

文章编号: 1000-6893(2000)S0-0S66-06

复合材料 RTM 制造工艺计算机模拟分析研究

梁志勇, 段跃新, 尹明仁, 张佐光

(北京航空航天大学 104 教研室, 北京 100083)

SIMULATION ANALYSIS OF RTM PROCESS FOR COMPOSITE MATERIALS

LIANG Zhi-yong, DUAN Yue-xin, YIN Ming-ren, ZHANG Zuo-guan

(Faculty 104, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 研究以计算机模拟分析技术的实际工程应用为目的, 在普通 WINDOW 窗口下实现各类平面构件 RTM 工艺过程的控制体积单元/有限元算法(CV/FEM), 进行工艺过程的压力场及树脂流场模拟分析。模拟分析主要工艺参数——树脂粘度、注射压力及预成型体渗透特性对 RTM 工艺过程的影响规律。研究得出注射压力及渗透率与工艺充模时间的定量反比关系, 以及树脂粘度与充模时间的定量线性关系。研究还揭示了注口设计对充模时间的影响规律。实验验证表明工艺模拟分析结果与实验结果有较好的一致性。RTM 工艺过程的计算机模拟分析技术将为优化工艺设计、减低工艺实验成本及保证产品质量提供有效的技术手段。

关键词: 复合材料; RTM; 计算机模拟; 树脂; 渗透率

中图分类号: V258 文献标识码: A

Abstract: The simulation technique of RTM process has been developed which is based on control volume/finite element method (CV/FEM). The resin flow front and pressure profile of RTM process for the flat structure products are presented. The quantitative inverse ratio correlation both for injection pressure and permeability with filling time is revealed under constant injection pressure condition. The quantitative linear relationship between resin viscosity and filling time is also analyzed. The influences of injection gate design are discussed in the research. The simulation results of filling time are in good agreement with those of the experiments. The simulation technique developed is featured by its easy use and affordable application for general composite industries.

Key words: composites; RTM; simulation; resin; permeability

90 年代以来, 欧美先进工业国家针对树脂基复合材料在航空航天越来越广泛的应用和冷战结束后的军备形势, 提出先进复合材料的低成本化 (Cost-effective composites) 及买得起的复合材料 (Affordable composites) 等概念和技术发展方向, 以适应高质量航空航天构件中多品种小批量的生产特点, 并确定了在 2000 年使其军机用先进复合材料成本降低 40% 的目标。复合材料 RTM (Resin transfer molding) 制造工艺技术是目前欧美低成本树脂基复合材料技术发展的两大主要方向之一, 也是目前先进复合材料技术的一个主要研究热点。如近年来的每届 SAMPE 及 SPI 年会上均有十几篇 RTM 相关的论文发表; 美国 F-22 先进战斗机上采用 RTM 工艺制造的复合材料零部件已多达 400 余件, 国外预计 RTM 工艺技术

将成为 21 世纪复合材料的主导成型工艺技术之一, 具有重要的技术、环保和市场意义^[1-3]。

RTM 主要原理为在模腔中铺放按性能和结构要求设计的增强材料预成型体 (preform), 采用注射设备将专用注射树脂体系注入闭合模腔, 模具具有周边密封和紧固以及注射及排气系统以保证树脂流动顺畅并排出模腔中的全部气体和彻底浸润纤维, 并且模具有加热系统可加热固化成型复合材料构件。RTM 工艺与其它复合材料成型工艺的本质区别在于 RTM 工艺中纤维/树脂的浸润是由低粘度的树脂在闭合模腔中流动并渗入增强材料预成型体, 并排除增强材料织构中的气体而完成纤维/树脂的浸润, 是粘性流体在具有各向异性的多孔介质中进行长程渗流而进行的复杂浸润过程, 具有较大的技术应用难度。为科学地掌握和实施 RTM 工艺, 国外近年来积极开展 RTM 工艺过程的计算机模拟分析技术研究, 先后有 RTMFLOT 及 LIMS 等计算机模拟分析软件的研究报道^[4]。但这些模拟分析技术需建立在真

收稿日期: 1999-06-03; 修订日期: 1999-09-10
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 59773004) 及航空科学基金 (97G51064) 资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/S0/0S66/>

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

它的大型软件平台基础上, 价格昂贵和通用性较差, 难以在实际复合材料工程中推广应用。

本研究以计算机模拟分析技术的实际工程应用为目的, 在普通 WINDOW 窗口下实现 RTM 工艺过程的控制体积单元/有限元算法(CV/FEM), 模拟分析各类平面构件注射工艺树脂粘度、注射压力及预成型体渗透特性对 RTM 工艺过程的影响规律, 并进行实验验证研究, 为 RTM 工艺技术的应用提供工艺理论基础。RTM 工艺过程的计算机模拟分析技术将为优化工艺设计、减低工艺实验成本及保证产品质量提供有效的技术手段。

1 RTM 工艺数学模型及 CV/FEM 算法

RTM 工艺技术复杂纤维/树脂流动浸润过程可由 Darcy 定律式(1)和流体连续性方程式(2)描述^[6]

$$v = - \frac{k}{L} \cdot P \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: v 是速度矢量; P 是沿流动方向的压力降; L 是树脂粘度; k 是渗透率张量; u , v 及 w 分别为 v 在 x , y 及 z 方向速度的分量。考虑预成型体各向异性时有

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

RTM 工艺树脂流动充模过程是移动边界过程, 即各时刻的树脂流场边界条件均不相同。但在一定时刻的树脂流场边界条件可视为确定边界条件, 可采用有限元算法求解, 再迭代求出树脂流动充模过程的整个流场情况, 得出树脂流场的压力分布(Pressure field), 同时采用流体分析的控制体积单元方法求解树脂流场任意时刻的流动前峰^[7]。图 1 为 RTM 工艺 2D 及 2.5D 流场计算的有限元网格和控制体积单元示意图。图中的 Q_i 为流场中第 $N_{i,j}$ 节点控制体积单元流向相邻控制体积单元的流量。控制体积单元为有限元节点相邻线元素的中点及相邻面心或体心相连所构成的封闭体积。通过计算控制体积单元的填充系数 F , 即可得到流场前峰

$$F = \frac{Q_i}{V} \quad (4)$$

式中: Q_i 及 V 分别为 t 时刻流场中第 $N_{i,j}$ 节点控

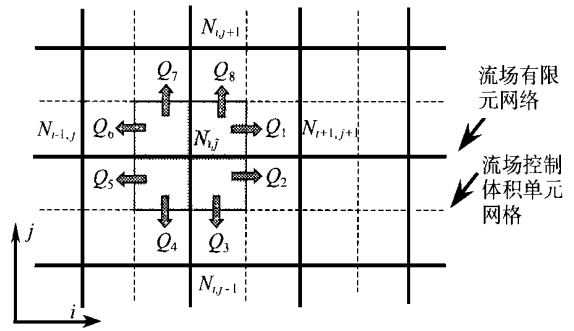


图 1 RTM 工艺流场 CV/FEM 计算原理

制体积单元中的树脂体积和控制体积单元体积。则有:

$F = 0$: 没有树脂流入该节点控制体积单元, 节点位置为未填充区域;

$0 < F < 1$: 树脂正流入该节点控制体积单元, 节点位置为流动前峰位置;

$F = 1$: 树脂已充满该节点控制体积单元, 节点位置为已填充区域

根据各时刻的压力场, 计算该时刻的各节点的 F 值即可得出该时刻的流场流动前峰位置, 从而迭代计算出 RTM 工艺的树脂流动充模全过程。

研究以计算机模拟分析技术的实际工程应用为目的, 在普通 WINDOW 窗口下, 实现 RTM 工艺过程的 CV/FEM 算法, 并使计算程序流场边界条件及参数的设置实现自动转化, 即程序可根据输入的任意有效边界条件及参数, 自动确定和进行流场计算, 消除了边界条件变化时所需的大量流场 FEM 的前后处理工作, 大大提高了软件的通用性和模拟分析使用效率^[8-9]。

2 RTM 工艺模拟结果与分析

2.1 树脂流动充模过程压力场模拟分析

由前述的 RTM 工艺基本数学模型可知, 注射压力是树脂流动充模的驱动力, 同时树脂流体压力场具有动边界和非线性的特点(压力场只有在线注射及均匀模腔尺寸时, 才具有线性分布的特点)。RTM 工艺模腔内的树脂流体压力场模拟结果可为优化模具刚度设计、合模力计算及纤维/树脂的浸润效果分析提供定量分析依据。图 2 及图 3 分别为多注口时注射初期及结束时的压力场模拟分析结果。图 4 为不对称 P 型结构注射结束时充模压力场模拟分析结果。由图可明显地看出压力场具有动边界和非线性的特点, 同时也说明

RTM 模具刚度设计须考虑压力场特性进行优化设计以保证产品的尺寸精度和降低模具成本。图 4 中的最后填充区内, 流体压力较小可能会导致树脂不能渗入纤维束内浸润纤维以及该区域内形成的气泡不易排除, 容易造成产品缺陷; 同时也大大延长充模时间, 因此应采用其他注口位置或保压措施。

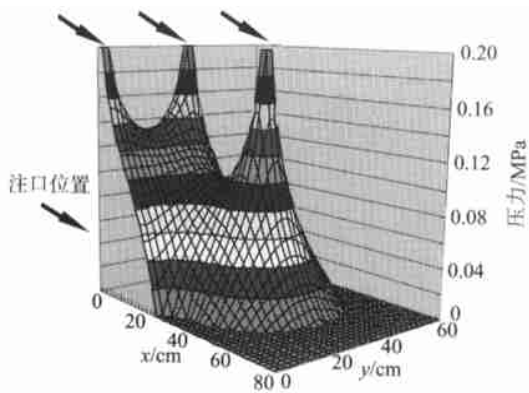


图 2 三注口时注射初期注射树脂流动充模压力场

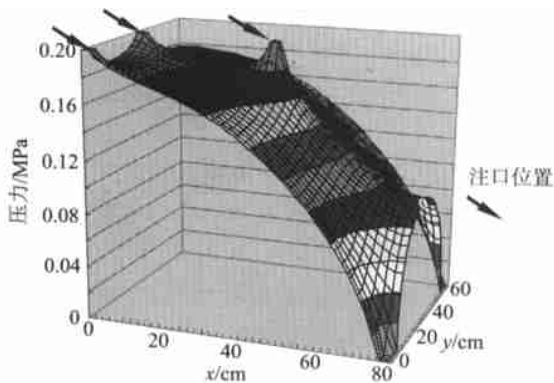


图 3 三注口注射结束时树脂流动充模压力场

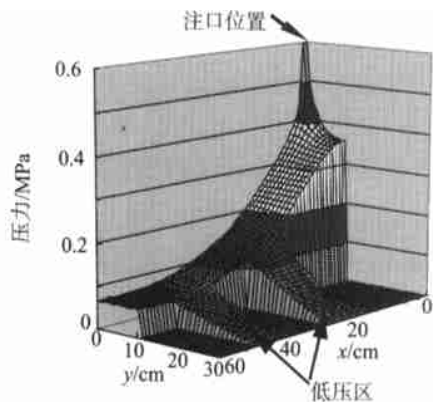


图 4 不对称 P 型结构注射结束时树脂流动充模压力场

2.2 RTM 工艺流动充模过程分析

应用 CV/FEM 算法模拟分析可有效预测 RTM 工艺过程的树脂流动充模全过程。显示任

意时刻的流动前峰位置, 得到重要的充模时间、树脂汇合线及可能出现主要工艺缺陷——干斑(dry spot)的预测, 实现闭合模具内树脂流动充模全过程的可视化(virtualization), 可大大提高工艺过程设计的可靠性和减少实验工作量, 降低复合材料构件的开发成本。图 5 及图 6 分别为不对称 P 型结构和复杂多注口的树脂充模模拟分析结果。图 7 为不对称多注口时树脂流动前峰及干斑缺陷位置的模拟预测。

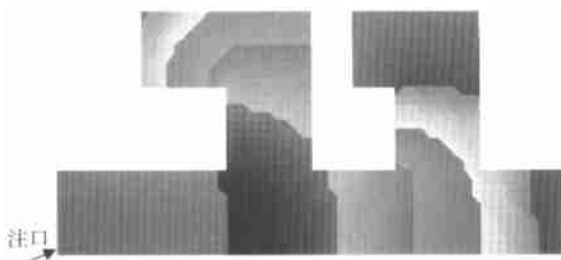


图 5 不对称 P 型结构树脂流动充模过程 (不同层次灰度表示不同时刻流动前峰位置)

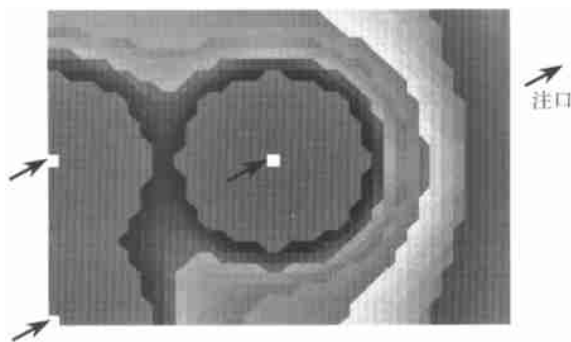


图 6 三注射口时的树脂流动充模过程 (不同层次灰度表示不同时刻流动前峰位置)

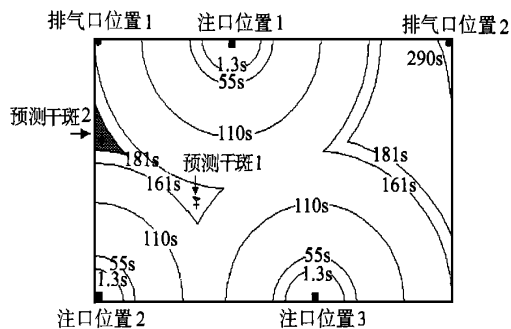


图 7 不对称多注射口时树脂流动前峰及干斑缺陷位置的预测

(图中数字指不同时刻的流动前峰位置)

由 2.1 节及 2.2 节的实例可看出, 研究实现了 CV/FEM 算法对各类平面构件的工艺过程模拟分析, 为 RTM 工艺基础理论研究和工艺优化设计的进一步研究提供了有效手段。其它典型平面流动模拟分析结果如图 8、图 9。

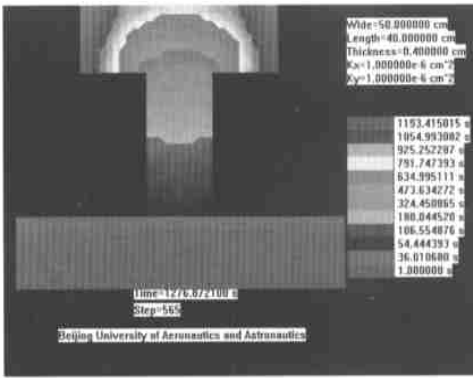


图 8 工字梁树脂流动情况模拟结果 (图中不同灰度代表不同时刻的流动前峰位置)

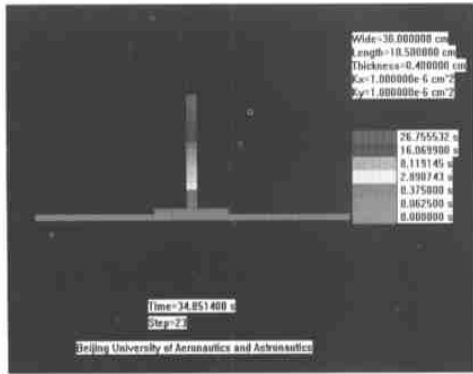


图 9 加强筋板树脂流动情况模拟结果

2.3 主要工艺参数对 RTM 工艺过程的影响

(1) 注射压力对工艺过程的影响 如 2.1 节所述, 注射压力是树脂充模的驱动力, 同时也对纤维 / 树脂浸润及气泡排除具有重要影响。但过大的注射压力也会造成模具损坏或模具工装成本过高以及模腔内纤维预成型体的位移和变形等, 导致工艺失败。以图 10 所示的 3 种典型 RTM 工艺注口设计为例, 渗透率 $K_{xx} = K_{yy} = 0.5 \times 10^{-6} \text{cm}^2$, 粘度 $G = 300 \text{cP}$, 研究注射压力对工艺充模时间的影响规律。图 11 ~ 图 13 分别为中心注口、角点注口及边缘线注口的填充时间 - 注射压力(t-P) 模拟分析结果。由图可看出, 对于一个确定的构件, 注射压力对工艺充模时间的影响规律

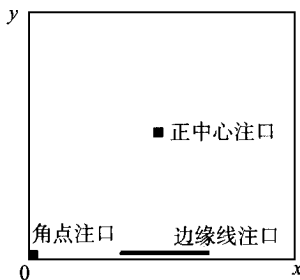


图 10 典型注口设计示意图

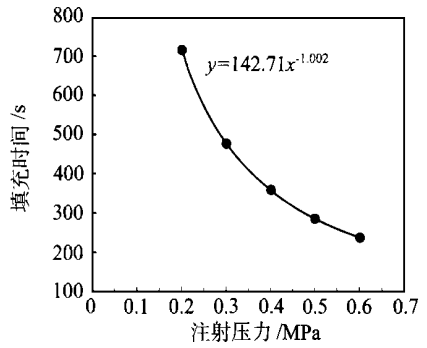


图 11 中心注口 t-P 模拟分析

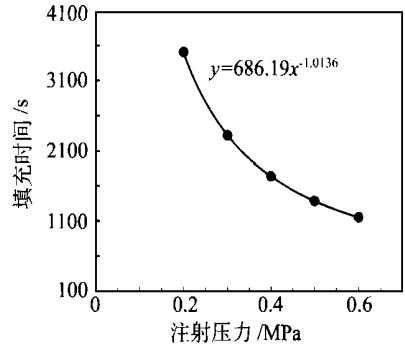


图 12 角点注口 t-P 模拟分析

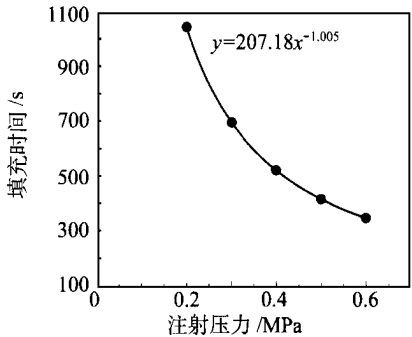


图 13 边缘线注口 t-P 模拟分析

为反比例关系, 这与式(1)的积分形式分析结果一致, 也验证了模拟分析计算的准确性。显然, 较低的注射压力会导致充模时间过长及浸润效果较差等问题; 较高的注射压力对充模时间的缩短也不十分有效, 因此在 RTM 工艺实施中应优化注射压力的选择。同时看出, 3 种典型 RTM 工艺注口设计的充模效率不同, 依次为: 中心注口 > 边缘线注口 > 角点注口, 其中中心注口和边缘线注口的充模效率要远高于角点注口。由 2.1 节的分析可知, 注射压力沿流距的增加迅速下降, 造成距注口较远位置的压降较小, 而充模效率大大降低。因此在工艺设计中应尽可能选择构件几何中心处为注口或者采用效率较高的线注口设计, 以满足工艺和生产要求。

(2) 树脂粘度对工艺过程的影响 树脂粘度 G 是 RTM 工艺的重要工艺参数, 同时 G 是树脂特

性及环境条件的综合反映。G 的大小直接影响树脂充模效率、注射压力的大小及纤维/树脂的浸润质量。图 14 ~ 图 16 为不同注口方案时树脂粘度

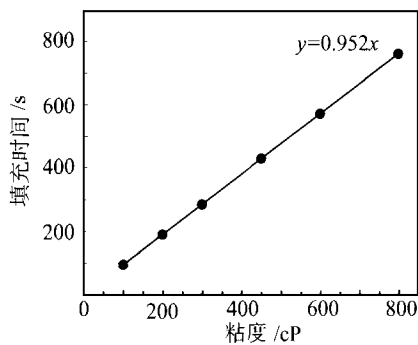


图 14 中心注口 t-G 模拟分析

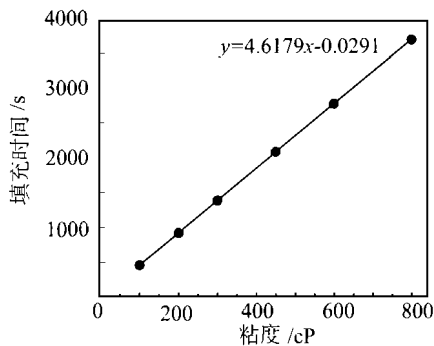


图 15 角点注口 t-G 模拟分析

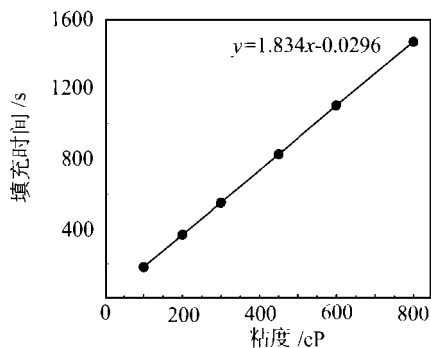


图 16 边缘线注口 t-G 模拟分析

对充模时间影响(t-G)模拟分析结果。由图可看出,在其它条件均相同时,树脂粘度 G 对充模时间 t 的影响规律为线性,采用较低树脂粘度可大大提高注射效率。特别是对充模效率较差的角点注口,降低树脂粘度可有效提高注射效率,避免高活性树脂在充模过程中的凝胶而造成工艺失败。因此为提高注射效率和保证纤维/树脂浸润质量,高性能复合材料 RTM 工艺均采用 100 ~ 300cP 的树脂粘度进行注射。

(3) 渗透率对工艺过程的影响 渗透率 K 是纤维预成型体对注入树脂流体的流动阻力参数, K 取决于纤维含量、预成型体微观结构及纤维/树脂的粘性摩擦等因素。渗透率对充模效率影响

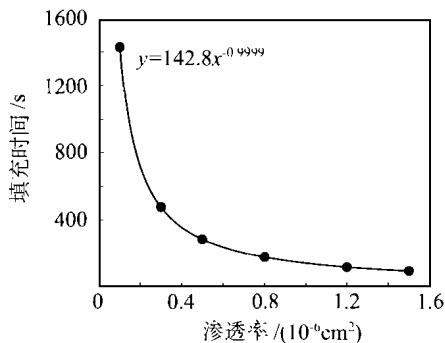


图 17 中心注口 t-K 模拟分析

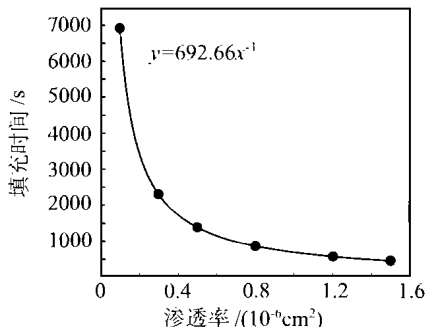


图 18 角点注口 t-K 模拟分析

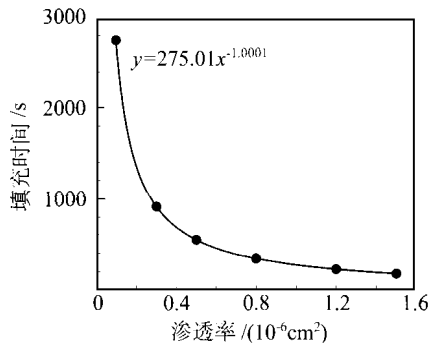


图 19 边缘线注口 t-K 模拟分析

(t-K) 的模拟分析结果见图 17 ~ 图 19。在其他条件均相同时,渗透率 K 对充模时间 t 的影响规律为反比例关系。特别是在低纤维含量时,随渗透率的增大(主要是纤维含量的降低),充模时间迅速减少;但纤维含量较高时(纤维含量 $V_f = 50\%$ 时, $K = 3.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$),渗透率 K 变化对充模时间 t 的影响变弱。由于高性能复合材料的 $V_f = 40\%$,因此 V_f 的变化对充模时间的影响不会十分显著,此时充模时间的缩短应主要靠降低树脂粘度。

3 RTM 工艺模拟算法的实验验证

RTM 工艺模拟算法的实验验证结果如表 1 所示,实验采用美国 Glas-Craft 公司 LPI 型 RTM 注射机进行。由表可看出,研究所开发的 CV/FEM 算法模拟 RTM 工艺充模时间(充模时间是注射压力、树脂粘度、注射方式及渗透率等影

响因素的综合体现)与实际实验结果有较好的一致性。中心点注射条件下出现较大偏差,可能是由

于中心点注射条件的实际边界条件不易保证而造成^[10, 11]。

表 1 实验板填充时间的实验结果与模拟结果的对比论证数据表

参数	1# 板	2# 板	3# 板	4# 板
尺寸/cm	21 × 29 × 0.3	20 × 29 × 0.3	20 × 24 × 0.3	22 × 29 × 0.3
纤维种类	0/90 经编玻璃布	0/90 经编玻璃布	0/90 经编玻璃布	0/90 经编玻璃布
纤维体积分数 V_f	52%	52%	52%	52%
渗透率/(10^{-6} cm ²)	2.68	2.68	2.68	2.68
G cP	315	415	415	375
注射压力/MPa	0.281	0.30	0.281	0.30
注射方式	边缘线中心点注射	边缘线注射	角点注射	正中心点注射
实际填充时间/s	290.0	565.0	145.0	97
模拟填充时间/s	285.3	598.2	158.8	119.2
相对误差/%	1.6	5.8	9.5	22.9

参 考 文 献

- [1] Poe C C Jr, Dexter H B, Raju I S. A review of NASA textile composites research [R]. AIAA Paper No. 97-1321, 1997.
- [2] Dow M B, Dexter H B. Development of stitched, braided and woven composites structure in ACT program [R]. NASA TP-97-206234, 1997.
- [3] Master J E, Portanova M A. Standard text method for textile composites[R]. NASA CR-4751, 1997.
- [4] 仲伟虹, 梁志勇, 等. RTM 工艺及其在我国航空工业中的应用[J]. 材料工程, 1995(1): 24 ~ 27.
- [5] Hip C. SAMPE update: F-22 raptor[J]. High Performance composites. 1998(7/8): 23 ~ 33.
- [6] Warwick G. Moulding for success[J]. Flight International, 1996, 24(30): 65 ~ 68.
- [7] Rudd C D, Long A C, Kendall K N, et al. Liquid composite technologies[M]. Woodhead Publishing Ltd and the Society of Automotive Engineers, 1997. 1 ~ 38.
- [8] Lee L J, Young W B, Lin R J. Mold filling and cure modeling of RTM and SRIM[J]. Composite Structure, 1994(27): 109 ~ 120.
- [9] SUN Xiudong, LI Shoujie, LI Liang, et al. Mold filling and curing analysis in vacuum-assisted resin transfer molding-scrimp [A]. Proceeding of NSF Design and Manufacturing Grantees Conference'99 [C]. California: 1999.
- [10] Kuang T H, Laudorn H, Advani S G. Significance of heart dispersion during manufacturing of composites with LCM processes [A]. Proceeding of NSF Design and Manufacturing Grantees Conference'99 [C]. California: 1999.
- [11] Gauvin R, Trochu F. Key issues in numerical simulation for liquid composite molding processes [J]. Polymer Composites, 1998, 19(6): 233 ~ 240.

作者简介:



梁志勇 男, 1965 年 5 月生, 副教授。现在北京航空航天大学材料科学与工程系工作, 北京市科技新星入选者, 兼任北京市聚合物基复合材料技术实验室副主任。主要研究方向有复合材料低成本制造技术, RTM 及 RFI 工艺技术、纺织复合材料、复合材料工艺计算机仿真与优化技术及复合材料制品的设计与开发。