复合材料学报 第18卷 第4期 11月 2001年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 18 No. 4 November 2001

文章编号: 1000-3851(2001)04-0017-06

视窗化 RTM 工艺充模过程模拟仿真技术研究

尹明仁, 段跃新, 李 丹, 梁志勇, 张佐光
(北京航空航天大学 材料科学与工程学院 104 教研室, 北京 100083)

摘 要: 根据 RTM 工艺树脂流动充模模型, 研究和开发了基于 FEM/CV 算法的 RTM 工艺复杂渗流充模过程数值模拟软件平台-BHRTM-2。BHRTM-2 在视窗系统下运行, 带有 FEM 网格捕捉器窗口可直观方便地设置注射口、溢料口和工艺参数, 操作简单, 能够模拟复杂边界制件的树脂流动充模过程、显示充模过程中任意时刻模腔内压力的分布场、流动前峰和预测充模时间及可能的干斑缺陷位置, 为 RTM 工艺设计与优化提供了有效技术手段。文中对 BHRTM-2 的模拟结果的正确性和可靠性进行了理论与实验验证, 并给出了具体算例。

关键词: 复合材料; RTM; 模拟仿真; 软件
中图分类号: TB332; V258 **文献标识码:** A

AFFORDABLE SIMULATION TOOL FOR RTM PROCESS

YIN Ming-ren, DUAN Yue-xin, LI Dan, LIANG Zhi-yong, ZHANG Zuo-guang
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: RTM process is considered as an affordable and environmental friendly manufacture technology for the advanced composites. One of the major difficulties of RTM applications is related with complex resin flow behavior during mould filling. A mold filling simulation tool, named BHRTM-2, was developed based on numerical models of RTM process and FEM/CV method. BHRTM-2 was developed in windows environment and a powerful snapping function was also provided, which let an operator easily determine the injection and vent locations. The automatically mashing function for complex plate shape part was also featured. The pressure field, resin flow front, filling time and dry spot of mold filling can be predicted with the simulation tool. The theoretical and experimental verifications of the mold filling simulation were well illustrated and case studies were also given in the research. The research will provide an affordable and user friendly simulation tool for RTM process.

Key words: composites; RTM; simulation; software

RTM 工艺(Resin Transfer Molding)又称为树脂传递模塑成型工艺, 是 LCM 工艺(Liquid Composite Molding, 液体复合材料成型工艺)中的一种, 与其它复合材料成型工艺(如 SMC 等)之间最大的不同在于 RTM 工艺是在闭合模腔中一步完成树脂对纤维进行浸润的成型过程, 该工艺具有更好的环保性及易于成型复杂制件等优异特点。但是由于树脂在模腔中一步完成浸润纤维, 因而模具的设计(如模具注射口与溢料口位置的选择)、工艺参数的确定成为 RTM 工艺的技术关键与难点。传统 RTM 工艺的模具设计及工艺参数确定, 完全基于反复的实验, 并限于工艺设计人员的经验与水平, 质量难以控制, 造成较长的工艺开发周期及较高的工艺开发成本。如何充分发挥 RTM 等 LCM 工艺的优异特点, 同时降低其工艺设计成本, 增强此类工艺成型过程的可预见性和可控制性成为先进 RTM 工艺研究的一个重要方向。

20 世纪 80 年代末以来, 世界上很多研究机构和院校对 RTM 工艺的质量控制技术进行了不断的探讨研究, 并将计算机模拟仿真技术引入到 RTM 工艺研究中。进入 90 年代中后期之后, 一些有代表性的应用于 LCM 工艺模拟仿真研究的软件平台逐

收稿日期: 2001-01-03; 收修改稿日期: 2001-02-05
基金项目: 国家自然科学基金资助(59833110 及 59773004)
作者介绍: 尹明仁(1975), 男, 硕士生, 现就读于北京航空航天大学, 研究方向为复合材料工艺计算机模拟仿真与优化技术。

步建立并日趋完善, 其中比较著名的有美国 Delaware 的 LIMS、密西根州立大学的 LMPC、福特公司开发的 CFILL 及 R. Gauvin 等人的 RTM-FLOT 等[1~4]。模拟仿真模型也逐步从一维、二维向三维方向发展, 同时在等温模型的基础上发展了非等温模型的 LCM 工艺模拟仿真平台。国外在此领域做得比较成功的国家都集中在欧美, 中国的台湾地区在此方面亦有很大发展[5]。我国 RTM 工艺研究起步较晚, 从目前的文献资料来看, 仅有北航等少数单位开展了 RTM 工艺计算机模拟仿真技术的研究。北航复合材料研究课题组在最初开发的 BHRTM-1 的基础上[6], 研究开发了第二代 LCM 工艺模拟仿真平台 BHRTM-2, 相对于 BHRTM-1, BHRTM-2 具有完全人性化的用户图形操作界面, 操作更为方便, 而且具有更强、更全面的功能。其最显著的特点是支持复杂边界形状 RTM 制件的模拟仿真计算, 支持二维复杂件的造型和自动网格剖分, 并且支持流场和压力场的动态显示。与国外开发成功的 RTM 模拟分析软件平台不同, BHRTM-2 可在视窗系统下运行, 不须依赖于昂贵的有限元分析平台, 因此具有较低的运行成本。

1　RTM 工艺模型原理与模拟分析算法

RTM 工艺的充模过程是一种非牛顿流体流经多孔介质的行为, 流动行为遵从 Darcy 定律

$$u_x = -\frac{K}{_}\frac{dP}{dx} \tag{1}$$

式(1)为一维表达式, 式中的 K 为渗透率张量, dP 为流动方向上的压降, _ 为树脂粘度。当考虑二维流动特性时, Darcy 定律具有如下形式:

$$\begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} = -\frac{1}{_}\begin{matrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{matrix}\begin{matrix} \frac{5P}{5x} \\ \frac{5P}{5y} \end{matrix} \tag{2}$$

结合二维流动的质量守恒方程, 可以得到如下压力场方程:

$$\frac{5}{5x}\frac{K_{xx}}{_}\frac{5P}{5x} + \frac{5}{5x}\frac{K_{xy}}{_}\frac{5P}{5y} + \frac{5}{5y}\frac{K_{yx}}{_}\frac{5P}{5x} + \frac{5}{5y}\frac{K_{yy}}{_}\frac{5P}{5y} = 0 \tag{3}$$

由式(3), 运用适宜的边界条件, 可以求出填充过程中各时间(时间连续的, 且按时间步长递增)模腔内的压力分布场, 从而树脂流体行为可以表述为一个亚稳定过程。当压力分布梯度表达式求出之后可以代入式(2)求出已填充区域的树脂流体流速, 由此可以重新计算该时间段(一个时间步长的跨度)的流体前沿位置。综上分析, RTM 工艺充模过程的二维模拟必须实现两个关键技术: 一是计算各时段的模腔内压力分布场, 二是重新确定树脂流体的流动前沿位置。

无论采用何种计算方法, 都应该满足以下几个边界条件:

(1) 注射口处, 注射压力或注射流量为一定值, 或为一预定义的方程。

(2) 树脂流体流动前峰的边沿处(已填充与未填充区域的分界线)压力为 0。

(3) 模腔壁或其它非渗透性表面处树脂流体流速设置为 0, 压力值为 0。

在上述边界条件的基础上, 可以采用一适宜的数值计算方法计算任意时刻的模腔内压力分布场值, 比较常用的数值计算方法包括有限差分法(FD)、边界元素法(BE)及有限元法(FE)。

有限元法相对其它方法而言, 更适于模拟非规则几何形状的 RTM 制件。有限元法一般都带有一个预处理过程(或软件)和一个后处理过程(或软件)分别进行有限元网格剖分和计算结果显示。有限单元类型一般采用三角形单元或四边形单元。有限元法可以对任意一个节点控制单元进行厚度、渗透率张量及孔隙率等单独赋值。BHRTM-2 所采用的数值计算方法为有限元法, 其中有限单元类型为规整四边形单元。

研究中, BHRTM-2 并没有依赖其它软件平台, 有限元网格剖分和计算结果的可视化显示都由 BHRTM-2 系统自身的相应模块负责, 其中仿 3D 树脂流体充模过程和压力场演变过程的显示由 BHRTM-2 系统的一个外挂程序 RTMFLOW 承担, BHRTM-2 系统主程序自身能进行二维流场显示。

2　系统的建立与实现

BHRTM-2 系统的设计与开发目标为一个完全运行在微软视窗 NT 平台上的高性能、多功能、低成本及全用户界面的 WIN32 应用程序, 用于对具有复杂边界形状的板状制件的 RTM 充模过程进行模拟, 以期为实际工艺的模具设计、参数优化和过程控制提供具有参考意义的数据结果。该系统为 RTM 工艺设计人员提供了一个设计参考和设计优化的辅助平台和工具。

BHRTM-2 系统包括一个主应用程序 BHRTM

(北航 RTM 工艺可视化模拟仿真平台)和辅助程序 RTMFLOW(对树脂流动过程和压力场演变过程进行仿 3D 显示)。其应用程序结构及所含模块间的关系如图 1 所示。

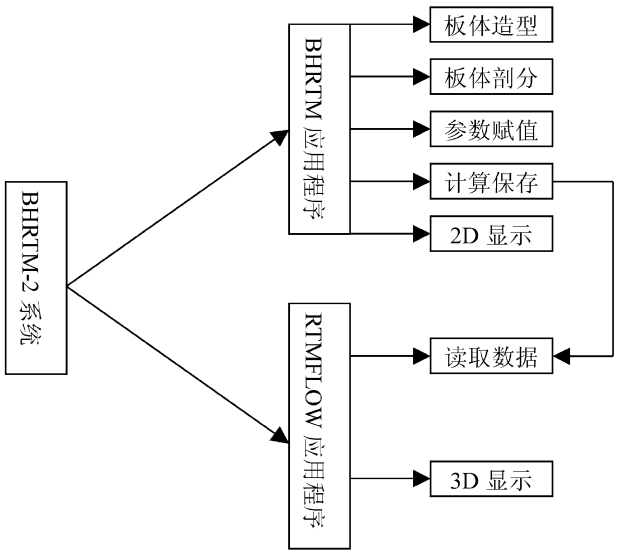


图 1 BHRTM-2 系统程序结构及模块划分示意图

Fig. 1 The module architecture of BHRTM-2 application system

BHRTM 应用程序完成计算后, 将场值数据输出到文件中, 同时可以输出制件尺寸和网格信息文件。RTMFLOW 可以读取这些场值文件和制件结构文件中的数据, 生成一系列的动画桢, 从而以三维方式显示 RTM 工艺过程中的流体充模成型过程。

BHRTM 应用程序在 VC 工具环境下开发, 充分利用 MFC 类库所带来的便利和功能。BHRTM 所有功能的实现都是基于 MFC 和 WIN32 API 进行, 其应用程序框架结构为多文档结构, 实际采用一个文档类型, 对应三个 VIEW 视图, 分别为计算与显示视图、造型和剖分视图及参数设置捕捉器视图。其中造型和剖分模块、显示模块及捕捉器窗口都大量使用了 MFC 中 CDC 类所提供的接口与函数, 包括点中测试, 并在其中利用了很多相关 GDI 对象。计算模块则充分利用了 NT 平台下多任务多线程的优点, 将主体计算任务交给一个独立的工作线程去完成, 这样界面主线程能够正常显示并控制工作线程的运行和终止。参数设置捕捉器的设计与实现是为了提供一个更直观更直接的参数设置可视化界面, 尤其在复杂边界形状下, 由于有限元信息较为抽象和复杂, 而在捕捉器窗口中却非常清晰, 用户可以方便地设置节点相关的属性值, 这些属性包括局部渗透率和注射口及溢料口位置, 此外也可对局部板体厚度进行赋值。图 2 为应用程序启动时的主界面。

在 BHRTM 应用程序的计算和显示窗口, 用户可以显示流动充模过程、压力场演变过程及合模压力曲线。为进一步更直观地实现充模流场和压力场

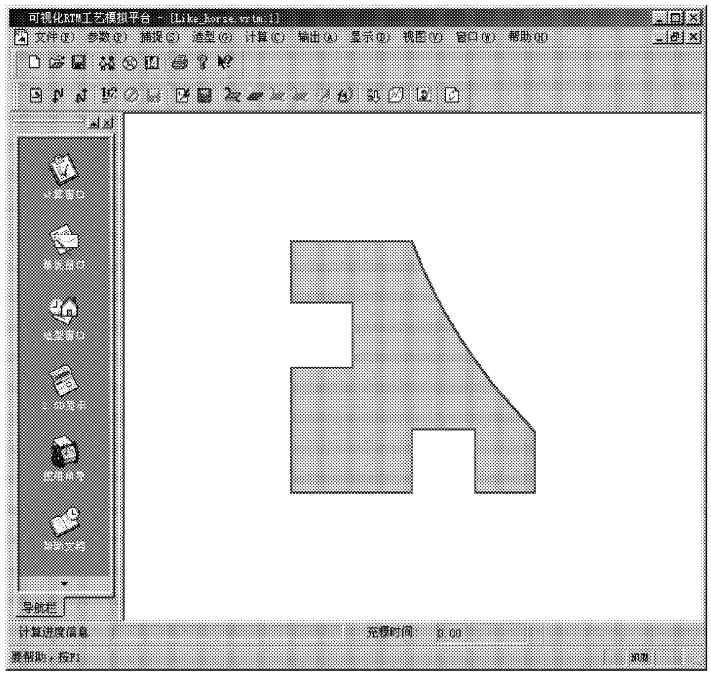


图 2 BHRTM 应用程序主界面

Fig. 2 The main UI of BHRTM application

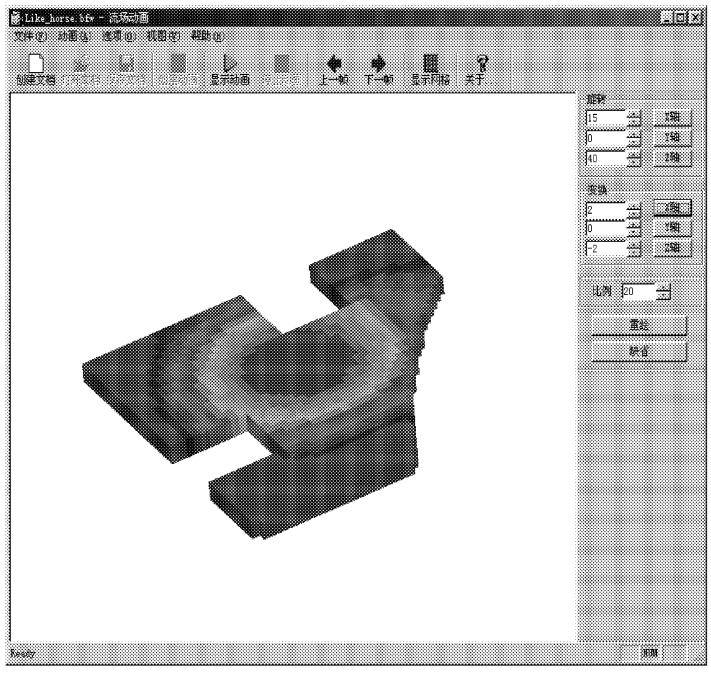


图 3 RTMFLOW 应用程序主界面

Fig. 3 The main UI of RTMFLOW application

的可视化, 研究开发了 RTMFLOW 应用程序, 该程序负责对 BHRTM 应用程序输出的压力场值文件进行读取并生成仿 3D 动画系列, 从而实现流场和压力场演变过程的 3D 显示。RTMFLOW 应用程序的主界面如图 3 所示。

3 系统验证与算例研究

系统的验证工作分两部分进行, 一是理论验证, 另一是实例验证。

3.1 理论验证

对矩形制件 RTM 工艺进行充模成型时, 在考虑整个面内渗透率一致均匀的前提下, 采用边缘线注射方式, 树脂的流动浸润行为表现为流动前峰平移推动, 此时充模过程的填充时间在理论上具有解

表 1　单向流动填充时间解析解与模拟解的对比

Table 1　Comparison in filling time of unidirectional flow between analysis and simulation

参数	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4	算例 5
树脂粘度/cP	300	300	300	300	300
渗透率/$10^{-6}cm^2$	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
注射压力/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
模腔尺寸/cm	10×20	10×20	10×20	10×20	10×20
注射方式	横向线注射	横向线注射	横向线注射	横向线注射	横向线注射
解析解/s	405.4	202.7	135.1	101.4	81.1
模拟解/s	405.7	202.77	135.17	101.37	81.09
解析解与模拟解相对误差/%	-0.074	-0.035	-0.052	0.029	0.012

表 2　二维辐射流动填充时间解析解与模拟解的对比

Table 2　Comparison in filling time of 2D radiative flow between analysis and simulation

参数	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4	算例 5
树脂粘度/cP	300	300	300	300	300
渗透率/$10^{-6}cm^2$	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
注射压力/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
模腔半径/cm	10	10	10	10	10
注射半径/cm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
注射方式	中心点注口	中心点注口	中心点注口	中心点注口	中心点注口
解析解/s	405.4	202.7	135.1	101.4	81.1
模拟解/s	405.7	202.77	135.17	101.37	81.09
解析解与模拟解相对误差/%	-4.35	-4.35	-4.38	-4.27	-4.35

析解,解析解方程为

$$t = \frac{Z}{2KP}x^2 \tag{4}$$

式中: P 为注射压力, Z为树脂粘度, x 为流距。表 1 为理论时间与模拟时间的对比。

从表 1 中可以看出,解析解与模拟解的差值很小。再考虑圆形 RTM 件的充模成型过程,当考虑面板内渗透率均匀时,以模腔中心为注射口,充模行为是流体辐射流动扩展的过程,此时填充时间有解析解,解析解方程为

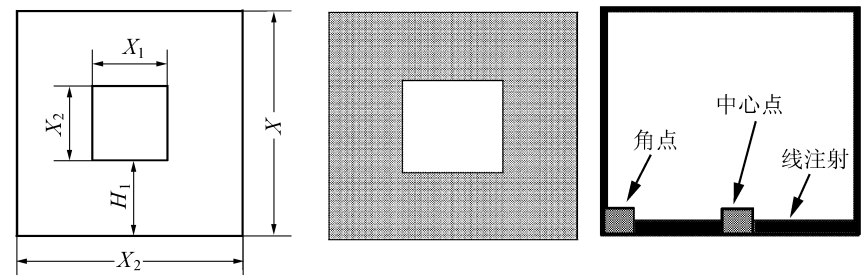
$$t_{ff} = \frac{H}{2KP_{inj}}\left[r_{ff}^2\ln\frac{r_{ff}}{r_{inj}} - \frac{1}{2}(r_{ff}^2 - r_{inj}^2)\right] \tag{5}$$

式中: r_{ff}为终点流动半径, r 为某时刻的流动位置, r_{inj}为注射口半径, P_{inj}为注射压力, H为孔隙率。填充时间最终还与初始注射半径有关,此时必须考虑注射面积(见后文阐述)。

表 2 为均匀辐射流动情况下,理论时间与模拟时间的对比。从表中数据对比来看,模拟结果与理论解析解之间的差值很小,在 4.5% 以内,产生偏差的原因除了与计算控制常数值的设置相关外,主要在于注射口面积的选择存在不可避免的偏差。由于系统采用的有限单元格式为四边形单元,所以模拟采用的注射口方式实际为中心菱形注射口,菱形边长约为 0.707(0.5×1.414) cm,注射口面积要小于理论解析解所设定的半径为 0.5 cm 的注口圆面积,由此模拟结果的填充时间稍微偏长,即使如此模拟时间偏差仍较小。

3.2　实例验证

从实验的角度对系统模拟的正确性与可靠性进行验证,图 4 为研究所采用的实例制件验证方案。图 4(a) 为实例制件的原型图,图 4(b) 为自动网格剖分过的造型示意图,图 4(c) 是实验验证中所采用的几种注射口方式示意图。在研究中保持最外边界尺寸为 23 cm×23 cm,改变尺寸 X_2 及 H_1,组合了 8 种有代表性的验证方案,见表 3。



(a) 回字形制件图　　(b) 网格剖分结果　　(c) 注射口位置

图 4　验证示例图、网格剖分结果及注射口位置示意图

Fig. 4　The size, mesh and injection locations of the instance

表 3 回字形制件实验结果与模拟结果对比

Table 3 Comparison of square part between experiment and simulation results

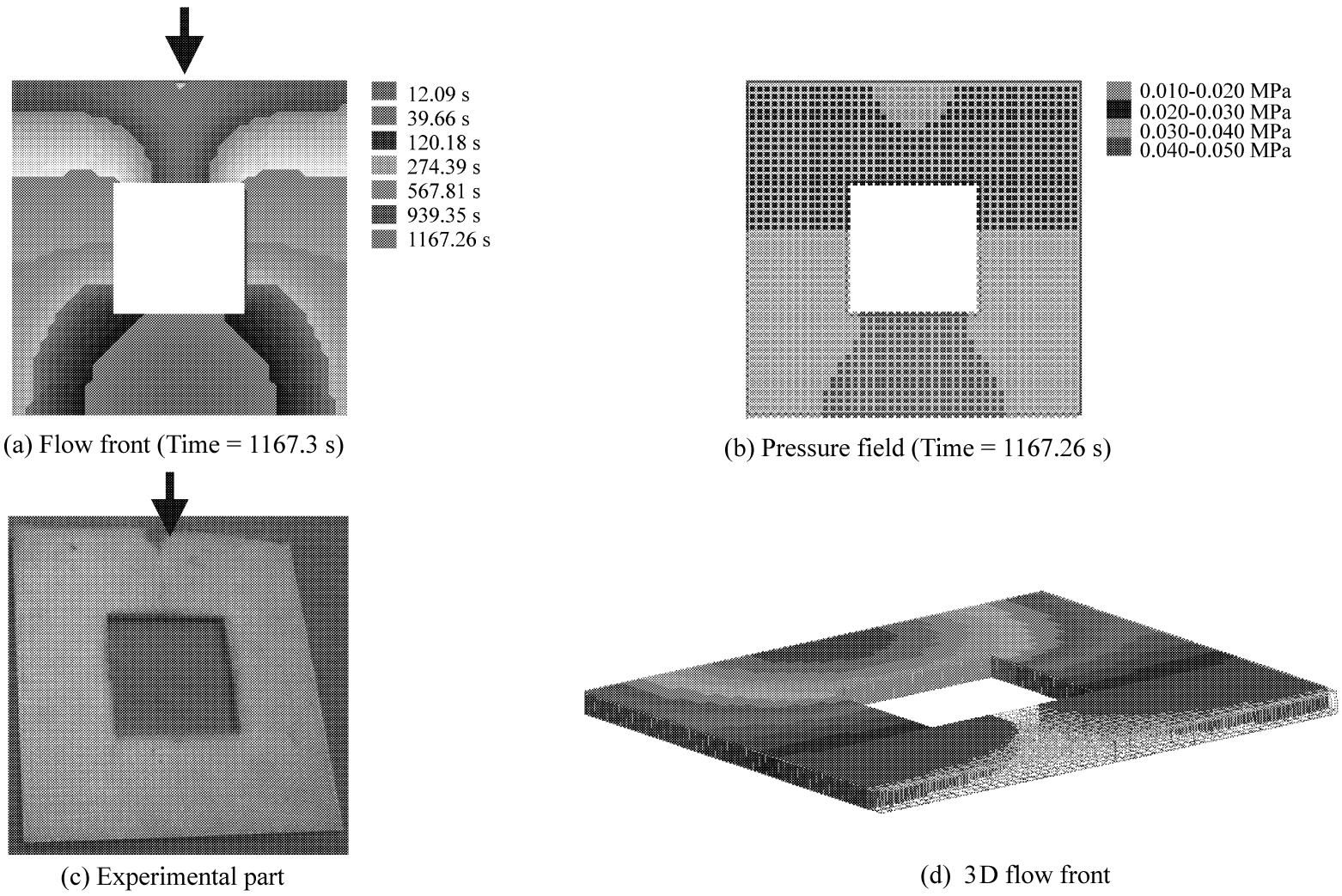
序号	注射方式	开孔尺寸 / mm	孔边距 H_1 / mm	渗透率 / $10^{-6}cm^2$	注射压力 / MPa	树脂粘度 / cP	实际充模时间/ s	模拟充模时间/ s	百分数差值/ %
1	线注射	90× 90	70	5. 14	0. 05	525	677	676. 8	0. 03
2	线注射	50× 50	90	5. 14	0. 05	570	675	641. 0	5. 0
3	线注射	130× 130	50	5. 14	0. 05	535	851	830. 39	2. 42
4	线注射	90× 90	40	5. 14	0. 05	500	658	699. 48	- 6. 3
5	线注射	90× 90	100	5. 14	0. 05	570	696	647. 58	6. 96
6	中点注射	90× 90	70	5. 14	0. 05	510	1166	1167. 57	- 0. 13
7	角点注射	90× 90	70	5. 14	0. 05	500	1695	1808. 3	- 6. 67
8	中点注射	130× 130	50	5. 14	0. 05	510	1271	1276. 13	- 0. 40

表 3 为实验数据与 BHRTM 模拟充模时间的数据对比。实验中采用面密度 d_s= 0. 4 g/ cm^2 玻璃纤维方格布, 树脂体系为 191 不饱和聚酯。

观察实验结果与模拟结果对比数据表, 实验结果与模拟结果的相对偏差在 7 % 之内, 这说明系统的应用可靠性比较高。造成实验结果与模拟结果偏差的原因, 也有可能是所记录的实验结果自身不够准确, 这主要是由于实验的影响因素比较多: 玻纤方格布的渗透率分布不均匀、铺放纤维布时造成纤维布局部变形、注射压力的波动、树脂粘度的变化、充模过程中存在边缘流动等都会影响充模时间。

图 5(a) ～5(d) 为表 3 中序列 6 充模过程的树脂流动前峰图、充模结束瞬间的压力场分布图、最后完成的实验制件及 3D 效果的充模过程。图 5(a) 及 5(c) 中的黑色箭头指明干斑缺陷位置。实验结果与模拟结果非常吻合。

理论与实验验证的结果表明, BHRTM 应用程序具有较高的模拟精度, 可以应用于实际 RTM 工艺充模过程的数值模拟。



(a) Flow front (Time = 1167.3 s)

(b) Pressure field (Time = 1167.26 s)

(c) Experimental part

(d) 3D flow front

图 5 模拟结果流动前峰、压力场及实验完成制件

Fig. 5 Flow front and pressure field of simulation results and experimental part

3.3　复杂边界制件算例

为了更好地展示 BHRTM-2 的操作特性与功能,设计了如图 6 所示的算例,图例为示例的构型与

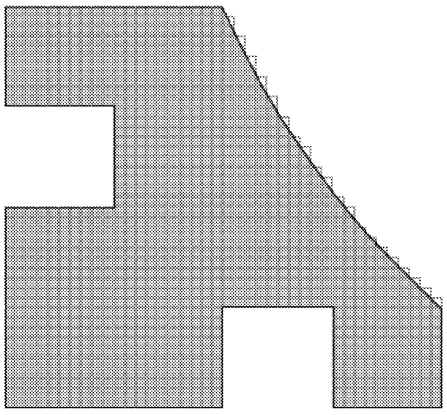


图 6　示例构型与网格剖分示意图

Fig. 6　Example and mesh cells

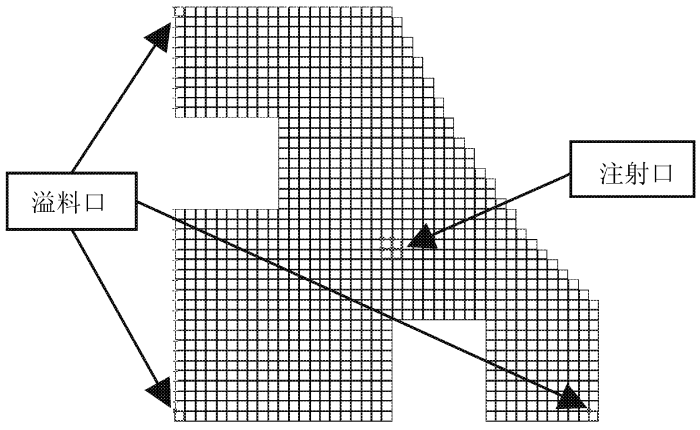
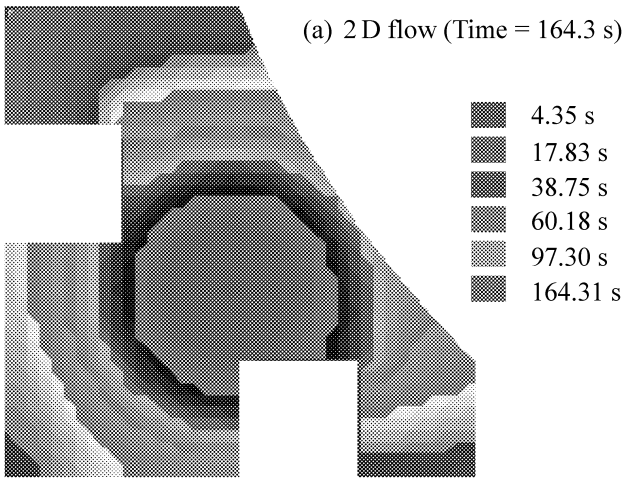


图 7　及捕捉器窗口下设置的注射口与溢料口位置

Fig. 7　Inlets and outlets set under snapping window



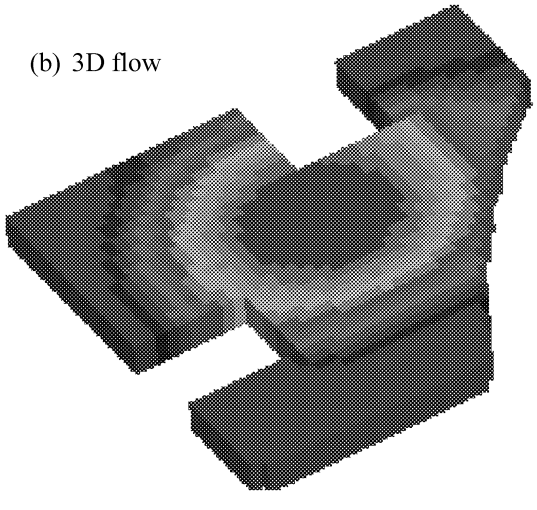


图 8　示例充模过程的显示

Fig. 8　Resin flow trace

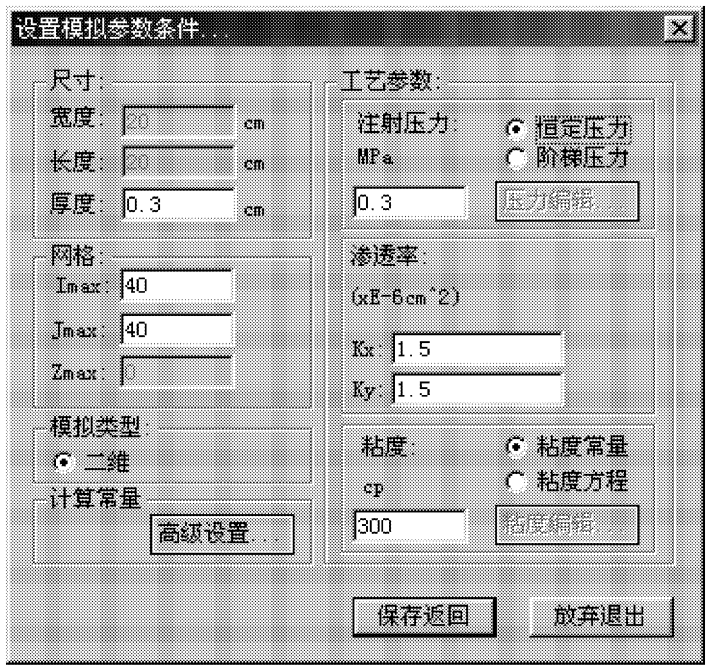


图 9　演示算例的工艺参数条件设置

Fig. 9　Set simulation parameters

网格自动剖分结果,右上外边界为一曲线,由于系统采用的是正方形单元,在曲线边界拟合时出现锯齿状,但曲线边界单元的控制体积仍设置为实际单元的体积大小。图 7 为参数捕捉器窗口下设置的注射口与溢料口位置示意图。再输入参数经计算之后,得到充模过程如图 8 所示,具体参数设置如图 9 所示。

4　结　论

BHRTM-2 模拟仿真系统,建立在 FEM/CV 的解决方法的基础上,采用矩形单元,计算效率高,容易设置和获取节点及有限单元信息,此外四边形单元方便以鼠标点中测试方法来实现参数设置的捕捉器窗口。该软件平台具有良好的视窗界面,便利用户掌握和使用;而且运行不需昂贵的第三方有限元平台的支持,运行成本低。软件平台支持树脂流动充模过程的显示及压力场演变过程显示,能够预测填充时间并估计可能的干斑缺陷位置,具有较高的模拟精度。

参考文献:

[1]　Liu Baichen, Bickerton S, Advani S G. Molding and simulation of resin transfer molding (RTM) - gate control, venting and dry spot prediction [J]. Composite Part A, 1996, 27(2): 135- 141.

[2]　Rudd C D, Long A C, Kendall K N, et al. Liquid molding technologies [M]. England: Woodhead Publishing Limited, 1997. 254- 293.

[3]　Lin M, Hahn H T, Huh H. A finite element simulation of resin transfer molding based on partial nodal saturation and implicit time integration [J]. Composites Part A, 1998, 29: 541- 550.

[4]　Gauvin R, Trochu F, Diallo L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement [J]. Polymer Composites, 1996, 17(1): 149- 158.

[5]　Cheng C Y, Hourng L W. Numerical simulation for the transverse impregnation in resin transfer molding [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998, 17(2): 165- 175.

[6]　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.