

发射箱箱盖树脂传递模塑工艺有限元模拟分析

秦旭锋, 蔡建, 尹亚阁, 孙凤云, 李辉, 卓毅
(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 为了减少人力和物力资源的浪费, 节约产品成本, 通过有限元分析技术确定箱盖树脂传递模塑工艺 (RTM) 的工艺参数。**方法** 对箱盖 RTM 工艺树脂流动过程进行数值模拟, 对比箱盖结构在线注射-点出射和点注射-点出射工艺下, 当注模压力为 0.2, 0.4 MPa 时对应的树脂流动前锋位置和压力分布结果。**结果** 综合成本和效率两方面因素, 选择 0.4 MPa 作为 RTM 的注模压力。采用线注射-点出射工艺得到稳定的树脂流动前锋形状, 能够有效预防干斑的产生。**结论** 分析结果与实验具有较好的吻合性, 能够有效指导 RTM 工艺中模具的设计, 可降低“试错法”带来的高昂成本和低效率, 对提高复合材料构件的制造水平具有明显积极作用。

关键词: 树脂传递模塑工艺; 箱盖; 有限元

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)21-0127-05

Finite Element Simulation of Launcher Container Cover Molding by RTM Process

QIN Xu-feng, CAI Jian, YIN Ya-ge, SUN Feng-yun, LI Hui, ZHUO Yi
(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to determine the RTM parameters of the launcher container cover through the finite element analysis technology, so as to reduce the waste of man power & material resources and product costs. The numerical simulation of resin flow process of cover RTM was carried out. The resin flow forward position and pressure distribution results of online injection - point outgoing and point injection - point outgoing were compared accordingly when the injection molding pressure was 0.2 MPa or 0.4 MPa. In order to balance the cost and efficiency, 0.4 MPa was selected as the RTM injection molding pressure. Online injection - point outgoing process was used to get stable resin flow forward shape, which could effectively prevent the generation of dry patches. As analysis results are well anastomotic with the experiments, they can effectively guide the mold design in the RTM process, reduce the high cost and low efficiency of "trial and error method", and play an obviously positive role in improving the manufacturing level of composite components.

KEY WORDS: RTM; cover; finite element

树脂传递模塑(RTM)工艺是从湿法铺层工艺演变而来的一种复合材料成型技术, 具有效率高、工作环境好、适应性强等优点, 得到了广泛应用。经过多年的探索研究, 工业界普遍认为树脂传递模塑制造技术在几项低成本制造技术中的综合优势

比较明显。RTM 成形工艺技术涉及流体控制、计算机仿真、树脂制备技术、织物预成型体技术和低成本复合材料模具设计等多个技术领域, 具有较高的技术难度^[1-3]。

复合材料成形工艺过程受到较多因素影响, 在

传统的复合材料生产中,工艺参数的确定常采用“试错法”得到,需要做大量试验,会造成人力和物力资源的浪费,增加产品成本。随着电子计算机的发展,以数值模拟技术实现工艺的虚拟设计,为复合材料制件工艺设计提供依据。RTM 工艺过程模拟可预测不同工艺下的注模时间、模腔内压力分布、树脂流动过程中流动前锋形状分布情况,以及预测可能出现的干斑缺陷,这些都为优化工艺设计提供重要依据^[4—6]。

集贮存、运输及发射功能于一体的箱式发射技术是各型陆基和舰载先进弹箭武器系统的一大重要发展趋势。箱式发射技术的核心和关键在于发射箱,文中对某武器型号发射箱箱盖 RTM 工艺树脂流动过程进行有限元分析,对比箱盖在线注射-点出射和点注射-点出射工艺下,当注模压力为 0.2, 0.4 MPa 时对应的树脂流动前锋位置和压力分布结果,优选注模方式及注模压力等工艺参数。分析结果与实验具有较好的吻合性,它能够有效指导 RTM 模具的设计,可降低“试错法”带来的高昂成本和低效率,对提高复合材料构件的制造水平具有明显积极作用^[7—8]。

1 箱盖结构及所需计算工况描述

箱盖为薄壁内空结构,周围分布加强筋,下部设置两处半圆弧连接钩,上部设置爆炸螺栓座,爆炸螺栓座上开有连接孔。在连接孔外侧端面设置爆炸螺栓密封圈槽,槽周围均布螺钉孔。箱盖外部尺寸为 410 mm×397 mm,箱盖壁厚为 5 mm。箱盖及爆炸螺栓座结构见图 1—2。

将通风道结构的 CAD 模型导入 Hypermesh 9.0 有限元前处理软件中,截取出相应需要计算的结构体,并对相应实体采用三角形单元进行有限元网格剖分。该箱盖结构有限元网格剖分见图 3。将该结构分别在 2 种注模压力、2 种注模方式下进行树脂流动过程模拟计算,并在出射口位置附近设置 4 个传感器,用以监测该位置树脂的压力变化。采用玻璃纤维斜纹织物,设置有限元模拟过程输入参数:渗透率 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 分别为 2.05×10^{-11} , 1.81×10^{-11} , 1.1×10^{-12} ;孔隙率为 0.4;树脂粘度为 0.4 Pa·s。在注模压力为 0.2, 0.4 MPa 下,分别采用线注射-点出射和点注射-点出射工艺进行注模,通过软件模拟仿真得出每种注模工艺下的树脂压力分布和时间分布。

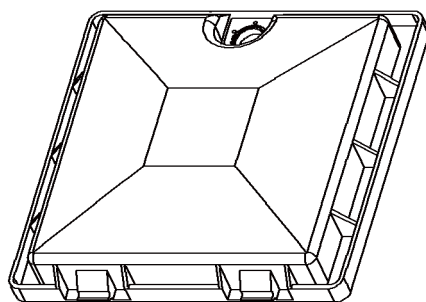


图 1 箱盖结构
Fig.1 Cover structure

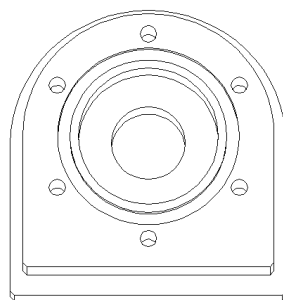


图 2 爆炸螺栓座
Fig.2 Explosive bolt seat



图 3 箱盖结构有限元网格
Fig.3 Finite element meshes of lid structure

2 有限元分析过程及结果讨论

2.1 线注射-点出射工艺

线注射-点出射工艺是将箱盖底面的外侧节点全部设置为注射口 (group 1—8), 将箱盖结构顶部中心处设置为出射口 (group 13)^[9]。从正面方向观察得到的树脂出射口及传感器设置位置的几何图示见图 4。

箱盖结构在 0.2 MPa 注射压力情形下的模拟结果见图 5—6。

在 0.2 MPa 注射压力下,线注射-点出射工艺对应的树脂注模时间约为 712 s,树脂流动前锋最后到达位于箱盖结构上方中心处的出射口,没有干

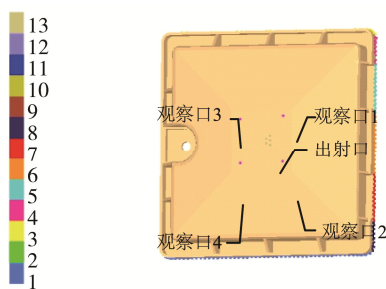


图 4 箱盖结构计算模型出射口和传感器的正面视图
Fig.4 Location of the exit portal and sensors

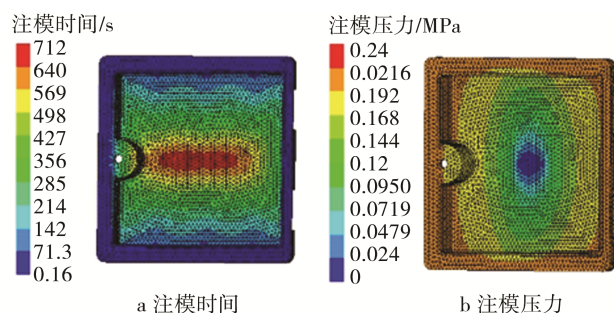


图 5 线注射-点出射工艺树脂注模时间与压力分布 (0.2 MPa)

Fig.5 Resin pressure and resin injection time profile of line injection-point outgoing process (0.2 MPa)

斑和明显的缺陷形成,从对应的树脂压力分布云图也得到了印证。云图中树脂流动时间分布显示,在注射口所需时间最短,树脂最后到达出射口,相应树脂压力分布则呈现出相反的结果,即:注射口处压力最大,出射口处压力最小。在 4 个观察口处的树脂压力分布趋势具有良好的一致性,说明该工艺没有出现流动滞后现象^[10]。

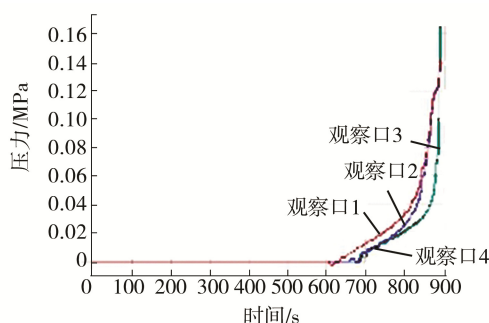


图 6 4 个观察口树脂压力与时间的关系 (0.2 MPa)
Fig.6 The relationship between resin pressure distribution and time of four observations (0.2 MPa)

箱盖结构在 0.4 MPa 注射压力情形下的模拟结果见图 7—8。

在 0.4 MPa 注射压力下,线注射-点出射工艺对应的树脂注模时间约为 356 s,这相对于 0.2 MPa 情形有了明显减少,且 2 种情况的流动前锋形状相

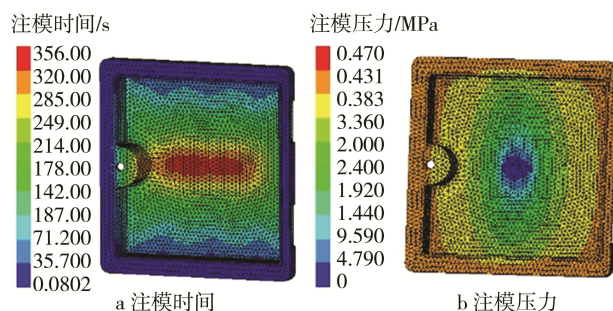


图 7 线注射-点出射工艺树脂注模时间与压力分布 (0.4 MPa)

Fig.7 Resin pressure and resin injection time profile of line injection-point outgoing process (0.4 MPa)

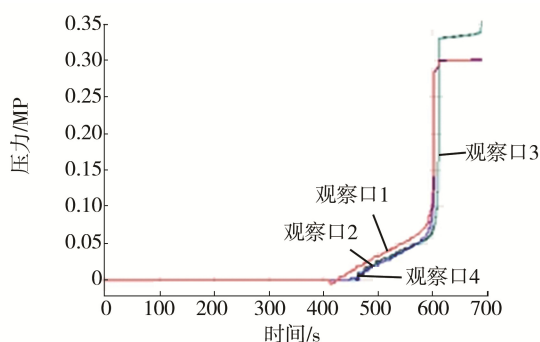


图 8 4 个观察口树脂压力与时间的关系 (0.4 MPa)
Fig.8 The relationship between resin pressure distribution and time of four observations (0.4 MPa)

似。即树脂最后到达位于箱盖结构上方中心的出射口,没有干斑和明显的缺陷形成,4 个观察口处的树脂压力分布趋势具有良好的一致性^[11]。

2.2 点注射-点出射工艺

点注射-点出射工艺是将箱盖底面四边中心节点设置为注射口,分别设置为 group 9, group 10, group 11 和 group 12;将箱盖结构顶部中心处设置成出射口,group 13 设置成出射口,见图 4。箱盖结构在 0.2 MPa 注射压力情形下模拟结果见图 9—10^[12]。

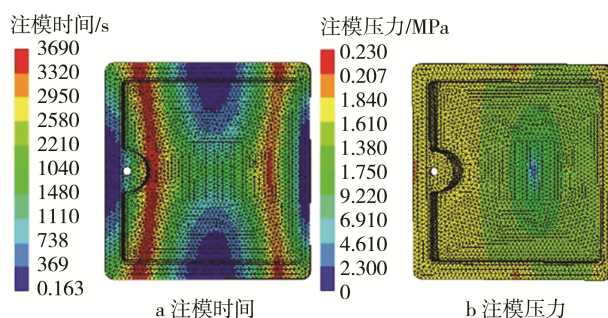


图 9 点注射-点出射工艺树脂注模时间与压力分布 (0.2 MPa)
Fig.9 Resin pressure and resin injection time profile of point injection - point outgoing process (0.2 MPa)

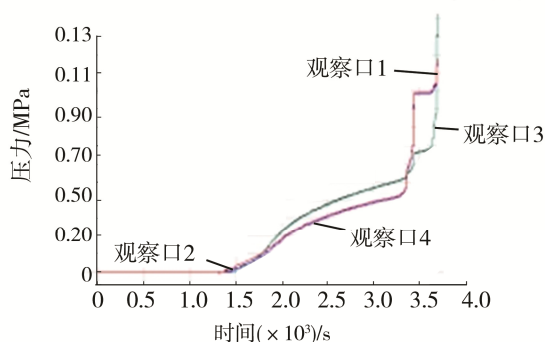


图 10 4 个观察口树脂压力与时间的关系 (0.2 MPa)
Fig.10 The relationship between resin pressure distribution and time of four observations (0.2 MPa)

在注射压力 0.2 MPa 下, 线注射-点出射工艺对应的树脂注模时间约为 3690 s, 但在流动前锋的位置上出现了在箱盖内部圆柱位置处出现的注射所需时间的最大值, 这表明树脂最终浸润该区域, 而出射口被设置在箱盖上方中心处, 这表明当出射口有树脂流出后时部分织物依然存在干斑, 也表明这种工艺可能存在缺陷。在 4 个观察口处的树脂压力分布趋势在较早时间即出现了不一致, 也表明这种注射方式相比于线注射点出射工艺性较差^[13-15]。注射压力 0.4 MPa 情形模拟结果见图 11—12。

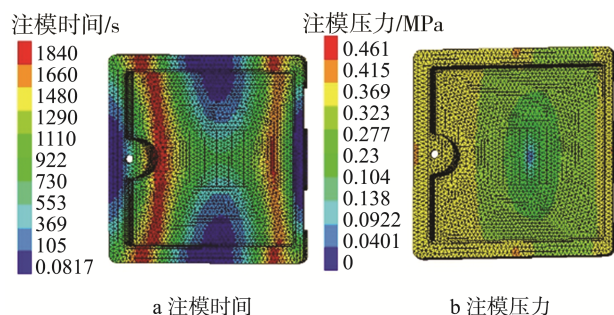


图 11 点注射-点出射工艺树脂注模时间与压力分布 (0.4 MPa)

Fig.11 Resin pressure and resin injection time profile of point injection - point outgoing process (0.4 MPa)

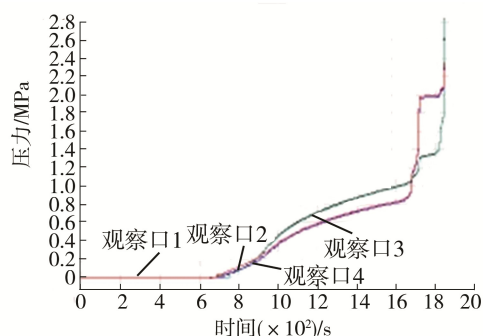


图 12 4 个观察口树脂压力与时间的关系 (0.4 MPa)
Fig.12 The relationship between resin pressure distribution and time of four observations (0.4 MPa)

在注射压力 0.4 MPa 下, 点注射-点出射工艺对应的树脂注模时间约为 1840 s, 树脂流动前锋形状与 0.2 MPa 下相似, 同样在箱盖内部的圆柱部分出现了所需树脂流动时间最长, 这会造成干斑。4 个观察口处的树脂压力分布趋势具有较大的离散性, 与线注射-点出射工艺相比, 这种工艺易产生缺陷。

3 试验验证

通过 RTM 成型工艺制备箱盖, 模具注胶通道设计为线注射-点出射, 注胶压力设计为 0.4 MPa, 经模具准备、织物定型剂处理、铺层、连接钩装配、加强筋装配、模具装配、树脂注射、固化、脱模等工序, 成型箱盖样件见图 13。箱盖外观及内部质量良好, 各项性能均满足指标要求。由此可知, 有限元分析结果与试验具有较好的吻合性。



图 13 箱盖样件
Fig.13 The cover sample

4 结语

通过对箱盖进行树脂传递模塑工艺树脂流动过程有限元分析, 对比了箱盖在线注射-点出射和点注射-点出射工艺下, 当注射压力为 0.2, 0.4 MPa 下对应的树脂流动前锋位置和压力分布结果。从结果可以得出以下结论。

1) 注模压力增大可以显著减少树脂注模完成所需的时间, 压力的增大对生产效率的提供具有积极意义。注模压力越大, 对成型模具刚度要求增加, 也增大了生产成本, 根据成本和效率的平衡需要恰当地选择注模压力。实际工艺过程中, 注模压力设置为 0.4 MPa。

2) 对于不同的注模工艺可以看出, 采用线注射-点出射工艺能得到稳定的树脂流动前锋形状, 有效预防干斑的产生; 点注射-点出射工艺出现了明显干斑现象, 所得构件易形成缺陷, 应避免采取。

3)有限元分析结果与试验具有较好的吻合性,它能够有效指导RTM工艺中模具的设计,可以有效降低由传统的“试错法”来确定生产工艺带来的高昂成本和低效率,为提高复合材料构件的制造水平具有明显积极作用。

参考文献:

- [1] LEE G W, LEE N J, JANG J, et al. Effects of Surface Modification on the Resin-transfer Moulding (RTM) of Glass-fibre/unsaturated-polyester Composites[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(1): 9—16.
- [2] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 605—610.
CHEN Shao-jie. Composite Technology and Large Aircraft[J]. ACTA Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 605—610.
- [3] AMICO S, LEKAKOU C. An Experimental Study of the Permeability and Capillary Pressure in Resin-transfer Moulding[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(10): 1945—1959.
- [4] LAM Y C, SUNIL C J, LIU X L. Numerical Simulation of the Mould-filling Process in Resin-transfer Moulding[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(5): 845—855.
- [5] 徐淑权, 黄立果, 蔡建, 等. 发射箱用RTM树脂体系工艺性与固化性能研究[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 115—119.
XU Shu-quan, HUANG Li-guo, CAI Jian, et al. Process and Curing Properties of RTM Resin System for Launch Box[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 115—119.
- [6] 蔡建, 徐淑权, 秦旭锋. 基于轻量化目标的发射箱纤维增强材料铺层设计[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 46—49.
CAI Jian, XU Shu-quan, QIN Xu-feng. Overlay Design of Fiber-reinforced Material of Launch Box Based on the Target of Lightweight[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 46—49.
- [7] XIANG H, LING H, WANG J, et al. A Novel High Performance RTM Resin Based on Benzoxazine[J]. Polymer Composites, 2005, 26(5): 563—571.
- [8] RAN Q C, TIAN Q, GU Y. Synthesis of 3-Phenyl-6-formyl-3,4-dihydro-2H-1,3-benzoxazine [J]. Chinese Chemical Letters, 2006, 17(10): 1305—1308.
- [9] TONTISAKIS A, BLYAKHMAN Y, CHAUDHARI A. New High Performance RTM System [C]//49th SAMPE International Symposium, Long Beach, 004.
- [10] 姚福军, 段跃新, 肇研. RTM工艺树脂注射温度优化[J]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 105—108.
YAO Fu-jun, DUAN Yue-xin, ZHAO Yan. Optimization of Resin Injection Temperature for RTM Process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(3): 105—108.
- [11] 吴晓青, 李嘉禄. 基于单向流动研究三维编织预制件的渗透性[J]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 116—120.
WU Xiao-qing, LI Jia-lu. Permeability of the 3D Braided Preform Based on the Unidirectional Flow Measurement[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(3): 116—120.
- [12] 刘刚, 罗楚养, 李雪芹, 等. 复合材料厚壁连杆RTM成型工艺模拟及制造验证[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 105—112.
LIU Gang, LUO Chu-yang, LI Xue-qin, et al. Process Simulation and Manufacture Testing of Composite Thick-wall Drag Brace Via RTM Technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 105—112.
- [13] DING Qi-le, JU Feng, SONG Shuai-bing, et al. An Experimental Study of Fractured Sandstone Permeability after High-temperature Treatment under Different Confining Pressures[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 8(34): 55—63.
- [14] ANUSH K C, KRISHNA P B. Comprehensive Investigation of Permeability Characteristics of Pervious Concrete: A Hydrodynamic Approach[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123(10): 627—637.
- [15] KAZMI S M R, JAYARAMAN K, DAS R. Single-step Manufacturing of Curved Polypropylene Composites Using a Unique Sheet Consolidation Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237(10): 96—112.