复合材料学报 第21卷 第2期 4月 2004年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 21 No. 2 April 2004

文章编号: 1000-3851(2004)02-0087-05

复杂形状三维薄壁构件 RTM 制造工艺注模过程模拟

戴福洪, 张博明, 杜善义, 武湛君
(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用有限单元/控制体积方法,编写了RTM工艺注模过程模拟程序SHELLCV。SHELLCV程序包含三角形壳元和矩形壳元两种单元,可以模拟复杂形状三维薄壁构件的RTM制造工艺注模过程,得到任意时刻的树脂流动前峰曲线、压力场分布。与解析解比较验证了SHELLCV程序的稳定性和可靠性。算例研究表明SHELLCV程序可为工艺设计:注射口和排气口的布置,合模压力提供有效的参考依据。

关键词: RTM; 有限单元/控制体积方法; 流动前峰
中图分类号: TB332; TB330.1 **文献标识码:** A

SIMULATION OF MOULD-FILLING IN RTM PROCESS FOR 3D COMPLEX SHAPE THIN SHELL PARTS

DAI Fuhong, ZHANG Boming, DU Shanyi, WU Zhanjun
(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A program SHELLCV was composed based on 3D shell element by the finite element/control volume method. SHELLCV can simulate the process of mould-filling in RTM for the 3D complex shape thin parts and predict the resin flow front advancement and the distribution of pressure field at any instant in time. Comparing with the analytical solutions validated the accuracy and the reliability of SHELLCV program. Numerical examples show SHELLCV program can provide the effective references for the process design such as inlets and outlet arrangement and the pressure of the mold.

Key words: resin transfer molding (RTM); finite element/control volume method; flow front

由于RTM工艺具有效率高、成本低、工作环境好、能耗低、适应性强等一系列优点,因此倍受青睐,发展迅速。复合材料成型工艺过程中,影响产品质量的因素十分复杂,工艺过程存在许多不确定因素如纤维预制体的不均匀性等。以往的复合材料生产工艺参数依靠"试凑法",要获得有用数据,需要做大量试验,从而导致大量的人力和物力浪费,增加了产品的成本。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。而工艺过程数值模拟为优化工艺参数,深刻理解各种参数对成品质量的影响,提供了有效的技术手段[1]。

工程实际需要的产品形状往往较为复杂,因此迫切需求能模拟复杂形状构件生产的工艺过程模拟软件。有限单元/控制体积方法适合于求解复杂形状边界问题而在RTM工艺注模过程模拟中得到了广泛的应用[2~4]。本文中采用三维壳元,实现了三角形和矩形两种网格上的有限单元/控制体积方法,编写了程序SHELLCV。三角元可以处理有孔、三维曲面等复杂形状构件的制造过程数值模拟。矩形单元适

收稿日期: 2003-01-13; 收修改稿日期: 2003-04-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372027)
通讯作者: 戴福洪,博士研究生,研究方向为:复合材料液体成型工艺数值模拟与在线监测。 E-mail: fuhongdai@163.com

合处理具有直角拐角的边界问题。一般的矩形元能处理的问题,采用三角元也可以处理。矩形元是线性压力梯度单元,三角元是常压力梯度单元,所以对边界形状较规则的问题采用矩形元,具有精度高,程序代码执行速度快的优点。RTM 制造工艺生产的复合材料制品常常是薄壁构件,程序 SHELLCV 能够模拟复杂形状的三维薄壁构件 RTM 制造工艺注模过程。因此,程序 SHELLCV 具有广泛的工程应用价值。

1　算法基础

1.1　控制方程与控制体积离散

树脂浸润纤维预制体的过程常用多孔介质的渗流模型来描述,树脂在模腔内的渗流假定遵循达西定律[5, 6]。

连续性方程:

$$\cdot V = 0 \qquad (1)$$

达西方程:

$$V = -\frac{[K]}{_} P \qquad (2)$$

式中: V 是渗流速度;　P 是压力梯度; _ 是树脂粘度; [K] 是渗透率张量。

将方程(2)代入连续性方程有:

压力场方程:

$$\cdot \frac{[K]}{_} P = 0 \qquad (3)$$

边界条件为

注口: $P = P_0$(常压力注射), $V = V_0$(常流率注射);

模具表面: $\frac{dP}{dn} = 0$;

流动前峰: $P = P_{amb}$(周围环境压力)。

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。在每一时间步,根据上一步计算结果假定流动前峰位置,则求解方程(3)类似于求解稳态热传导问题,可以采用 Galerkin 权余法求解。然后采用控制体积单元方法求解树脂流场任意时刻的流动前峰[7, 8]。

1.2　填充时间的解析解

在常流率注射时可以得到填充时间 t 的解析解为:

$$t = \frac{O V_{tot}}{q_0} \qquad (5)$$

式中: V_{tot} 为模具腔体体积; O 为孔隙度; q_0 为注射流率。

2　数值算例

2.1　圆柱壳体

考虑一半径为 1 m,高为 0.4 m,厚度为 0.01 m 的圆柱壳形纤维预制体,孔隙度为 0.5,各向同性渗透率 $K_x = K_y = 6.752\times10^{-10}\,m^2$,树脂粘度为 0.08 Pa·s。在中心设有一半径为 0.05 m 的圆孔形注射口,注射流率为 $4.0\times10^{-5}\,m^3/s$,排气口设在四个角点。

圆柱壳体用 348 个三角形单元离散,其有限元模型如图 1 所示。图 2 给出了按照方程(5)计算的解析填充时间和数值填充时间的比较,可以看出数值解和解析解吻合良好。图 3 给出了不同时刻的树脂流动前峰的发展情况,可以看到树脂流动前峰从开始的圆形向两边逐渐发展到近似直线形状。图 4 给出了注模结束时的压力场分布。

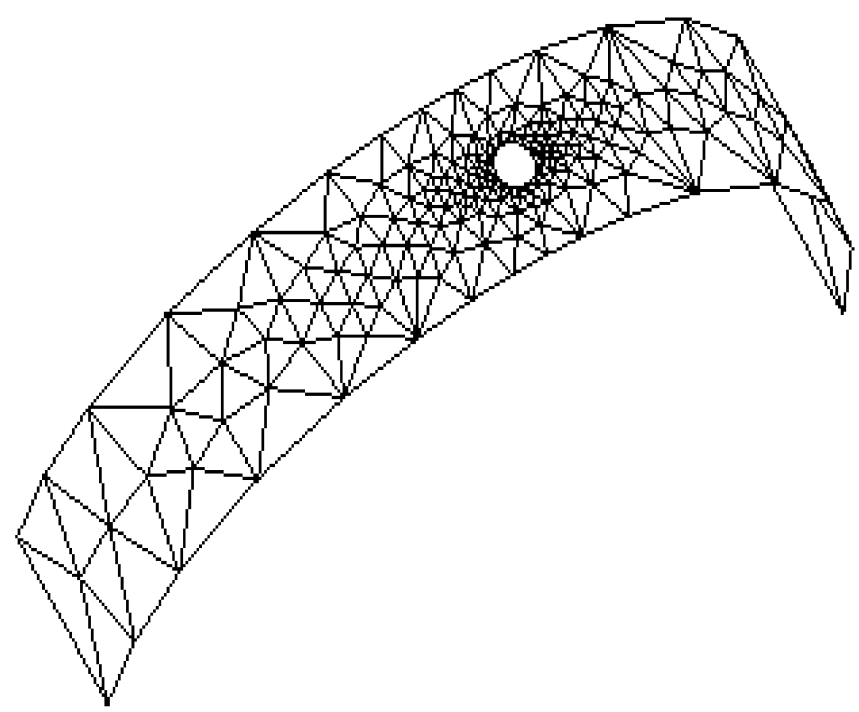

图 1　圆柱壳算例的有限元网格

Fig.1　Finite element model for cylindrical shell example

2.2　工字梁

工字梁模型的几何尺寸为: 梁肋为 0.4 m×0.2 m×0.02 m, 上下翼板均为 0.4 m×0.3 m×0.01 m。孔隙度为 0.5, 梁肋各向同性渗透率 $K_x = K_y = 3.648\times10^{-10}\,m^2$, 上下翼板正交各向异性渗透率 $K_x = 3.648\times10^{-10}\,m^2$, $K_y = 1/4\,K_x$, 树脂粘度为 0.08 Pa·s。注射口和排气口的布置有五种工况, 如图 5 和表 1。注射流率为 $2.0\times10^{-6}\,m^3/s$。

工字梁的有限元模型如图 5。图中标出的节点是可能的注射口或排气口, 其中工况5是采用与工

表 1 不同工况下注射口和排气口的布置

Table 1 Arrangement of inlets and outlets at different cases

工况号	注射口	排气口
1	b	a, c, d, f , g, i, j , l, m, o
2	b	d, f , g, i, j , l, m, o
3	a	c, d, f , g, i, j , l, m, o
4	a, c	b, d, e, f , g, h, i, j , k, l, m, n, o
5	a, c	b, d, e, f , g, h, i, j , k, l, m, n, o

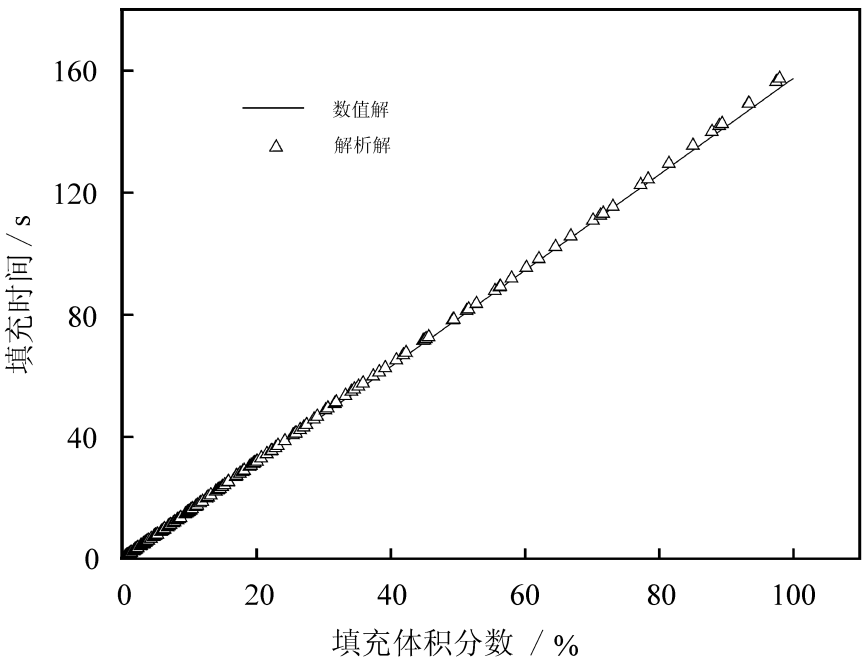

图 2 圆柱壳算例的数值解和解析解的比较

Fig. 2 Analytical solutions and numerical solutions for cylindrical shell example

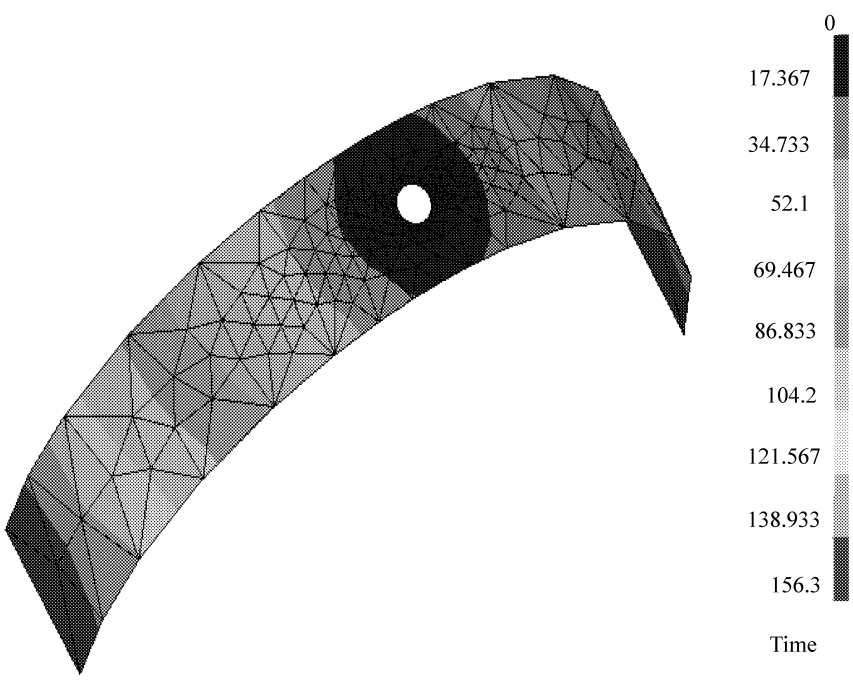

图 3 圆柱壳算例不同时刻的树脂流动前峰

Fig. 3 Resin flow front at different stages for cylindrical shell example

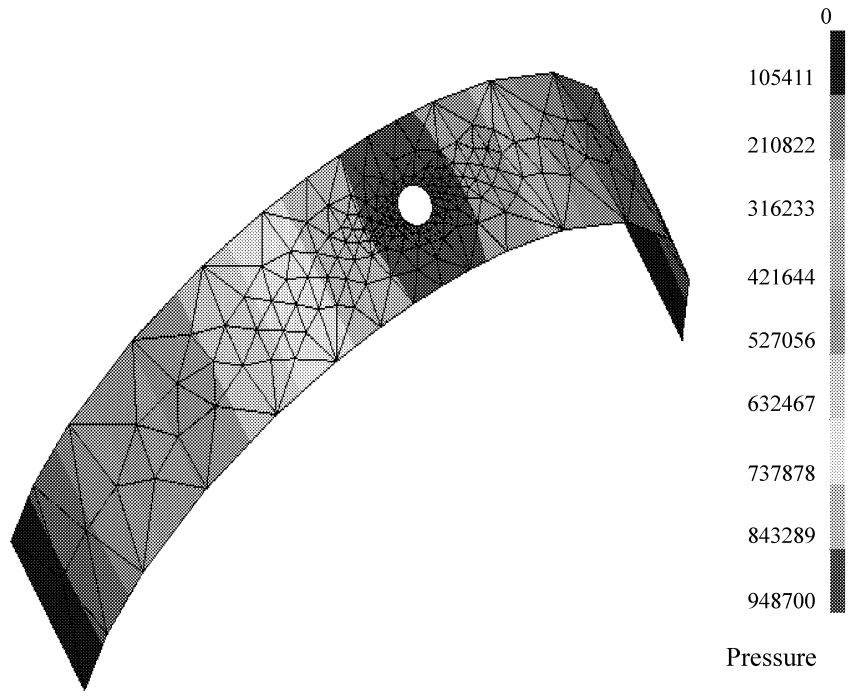

图 4 圆柱壳注模完成时的压力场分布

Fig. 4 Pressure field when finishing filling process for cylindrical shell example

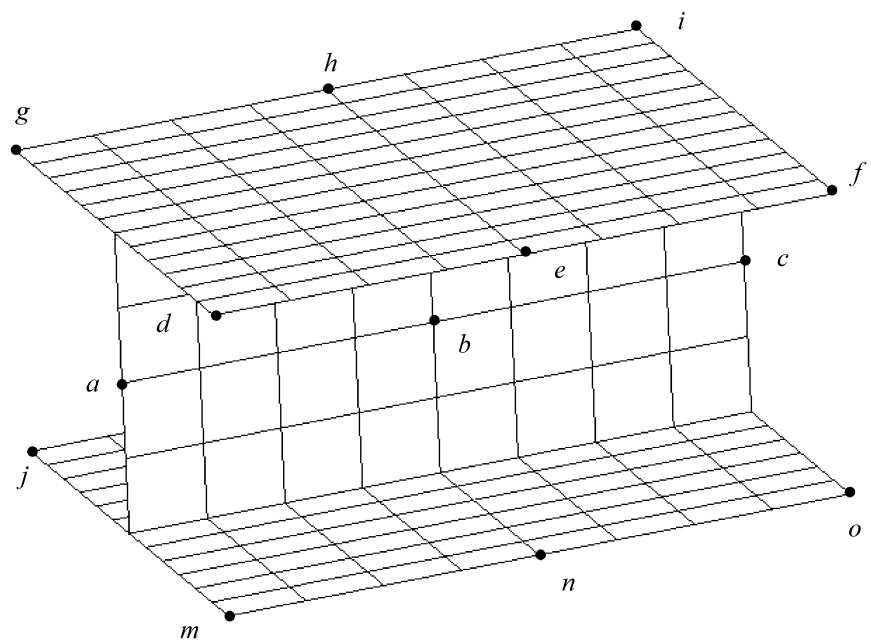

图 5 工字梁的有限元模型

(图中 k, l 两点与 n, o 两点对称未示出)

Fig. 5 Finite element model for I beam example (the two points k and l are not shown which are symmetrical with points n and o)

况 4 相同的注射口和排气口布置, 但是翼板的渗透率为各向同性。图 6 和图 7 给出了工况 1 的树脂流场和注模结束时的压力场模拟结果。从图 6 中可以观察到树脂流动前峰从梁肋向翼板发展的情况。在梁肋树脂流动前峰曲线由开始的圆形向两侧逐渐过渡到直线, 在翼板中由于渗透率为正交异性树脂流动前峰曲线由椭圆向两侧过渡到直线。图 8 给出了不同工况时的数值解和解析解的比较。对于工况 2, 排气口节点同时最后填满, 因此与解析解吻合最好。对于其它四种工况, 在注模未完成时有部分树脂溢出模具腔体, 而导致数值解和解析解产生差别。几种工况下的填充时间和树脂浪费情况见表 2。从表 2 中可以发现工况 2 是单孔注射的优先选择的方案, 尽管双孔注射方案(工况 4) 可以有效地降低注模时间, 但造成的树脂浪费也较严重。对工况 5, 如不在翼板侧边中点(如 e, h 点) 设排气口则会形成干斑,

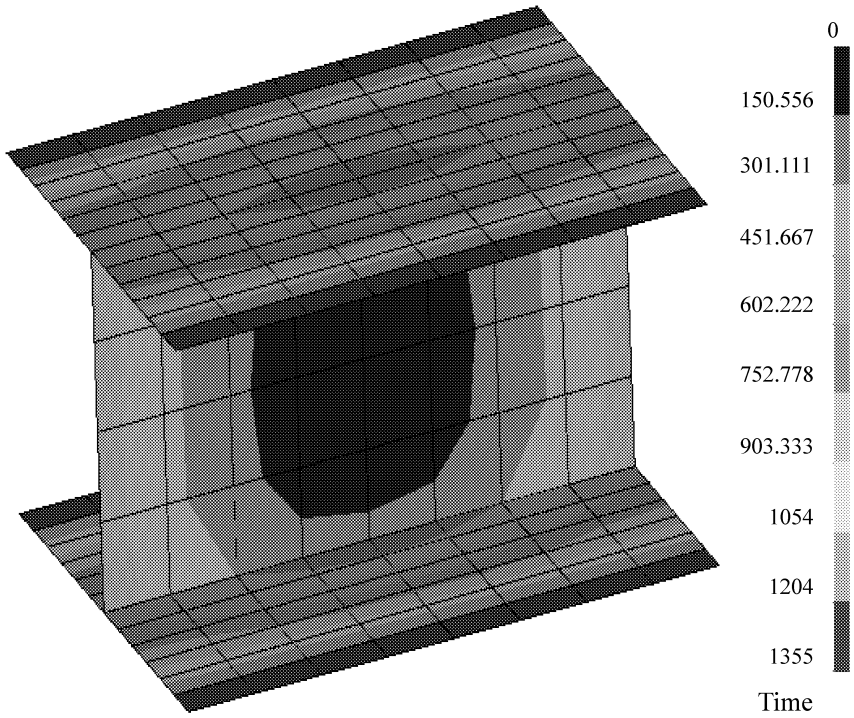

图 6　工况 1 不同时刻的树脂流动前峰

Fig. 6　Resin flow front at different stages for Ⅰ beam example at case 1

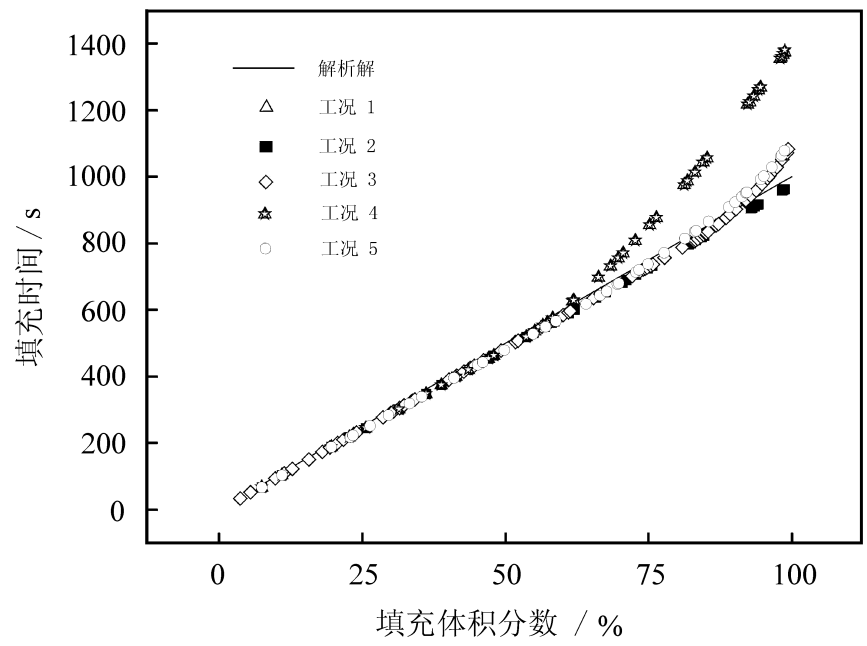

图 8　工字梁算例不同工况数值解和解析解的比较

Fig. 8　Analytical solutions and numerical solutions for Ⅰ beam example

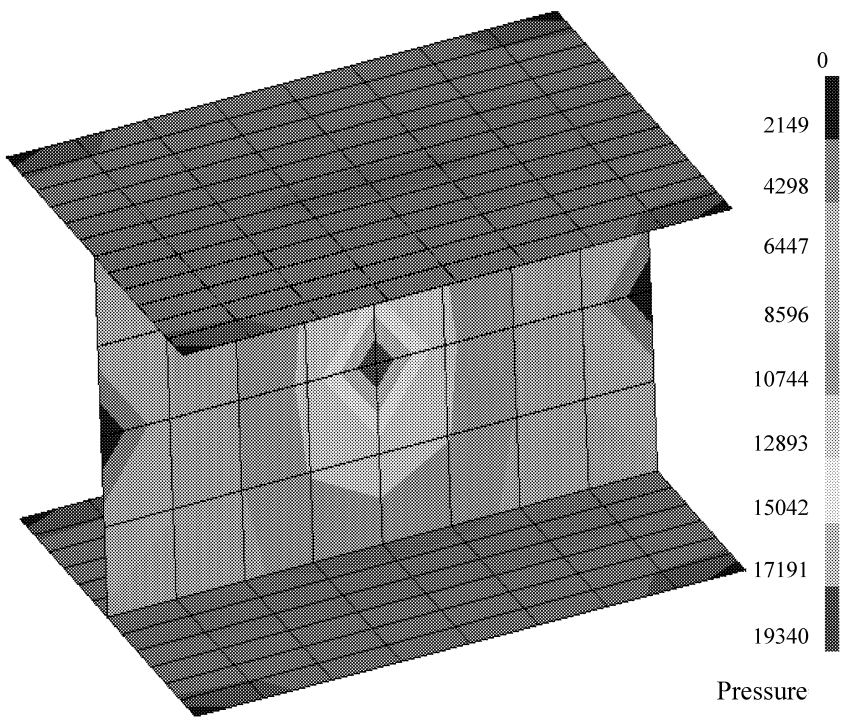

图 7　工况 1 注模结束时的压力场分布

Fig. 7　Pressure field when finishing filling process at case 1 for Ⅰ beam example

表 2　不同工况下填充时间和树脂溢出量

Table 2　Filling times and overflow-resin at different cases

工况号	填充时间	树脂浪费/ cm^3
1	1375	751
2	962	0
3	1082	163
4	690	762
5	539	160

如图 9。

2.3　汽车引擎盖板

汽车引擎盖板算例模型比较复杂，前后长

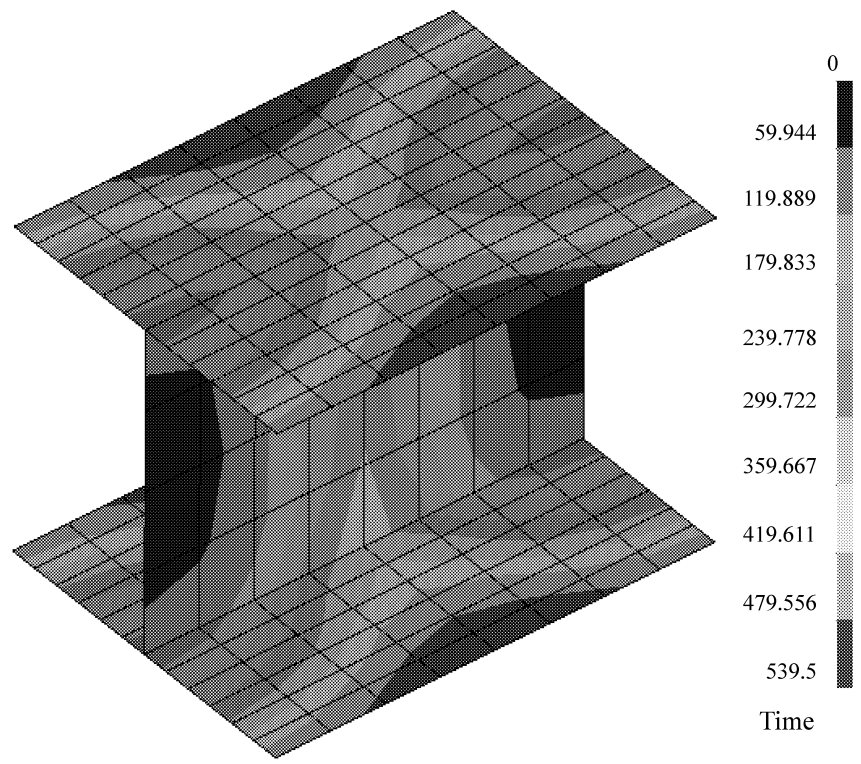

图 9　工况 5 不同时刻的树脂流动前峰

Fig. 9　Resin flow front at different stages at case 5 for Ⅰ beam example

1.4 m，左右宽 1.2 m，前部主体曲面是由三次曲线生成，其有限元模型见图 10。图中涂黑的区域表示成品的孔洞。纤维预制体渗透率为 $8.611\times10^{-9}m^2$，树脂粘度为 0.1 Pa · s。采用四个注射口，注射条件为常压力：1.0×10^5 Pa。

图 11 给出了汽车引擎盖板算例不同时刻树脂流动前峰。图 12 给出了汽车引擎盖板算例注模结束时的压力场分布。对于这样形状复杂的构件，注射口和排气口的布置是否合理尤为重要。从图中可以清楚地观察到树脂汇合以及最后填充的区域，这些模拟的结果可为工艺设计提供可靠的参考依据。

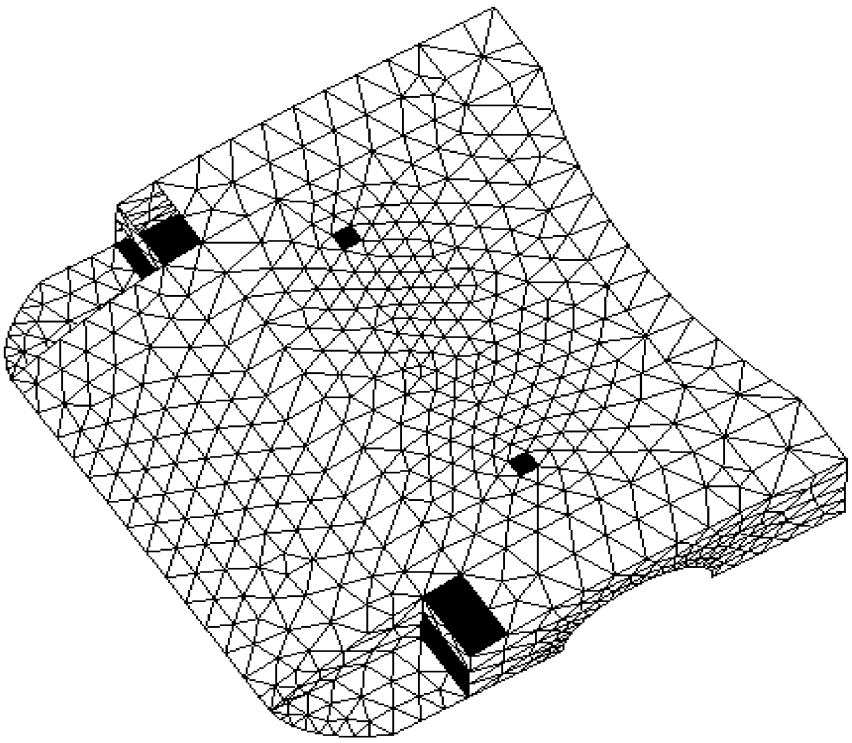

图 10 汽车引擎盖板算例的有限元模型

Fig. 10 Finite element model for car panel example

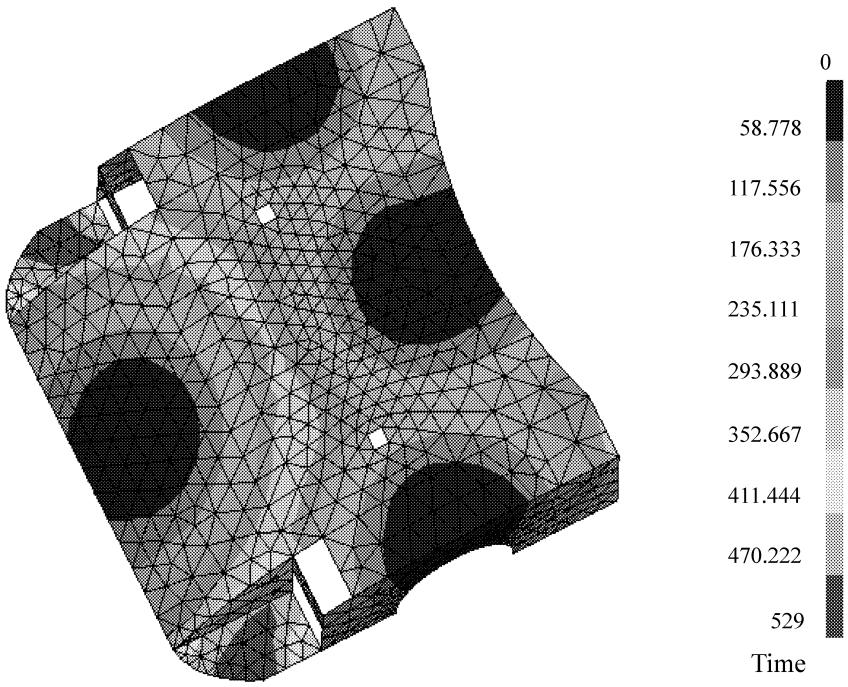

图 11 汽车引擎盖板算例不同时刻树脂流动前峰

Fig. 11 Resin flow front at different stages for car panel example

3 结 语

本文中分别使用三角形网格和矩形网格实现了有限单元/控制体积算法, 编写了程序 SHELLCV。与解析解比较验证了 SHELLCV 程序的稳定性和可靠性。数值算例研究表明: SHELLCV 程序可以模拟复杂形状的三维薄壁构件 RTM 制造工艺注模过程, 预测任意时刻的树脂流动前峰曲线、压力场分布。算例研究发现: 注射口和排气口的布置不当不仅可能导致工艺缺陷——干斑的形成, 而且可以导致一部分树脂注模完成前溢出模具腔体而造成树脂浪

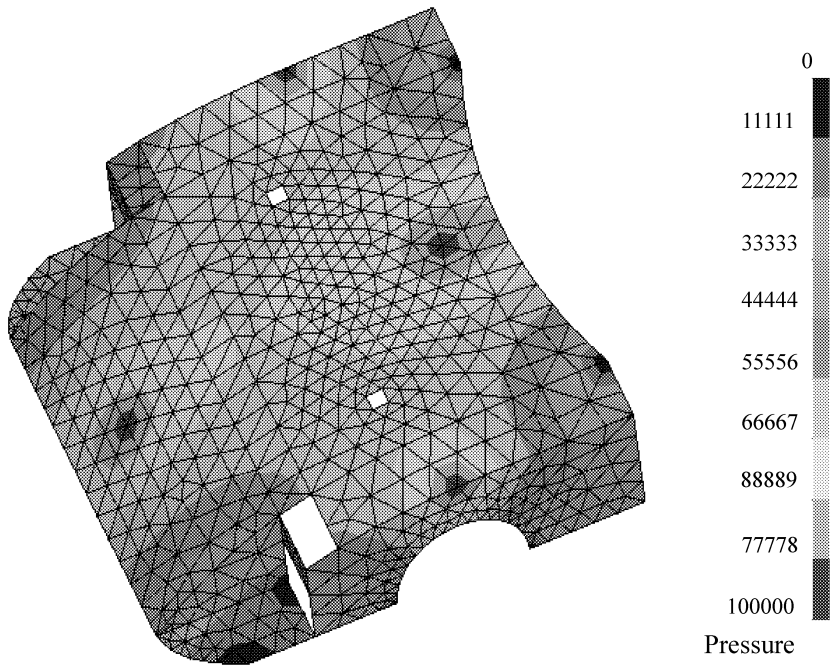

图 12 汽车引擎盖板算例注模结束时的压力场分布

Fig. 12 Pressure field when finishing filling process for car panel example

费。SHELLCV 程序可以有效地预报这一树脂溢出量。算例研究表明 SHELLCV 程序可为工艺过程设计: 注射口和排气口的布置, 合模压力提供有效的参考依据。

参考文献:

[1] Sylvia R M Kueh, Suresh G Advani. Sensor placement study for online flow monitoring in liquid composite molding [J]. Polymer Composites, 2000, 21(3): 436- 449.

[2] 江顺亮. RTM 加工工艺充模过程的计算机模拟 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 13- 17.

[3] 吕 昶, 薛元德. RTM 工艺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.

[4] 尹明仁, 段跃新, 李 丹, 等. 视窗化 RTM 工艺充模过程模拟仿真技术研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(4): 17- 22.

[5] Lam Y C, Joshi S C, Liu X L. Numerical simulation of the mould-filling process in resin-transfer moulding [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(6): 845- 855.

[6] Maier R S, Rohaly T F, Advani S G, et al. A fast numerical method for isothermal resin transfer mold filling [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(8): 1405- 1417.

[7] Joshi S C, Lam Y C, Liu X L. Mass conservation in numerical simulation of resin flow [J]. Composites: Part A, 2000, 31(10): 1061- 1068.

[8] Frederick R, Phelan J R. Simulation of the injection process in resin transfer molding [J]. Polymer Composites, 1997, 18(4): 460- 476.