

文章编号:1000-6893(2006)06-1223-06

RTM 工艺工字梁构件的模拟与实验研究

段跃新, 孙玉敏, 张佐光

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

Study on Simulation and Experimentation of H Wallboard for RTM Processing

DUAN Yue-xin, SUN Yu-min, ZHANG Zuo-guang

(School of Material Science and Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 采用自主开发的 RTM(树脂传递模塑)工艺 3D 模拟系统对航空用典型工字梁平板构件进行了模拟分析。确定中心点注射为最佳注射方式,并确定了 8 个合理溢料口位置,详细研究了预成型体渗透率不均匀问题对工艺的影响。对构件进行了模具制造和实验验证,实验结果与模拟结果基本吻合。计算机 RTM 工艺模拟对于模具开发、构件制造具有较好的指导意义。

关键词: 复合材料; 树脂传递模塑(RTM); 模拟; 渗透率; 工字梁

中图分类号: V258; TB332 **文献标识码:** A

Abstract: Resin Transfer Molding(RTM) filling process of an H wallboard is simulated in 3D using the simulation system. This system was developed by Beijing University of Aeronautics and Astronautics independently. After analysis of the simulation results, the optimal injection way is set as center point injection and 8 reasonable vents are settled. Also, the effects of preform inhomogeneous permeability on RTM process are studied particularly. Mould manufacture and filling experiment are operated, the experiment results coincide with the simulation results basically. RTM process simulation gives veracious guidance to mould development and component manufacture.

Key words: composite; resin transfer molding(RTM); simulation; permeability; H-wallboard

RTM(Resin Transfer Molding)工艺技术是目前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。RTM 又称树脂传递模塑,是指低黏度树脂在闭合模具中流动、浸润增强材料并固化成型的一种技术,属于复合材料的液体成型(LCM)和结构液体成型技术(SLM)范畴^[1-3]。RTM 制品具有强度及性能可靠性高、成型工艺简单、生产效率高、外表光滑、环保性能好等优点。但是,由于 RTM 工艺过程在闭合模腔内完成,有很多影响成型和产品性能的工艺参数:注射压力/流动速率、树脂黏度、纤维渗透率、模具和树脂温度、构件几何形状、材料属性、注射口和溢料口形状、数目、位置及其大小等。工艺参数之间组合方式很多,使得 RTM 工艺的优化非常复杂。如果通过传统的试验方法来优化工艺参数,既耗时工艺成本又高。随着 RTM 制件在航空航天、汽车工业、机械制造、船舶、建筑等领域的应用不断增

加,进一步降低 RTM 工艺的成本成为一个亟待解决的课题,应用计算机技术对 RTM 工艺进行模拟仿真有效的解决途径。通过计算机模拟仿真技术,可以得到对整个 RTM 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。

RTM 工艺的模拟仿真技术发展迅速,等温和非等温条件下一维、二维和三维的模拟仿真模型已经被提出。在采用 FEM/CV 及 BEM 等分析方法以后,出现了一些用于 RTM 工艺的数学软件,比如 MATLAB,RTMS 和 RAPFIL,ANSYS。而最具代表性的有限元建模分析软件是 PATRAN。本研究采用北京航空航天大学自主开发的软件系统,成功地实现了 RTM 工艺中树脂流动充模过程的模拟仿真^[4]。模拟仿真步骤:首先利用 PATRAN 软件建立构件的有限元模型;然后将有限元模型数据导入计算软件中进行计算^[5,6];最后再利用 PATRAN 软件对计算所得数据进行后处理,并实现流场和压力场的显示。通过专业分析进而对具体的工艺参数进行优化。

1 工字梁平板构件的建模与有限元划分

根据图纸在 PATRAN 中进行工字梁构件 (500 mm×300 mm) 的三维几何建模及有限元剖分,如图 1 所示。

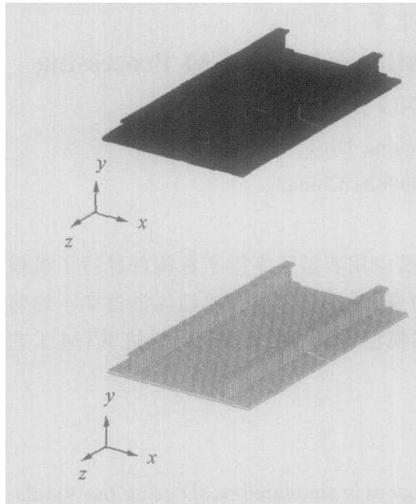


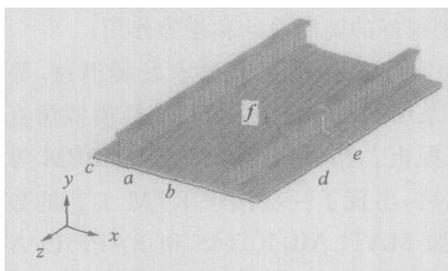
图 1 工字梁构件的几何建模与有限元剖分

Fig. 1 Geometry and finite element model of H wallboard

2 工字梁平板构件的 RTM 工艺模拟

2.1 注射方式及注口位置的选择

根据工字梁构件的特点,采用 6 种注射方式及注口位置(如图 2 所示),固定其他工艺条件为:注射压力 $P=0.5\text{ MPa}$;树脂黏度 $\eta=0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}$;纤维体积含量 $V_f=60\%$;预成型体渗透率 $K=1.0\times 10^{-12}\text{ m}^2$ 。对工字梁平板构件进行 RTM 工艺模拟研究,确定最佳注射方式及注射口位置。



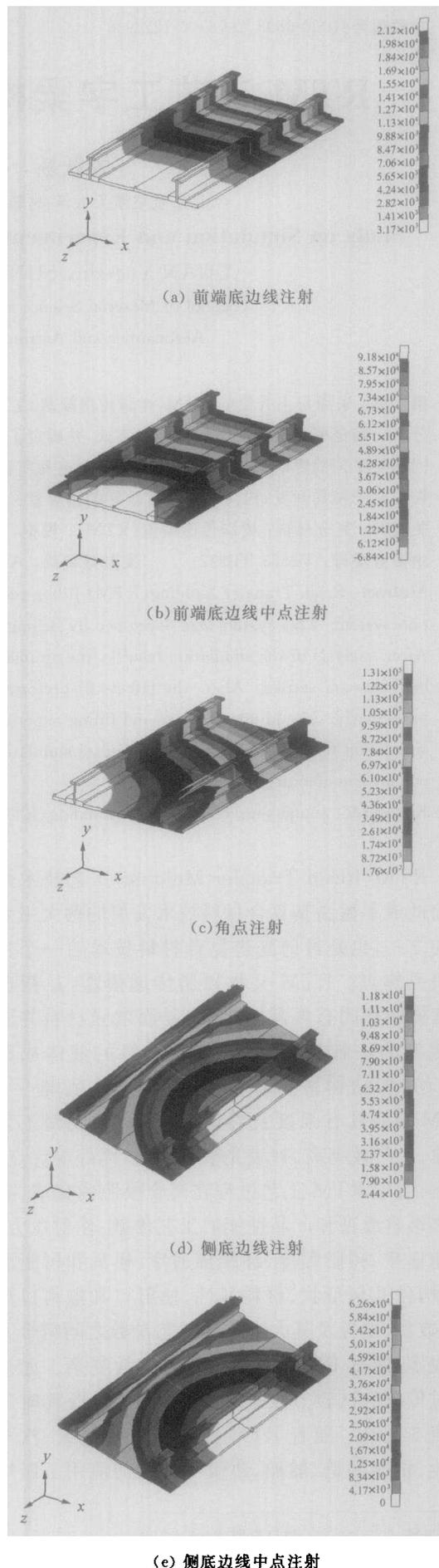
a—前端底边线注射; b—前端底边线中点注射; c—角点注射; d—侧底边线注射; e—侧底边线中点注射; f—构件中心点注射

图 2 6 种注射方式及注口位置

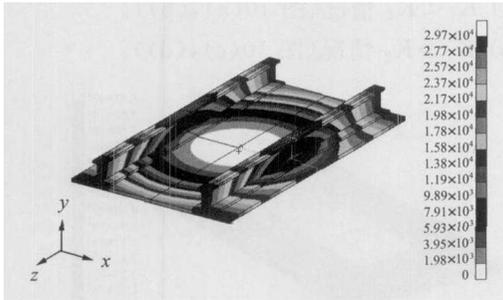
Fig. 2 6 injection means and inlet positions

分别以上述 6 种注射方式及注口位置进行恒压注射充模模拟,结果如图 3。

图 4 为 6 种注射方式充模时间比较图,通过比较可以发现,2 种线注射形式注射效率较高,而点注射的形式中,中心点注射形式注射时间最短。



(e) 侧底边线中点注射



(f) 构件中心点注射

图 3 不同注射方式模拟树脂流动前峰图

Fig. 3 Resin flow fronts of different injection means

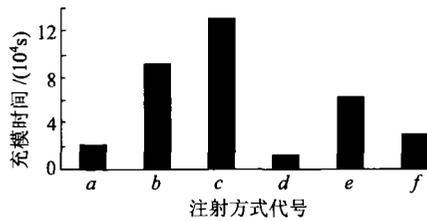


图 4 不同注射方式充模时间比较图

Fig. 4 Filling time of different injection means

线注射形式虽然成型效率较高,但是由于预成型体在装模过程中容易出现纤维脱离问题,导致在工字梁上下腹板边缘易出现树脂通道,产生流道效应,从而引起树脂流动紊乱,构件制造失败;同时线注射模具加工精度要求高于点注射,所以最终选择中心点注射形式。

2.2 溢料口的选定

根据中心注射树脂流动形态及其最后填充位置(如图 3(f)所示)决定在构件底面 4 个角和工字梁上横板面的前后边中心处设置溢料口,共 8 个溢料口(如图 5 所示)。以下模拟工作均设置如图所示的溢料口。

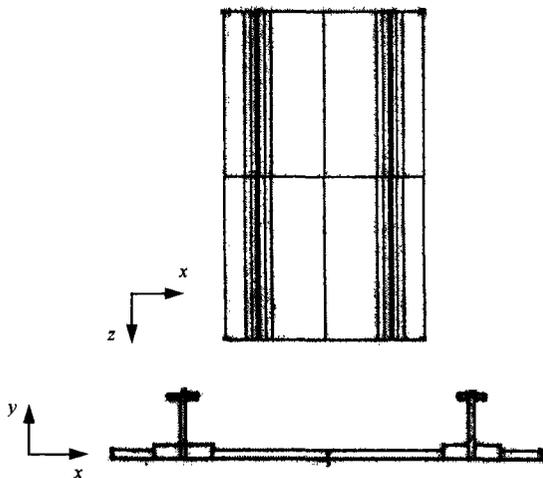


图 5 溢料口设置

Fig. 5 Outlet positions

2.3 工艺条件对工字梁构件 RTM 工艺的影响

(1) 树脂黏度对构件 RTM 工艺的影响

中心点注射(图 2(f)所示),设置 8 个溢料口(图 5 所示),恒压注射,渗透率均一。以下工艺条件恒定:注射压力 $P=0.5 \text{ MPa}$;纤维体积含量 $V_f=60\%$;预成型体渗透率 $K=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$;树脂黏度在 $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s} \sim 0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 之间变化。模拟结果如图 6。

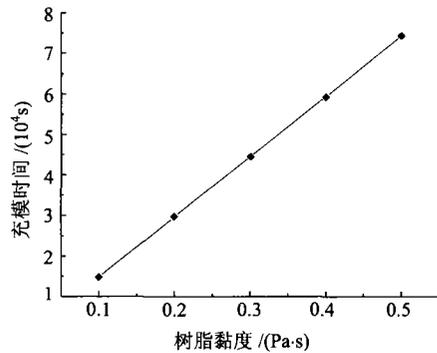


图 6 树脂黏度与模拟充模时间关系图

Fig. 6 Relation between filling time and resin viscosity

由图 6 可知中心注射的充模时间随树脂黏度的增加而线性增加,即树脂黏度越小充模时间越短。工艺实施时,工艺允许的情况下,应在低树脂黏度的温度下充模,这样能明显缩短注射时间也有利于树脂对增强体的浸润。

(2) 注射压力对构件 RTM 工艺的影响

中心点注射,设置 8 个溢料口,恒压注射,渗透率均一。工艺条件: $\eta=0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $V_f=60\%$; $K=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$; P 在 $0.1 \text{ MPa} \sim 1.0 \text{ MPa}$ 之间变化。模拟结果如图 7。

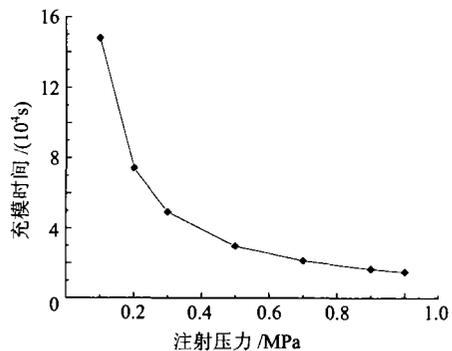


图 7 注射压力与模拟充模时间关系图

Fig. 7 Relation between filling time and injection pressure

由图 7 可知,模拟充模时间随注射压力的增加而减小。在低压区增加注射压力可以明显缩短

充模时间,而在高压区充模时间基本不变。况且注射压力过大易造成预成型体的变形,影响构件的使用性能。压力过大也不利于树脂充分浸润纤维增强体,会造成干斑缺陷。实际充模时,应选择适中的注射压力。

(3) 渗透率对构件 RTM 工艺的影响

中心点注射,设置 8 个溢料口,恒压注射,渗透率均一。工艺条件: $P=0.5 \text{ MPa}$; $\eta=0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $V_f=60\%$; K 在 $10^{-12} \text{ m}^2 \sim 10^{-9} \text{ m}^2$ 之间变化。模拟结果如图 8。

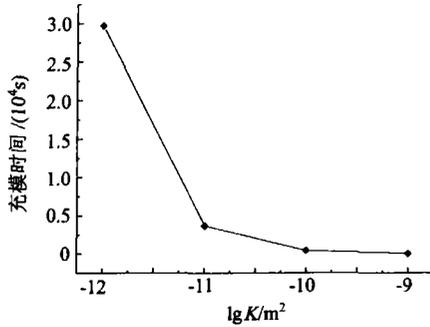


图 8 渗透率与模拟充模时间的关系图

Fig. 8 Relation between filling time and permeability

由图 8 可知,充模时间随 K 的增大而减小,且在低渗透率区域提高渗透率能显著缩短充模时间。渗透率大小取决于预成型体特性和纤维体积含量,因而在选定了预成型体和纤维含量后,渗透率基本上是不能改变的。

(4) 对渗透率不均一情况的模拟

由于本构件的预成型体的制备过程中,工字梁部分和平板分别制备,易造成预成型体渗透率不均一。经分析有以下两大类不均一的情况。采用工艺条件: $P=0.5 \text{ MPa}$; $\eta=0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $V_f=60\%$ 。对各种渗透率分布情况进行工艺模拟。

① 工字梁渗透率与其他部分渗透率不同(图 9): K_1 为工字梁部分的渗透率; K_2 为底面部分的渗透率。

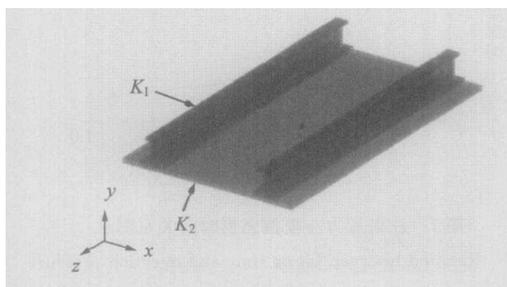


图 9 第 1 类渗透率分布

Fig. 9 The first kind of permeability distribution

(a) $K_1 < K_2$ 情况(图 10(a),(b))。

(b) $K_1 > K_2$ 情况(图 10(c),(d))。

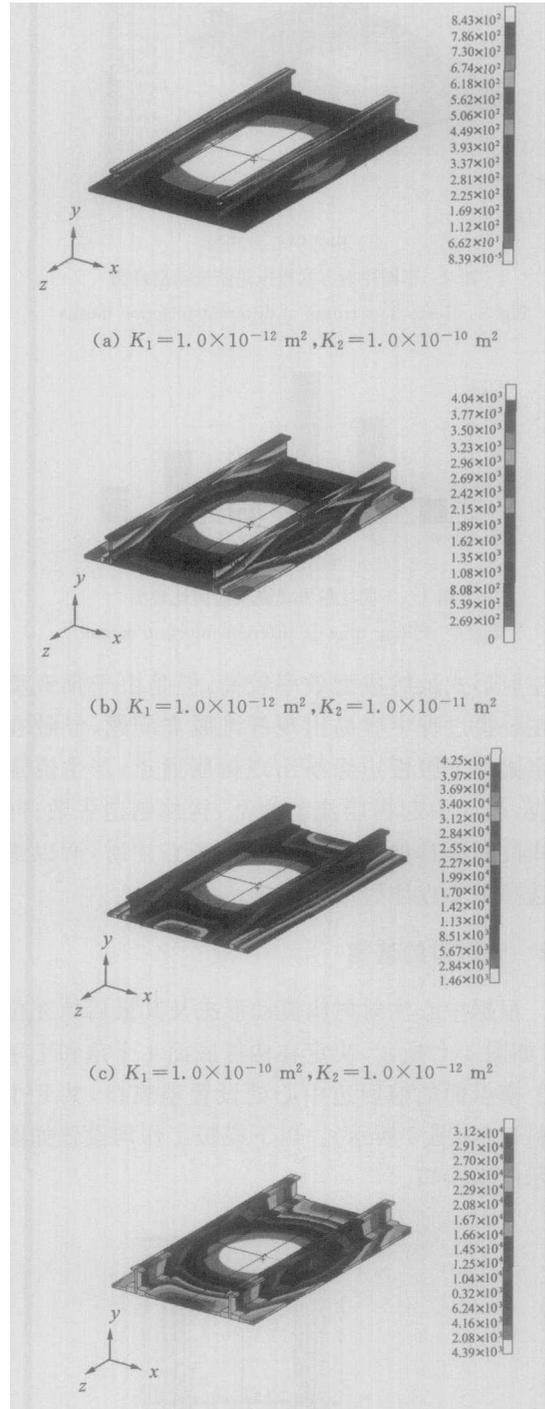


图 10 树脂流动前峰

Fig. 10 Resin flow front

通过图 9,图 10 可以看出,当 $K_1 < K_2$,渗透率相差 2 个数量级时,树脂流到底面平板溢料口的时间是 225 s 左右,而流到工字梁 4 个溢料口的时间是 843 s 左右,近似为前者的 4 倍,在实际情况中,树脂不可能从设在工字梁处的溢料口流

出,即工字梁根本不会被充满或需要很长时间,在这种情况下,原有的注射形式和工艺条件将不可能完成工字梁板的制备。当 $K_1 > K_2$ 时,可以看到树脂最终充模的位置并不在预先设计的溢料口位置,这就意味着如果按照原有工艺制备,必将产生干斑或其他缺陷如大气泡等。所以应在工艺中尽量避免渗透率不均匀造成的树脂流动紊乱,使构件制备失败。

② 工字梁根部与其他部分渗透率不同(图 11): K_3 是工字梁根部的渗透率; K_4 是构件其他部分的渗透率。

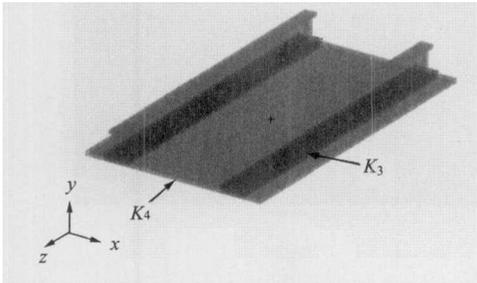


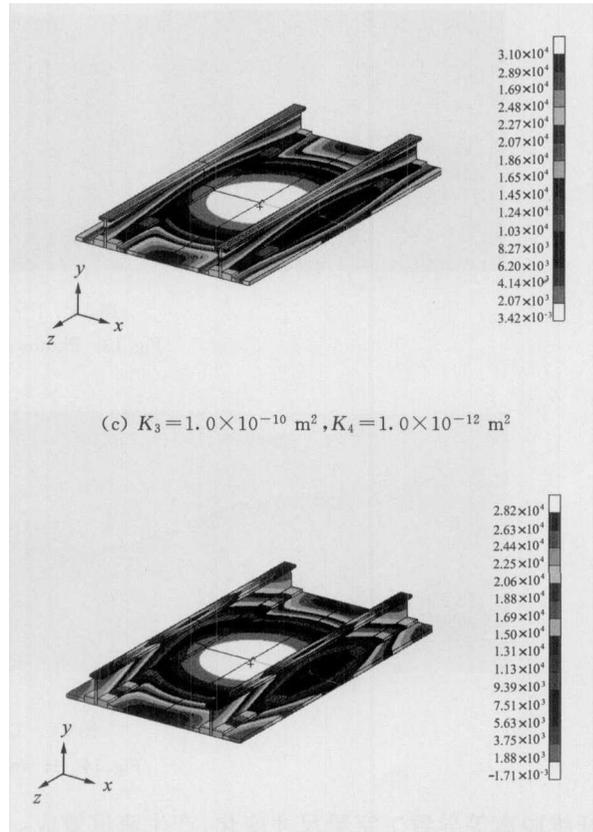
图 11 第 2 类渗透率分布

Fig. 11 The second kind of permeability distribution

① $K_3 < K_4$ 情况(图 12(a),(b))。

② $K_3 > K_4$ 情况(图 12(c),(d))。

通过模拟结果可以看到与①相似的结果,当 $K_3 < K_4$, 渗透率相差 2 个数量级时,树脂流到



(c) $K_3=1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2, K_4=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$

(d) $K_3=1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2, K_4=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$

图 12 树脂流动前峰

Fig. 12 Resin flow front

工字梁 4 个溢料口的时间是底面平板溢料口的时间的一半,实际出现这种情况很容易造成构件制备失败。当 $K_3 > K_4$, 出现了树脂最终充模的位置并不在预先设计的溢料口位置,易产生干斑或其他缺陷如大气泡等而导致构件制造失败。

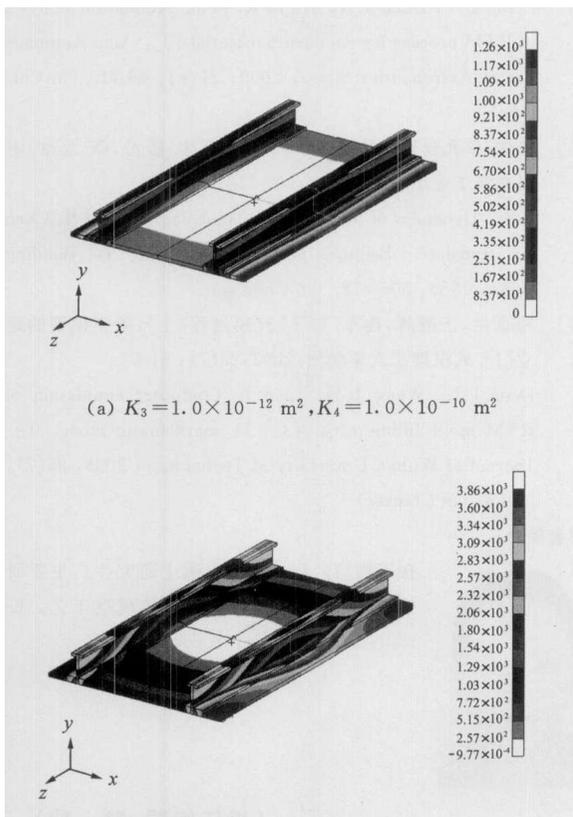
3 实验验证

3.1 模具设计及制造

根据模拟分析结果,选择中心注射为最终注射形式,设计并制造模具,模具结构与实物如图 13。

3.2 验证

根据模拟结果,采用工艺条件为: $P=0.02 \text{ MPa}; \eta=0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}; V_f=55\%; K=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 进行实验验证。模拟结果:充模时间为 32 min (1970 s);实际充模时间为 27 min (1620 s);误差为 5 min。产生误差的主要原因是:在实际工艺中,渗透率和树脂黏度等参数与模拟结果存在一定的误差,特别是由于工字梁制造过程中出现



(a) $K_3=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2, K_4=1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$

(b) $K_3=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2, K_4=1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$

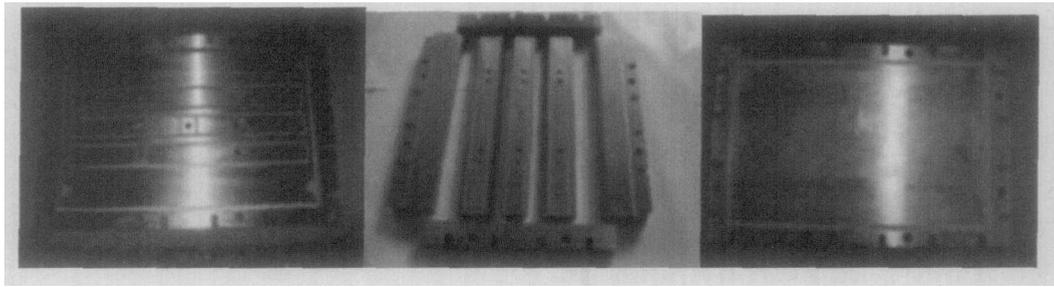


图13 工字梁构件模具照片

Fig. 13 Photos of H wallboard mould

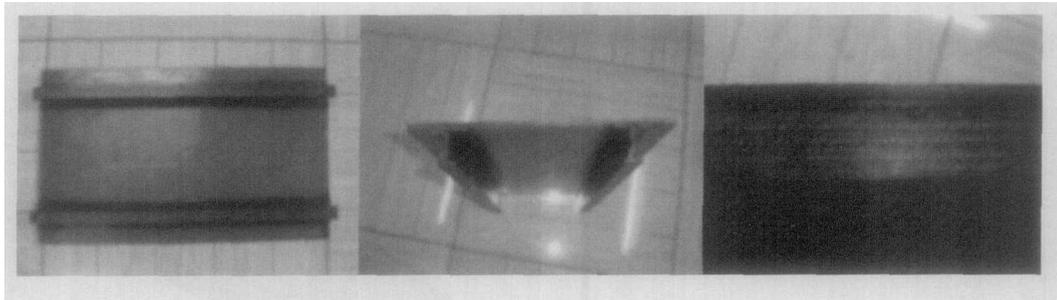


图14 工字梁板零件图

Fig. 14 H wallboard components

纤维脱离等导致工字梁尺寸变化,产生流道效应,使得树脂在模腔中的流动与模拟结果不符。只需要修正这些参数就可以达到比较准确的模拟结果。实验验证的结果表明,RTM工艺模拟系统对于工艺过程中可能出现的问题以及注射口溢料口的选择都具有指导作用。图14为实验验证构件。

4 结论

通过RTM工艺3D模拟研究,确定了制造工字梁平板构件的注射形式和注射位置,优化了注射压力、树脂黏度、渗透率等工艺参数,对于预成型体铺放过程中出现的渗透率不均匀问题进行了充分的研究。通过实验验证,模拟结果与充模结果具有较好的吻合,模拟结果对于实际充模过程具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Rudd D, Long A C, Kendall K N. Liquid molding technologies[M]. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 1997: 254-292.
- [2] 董永祺. 我国树脂基复合材料成型工艺的发展方向[J]. 纤维复合材料, 2003(2): 32-34.
Dong Y Q. New development of processes for resin matrix composites in China[J]. Fiber Composites, 2003(2): 32-34. (in Chinese)
- [3] 赵秋艳. 复合材料成型工艺的发展[J]. 航天返回与遥感,

1999, 20(1): 41-46.

Zhao Q Y. Development of forming processes for composite materials[J]. Space Craft Recovery & Remote Sensing, 1999, 20(1): 41-46. (in Chinese)

- [4] 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[J]. 航空学报, 2000, 21(s): 66-71.
Liang Z Y, Duan Y X, Yin M R, et al. Simulation analysis of RTM process for composite materials[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(s): 66-71. (in Chinese)
- [5] 贝尔. 多孔介质流体动力学[M]. 李竟生, 陈希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 505-518.
Bear. Dynamics of fluids in porous media[M]. Li J S, Chen X, translate. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983: 505-518. (in Chinese)
- [6] 邓京兰, 王继辉, 连军. RTM充模过程(I): 数学模型的建立[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(7): 51-53.
Deng J L, Wang J H, Lian J. Computer simulation of RTM mold filling process (I): mathematic model[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(7): 51-53. (in Chinese)

作者简介:



孙玉敏(1978—)女, 硕士研究生。主要研究方向: 树脂基复合材料液体成型工艺。E-mail: yumin_sun@163.com

(责任编辑: 蔡 斐)