

33 Richard B, Dessenberger L, Tucker C. Mold filling and curing analysis in liquid composite molding. *Polymer Composites*, 1995; 16(6): 495~506

34 Ngo N D, Tamma K K Non-isothermal three-dimensional developments and process modeling of composites: flow/thermal/cure formulations and experimental validations. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2000; 1(3): 57~72

35 Ngo N D, Tamma K K Non-isothermal 2-D flow/3-D thermal developments encompassing process modeling of composites: flow/thermal/cure formulation and validations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001; 50(7): 1559~1585

36 Shojaei A, Ghaffarian S R, Karimian S M H. Simulation of the three-dimensional non-isothermal mold filling process in resin transfer molding. *Composites Science and Technology*, 2003; 63(13): 1931~1948

37 Young W B, Han K, Liou M J. Flow simulation in molds with preplaced fiber mats. *Polymer Composites*, 1991; 12(5): 391~403

38 Young W B. Three-dimensional non-isothermal mold filling simulation in resin transfer molding. *Polymer Composites*, 1994; 15(2): 118~127

39 Young W B. Thermal behaviors of resin and mold in the process of resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1995; 14(4): 310~331

40 Young W B, Rupel K, Liou M J. Analysis of resin injection molding in molds with preplaced fiber mats: numerical simulation and experiments of mold filling. *Polymer Composites*, 1991; 12(1): 30~38

41 Lin R, Lee L J, Liou M. Non-isothermal mold filling and curing simulation in thin cavities with preplaced fiber mats. *International Polymer Processing*, 1991; 4(5): 356~369

42 Chen R L, Gui B, Li M C et al Non-isothermal mold filling and curing simulation for resin transfer molding. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2003; 16(4): 247~252

(编辑 吴坚)