

复合材料纵横加筋隔框RTM成型工艺

罗 维 郭 强 赵文琛 彭 珂 黄海超

(航空工业成都飞机工业(集团)有限公司, 成都 610091)

文 摘 航空次承力框结构因结构复杂、精度要求高,目前仍然大多使用铝合金材料通过数控机加方式进行制造。为探索该类框结构的复合材料整体化成型的可行性,本文针对含纵横加筋及局部翻边结构特征的机身次承力框结构,对一薄壁复合材料隔框的整体化RTM成型工艺方法进行了研究。隔框结构的铺层变形仿真结果表明,采用全(0°/90°)铺层组合能够最大程度地减少结构的翘曲变形,且得到实际验证;流动仿真结果表明,较点注胶及线注胶方案,采用面注胶方式能够显著减少充填时间及充填压力;将优化的方案结合铺层自动下料、填充材料拉挤成型等自动化工艺相结合,成功制备了无损检测内部质量合格、取样力学性能与传统热压罐成型工艺相近的复合材料整体隔框。

关键词 复合材料,框结构,RTM,成型工艺

中图分类号:TQ 323.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.06.007

Study on Composite Frame With Stringer-Stiffened Feature by Resin Transfer Molding

LUO Wei GUO Qiang ZHAO Wenchen PENG Ke HUANG Haichao

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial(Group)Co., Ltd., Chengdu 610091)

Abstract Due to the complicated structure and high precision requirement, the subordinate frame structure of aviation is still mostly made of aluminum alloy by CNC machines. In order to explore the feasibility of integrated forming solution for composite frame structure, this paper studies the resin transfer molding (RTM) method of a thin-wall composite frame with longitudinal and transverse stiffeners and partial flanging structure characteristics. Simulation results show that the full (0/90)_s layer combination can reduce the warping deformation of the structure to the greatest extent, which was also verified by the actual manufacturing results. The flow simulation results show that surface-injection method can significantly reduce the filling time and pressure compared with point-injection and line-injection plans. By combining the optimized scheme with automatic laying-up blanking, pultruded filling material and other automatic processes, the integral insulation frame of composite material with qualified internal quality and similar sampling mechanical properties to the traditional autoclave forming process was successfully fabricated.

Key words Composite material, Frame structure, Resin transfer molding, Molding process

0 引言

框梁及框架结构是经典的理想支撑结构,为加强筋、肋、杆、管等组成的静定或超静定结构,具有大跨度、拓展性强、节省材料、结构灵活等特点,在飞行器结构设计中得到了大量的应用^[1-3]。

随着复合材料制造技术的提高,先进复合材料在飞机上的应用已经从雷达罩、蒙皮、方向舵等非承力或次承力构件逐步向波纹梁^[4]、机翼盒段^[5]、地板

梁^[6]、压力框^[7]等主承力构件上推广。作为主要的承力结构件,机身上众多的框梁结构较为复杂,往往带有较多较高的纵横加筋、翻边等结构,且其存在装配关系,对制件的制造精度要求较高,常规的真空袋-热压罐成型工艺难以满足精度要求。

树脂传递模塑成型(RTM)^[8]技术的特点是将树脂浸润、固化成型过程、增强纤维结构设计和制造过程分开,这使得设计者可通过材料设计剪裁满足较

收稿日期:2020-09-01

基金项目:四川省科技计划(2019YFG0381)

第一作者简介:罗维,1990年出生,博士,主要从事复合材料液体成型技术研究。E-mail: luo331144@126.com

为精确、复杂的技术要求；其次，通过树脂在闭合模具中一次性浸渍预成型体，因此能够方便和快速地完成带纵横加筋、夹芯等形状和结构较为复杂的复合材料制件的整体化成型。同时RTM成型工艺质量和力学性能较好，因此是复合材料框梁、框架及接头结构较为理想的成型工艺，也是满足复合材料复杂结构制件整体化及低成本化成型工艺的一个重要发展方向。

本文选取一具有纵横加筋及翻边结构的典型隔框结构作为研究对象，从树脂及预制体的典型基础性入手，通过优化模具设计及注胶方案设计，以期制备得到尺寸精度、纤维含量及内部质量满足要求的复材隔框制件。

1 实验

1.1 试验材料及设备仪器

国产T700碳纤维平纹织物ZT7H3198P，面密度200 g/m²；国产双马来酰亚胺树脂定型膜LCM01，面密度40 g/m²；国产RTM用双马来酰亚胺树脂QY8911，密度1.2 g/cm³。ISOJET树脂注射系统；恒温烘箱；Olympus OMNIScan MX2超声检测仪；MTS E43万能力学试验机；MDJ-300A型固体密度计；Brookfield RVDVII+型黏度计。隔框成型工装材料采用Q235模具钢，其他注胶用管路及接头皆为市售。

1.2 试验方案

1.2.1 测试

采用黏度计对树脂的升温及恒温黏度特性进行测试；采用万能力学试验机测试复合织物在不同层数及铺层角度组合下的压缩-位移曲线；采用自制矩形单向渗透率测试模具，在实际注胶温度条件下对复合织物的流动前沿随时间的变化情况进行测试，结合Darcy定律所推导出的流动距离 L 平方与时间 t 的关系(公式1)计算得到织物的渗透率^[9]。

$$L^2 = \frac{2K\Delta P}{\eta\varphi}t \quad (1)$$

式中， Δp 为压力差， η 为树脂黏度， φ 为预制体孔隙率。

1.2.2 隔框建模及流道仿真

为评估不同注胶方式对制件充模行为的影响，借助PAM-RTM工艺仿真软件，考虑填充材料区域的影响，对隔框进行分区域建模，并进一步针对预制体的渗透性能及压缩性能测试数据进行材料边界条件设定，注胶压力、流量及温度等工艺边界条件根据树脂流变测试结果及实际生产经验进行设置。

1.2.3 隔框RTM模具设计

本文选择的纵横加筋框尺寸为700 mm×400 mm，壁厚1.5 mm，具体结构如图1所示。根据流道

仿真方案的评估结果，选择筋条方向设置溢胶口，并在所有筋条交叉点处均设置溢胶口，如果不使用可以进行局部封堵，方便实现各种流道方案验证。

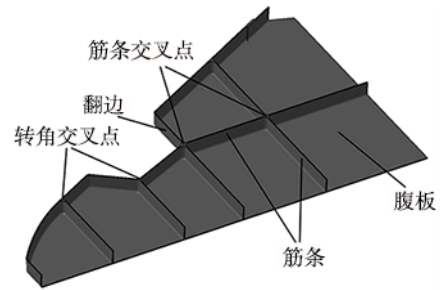


图1 典型纵横加筋翻边隔框模型示意

Fig. 1 Model of a typical frame with horizontal and vertical stringer-stiffened feature

隔框成型模具(图2)主要由底座、芯块、定位挡块、多孔板、盖板5部分组成。底座及盖板根据隔框外形进行设计制造成梯形轮廓并在其表面设置减轻槽。

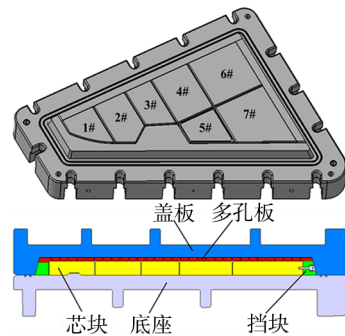


图2 隔框成型模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forming mold of the frame

根据制件外形设计了7个芯块，分别对应零件筋条区域内型面的成型，芯块与底座间通过凸台进行定位，以控制制件壁厚。芯块四周分别采用3个挡块将其封闭，起到外轮廓定位及翻边区成型的作用，其中一个挡块可以与两个芯块连接保证芯块整体铺叠和组装时不出现预制体错位变形的问题。多孔板和盖板设计提供面注胶工艺选择并确保制件腹板面在注胶过程中的稳定均匀渗透。

1.2.4 预制体制备

根据隔框制件数模，对各个芯块铺层进行展开仿真及剪口和料片外形设计，保证转角区域剪口位置错开^[10]，并根据设计结果对织物进行自动下料得到铺叠料片，首先对4#~7#芯块分别进行单块和整体铺叠，然后对剩下的1#~3#芯块进行铺叠和组装，铺叠过程中的填充材料区域采用拉挤成型的预浸料填充芯材进行填充，最后对整个隔框腹板面铺层进行铺叠。铺叠完成后对多余部分进行修切，隔框预制体制造过程及完成最终铺叠后的预制体如图3所示。

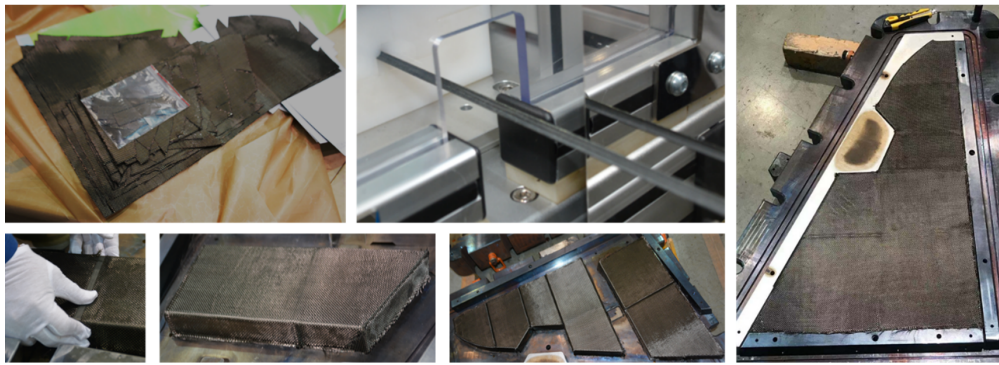


图3 隔框预成型体制备过程

Fig. 3 Process of the preform shaping

1.2.5 合模及注胶

在铺叠好的预制体周边安装好挡块,并在密封槽中放置密封条,然后将多孔板和盖板预先连接后构成的阴模部分吊装与底座合模,确保合模间隙低于0.3 mm。随后将模具与注胶机通过氟塑料注胶管相连接,待模具在烘箱中预热至110℃时启动注胶程序,注胶过程中保持模具内腔真空度不低于-0.85 MPa,注胶温度控制在90~100℃,树脂注射速率控制在20~50 mL/min,注射压力控制在0.2~1.0 MPa。当树脂从溢胶口溢出时,关闭溢胶口阀门,当所有溢胶口阀门关闭后,再逐一打开溢胶口进行排气,直至所有溢胶口均无不明显气泡产生时,关闭溢胶口阀门,之后树脂在1 MPa下保压5 min后停止注胶。复合材料按照树脂固化程序在烘箱中固化成型。

1.2.6 脱模

待制品完成固化,模具自然冷却至60℃以下时,取下所有螺栓,取下盖板,利用顶出螺杆将底板和芯模慢慢取出,随后取下底板,逐一取出芯模,为便于脱模,芯模可设计为组合式模具,脱模并切割后的实物见图4。

2 结果与讨论



图4 成型后的隔框实物图

Fig. 4 Image of the finished composite frame

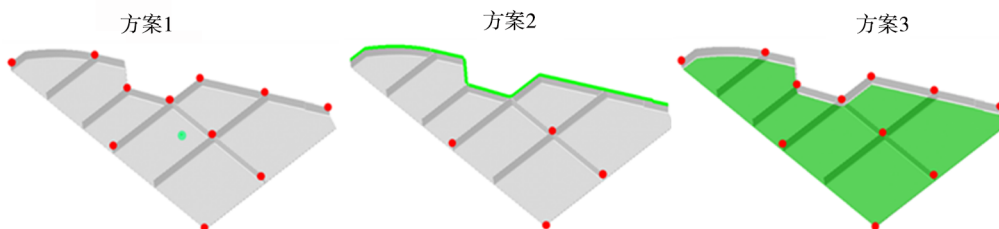


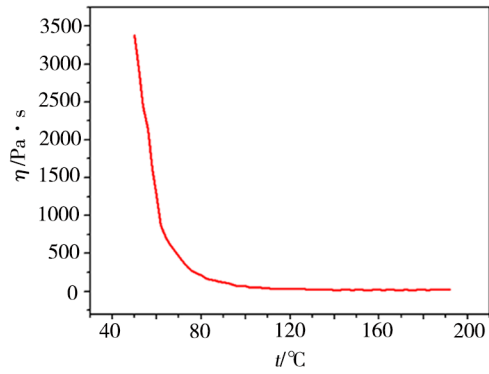
图5 3种不同的隔框流道设计方案示意

Fig. 5 Schematic diagram of 3 different runner design of the frame

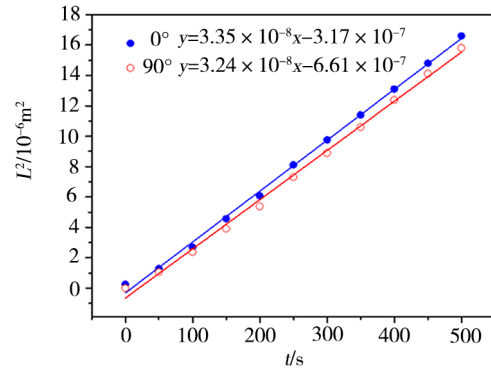
2.1 流道设计

相较于实际的试错试验,进行流动工艺仿真分析能够大幅缩短工艺方案的验证时间,降低试错成本。在本研究中,我们分别选择了3种不同的注胶流道设计方式通过PAM-RTM软件进行仿真,以考察不同注胶方式对树脂充填过程的影响。如图5所示,第一种注胶流道设计为单点进胶多点出胶,进胶口设置为腹板面中心,出胶口分别设置在筋条交叉处及腹板顶点处;第二种注胶流道设计方案为线进胶多点出胶,进胶口为翻边区线状进胶口,出胶口设置在图5所示的4个位置;第三种注胶流道则设计为腹板面进胶,各筋条及转角交叉点处设置出胶口。

根据图6所示的树脂黏度测试曲线及织物预制体单向渗透率试验中流动距离的平方 L^2 与流动时间 t 的实测结果,可计算得到预制体在 $x(0^\circ)$ 和 $y(90^\circ)$ 方向渗透率分别为 6.03×10^{-12} 和 $5.83 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,文献[11]对3K平纹织物面外渗透率测试结果,设定仿真的边界条件为: $K_1=6.03 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $K_2=5.83 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, z 方向渗透率为 $K_3=2.03 \times 10^{-13} \text{ m}^2$,注胶温度90℃,注射速率设置为25 mL/min,注射最高压力阈值设置为1 MPa进行仿真。从仿真结果来看(图7),3种仿真方法均能实现最终填充,且对应树脂流动过程均无流动前沿干涉。相比之下,方案1对应的点注胶工艺注射时间需4 742.7 s,完全填充后的最大注胶压力未超过设定值1 MPa;方案2对应的线注胶工艺对应填充时间为7 338.7 s,耗时最长,且完全填充后注胶口压力已经达到给定的上限值1 MPa。同时从填充时



(a) 黏-温曲线



(b) 单向渗透率的 L^2-t 拟合结果

图6 树脂黏-温曲线及预制体在0°及90°方向的单向渗透率的 L^2-t 拟合结果

Fig. 6 Viscosity-temperature curves of the resin and the fitting curves between L^2 and t of the preform on x (0°) and y (90°) direction

间云图上可见,该方案填充过程中内部存在较晚填充的包络区域,存在干斑风险。方案3对应的面注胶工艺对应填充时间为1 355.2 s,耗时最短,对应系统最大压力也达到1 MPa。结合树脂的工艺窗口考虑,最终选择面注胶工艺进行工装设计及试验件制造。

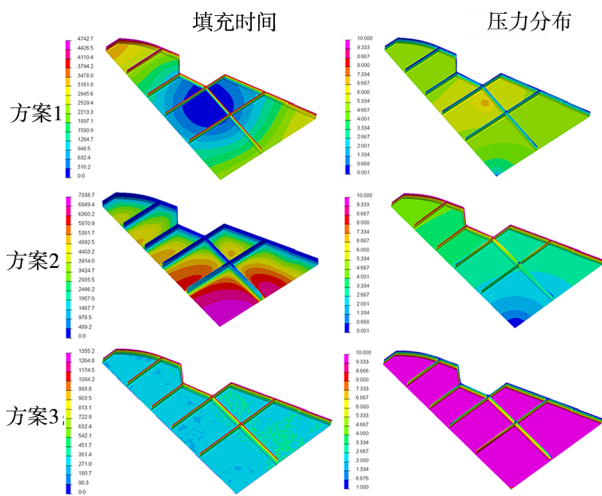


图7 3种方案下隔框流动仿真结果

Fig. 7 Filling simulation results of the 3 runner design

2.2 试验件质量分析

2.2.1 制件纤维体积含量

制件纤维体积含量通过下式进行计算:

$$\varphi = \frac{\rho_C - \rho_R}{\rho_F - \rho_R} \times 100\% \quad (2)$$

式中, ρ_C 为复合材料密度, ρ_R 为纯树脂密度, 测试值为 1.204 g/cm^3 。 ρ_F 为纤维体密度, 测试值为 1.791 g/cm^3 。在制件上分别选取个特征区域进行取样测量复合材料密度的平均值为 1.548 g/cm^3 , 并取平均值后通过上式计算得到制件最终的平均体积分数为 58.6%。

2.2.2 表面及外观质量及翘曲

从成型隔框的表面质量来看, 制件内外表面结宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第6期

构光滑, 整个腹板面及R区无明显的富树脂或贫胶缺陷。自然状态下, 7#芯块对应腹板面由于结构上受到的约束最少, 产生了轻微的翘曲变形, 实测翘曲量为 2.5 mm, 与 $(0/90)_8$ 铺层的变形仿真结果得到的 2.223 mm 相近, 而 $[(\pm 45)(0/90)(\pm 45)(0/90)]_8$ 和 $[(\pm 45)(\pm 45)(0/90)(0/90)]_8$ 铺层对应的翘曲变形量则分别为 5.641 和 8.125 mm。隔框变形仿真及实际零件翘曲照片对比见图8。

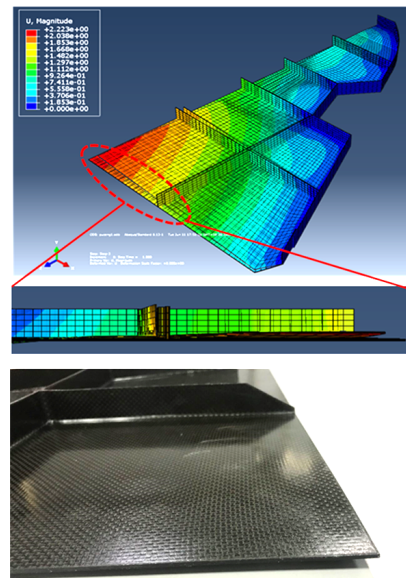


图8 隔框变形仿真及实际零件翘曲照片对比

Fig. 8 Deformation simulation results and the real warping picture of the frame

2.2.3 筋条位置及纵横加筋交叉处内部质量

为了进一步考察成型隔框的内部质量, 我们对隔框的纵横加筋位置进行了相控阵无损检测, 从图9中可以看出, 纵横加筋处填充芯材密实无孔隙, 外形尺寸规则, 相控阵无损检测表明筋条与腹板连接处部分回波信号清晰, 无分层等常规缺陷。

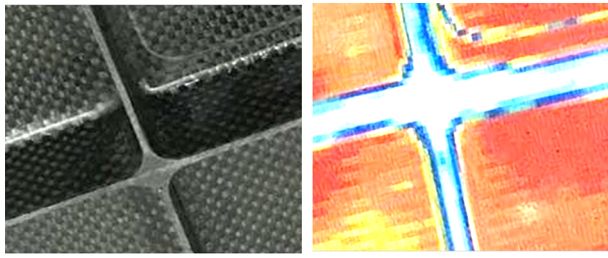


图9 纵横加筋位置处无损检测结果

Fig. 9 NDT result of area with vertical and horizontal stiffeners

2.2.4 局部力学性能

对隔框进行局部取样并测试其弯曲及短梁剪切性能,结果如表1所示。可以看出,RTM成型零件的弯曲性能与热压罐工艺试样接近,短梁强度甚至高于典型热压罐工艺制备的层压板试样,从侧面印证了RTM工艺不会对复合材料性能造成显著劣化,制备弱框结构复合材料具备可行性。

表1 RTM隔框取样与热压罐试样力学性能对比

Tab. 1 Comparison of mechanical properties between RTM specimens and typical autoclave-cured samples

工艺方法	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	短梁强度/MPa
RTM	982.6±56.5	48.5±2.2	82.6±3.9
热压罐	1016±48.6	49.4±3.5	79±4.4

3 结论

通过对典型纵横加筋及翻边结构的复合材料隔框的整体化RTM成型,在铺层设计、铺叠模具设计、流动仿真及注胶流道设计等方面开展研究,积累了一些经验,归纳总结如下。

(1)纵横加筋隔框采用大小框嵌套铺放工艺能够保证承力筋条上部分纤维的连续性,具体的铺层连续设计应当视具体框结构进行优化设计。

(2)在本文的隔框制造实例中,全(0/90)_z织物铺层对应的复合材料变形量最低,变形仿真结果与实际制造的趋势和变形量基本相符。从RTM成型零件的取样力学性能结果表明其与预浸料-热压罐工艺成型试样的弯曲及短梁剪切性能接近。

(3)在本论文涉及的典型隔框制造过程中,通过腹板面面注胶能够有效缩短充模时间,并降低充模压力,是优选的注胶方式,通过流动仿真模拟筛选出的面注胶方案所需的注胶时间及胶液出胶顺序与实际注胶过程基本相符。

参考文献

[1] PIERRE MINGUET. Analysis of the strength of the interface between frame and skin in a bonded composite fuselage panel [C]. The 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1997:2783-2790.

[2] 王霖, 韩小勇, 田茶, 等. 复合材料机身隔框制造技术分析现状 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(10):124-129.

WANG L, HAN X Y, TIAN R, et al. Technical analysis

and current situation research on manufacturing composite fuselage frame [J]. Composites Science and Engineering, 2019 (10):124-129.

[3] 李维娜. 复合材料机身框的力学性能 [J]. 中国科技信息, 2016(11):52-53.

LI W N. Mechanical properties of composite fuselage frame [J]. China Science and Technology Information, 2016(11):52-53.

[4] 孟祥吉, 燕瑛, 罗海波, 等. 复合材料波纹梁冲击试验与数值模拟 [J]. 复合材料学报, 2015, 32(1):196-203.

MENG X J, YAN Y, LUO H B, et al. Impact tests and numerical simulation of composite waved-beam [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1):196-203.

[5] 台元月, 常海峰, 梁奕珠. 舵面复合材料整体盒段研制 [C]. 中国国际复合材料科技大会, 2017.

TAI Y Y, CHANG H F, LIANG X Z. Development of integral box section of composite material of rudder face [C]. China International Composite Science and Technology Conference, 2017.

[6] WALLS K O, CRAWFORD R J. The design and manufacture of a transverse floor beam from thermoplastic composite material—a case study [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1996, 9(4):396-417.

[7] 刘顺臻, 姜洪博, 王韬, 等. 复合材料主承力构件后压力框制造技术研究 [J]. 航空科学技术, 2019(7):40-46.

LIU S Z, JIANG H B, WANG T, et al. Study on manufacturing technology of composite primary-load-carrying rear pressure bulkhead [J]. Aeronautical Science and Technology, 2019(7):40-46.

[8] 王强华. 复合材料成型工艺中的闭模工艺技术 [J]. 玻璃钢, 2007(2):38-41.

WANG Q H. The closed die technology in the composite material forming process [J]. Fiber Reinforced Plastics, 2007 (2):38-41.

[9] 张默, 李炜. VARTM工艺中增强体的渗透率测定 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(6):54-56.

ZHANG M, LI W. Measurement on the permeability of reinforcements in the vartm process [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2011(6):54-56.

[10] 原崇新, 高丽敏, 陈凯, 等. A形复合材料加强框的RTM成型工艺研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(1):77-79.

YUAN C X, GAO L M, CHEN K, et al. RTM processing of the a-shaped composite stiffened frame [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(1):77-79.

[11] 肖飞, 原崇新, 丛晶洁. 复合材料加筋壁板结构件VARI液体成型工艺计算模拟 [J]. 航空材料学报, 2016, 36(4):47-54.

XIAO F, YUAN C X, CONG J J. Computational simulation of VARI fluid process molding for stiffened panel structural composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4):47-54.