

带工字型孔的平板构件 LCM 充模过程模拟及实验研究 *

段跃新 邱婧婧 梁志勇 张佐光

(北京航空航天大学,北京 100083)

文 摘 根据 LCM 工艺树脂流动充模模型和 FEM/ CV 算法开发了 LCM 工艺计算机过程模拟的 3D LCM 系统,考查了工字型孔尺寸或位置对平板构件充模过程的影响,并进行了对比实验,同时分析了其流动充模模式的变化规律。结果表明模拟结果与实验结果具有较好的吻合性。模拟软件可以比较准确地模拟 LCM 工艺的充模过程,为指导实际工艺的设计及优化奠定了重要的基础。

关键词 复合材料,液体成型,模拟仿真

Simulation and Experiment Research on LCM Process on I -shape Hole Panel

Duan Yuexin Qiu Jingjing Liang Zhiyong Zhang Zuoguang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract A 3D LCM (liquid composite molding) system of LCM processing simulation is developed based on resin flowing/filling model of LCM process and FEM/ CV method to investigate the influence of I -shape hole dimension/location on filling time of 2D plane. Corresponding comparative experiment is performed and the filling mode change is also analyzed. It is indicated that experimental results match the simulation results well. This software can correctly simulate the LCM filling process and provide an important base of the actual process design and optimization.

Key words Composite, LCM, Simulation

1 引言

复合材料液体成型工艺 (LCM 工艺) 是包括 RTM、RFI 和 RIFT 等工艺在内的一种先进复合材料成型工艺方法,其成型原理是将专用液态低粘度树脂在一定压力下,注入预先铺放了纤维增强材料的闭合模腔或加热熔化模腔内的树脂膜,树脂流动、浸润增强材料并排除模腔中气体,最后固化成型^[1,2]。

LCM 工艺适用于连续纤维增强的热固性树脂基复合材料的制造,具有能源消耗小(为传统工艺的

1/4)、开模力小(为传统压模工艺的 1/40)、非常适合工业化和自动化、生产效率高等优点。应用计算机对 LCM 工艺充模过程进行仿真模拟,可以以较低的成本、较短的时间得到对整个 LCM 工艺过程有指导意义的数据,有利于合理设计模具、优化工艺参数,能起到很好的辅助设计和指导作用,比如避免注射口和溢料口设计不当,节约资金和缩短周期,从而获得优良品质的 LCM 制品。

近几年,LCM 充模过程的计算机模拟仿真模型

收稿日期:2003 - 12 - 22;修回日期:2004 - 03 - 22

*国家自然科学基金项目:59 833 110 及国家 863 项目:2001AA 335 020

段跃新,1970 年出生,副教授,主要从事先进复合材料成型工艺的研究工作

已经逐渐从一维、二维发展到三维,出现了一些用于 LCM 工艺的计算机模拟软件,比如 MATLAB^[2]、RTMS 和 RAPFIL^[3]、FORTRAN^[4]、ANSYS^[5]等,在这些软件的基础上,建立了一些有代表性的模拟仿真软件研究平台如 LIMS^[2]软件系统、LMPS 软件系统、LMPC、RTMSIM^[6]及 RIMHLOT^[7]分析模块等。模拟预测压力分布、树脂流动模式、气泡的形成、充模过程中的现象、以及注射口和溢料口的合理位置,为模具设计、树脂注射过程提供了理论依据。本文采用计算软件与通用有限元分析软件 PATRAN 相结合,对任意复杂形状三维零件的模拟仿真,同时通过实验进行验证。

2 数学模型的建立

在 LCM 工艺过程中,树脂在模腔内的流动可以看成是牛顿流体在多孔介质中的流动,可以利用达西定律来模拟及分析这种流动。

Darcy 定律可以用下面的公式描述:

$$\mathbf{V} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1)$$

式中, \mathbf{V} 是速度矢量, ∇P 是压力梯度, μ 是粘度, \mathbf{K} 是纤维布的渗透率张量。在三维流场和笛卡尔坐标下,方程(1)可展开为:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 u 、 v 和 w 是三个速度分量, k_{ij} ($i, j = x, y, z$) 是笛卡尔坐标下渗透率张量的三个分量。

由于树脂和纤维的密度假设为不变,连续性方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

对方程(3)进行区域积分:

$$\iiint \nabla \cdot (ui + vj + wk) dV = 0 \quad (4)$$

根据格林公式,方程(4)变为:

$$\iint (ui + vj + wk) \cdot \mathbf{n} ds = 0 \quad (5)$$

展开方程(5)获得:

$$\iint (n_x u + n_y v + n_z w) ds = 0 \quad (6)$$

式中, n_x 、 n_y 和 n_z 是积分表面的方向矢量分量。把方程(2)代入方程(6)获得:

$$\iint \frac{1}{\mu} [n_x \ n_y \ n_z] \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{Bmatrix} ds = 0 \quad (7)$$

方程(7)是基于质量平衡的方程,利用方程(7)可以求解流体流过各向异性多孔介质的问题,压力是最后需要求解的参数。

求解方程的方法有很多种,本研究中采用有限元/控制体积方法(FEM/CV)。

3 实验

采用自制的注射设备及模具,对标准粘度液体浸润玻璃纤维连续毡进行 LCM 工艺实验研究。

采用如图 1 所示工字型平板,即 320 mm × 320 mm 的二维平板中间挖一个工字型孔。注射口位置为底边线注射形式。实验中,通过改变 x 、 y 、 m 、 n 的尺寸实现工字型孔的位置及形状的变化,具体情况如表 1 所示。

改变工字型孔尺寸及工字型孔位置,研究工艺参数对树脂充模过程的影响。由于实验板厚度较薄(4 mm),所以忽略树脂渗透过程中厚度的影响。

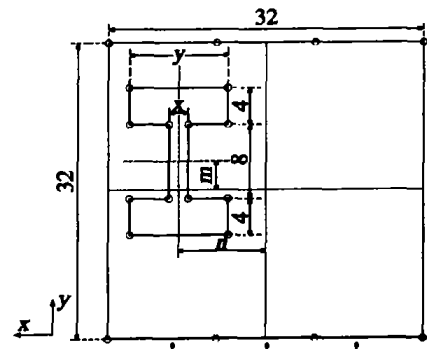


图 1 实验验证构件

Fig.1 Sample scheme

表 1 试样尺寸
Tab. 1 samples sizes

试样编号	工字型孔尺寸/cm			
	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
0	0	0	2	10
0	0	0	2	14
0	0	0	2	24
0	0	0	6	10
0	0	0	6	14
0	0	0	14	14
5	0	0	2	10
7	4	0	2	10

4 充模过程数值模拟

4.1 改变工字型孔尺寸对充模过程的影响

工字型孔尺寸的合理选择是保证充模质量的重要因素,如果工字型孔尺寸设计得不合理会导致成型中留下无法消除的缺陷。

首先将不同尺寸工字型孔二维平板的有限元模型输入三维计算软件,考查不同工字尺寸对充模时间和充模质量的影响。注射口位置选择底边线注射,溢料口位置选择两个顶角,在树脂粘度 $0.062 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、渗透率 $9.7092 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 、压力为 0.02 MPa 的情况下,改变工字型孔尺寸,计算得到不同时刻的流动前锋位置及充模结束时模腔内压力的分布情况如图 2、图 3 所示,实验验证如图 4 所示,所有模拟与实验结果如表 2 所示。

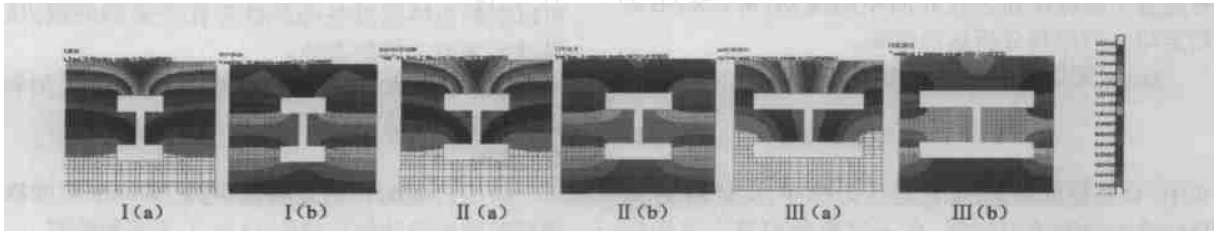


图 2 改变工字型孔横梁尺寸的模拟结果

Fig. 2 Simulation result of different cross-beam sizes of hole
(a) 流动前锋位置; (b) 压力场分布。

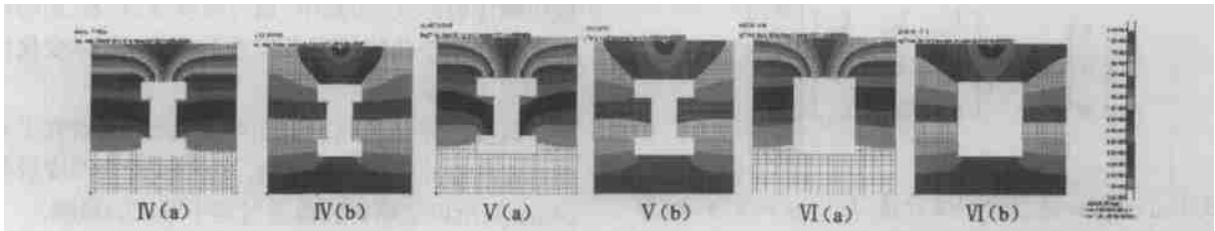


图 3 改变工字型孔中线尺寸的模拟结果

Fig. 3 Simulation result of different center-line sizes of hole
(a) 流动前锋位置; (b) 压力场分布。

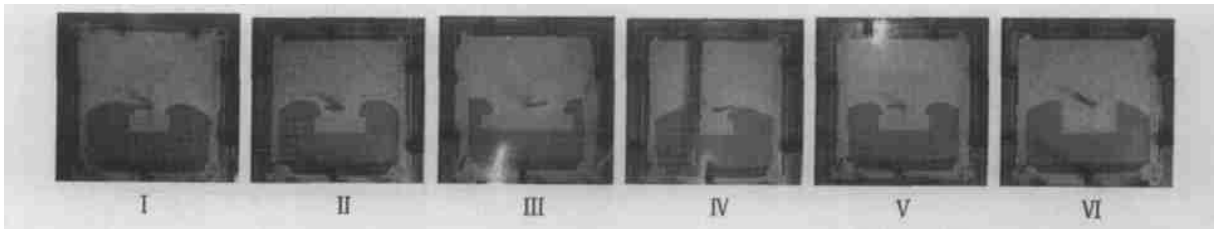


图 4 工字型孔二维平板改变 *y* 的尺寸注射实验结果

Fig. 4 Injection experiment result of different *y* sizes of hole panel

表2 不同工字型孔尺寸的二维平板充模时间

Tab.2 Filling time of different holes

试样编号	充模时间/s		误差/%
	模拟	实验	
141	135	135	4.44
164	173	173	- 5.2
298	304	304	- 1.97
133	130	130	2.31
152	159	159	- 4.4
147	153	153	- 3.92

渗透率的测试根据 Darcy 定律(1)式,考虑一维流动特性,有:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P}{x} \quad (8)$$

式中, P 为流动方向上流体中某时刻两点间的压力差, x 为此两点间的距离,将式(8)代入到式(1)中,经整理有:

$$x dx = \frac{K}{P} Pd t \quad (9)$$

将式(9)两边同时积分,有:

$$\int_0^x x \cdot dx = \int_0^t \frac{k}{P} \cdot Pd t \quad (10)$$

最后积分结果为:

$$t = \frac{x^2}{2KP} \quad (11)$$

根据式(11)做 $t-x^2$ 图,可以得到斜率,在 P 与 K 已知的情况下,可以求得渗透率 K 。

由图2中不同时刻的流动前锋以及压力场分布可以看出,工字型孔横梁尺寸不但影响了流动前锋的状态,对模腔内压力分布、充模时间的影响都相当明显。因为横梁尺寸的增加实际上增大了最后填充点到注射口的流距,尤其是试样 的整个模腔内压

力降低得很快。也说明工字型孔横梁越长,压力降低得越快,更容易出现缺陷,流过工字型孔两侧的时间也随之增长。

显然, 号工字型孔平板充模时间较短,缺陷最少,是比较理想的方案。从图2中和表2可以看出,实验结果与模拟结果吻合较好,其充模时间实验与模拟误差 $< 6\%$ 。所以在工艺过程中不但要考虑构件形状的设计要求,还要考虑当工字型孔横梁过长时,充模变慢且缺陷较多等负面影响。

对比图3与图2可以看出,工字型孔中线尺寸的改变不如横梁尺寸改变的影响显著,但是也会影响流动前锋状态以及模腔内压力分布、充模时间。由于工字型孔中线尺寸增加,压力降分布较均匀,且降低得较慢,工字型孔两侧较少出现缺陷。

通过这些实验与模拟结果可以发现,并非模腔面积越小,充模时间越短;充模时间还与工字型孔的尺寸、形状有关。

4.2 工字型孔二维平板改变工字型孔位置对充模过程的影响

以上研究的都是工字型孔位置在二维平板几何中心时的充模过程实验和模拟结果,实际工艺中工字型孔的位置往往偏离了平板的几何中心,因而有必要研究改变孔位置的充模过程。将不同位置工字型孔的二维平板有限元模型输入三维计算软件,考查不同孔位置对充模时间和充模质量的影响,模拟结果见图5,实验结果见图6,充模时间见表3。实验中保证注射压力、粘度、注射口位置等工艺参数恒定,实验结果中工字型孔两侧的流动前锋是不对称的。反复实验证明,如果模拟时均匀设置渗透率的值,则模拟结果与实验结果流动前锋的轮廓不太吻合,两者充模时间的数值也有较大差距(表4)。所以这只能是渗透率设置不合理造成的。考虑到有机玻璃上模板的刚度不够大,夹具在模板周围一圈施加压力后,上模板发生形变,中央区域略有翘曲,该处的模腔体积增大,纤维孔隙率增大,渗透率也随之增大。

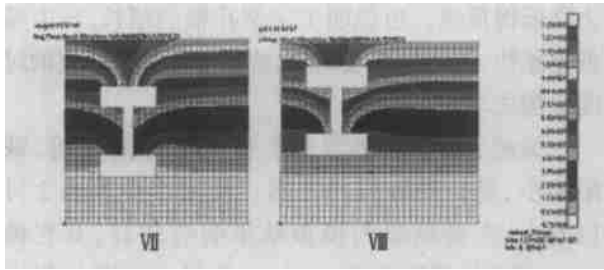


图5 工字型孔位置处于平板非几何中心时
模拟流动前锋位置

Fig.5 Simulation result of different hole location



图6 号工字型孔二维平板不同时刻的
实验结果流动前锋位置

Fig.6 Experiment result of different time of hole panel

表3 不同工字型孔位置的二维平板充模时间

Tab.3 Filling time of different I holes location

试样 编号	实验充模 时间/s	渗透率均匀时		渗透率变化时	
		模拟充模 时间/s	误差/%	模拟充模 时间/s	误差/%
	122	139	13.93	122	0
	120	129	7.50	116	3.3

表4 多次实验充模时间与模拟结果对比

Tab.4 Comparison of experimental and
simulation results of filling time

型号	渗透率均匀时充模时间/s		误差/%
	模拟	实验	
- 1	139	122	13.93
- 2	141	122	15.56
- 3	145	122	18.88

实验中对模腔周围一圈及中央区域的厚度进行了测定,并采用刚度较大、模腔几乎无形变的模具,测得不同模腔厚度下的渗透率值:中央区域的渗透率设置为 $1.4564 \times 10^{-9} \text{m}^2$,边缘区域渗透率仍为 $9.7092 \times 10^{-10} \text{m}^2$,因此将渗透率的分布调整为如图7所示。渗透率变化设置后,得到的实验与模拟结果的对比见图8。显然这时的模拟结果与实际流动前锋轮廓较吻合,充模时间也更接近实验值。

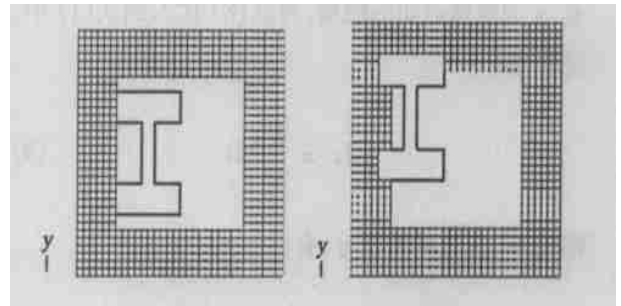


图7 纠正后的二维平板渗透率变化

Fig.7 Modified panel permeability change

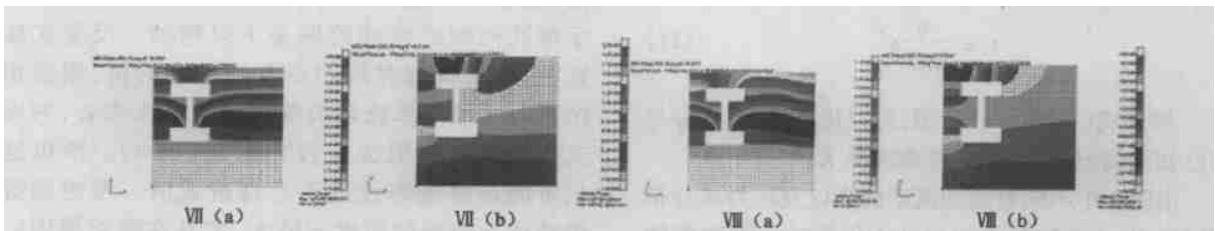


图8 纠正渗透率后的 号和 号的模拟结果

Fig.8 Simulation results of modified permeability

(a) 流动前锋位置;(b) 压力场分布。

(下转第 43 页)

Si—CH₃、Si—CH₂—Si、Si—H 组成的 SiC₄、SiC₃H 等结构单元,为支化度较高的体型结构。

(2)由 NMR 知其 C—H/Si—H 值为 8.84, SiC₃H/SiC₄ 值为 0.51。热分析表明,在 N₂ 气氛中 1 200 裂解后,陶瓷收率为 78.9%。XRD 表明,在 N₂ 中 1 250 裂解后转化为 β -SiC,晶粒尺寸约 3.75 nm。即该 PCS 硅氢含量高,陶瓷收率高,但支化度偏高。为改善 PCS 的组成结构、提高其性能,还需要进行工艺的进一步优化。

参考文献

1 Birot M, Pillot J P, Dunogues J. Comprehensive Chemistry of Polycarbosilanes, Polysilazanes, and Polycarbosilazanes as Precursors of Ceramics. Chem. Rev. 1995;95:1 443~1 477

2 Yajima S, Hasegawa Y, Hayashi J. Synthesis of continuous silicon carbide fiber with high tensile strength and high Young's modulus. Part I. Synthesis of polycarbosilane as precursor. J.

Mater. Sci., 1978;13:2 569~2 576

3 宋永才,王岭,冯春祥.聚碳硅烷的合成与特性研究.高分子材料科学与工程,1997;13(4):30~33

4 宋永才,王岭,冯春祥.聚碳硅烷的分子量分布与可纺性研究.高技术通讯,1996;1:6~8

5 Hasegawa Y, Okamura K. Synthesis of continuous silicon carbide fiber. Part IV. The structure of polycarbosilane as precursor. J. Mater. Sci., 1986;21:321~328

6 陆逸,李效东.聚碳硅烷的结构鉴定.宇航材料工艺,1989;19(6):55~59

7 Hasegawa Y, Imura M, Yajima S. Synthesis of continuous silicon carbide fiber. Part II. Conversion of polycarbosilane fiber into silicon carbide fibers. J. Mater. Sci., 1980;15:720~728

8 Hasegawa Y, Okamura K. Synthesis of continuous silicon carbide fiber. Part III. Pyrolysis process of polycarbosilane and structure of the products. J. Mater. Sci., 1983;18:3 633~3 648

(编辑 吴坚)

(上接第 30 页)

纠正后的模拟结果与实验结果能很好地吻合,这就说明只要在模拟时多考虑实际工艺中的影响因素,尽可能准确地设置工艺参数值,完全可以使模拟结果与实验结果取得相同的效果,从而用来指导实际工艺。

5 结论

(1)通过已开发的模拟分析软件分析了带工字型孔的二维平板构件充模过程,改变工字型孔的尺寸或位置,实验验证了软件模拟的准确性和可靠性;

(2)实验和模拟结果表明:多考虑实际工艺中的影响因素,尽可能合理地设置工艺参数输入值,使其与实际成型时的情况接近,模拟软件就可以较准确的反映树脂充模状态和充模时间;

(3)在注射口和溢料口位置固定时,带工字型孔的平板中工字横梁对充模时间影响很大,当工字横梁过长时,出现充模时间大大增长且缺陷较多等负面影响,随着横梁变短平板缺陷减少。

这些模拟得到的规律可以在减少实验量,降低 LCM 工艺成本和缩短开发周期的基础上实现对整个工艺过程的优化。

参考文献

宇航材料工艺 2004 年 第 5 期

1 梁志勇,段跃新,尹明仁等.复合材料 RTM 制造工艺计算机模拟分析研究.航空学报,2000;21(4):65~71

2 Gökce Ali, 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

3 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

4 Bickerton S, Stadfeld H C, Steiner K V, Advani S G. Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding. Composites Science and Technology, 2001; 61:1 625~1 637

5 Lin M Y, Murphy M J, Hahn H T. Resin transfer molding processing optimization. Composites, Part A, 2000;31:361~371

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

7 Gauvin R et al., Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. Polymer Composites, 1996; 17(1):149~158

(编辑 吴坚)