

# 复合材料 RTM 制造工艺数值模拟研究进展

戴福洪 杜善义

( 哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001 )

**摘 要** 纤维预制体的渗透性、孔穴或干斑的形成、残余应力的形成是影响成品质量的三个主要方面,本文对研究中存在的问题,进行了总结和评述。针对 RTM 工艺过程模拟中采用的控制方程,简要阐述了几种常用数值方法的特点。结合国内外 RTM 工艺过程数值模拟研究动态,指出了其发展方向。

**关键词** RTM,数值模拟,树脂,纤维预制体

## Development of Resin Transfer Molding Process Numerical Simulation

Dai Fuhong Du Shanyi

( Harbin Institute of Technology Harbin 150001 )

**Abstract** This paper presents a summary on studies of factors which influence the quality of finished parts based on permeability of fibrous preform, voids or dry spots and residual stress. According to governing equations used in the simulation of RTM process, advantages and disadvantages of several different numerical methods are briefly introduced. From the research trends at home and abroad, future development of the RTM process numerical simulation is also prospected.

**Key words** Resin transfer molding, Numerical simulation, Resin, Fibrous preform

### 1 前言

RTM 是树脂传递模塑成型的简称,它具有以下明显特点<sup>[1,2]</sup>:(1)产品单面或双面均可涂覆胶衣;(2)能制造出具有良好表面品质的、高精度的复杂构件;(3)模具制造与材料选择的机动性强,设备与模具属于中等投资;(4)产品空隙率低(0~0.2%),纤维含量高;(5)可同时进行多种 FRP 制品的成型;(6)便于使用 CAD 进行模具和产品设计;(7)模塑的构件易于实现局部增强,并可方便制造含嵌件和局部加厚构件;(8)成型过程中散发的挥发性物质很少,有利于人体健康和环境保护。

RTM 工艺已广泛应用于建筑、交通、电讯、卫生、航空航天等领域<sup>[3~5]</sup>。

尽管 RTM 工艺存在较多优点,但它也存在一些问题<sup>[6]</sup>:(1)对 RTM 用树脂性能要求较高;(2)模具

的制作和设计,纤维预制体在模具中的安放技术要求严格;(3)纤维预制体的可渗透性能是影响 RTM 工艺过程的重要参数,不同结构和形状的纤维预制体的渗透性数据要依靠实验测定,还没有建立一个纤维预制体渗透性的标准数据库;(4)价格合适的注模分析软件还需进一步开发;(5)在大面积、结构复杂的模具腔体内,注模过程的动态监测和控制还非常困难。

复合材料 RTM 制造工艺技术是目前欧美树脂基复合材料低成本技术发展的两大主要方向之一。早期的 RTM 工艺技术,以小型试件试验确定工艺参数,然后进行成品加工,这是导致材料成本居高不下的原因之一。随着计算机技术的发展,以数值模拟代替试验成为可能;因而 RTM 工艺的数值模拟研究发展迅速,以数值模拟技术实现工艺的虚拟设计,为

收稿日期:2002-06-18;修回日期:2002-07-25

戴福洪,1971 年出生,博士研究生,主要从事复合材料 RTM 制造工艺数值模拟和工艺过程在线监测研究工作

工艺设计提供依据,已成为 RIM 工艺研究领域的热点。

## 2 影响成品质量因素方面的研究

从提高产品的质量考虑,要求成品均匀性好,避免树脂富裕区或贫瘠区的形成,避免工艺缺陷——气泡或干斑的形成,以及尽量降低制品中的残余应力水平,减小残余变形。

RIM 工艺流程包括三个主要步骤:纤维预制体的制作与安装,注模过程,固化过程。一般认为前两个步骤对成品的均匀性、工艺缺陷——气泡或干斑的形成有重要影响,而残余应力主要在固化过程中形成。纤维预制体的可渗透性能对成品的均匀性和气泡或干斑的形成都有重要影响,也是决定数值模拟精确性的重要参数,因此对纤维预制体结构变异与渗透性的关系及其渗透性能表征方面的研究受到了广泛的重视。

影响成品质量因素是多方面的,如原材料的性质、界面、温度、注射压力、真空条件等<sup>[7]</sup>,在具体研究中,只能针对某一或几种原因加以分析,而不能面面俱到。目前,研究较多的有以下几方面:(1)纤维预制体渗透性能;(2)气泡、干斑;(3)残余应力。

### 2.1 可渗透性

纤维预制体可渗透性能预报可分为不考虑纤维预制体变形和考虑纤维预制体变形两种情况。不考虑纤维预制体变形时,对纤维为均匀分布的预制体,常采用主轴方向的渗透系数进行坐标转换推得任意方向的渗透系数。对有纤维束存在的预制体,在纤维束内的渗流(细观流动),与各纤维束间的渗流(宏观流动)是不相同的,这时需要考虑二者的相互作用。Choi<sup>[8]</sup>考虑到纤维排布方式分别为方形和六边形的细观流动模型,提出了考虑细观流和宏观流结合起来的耦合流动模型来预测纤维预制体的可渗透性能。当考虑纤维预制体变形时,常采用胞体方法(Method of Cells)<sup>[9,10]</sup>,取出代表性单胞建立数学模型,引入边界条件、连续性条件等进行分析和求解来预报渗透性能。

纤维预制体结构变异原因大致有以下三个方面<sup>[11~16]</sup>:一是在预制体成型过程中由外界扰动引起;二是预制体安装到模具中时,为适应模具表面形状、纤维预制体变形以及纤维预制体切断处与模具表面不能完全吻合而引起;三是注模过程中树脂与

预制体的相互作用引起,如纤维冲刷引起纤维密度改变。

纤维预制体结构和形状变异会导致局部纤维体积分数较低或较高而形成树脂富裕区或贫瘠区,使成品均匀性差。纤维预制体边缘与模具表面不能很好吻合,该处易形成高渗透区,导致局部树脂流动较快。边缘流动常以管道流模型来描述,也有学者研究表明边缘流动应考虑横向流的影响<sup>[13]</sup>。RIM 工艺注模方式多种多样,当采用周围注射方式时,可能引起纤维预制体压缩变形,这时考虑树脂和纤维的相互作用就显得重要。

近年来,众多学者在细观尺度上,研究纤维结构的变异对渗透性的影响,已取得了一些进展,如考虑边缘效应时建立了等效渗透系数模型,建立了考虑模具表面曲率影响的渗透系数模型<sup>[16]</sup>等。但目前提出的模型还不具有普遍性,如何将预制体的可渗透性能与不同纤维材料、纤维体积分数、编织方式、纤维分布方式等建立起函数关系仍是一极具挑战性的课题。

### 2.2 气泡及干斑

RIM 工艺生产的复合材料气泡含量与加工前树脂的气泡含量及在注模和固化过程中形成的气泡有关<sup>[17]</sup>。有研究表明气泡在树脂流动前峰处含量较高,这些气泡可以由某些障碍物如纤维卷曲的毛刺等引起。气泡形成的原因有以下 4 点<sup>[18]</sup>:(1)注模过程中空气的陷入;(2)树脂中溶解水和气体;(3)固化过程中化学反应放出气体;(4)树脂收缩、边界受约束时高应力增殖。

第(2)、(3)点与树脂的化学特性和加工前树脂的处理有关。第(1)点可以选择合适的注模条件避免或减小。第(4)点是在达到凝胶点附近由于模量增加内应力增长而萌生的孔穴。

辅助抽真空工艺可以减少气泡含量,其原因是压力梯度增大而减少了气泡的半径,而使气泡活动性增强。如辅助抽真空,由于没有内压支撑在树脂流动前峰处不能形成气泡。辅助抽真空只有在确保模具密封时对减少气泡含量有益,否则在外气压大于树脂压力时空气被吸入树脂中,会使气泡含量增加。气泡含量会影响到材料性能,如层间剪切强度,纵、横向弯曲模量,纵、横向拉伸强度和模量,压缩强度和模量,抗疲劳性能等。据文献<sup>[17]</sup>报道,10%的

气泡含量导致弯曲强度减小 3%, 拉伸强度减小 3%, 受扭剪切强度减小 9%, 碰撞强度减小 8%。

气泡形成的主要原因之一是由于注入树脂过程中空气的陷入, 导致难以连续生产一致性好的高强度和高表面质量的复合材料制品, 缺胶、微孔和浸润不良使复合材料制品质量、性能下降。对由于工艺条件选择不合适, 如注口和排气口安排不当等导致的大块干斑的形成, 可采用数值模拟预测到。而对微孔穴的形成和分布方面的研究还不充分。

微孔穴的形成与纤维结构的不均匀有关, 纤维结构的不均匀性使纤维预制体的渗透性能分布不均, 从而导致在细观尺度上树脂流速分布不均。在细观尺度上毛细压力可能占优势而增大了树脂流速分布不均。在树脂流动前峰处, 细观尺度上速度场分布不均导致了微孔穴的形成。最近 Kang<sup>[19]</sup>对一维注模过程中微孔穴形成、孔穴大小和数量进行了研究。

从产品性能预报角度看, 了解气泡的大小和数量这些信息无疑具有重要意义, 但对二维或三维注模过程要涉及到宏观流和细观流的相互作用、气泡尺寸变化、气泡的分离和汇合等等问题, 微孔穴的预报是相当复杂的, 仅是建立模型就很困难, 这方面也是需要深入研究的课题。

### 2.3 残余应力

工艺过程引起的残余应力和翘曲是复合材料生产者十分关心的问题。需仔细设计工艺过程以减小部件中的残余应力和翘曲。残余应力与树脂的线膨胀系数、纤维预制体线膨胀系数、部件内的温度和固化梯度以及固化后的树脂收缩有关。残余应力影响材料的力学性能, 可能使基体萌生初始裂纹、构件翘曲等。

对 RTM 工艺生产的复合材料, 残余应力分析需要确定固化过程中材料的力学性能。在固化过程的不同时段材料的力学性能不同, 树脂在橡胶态的线膨胀系数比玻璃态的线膨胀系数高 2~3 倍, 而在橡胶态树脂的杨氏模量比在玻璃态的大约低 100 倍, 体积模量在两种状态下基本在同一数量级水平。这意味着树脂在橡胶态单轴应力状态下应力水平较低, 但在三向应力状态下应力水平可能有较高的发展。另一促使残余应力形成和发展的因素是固化过程中树脂的体积收缩。一般假设树脂体积收缩与固

化度有线性关系, 环氧树脂在固化阶段体积收缩可达到 4%~6%。Golestanian<sup>[20]</sup>采用与固化状态相关的材料性能参数, 对 RTM 工艺引起的残余应力问题进行研究, 并考虑到固化后树脂收缩效应, 研究表明树脂收缩引起残余应力减小。

另一值得注意的方面是模具与制品的相互作用对残余应力水平发展的影响, 固化过程中由于线膨胀或树脂收缩, 复合材料制品与模具间有相互膨胀或收缩作用。如果复合材料制品的自由膨胀或收缩受到约束, 则导致残余应力水平的增长。而采用柔性模具时, 有可能使制品局部与模具表面发生脱离, 这给残余应力分析时边界条件的确定带来困难。

## 3 数学模型及数值模拟

### 3.1 数学模型

RTM 工艺过程的模拟是相当复杂的问题, 树脂注入模具腔体是暂态的三维过程, 而附加的困难源于力、热的耦合效应, 并涉及固化反应动力学的内容。RTM 工艺过程模拟一般采用以下几个控制方程:<sup>[21~25]</sup>

$$\text{连续性方程: } \nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

式中:  $V$  为渗流速度。

$$\text{动量方程(达西方程): } V = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (2)$$

式中:  $K$  为渗透系数;  $\mu$  为粘性系数;  $P$  为压力。

能量方程:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r C_r V \nabla T = \nabla \cdot (D \cdot \nabla T) + \dot{G} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $C$  为比热容;  $D$  为热导率;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $\rho_r$  为孔隙度;  $\dot{G}$  为固化反应热生成率; 下标  $r$  代表树脂, 无下标代表复合材料。

$$\dot{G} = H \dot{m} \quad (4)$$

式中:  $H$  为反应热;  $\dot{m}$  为固化树脂质量生成率。

$$\text{固化方程: } \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{1}{V} V \nabla \alpha = \dot{m} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为固化度。

而  $\dot{m}$  有不同的经验关系式。

边界条件:

$$\text{注口: } P = P_{in} \text{ 或 } V = V_{in}; T = T_0; \alpha_0 = 0$$

式中:  $P_{in}$  为注口压力;  $V_{in}$  为注口树脂流速;  $T_0$  为初始温度;  $\alpha_0$  为初始固化度。

$$\text{固定边界: } \frac{dP}{dn} = 0$$

式中:  $n$  为外法矢量。

自由表面:  $P = P_{\text{air}}$

式中:  $P_{\text{air}}$  为外界压力。

$m$  的经验公式常用下式:

$$\dot{m} = \left[ \left( A_1 e^{E_1/RT} + A_2 e^{E_2/RT} \right)^m \right] (1 - n) \quad (6)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $n$ 、 $m$  为实验确定常数,  $R$  为普适气体常数。

粘性系数  $\mu$  是  $T$  和  $\alpha$  的函数:

$$\mu = a_0 e^{a/RT} \left( e^{\left( \frac{b}{RT} - b_0 \right)} \right) \quad (7)$$

式中:  $a$ 、 $a_0$ 、 $b$ 、 $b_0$  为实验确定常数。

以上几个方程是非线性的方程组,其粘性  $\mu$  与温度  $T$ 、固化度  $\alpha$  耦联在一起。RTM 工艺过程采用的能量方程有两种模型:一种是方程(3)所用的局部热平衡模型,假设在同一点纤维和树脂温度相同;另一种是两相模型,将流体相和固体相能量方程各自独立的建立起来,二者通过界面的热交换联系起来。对纤维和树脂间热传导系数较大时或树脂流速较慢时,局部热平衡模型可以是合理的近似。相对两相模型更加简捷,所以采用局部热平衡模型的较多。方程(5)是树脂的固化反应方程,反映了固化树脂质量生成率与固化度的关系。方程(6)和方程(7),分别描述了树脂的化学动力学行为和流变性能。对这两者的描述并没有统一的模型,不同的树脂可能采用不同的模型。

### 3.2 数值模拟

RTM 工艺过程的计算机模拟分析的最终目的是为降低工艺成本及保证产品质量服务。RTM 工艺过程模拟可预测不同工艺条件下的注模时间,预测模腔内压力分布情况,预测温度场和固化度场的分布情况,显示任意时刻的树脂流动前峰位置,以及预测可能出现的主要工艺缺陷——干斑<sup>[22]</sup>,这些预测的结果将为优化工艺设计提供重要依据。

RTM 工艺的数值模拟可分为等温过程和非等温过程两种。等温过程模拟主要是模拟注模过程,求解方程(1)和方程(2),模拟树脂流场。非等温过程模拟要将以上 7 个方程联立求解。常用的有限差分法、有限元法和边界元法都可用于 RTM 工艺数值模拟。文献中采用控制体积有限元方法(CVFEM)<sup>[22~24]</sup>较多,也有的学者采用纯有限元方法<sup>[25,26]</sup>、边界元法<sup>[27]</sup>。有限差分法相对其他两种方法而言,在程序编制上较容易些。其中有代表性的是贴体坐标法<sup>[28]</sup>,它是一种区域展开的方法,将不

宇航材料工艺 2002 年 第 6 期

规则形状物理域变换成规则形状的求解域,再用有限差分法离散。贴体坐标法采用的是网格再生技术,计算量大,而在处理复杂形状边界或树脂汇合/分离等问题时程序编制较复杂。

有限元方法又可分为控制体积有限元和纯有限元方法。RTM 工艺树脂流动充模过程是暂态过程,但在某一特定小时间间隔内的树脂流动可视为稳态流动,可采用有限元算法求解,得出树脂流场的压力分布,同时采用控制体积单元方法求解树脂流场任意时刻的树脂流动前峰。控制体积有限元方法克服了网格再生的困难,而且可以利用通用有限元程序强大的前后处理功能<sup>[29]</sup>,但其跟踪树脂流动前峰位置的精度不如网格再生技术高。针对这一问题,Kang<sup>[30]</sup>提出了一种修正控制体积有限元算法,在树脂流动前峰所处单元进行细分,从而增加了树脂流动前峰的分辨率。控制体积有限元方法还存在质量不守恒的问题, Joshe<sup>[31]</sup>提出了按照压力下降的顺序安排控制体积,计算流入和流出控制体积的质量,并调整到平衡的算法。但该方法对多孔注射 RTM 工艺的应用较困难。纯有限元方法将填充系数引入压力场的控制方程中,作为未知量求解。它与控制体积有限元方法都采用固定网格技术,基本思想都是观察树脂流体对网格的浸润情况,只是求解的策略上不同。相对控制体积有限元方法而言,纯有限元方法不用额外划分控制体积单元。传统的控制体积有限元算法时间步选择要求较严格,每一步时间增量限制在不超过一个控制体积被填充范围内,而纯有限元方法没有这样的限制,但程序编制较复杂。

边界元方法是一种降维解法,文献中采用边界元方法的人相对较少。在渗透系数和粘性系数为常量时,流场控制方程可化为 Laplace 方程,可采用边界元方法求解压力场,然后修正树脂流动前峰。角点边界的离散,自由表面和与固定边界的接触,多连通域等问题是采用边界元方法应注意的几个方面。

### 4 结语

复合材料 RTM 工艺过程的研究涉及实验和数值模拟两个方面,二者是相辅相成的。近年来,数值模拟研究发展迅速,下面对数值模拟方面谈几点想法。

(1) 数值模拟朝着微观化方向发展,针对理想材料的数值模拟,控制体积有限元技术和纯有限元技

术已发展较成熟,相应的软件也已推出,如 LIMS、RTMSIM 等程序。许多学者针对纤维细观结构、模具表面曲率、拐角等对工艺过程的影响进行研究,即不仅仅是模拟均匀树脂流场,而致力于细观结构的变异与树脂流场发展的关系研究。

(2) 数值模拟朝精确化方向发展,如增强树脂流动前峰分辨率技术,考虑预成型体与模具间的缝隙影响等研究,模拟温度场考虑模具厚度方向的变化,考虑热弥散作用的影响等。人们应致力于以更精确的模型模拟工艺过程。

(3) 微缺陷形成机理和预报研究,作为多孔介质的纤维预制体的材料性能研究,仍是倍受关注的课题。

### 参考文献

- 1 段华军,马会茹,王钧. RTM 工艺国内外研究现状. 玻璃钢/复合材料,2000;(5):46~48
- 2 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
- 3 仲伟虹,梁志勇,张佐光,宋焕成. RTM 工艺及其在我国航空工业的应用前景. 材料工程,1995;(1):9~11
- 4 梁志勇,仲伟虹,张佐光,段跃新. 复合材料成型新技术——RTM 及其在汽车工业中的应用. 纤维复合材料,1995;(1):40~44
- 5 Walter Michaceli, Jochen Topker. RTM for railway applications: development of a tram end bumper. SAMPE Journal, 2001; 37(2):67~74
- 6 Beckwith S W, Hyand Craig R. Resin transfer molding: a decade of technology advances. SAMPE Journal, 1998;34(6):7~19
- 7 高国强,薛忠民. RTM 工艺过程缺陷产生机理分析. 玻璃钢/复合材料,2001;(2):26~29
- 8 Mi Ae Choi, Mi Hye Lee, Jaeeon Chang, Seung Jong Lee. Permeability modeling of fibrous media in composite processing. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 1998;79:585~598
- 9 Ali Gökce, Suresh Advan. Permeability estimation with the method of cells. Journal of Composite Materials, 2001;35:713~728
- 10 Heardman E, Lekakou C, Bader M G. In-plane permeability of sheared fabrics. Composites: Part A, 2001;32:933~940
- 11 Abraham D, McIlhagger R. Investigations into various methods of liquid injection to achieve mouldings with minimum void contents and full wet out. Composites: Part A, 1998;29:533~539
- 12 Richardson M O W, Zhang Z Y. Experimental investigation and flow visualization of the resin transfer mould filling process for nonwoven hemp reinforced phenolic composites. Composites:

Part A, 2000;31:1303~1310

- 13 Hammami A, Cauvin R, Trochu F. Modeling the edge effect in liquid composites molding. Composites: Part A, 1998;29:603~609

- 14 Bickerton S, Advani S G, Mohan R V, Shires D R. Experimental analysis and numerical modeling of flow channel effects in resin transfer molding. Polymer Composites, 2000;21(1):134~153

- 15 Bickerton S, Sozer E M, Graham P J, Advani S G. Fabric structure and mold curvature effects on permeability and mold filling in the RTM process. Part . Experiments. Composites: Part A, 2000;31:423~438

- 16 Bickerton S, Sozer E M, Simacek P, Advani S G. Fabric structure and mold curvature effects on permeability and mold filling in the RTM process. Part . Predictions and comparisons with experiments, Composites: Part A, 2000;31:439~458

- 17 Neil Pearce, Felicity Guild, John Summerscales. A study of the effects of convergent flow fronts on the properties of fiber reinforced composites produced by RTM. Composites: Part A, 1998;29:141~152

- 18 Yongsung Eom, Louis Boogh, Veronique Michaud, Jarr Anders Manson. A structure and property based process window for void free thermoset composites. Polymer composites, 2001;22(1):22~31

- 19 Moon Koo Kang, Woo Il Lee, Thomas Hahn H. Formation of microvoids during resin-transfer molding process. Composites science and technology, 2000;60:2427~2434

- 20 Hossein Golestanian, Sherif El-gizawy A. Modeling of process induced residual stresses in resin transfer molded composites with woven fiber mats. Journal of Composite Materials, 2001;35(1):1513~1528

- 21 Fontana O P V. Viscosity: thermal history treatment in resin transfer moulding process modelling. Composites: Part A, 1998;29:153~158

- 22 梁志勇,段跃新,尹明仁,张佐光. 复合材料 RTM 制造工艺计算机模拟分析研究. 航空学报,2000;21(增刊):66~71

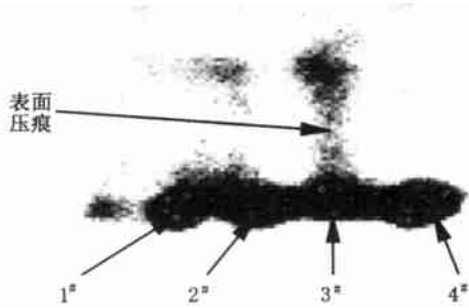
- 23 Seong Taek Lim, Woo Il Lee. An analysis of the three-dimensional resin-transfer mold filling process, Composites Science and Technology, 2000;60:961~975

- 24 Moon Koo Kang, Woo Il Lee. Analysis of resin transfer/compression molding process. Polymer Composites, 1999;20(2):293~304

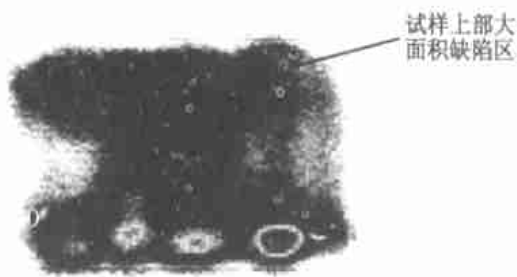
- 25 Ngo Nam D, Tamma Kumar K. Non-isothermal 2-D flow/3-D thermal developments encompassing process modeling of composites: flow/thermal/cure formulations and validations. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001;50:1559~1585

(下转第 46 页)

宇航材料工艺 2002 年 第 6 期



(a) 停止加热 0.5 min 时的图像



(b) 停止加热 10.8 min 时的图像

图 5 铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料热像图

Fig. 5 Infrared images of honeycomb aluminum composites

## 5 结论

对铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料最易出现的蒙皮脱粘缺陷红外热像实验表明,采用本方法可以有效地检出此类缺陷,并且检测速度快、造成温差的方式

简单、缺陷位置和大小显示直观,同时检测结果易保存至计算机磁盘,以备进一步数据处理。环境温度、缺陷位置和缺陷性质都影响缺陷的最佳检测时间,但对于本实验中的铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料的各种脱粘缺陷,检测速度都高于每分钟两屏。

在红外热像检测中,实现被检工件快速、方便、自动化的加热方式,加热源和热像头的同步自动扫查以及智能化地识别各种缺陷是今后发展的重要方向。

## 参考文献

- 1 陈积懋,余南廷编著. 胶接结构与复合材料的无损检测. 国防工业出版社,1984:1~10
- 2 陈积懋. 复合材料无损评定技术. 无损检测,1991;(13):24~30
- 3 Chern E James. Concept of non-destructive evaluation. Materials Evaluation,1991;(9):1228
- 4 刘松平,郭恩明. 复合材料无损检测技术的现状与展望. 航空制造技术,2001;(3):30~32
- 5 刘松平,郭恩明,张谦琳等. 复合材料深度方向超声 C 扫描检测技术. 无损检测,2001;(1):13~15
- 6 魏勤,尤建飞,彭如海等. 超声 C 扫描成像系统在铝基复合材料无损检测中的应用. 华东船舶工业学院学报,2000;(2):31~34
- 7 朱建堂. 激光、红外和微波无损检测技术的应用与发展. 无损检测,1997;(11):314~316

(编辑 李洪泉)

(上接第 18 页)

26 Mohan R V, Ngo N D, Tamma K K. On a pure finite-element-based methodology for resin transfer mold filling simulations. Polymer Engineering and Science, 1999;39(1):26~43

27 Schmidt F M, Lafleur P, Berthet F, Devos P. Numerical simulation of resin transfer molding using linear boundary element method. Polymer Composites,1999;20(6):725~732

28 Shipeng Li, Raymond Gauvin. Numerical analysis of the resin flow in resin transfer molding. Journal of Reinforced Plastics and Composites,1991;10:314~327

29 Lam C, Joshi Sunil C, Liu X L. Numerical simulation of

the mould-filling process in resin-transfer moulding. Composites Science and Technology, 2000;60:845~855

30 Moon Koo Kang, Woo Il Lee. A flow-front refinement technique for the numerical simulation of the resin-transfer molding process. Composites science and Technology, 1999;59:1663~1674

31 Joshi S C, Lam Y C, Liu X L. Mass conservation in numerical simulation of resin flow. Composites: Part A, 2000;31:1061~1068

(编辑 马晓艳)