

树脂传递模塑(RTM)工艺树脂 微观流动行为数值分析^①

王柏臣¹, 黄玉东², 刘 丽²

(1. 沈阳航空工业学院材料工程系 沈阳 110034; 2. 哈尔滨工业大学应用化学系 哈尔滨 150001)

摘要 根据树脂在纤维预制体内部的流动特点,在 Darcy 定律基础上建立了 RTM 工艺树脂微观浸润过程数学模型,并对浸润过程进行了数值模拟。借助无量纲分析,研究了 RTM 工艺微观浸润过程的影响因素。结果表明,随着浸润过程的进行,纤维束内压力逐渐降低,降低树脂粘度和纤维含量,能够提高纤维预制体的浸润速度。浸润过程实验证实了 RTM 工艺数值模拟的有效性。

关键词 树脂传递模塑(RTM);Darcy 定律;微观浸润行为;数值分析

中图分类号:TB332

文献标识码:A

文章编号:1006-2793(2006)04-0297-04

Numerical analysis on microscopic flow behavior of resin with resin transfer molding(RTM)process

WANG Bai-chen¹, HUANG Yu-dong², LIU Li²

(1. Department of Material Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China;

2. Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Based on flow characteristics of resin in fiber preform, a mathematical model describing microscopic impregnation process was derived by means of Darcy law, and impregnation process was numerically simulated. The effect factors on RTM microscopic impregnation process were analyzed with help of dimensionless analysis. The results show that the internal pressure of fiber bundle decreases gradually and impregnation velocity of fiber preform can be improved by reducing resin viscosity and fiber content. RTM impregnation process test proves that the numerical simulation of RTM process is effective.

Key words resin transfer molding(RTM);Darcy law;microscopic impregnation behavior;numerical analysis

1 引言

树脂传递模塑(RTM)工艺以其成本低、效率高、产品质量好、对环境污染小等优点,成为树脂基复合材料低成本技术发展的主要方向之一^[1~3]。RTM 工艺属于复合材料液体成型技术,基体树脂对纤维增强体的充分浸润,能够促进树脂与纤维之间的界面结合,减少材料内部缺陷。由于纤维预制体通常可视为一种多孔介质,因此大多数树脂流动行为研究都是建立在流体力学的经典定律(即 Darcy 定律)基础上。Darcy 定律在宏观尺度上描述了在流动方向上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。RTM 工艺使用的

增强纤维通常采用二维或三维织物形式,其内部存在纤维束内和纤维束间两种不同尺度的结构单元。在 RTM 工艺树脂充模过程中,同时发生宏观流动(纤维束间)和微观流动(纤维束内),这两种流动行为相互耦合,因此 RTM 工艺的浸润机理十分复杂^[4]。对 RTM 工艺中树脂流动行为进行深入分析,对制定和优化 RTM 工艺参数、提高复合材料的性能具有重要意义。

迄今为止,很多 RTM 树脂流动方面的研究大多从宏观水平分析树脂在纤维预制体内的平均流动现象,在研究过程中不考虑树脂体系在纤维束内部的微观流动行为^[5~7]。许多研究表明,微观浸润行为对 RTM 工

① 收稿日期 2005-07-29,修回日期 2005-11-09。

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目(51460120104HT0102)。

作者简介:王柏臣(1973—),男,博士,从事聚合物基复合材料成型工艺和界面方面研究。E-mail: wangbaichen@hit.edu.cn

艺树脂宏观流动影响重大,特别是在纤维含量较高的先进复合材料 RTM 成型过程中,树脂对于增强纤维的微观浸润效果是影响材料性能的关键因素^[8]。根据树脂在 RTM 工艺流动充模过程中的流体力学特点,文中建立了树脂在增强纤维束内流动的数学模型。该模型能够预报影响 RTM 工艺树脂微观流动行为工艺参数的变化规律。

2 模型建立

在树脂传递模塑工艺中,树脂由模具入口注入后,浸润预先放置的纤维预制体。当模腔充满后由模具出口流出,树脂对纤维增强体的浸润可分为宏观和微观两个过程,如图 1 所示。

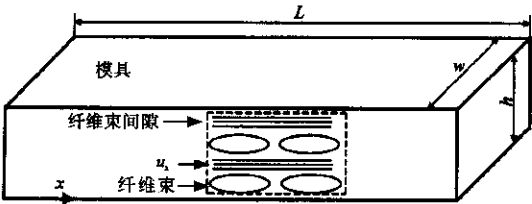


图 1 树脂流过多孔介质示意图

Fig.1 Schematic diagram of resin flow in porous medium

根据 Darcy 定律,当树脂流过预制体纤维束间时,其速度相对于压力梯度的关系式为

u_x = - \frac{K_M}{\mu} \frac{dp}{dx} \tag{1}

式中 u_x 为 Darcy 速度在 x 轴方向分量;K_M 为纤维预制体渗透率,即宏观渗透率;μ 为树脂粘度;p 为充模压力。

由于树脂在纤维束内沿 x 轴方向的压力相对其在纤维束间的压力可忽略,K_M 等于纤维预制体的饱和渗透率。图 1 中,虚线框为纤维预成型体内部截面示意图。在纤维束间流动的树脂浸润纤维束,可看作纤维束对树脂的吸收过程。

根据经验,在 RTM 中预制体内部的纤维束大多按椭圆形排列。图 2 为一束纤维的横截面微观示意图。由于在浸润过程中,纤维束被树脂的宏观流动包围,纤维束内部树脂的流动可认为是垂直于纤维束的径向流动,直至纤维束被完全浸透。椭圆形纤维束内部树脂流前沿的周长 P_er 可表示为

P_{er} = \pi \sqrt{2[(a - y_f)^2 + (b - y_f)^2]} \tag{2}

\frac{dp}{dy^*} \bigg|_{y^*=y_f^*} = \frac{2(p_i^* - p_0^*) \{ \sqrt{2[(G_3 - y_f^*)^2 + (1 - y_f^*)^2]} \}^{-1}}{\ln \frac{-(G_3 + 1 - 2y_f^*) + \sqrt{2[(G_3 - y_f^*)^2 + (1 - y_f^*)^2]}}{-(a + b) + \sqrt{2(a^2 + b^2)}}} \tag{5}

式中 y_f 为纤维束内微观坐标系坐标;a 为纤维束沿主坐标轴(x)方向厚度的 1/2,即最大椭圆的长半轴;b 为纤维束沿副坐标轴(y)方向厚度的 1/2,即最大椭圆的短半轴。

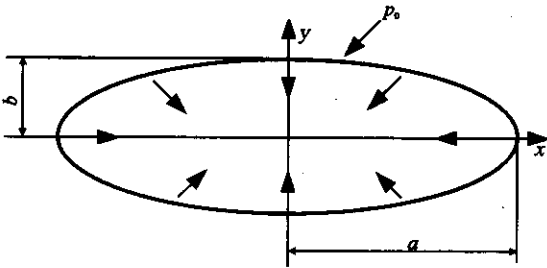


图 2 树脂浸润纤维束的示意图

Fig.2 Schematic diagram of a fiber bundle impregnated with resin

假设(1)由于大多数纤维束的横截面积为平滑椭圆的形式,则可认为树脂被纤维束的吸收速度等于微观流动前锋的周长和微观浸润速度的乘积;(2)在纤维束内树脂流动前锋,任意处树脂的微观流速为 \frac{dy_f}{dt}。

由于纤维束可视为单一尺度多孔介质,根据一维 Darcy 定律,树脂对纤维束的渗透速率可表示为

\frac{dy_f}{dt} = \frac{u_y}{\phi_f} \bigg|_{y=y_f} = - \left(\frac{K_f}{\mu \phi_f} \right) \frac{dp}{dy} \bigg|_{y=y_f} \tag{3}

式中 u_y 为树脂在纤维束内的微观流速;φ_f 为纤维束孔隙率;K_f 为纤维束的渗透率。

如图 2 所示直角坐标系,可认为纤维束浸润在树脂流中,其外侧承受流体压力为 p_0,受树脂压力 p_0 及纤维束毛细吸收作用,树脂由纤维束外沿逐渐向中心渗透。根据力学理论,中心点处树脂沿 y 轴方向的压力近似为零。因此,可得边界条件(1)对于坐标原点 O,存在 y=0, p=p_0;(2)对于椭圆中心点,存在 y=b, p=0;(3)对于椭圆内任一点,存在 y=y_f, p=p_i。

纤维束内任一点的压力梯度为

\frac{dp}{dy} \bigg|_{y=y_f} = \frac{2(p_i - p_0) \{ \sqrt{2[(a - y)^2 + (b - y)^2]} \}^{-1}}{\ln \frac{-(a + b - 2y_f) + \sqrt{2[(a - y_f)^2 + (b - y_f)^2]}}{-(a + b) + \sqrt{2(a^2 + b^2)}}} \tag{4}

为便于进一步分析,对式(4)进行无量纲化处理^[9],可得

由式(5)可得,纤维束内树脂沿 y 方向无量纲 Darcy 速度(微观速度)为

$$\frac{dy_f^*}{dt} = -G_1 \frac{dp^*}{dy^*} \Big|_{y^*=y_f^*} \tag{6}$$

纤维束内树脂沿 x 方向无量纲 Darcy 速度(宏观速度)为

$$u_x = \frac{dp_x^*}{dx^*} \tag{7}$$

式(5)~式(7)描述了树脂流体通过具有椭圆形纤维束的双尺度多孔介质的通用方程。其中,对特征参数 G_1 、 G_2 及 G_3 的定义分别为

$$G_1 = \left(\frac{\phi}{\phi_t}\right)\left(\frac{K_t}{K_{ch}}\right)\left(\frac{L}{b}\right)^2 \tag{8}$$

$$G_2 = \left(\frac{\phi_t}{\phi}\right)\pi abN_s \tag{9}$$

$$G_3 = \frac{a}{b} \tag{10}$$

3 计算结果及分析

根据计算模型,对树脂在 RTM 工艺中的微观浸润过程进行模拟,典型计算结果如图 3~图 5 所示。

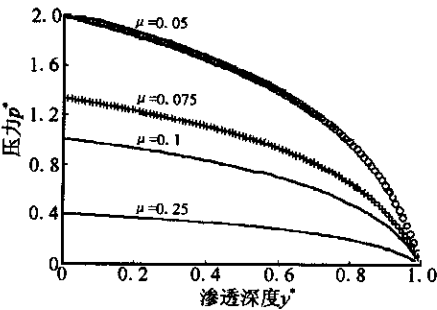


图 3 无量纲压力和渗透深度的关系($b/a=0.9$)
Fig.3 Relationship between dimensionless pressure and impregnation depth($b/a=0.9$)

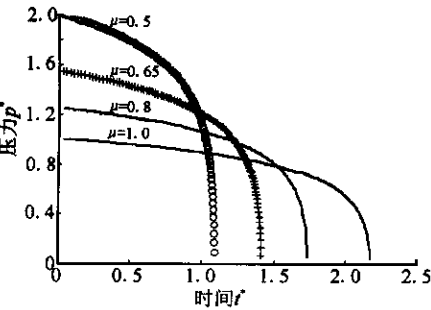


图 4 无量纲压力和时间的关系
Fig.4 Relationship between dimensionless pressure and time

图 3 为 $b/a=0.9$ 时在不同树脂粘度下,树脂在织

物纤维束内流动过程中压力随渗透深度的变化关系。在任一树脂粘度下 p^* 随 y^* 的变化趋势相同。随着渗透深度的增加,纤维束内部压力逐渐减小。同时,随着树脂体系粘度的增加,纤维束内的压力减小。纤维束内的起始压力由粘度 $\mu=0.05$ 时所对应的 2.0 变为 $\mu=0.1$ 时所对应的 1.0。纤维束内的压力越小,则树脂在纤维束内的流动速度越慢,需较长时间才能实现树脂在纤维束内的完全浸润。

图 4 为纤维束内压力随时间的变化关系。随着树脂在纤维束内流动时间的增加,纤维束内的压力逐渐降低。因此说明,随着纤维束内浸润过程的进行,树脂在纤维内的流动速度逐渐降低,且随着树脂体系粘度的增大,树脂对纤维束的浸润时间增加。

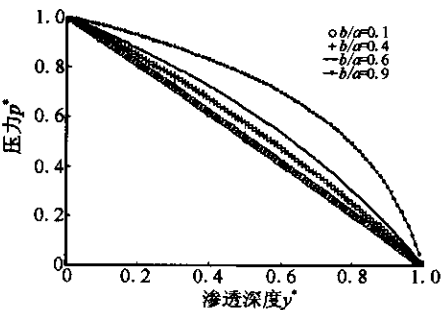


图 5 无量纲压力与渗透深度的关系
Fig.5 Relationship between dimensionless pressure and impregnation depth

根据文献[10],椭圆形纤维束的短轴和长轴之比(即纤维束的形状因子 b/a),体现了纤维束内渗透率的各向异性。这种各向异性是由于纤维束在外加压力下产生了形变。因此,可用来表征纤维预制体在 RTM 模具内部的被压缩程度,在一定程度上代表了模具内部的纤维含量。纤维含量越高,纤维预制体受压缩程度越大。因此 b/a 越小于 1,此时纤维束内部的毛细压力作用就越显著。

图 5 为树脂在纤维束内流动过程中压力随渗透深度的变化。随着 b/a 的增大,压力随渗透深度下降的趋势变慢,说明纤维束的几何形状影响 RTM 工艺树脂浸润过程。

4 实验验证

图 6 为在相同树脂注射时间和纤维含量下,不同粘度树脂在 RTM 工艺浸润过程中的照片。由图 6 可看出,树脂流动前沿位置和形状随着树脂粘度的不同而不同。当树脂粘度较大时,树脂流动前沿近似呈圆形,但流动速度较低。当树脂粘度较低时,树脂流动较

快,树脂流动前沿呈椭圆形,并能观察到明显的不平整流动前沿。这是由于树脂粘度高,增大了树脂在纤维束间和纤维束内的流动阻力,树脂浸入纤维束内部变得更加困难,但此时的宏观流动速率和微观流动速率相差较小,因此流动前沿比较平整。

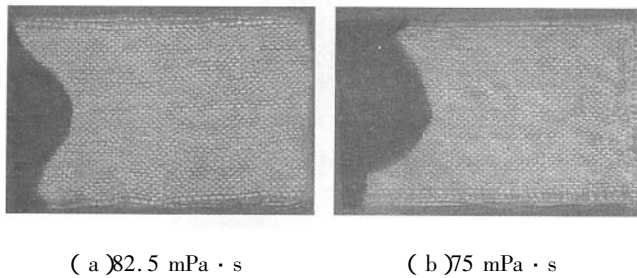


图 6 粘度对 RTM 浸润过程的影响

Fig. 6 Effect of viscosity on RTM impregnation process

图 7 为在相同流动时间和树脂粘度下,不同纤维含量下树脂浸润过程的照片。由图 7 可看出,纤维含量低时,树脂的流动速度更快。这是由于纤维铺层数目的增多,使流动过程中流动阻力变大,树脂的宏观流动变得更加困难。

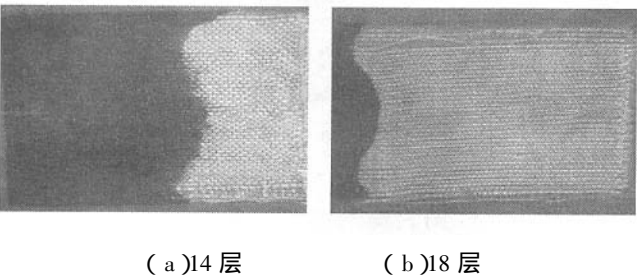


图 7 纤维含量对 RTM 浸润过程的影响

Fig. 7 Effect of fiber content on RTM impregnation process

图 7(a)中,由于织物铺层数目少,纤维织物中间出现了褶皱,造成了纤维铺层的不均匀,使得在流动过程中流动峰前沿不规则,此时树脂的宏观流动速率与微观流动速率相差较大。图 7(b)中,树脂流动前沿呈近似半圆形,这符合树脂在各向同性纤维织物中的流动特征。由于铺层数目过大,虽然树脂流动速度较慢,但由于宏观流动速率和微观流动速率相差较小,因此流动前沿比较整齐。图 6 和图 7 证实了图 3 ~ 图 5 中的数值模拟结果。

5 结论

(1)RTM 技术的关键是实现基体树脂对纤维增强

体的充分浸润,选择适当的工艺参数对树脂在纤维束内部的微观浸润过程,进而对 RTM 宏观浸润效果有重要影响;

(2)RTM 工艺树脂微观浸润过程数值分析结果表明,较低的树脂粘度有利于提高树脂在纤维束内的流动速度,纤维含量增大,会导致充模过程中树脂流动困难。浸润过程实验证实了 RTM 工艺树脂微观流动行为数值模拟的有效性。

参考文献:

[1] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展[J]. 航空材料学报, 2000 20(1) :46-54.

[2] 梁志勇,仲伟虹,张佐光,等. 复合材料成型新技术——RTM 及其在汽车工业中的应用[J]. 纤维复合材料, 1995 3(1) :40-44.

[3] Abali F ,Shivakumar K ,Hamidi N ,et al. An RTM densification method of manufacturing carbon-carbon composites using Primaset PT-30 resin[J]. Carbon 2003 41 893-901.

[4] Binetruy C ,Hilaire B. The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM[J]. Composites Science and Technology ,1997 57 587-596.

[5] 李海晨,王彪,林新. 关于 RTM 工艺过程树脂渗流的几个重要问题[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001 33(6) :769-772.

[6] 吕昶,薛元德. RTM 充模过程数值模拟及实验比较[J]. 复合材料学报, 1999 16(1) :131-136.

[7] Shojaei A ,Ghaffarian S R ,Karimian S M. Numerical simulation of three-dimensional mold filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations[J]. Composites Science and Technology ,2002 62 : 861-879.

[8] Karbhari V M ,Palmese G R. Sizing related kinetic and flow considerations in the resin transfer infusion of composites [J]. Journal of Materials Science ,1997 32 5761-5774.

[9] Parnas R S ,Phelan F R. The effect of Heterogeneous porous media on mold filling in resin transfer molding[J]. SAMPE , 1991 22(2) 53-60.

[10] Chick J P ,Rudd C D ,Van Leeuwen P A ,et al. Material characterization for flow modeling in structural reaction injection molding[J]. Polymer Composites ,1996 ,17(1) : 124-136.

(编辑 崔贤彬)

作者: 王柏臣, 黄玉东, 刘丽, WANG Bai-chen, HUANG Yu-dong, LIU Li
作者单位: 王柏臣, WANG Bai-chen(沈阳航空工业学院材料工程系, 沈阳, 110034), 黄玉东, 刘丽, HUANG Yu-dong, LIU Li(哈尔滨工业大学应用化学系, 哈尔滨, 150001)
刊名: 固体火箭技术 ISTIC EI PKU
英文刊名: JOURNAL OF SOLID ROCKET TECHNOLOGY
年, 卷(期): 2006, 29(4)
被引用次数: 3次

参考文献(10条)

1. 陈祥宝 先进树脂基复合材料的发展[期刊论文]-航空材料学报 2000(01)
2. 梁志勇, 仲伟虹, 张佐光 复合材料成型新技术—RTM及其在汽车工业中的应用 1995(01)
3. Abali F, Shivakumar K, Hamidi N An RTM densification method of manufacturing carbon-carbon composites using Primaset PT-30 resin 2003
4. Binetruy C, Hilaire B The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM 1997
5. 李海晨, 王彪, 林新 关于RTM工艺过程树脂渗流的几个重要问题[期刊论文]-哈尔滨工业大学学报 2001(06)
6. 吕昶, 薛元德 RTM充模过程数值模拟及实验比较[期刊论文]-复合材料学报 1999(01)
7. Shojaei A, Ghaffarian S R, Karimian S M Numerical simulation of three-dimensional mold filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations 2002
8. Karbhari V M, Palmese G R Sizing related kinetic and flow considerations in the resin transfer infusion of composites 1997
9. Parnas R S, Phelan F R The effect of Heterogeneous porous media on mold filling in resin transfer molding 1991(02)
10. Chick J P, Rudd C D, Van Leeuwen P A Material characterization for flow modeling in structural reaction injection molding 1996(01)

相似文献(2条)

1. 期刊论文 谭华, 晏石林, 王继辉 RTM充模过程数值模拟的隐式有限元算法 -固体力学学报2004, 25(3)
建立了基于欧拉方法描述树脂传递模塑(RTM)工艺充模过程的基本数学方程, 并采用有限元隐式时间积分方法对基本方程进行了数值求解, 编制了基于隐式有限元算法及传统有限元控制体算法的程序, 通过具体算例比较了这两种算法的优缺点. 与传统的有限元控制体法相比, 该文提出的隐式有限元算法能节省计算时间, 特别适合于单元、节点数目多的情况. 隐式有限元算法是一种纯有限元方法, 不需要使用控制体积技术, 采用该算法计算出的流动前沿与时间步长无关.
2. 学位论文 卜建辉 RTM成型过程数值模拟 2006
树脂传递模塑(RTM)工艺日益成为复合材料制造的主导工艺技术之一。高效生产质量稳定的树脂基复合材料的关键技术在于选择合适的工艺参数, 制定合理的工艺方案。通过对成型过程进行数值模拟, 能够预测熔体在型腔内的状态及变化规律, 从而可以辅助模具设计和成型工艺参数的设置与优化。本文采用有限元控制体积法对树脂传递成型工艺的等温充填过程进行了数值模拟, 主要研究工作和创新点包括以下几个方面:
1) 针对RTM工艺树脂浸润增强体的特点, 从Darcy定律以及质量守恒定律出发, 建立了三维薄壁制件等温充模流动的理论模型和控制方程。通过对充模过程的物理量进行量纲分析, 发现RTM成型中动量方程的压力梯度项(105N/m3)与重力项(104N/m3)只相差一个数量级, 不能忽略重力项, 因此在本文构建的模型中考虑了重力项的影响。
2) 论文采用有限元控制体积法实现了RTM充模过程的数值模拟, 即型腔内的压力场采用有限元法求解, 并根据节点的控制体积的充填状况更新流动前沿, 从而准确预测任意时刻的树脂流动前峰曲线、压力场及速率场的分布, 以及熔接线和气穴的位置, 为模具及工艺设计如注射口和排气口的布置, 合模压力等提供了有效的参考依据, 并通过算例对比验证了程序对一维、二维平面以及三维薄壁制品的成型过程模拟的可靠性。
3) 本文开发了RTM树脂流动过程数值模拟软件包, 并集成到郑州大学国家橡塑模具工程研发中心自主开发的塑料成型数值分析软件Z-Mold中, 利用Z-Mold的前后置处理模块来实现几何模型的建立、有限元网格的划分以及分析结果的显示。所有的参数可以在图形用户界面下输入, 同时可以在后处理程序中观察树脂流体的动态填充过程。

引证文献(3条)

1. 张朝, 黄君, 施勇晖, 戴干策 玻璃纤维毡(GMT)浸渍过程中的表面张力作用[期刊论文]-华东理工大学学报(自然科学版) 2009(2)
2. 刘金良, 吴晓青 RTM工艺中树脂流动管道的优化设计[期刊论文]-玻璃钢/复合材料 2008(6)
3. 何斌, 杨振国, 景永伟, 徐凯 RTM成型技术在码头钢筋混凝土结构修复中的应用[期刊论文]-腐蚀与防护 2008(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gthjjs200604017.aspx

授权使用: 哈尔滨理工大学(heblgdx), 授权号: 2d960a86-f98c-4493-8db6-9dbe00962896

下载时间: 2010年7月25日