

引文格式: 靳皓越, 闫超, 王宇宁, 等. 泡沫芯材处理工艺对VARI成型复合材料力学性能的影响[J]. 航空制造技术, 2026, 69(4): 25020013.
JIN Haoyue, YAN Chao, WANG Yuning, et al. Effect of foam-core treatment process on mechanical properties of VARI molded composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(4): 25020013.

泡沫芯材处理工艺对VARI成型复合材料力学性能的影响

靳皓越, 闫超, 王宇宁, 杨孟鑫, 刘秋峰

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 泡沫夹芯结构树脂基复合材料在航空工业中应用广泛, 采用真空辅助树脂灌注工艺能显著降低其制造成本。该类夹层结构的液体成型过程中, 树脂在渗透预制体时易发生流动不均, 可能导致孔隙、干斑等缺陷。因此, 有必要对成型过程中的树脂流动行为进行分析与调控, 以提升泡沫夹芯复合材料的产品质量。本研究通过有限元法模拟了不同泡沫芯预处理方式下夹层结构的树脂浸润过程, 并对固化后的夹芯板进行了力学性能分析, 结果表明, 对泡沫芯进行打孔处理是一种更为有效的预处理方法。

关键词: 复合材料; 夹层结构; 液体成型; 真空辅助树脂灌注(VARI); 数值模拟

中图分类号: V258

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020013

Effect of Foam-Core Treatment Process on Mechanical Properties of VARI Molded Composites

JIN Haoyue, YAN Chao, WANG Yuning, YANG Mengxin, LIU Qiufeng

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] The resin matrix composite materials with foam-core sandwich structures are widely used in the aviation industry, and the vacuum assisted resin infusion process can effectively reduce manufacturing costs. During the liquid molding process of sandwich structures composite materials, the incorrect flow behavior of resin during impregnation of the preforms can lead to defects such as voids and dry spots. To improve the product quality of foam-core sandwich structure composites, it is necessary to optimize the flow behavior of the resin during the molding process. In this study, the finite element method is used to simulate the impregnation process of preforms with different pre-treatment methods of foam-core material. The mechanical analysis was performed on the solidified sandwich structures composite panels. The results indicate that perforating the foam-core material is a more effective pretreatment method.

Keywords: Composite material; Sandwich construction; Liquid molding; Vacuum assisted resin infusion (VARI);

Numerical simulation

先进航空材料是高新航空装备发展的前提条件^[1], 航空工业的发展决定了先进航空结构材料必须具备轻量化、高可靠性、长寿命、低成本化的特点^[2]。高性能复合材料具有优异的减重性能, 且强度高、比刚度大、可设计性强^[3], 是航空工业领域不可或缺的关键战略材料。自20世纪70年代起, 先进复合材料在航空航天领域的应用已经由制造次承力结构件, 逐步发展为制造机身、机

翼等主承力结构件^[4], 极大地促进了飞行器的轻量化、结构一体化。目前, 先进复合材料的用量已经成为航空器先进性的重要衡量指标, 在先进民用飞机的制造中, 复合材料用量已经超过50%^[5]。我国复合材料研究起步较晚, 国产大飞机在这一指标上与世界先进水平存在一定差距, 例如C919中的复合材料用量约为12%^[6]。此外, 复合材料低成本制造水平也存在明显差距。

收稿日期: 2025-01-07; 退修日期: 2025-04-03; 录用日期: 2025-04-15

基金项目: 陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-387)

通信作者: 闫超, 高级工程师, 博士, 研究方向为先进复合材料制造技术。

据统计,航空复合材料构件成本的 70% 来源于制造环节^[5]。因此,如何实现舱门、机翼等大型复合材料结构件高效率、低成本制造是我国航空工业亟待解决的关键技术难题。液体成型技术以其低成本、适用于大面积整体成型的特点,在航空复合材料制造中得到广泛应用。这种工艺通过在铺放有纤维增强材料预成型体的闭合模腔中注入液态树脂,并在预设的温度下完成材料成型。在这个过程中,液态树脂逐渐排出空腔中的空气,并浸润模腔中的纤维预成型体。目前主流的低成本液体成型技术主要包括树脂传递模塑成型(Resin transfer molding, RTM)、树脂膜熔渗(Resin film infusion, RFI)和真空辅助树脂灌注(Vacuum assisted resin infusion, VARI)。其中 VARI 工艺使用单面模具,更适用于大尺寸复杂零件的制造,已经成功应用于 A400M 的舱门,以及波音 787、空客 A380 等机型的机翼制造。

泡沫夹芯结构的复合材料具有高刚性,且减重效果明显,在航空领域被广泛应用于尾翼、尾梁和舱门等机身部件。刘琦等^[7]采用组合模具成型方案,分析了模具配合间隙及固化压力对泡沫夹层结构零件的成型质量的影响。贾欲明等^[8]对比分析了不同泡沫材料作为夹层结构夹芯材料的优缺点。孙煜等^[9]对不同处理方法制备的泡沫芯材采用 VARI 工艺进行成型,并对其成型效率、质量和力学性能分别进行了研究。Wang 等^[10]提出对泡沫芯材进行打孔处理,制作了 5 种不同孔密度的复合材料样品,随着孔密度的增加,复合材料的力学性能随之提升。Halimi 等^[11]研究了在泡沫芯上加工不同的孔型对泡沫夹芯结构复合材料机械性能的影响。Truxel 等^[12]的试验结果表明,在芯材上进行凹槽处理能阻止裂纹的扩展。张家莹等^[13]提出通过铺放本体树脂胶膜和芯材打孔的方式,解决 VARI 制备的泡沫夹芯壁板面-芯界面粘接强度较低的问题。苏霞等^[14]采用压实试验和注胶仿真模拟分析方法,对高肋壁板在 VARI 整体一次成型中存在的预定型困难、树脂流动控制复杂等问题进行了分析,并确定了最优的工艺参数。陈斯等^[15]采用有限元法模拟了 VARI 成型中夹层结构复合材料的充模过程,并结合试验确定了合适的充模方案。Yan 等^[16]采用有限元法分析了泡沫夹芯结构复合材料 VARI 成型中注射工艺对树脂流动的影响,结果表明改善注射工艺可以有效提升复合材料的成型质量。

本文采用 VARI 工艺成型的夹芯试板为研究对象,通过分析 PMI 泡沫夹芯复合材料的树脂充模过程,以及泡沫芯预处理方式对固化后的复合材料力学性能的影响,来探索复合材料泡沫夹芯板的最优成型工艺,从而为实际生产提供理论依据和技术指导。

1 树脂流动前沿模拟

复合材料的制造既要保证组分材料按预先设计的排列方式实现复合,也要保证产品的外形和内部质量达到设计要求,具有材料成型和最终产品形状生成同步完成的特点。热固性树脂基复合材料如果在固化过程中产生缺陷,很难通过修复使产品质量达到设计标准。液体成型过程中,树脂流动行为对复合材料最终质量具有重要影响,树脂的不均匀流动可能造成流动前沿发生空气包裹,进而形成干斑和孔隙等缺陷。

1.1 模型建立

PMI 泡沫夹芯复合材料由蒙皮、层压板及 PMI 泡沫芯组成。在 VARI 成型过程中,液体树脂在真空及压力条件下,流动并浸润干纤维预制体,然后经升温固化,最终获得复合材料,如图 1 所示。在 VARI 工艺中,控制树脂的流动和浸润过程是保证成品质量的关键。为了保证树脂在预制体内的均匀流动,通过对泡沫芯进行打孔或开槽处理来改善泡沫夹芯结构的局部流动环境。

为研究泡沫夹芯复合材料填充过程中的树脂流动行为,使用 PAM-RTM 软件对其进行数值模拟。本研究中,泡沫夹芯试板尺寸为 835 mm × 600 mm × 17 mm,泡沫芯的尺寸为 735 mm × 500 mm × 15 mm。在注胶口侧居中放置导流网,导流网尺寸为 400 mm × 350 mm。在填充过程中,树脂经注胶管注入模具并渗透预制体,最终形成层压板。此阶段中,树脂被视为不可压缩的流体且密度保持不变。为分析不同泡沫芯处理方式对树脂流动行为的影响,分别对泡沫芯底部进行单面开槽处理和打孔处理,开槽的槽间距为 25 mm,槽宽为 2 mm,槽深为 2 mm;打孔处理的孔径为 2 mm,孔间距为 25 mm。此外,设置无处理的泡沫芯材作为对照组。

1.2 材料属性与边界条件

本研究中,注胶温度设定为 $(80 \pm 5) ^\circ\text{C}$; 打孔和开槽部分的面内渗透率分别为 $5.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 和 $5.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, 它们的厚向渗透率均为 $3.1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$; 树脂的黏度为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 忽略树脂渗透过程中的黏度变化,忽略树脂渗透过程中黏度对渗透行为的影响。本研究中所用树脂为高温固化环氧树脂,密度 1200 kg/m^3 ; 增强材料为 T300 级织物 CF3031,面密度 225 g/m^2 ; 泡沫芯厚度

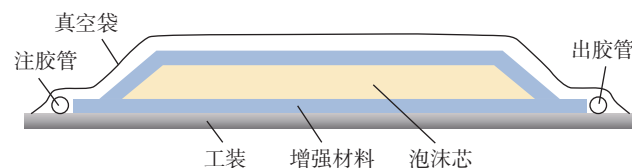


图 1 VARI 工艺原理图

Fig.1 Schematic diagram of VARI process

为 15 mm; 层压板区厚度为 1.96 mm; 上蒙皮厚度为 0.98 mm; 下蒙皮厚度为 0.98 mm。

对于孔/槽处理后的泡沫芯区域, 其树脂流动采用不可压缩 Navier-Stokes 方程进行求解。在 VARI 成型过程中, 由于树脂填充时的流速较低, 雷诺数低于 1, 因此忽略树脂流动中的对流, 简化对流项后的方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

式中, u 为树脂的流动速度, m/s; ρ 为树脂密度, kg/m^3 ; t 为时间, s; p 为压力, Pa; μ 为树脂黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

为提高计算效率, 本研究中忽略树脂流动的极性、惯性效应及边缘效应, 并假设预制体和泡沫芯在树脂流动的过程中不发生变形。根据实际生产情况, 设定仿真模型的边界条件如下: 树脂的注射压力为 0.1 MPa, 出口压力为 0, 且在流动前沿位置采用真空压力。

1.3 数值模拟结果分析

本研究对 3 种预处理方式的泡沫夹芯板 VARI 成型过程的充模过程进行了仿真分析。其中, 经刻槽处理的泡沫芯充模时间最短 (20.1 s), 打孔处理次之, 而未做任何预处理的泡沫夹芯板所需充模时间最长, 达 27.8 s。这说明, 对泡沫芯进行预处理有助于优化树脂流动路径, 降低流动阻力, 进而缩短充模时间, 提高充模效率。

泡沫夹芯板 VARI 成型过程中, 树脂浸润不充分会导致干斑、贫胶等缺陷, 因此需要对充模过程的流动前沿及充模结束后的树脂压力分布进行控制。对 VARI 成型工艺中, 不同处理方式的泡沫芯材在相同注胶工艺参数下的树脂流动行为进行模拟。泡沫芯夹层板上、下蒙皮的树脂流动情况如图 2 所示。对于无处理的泡沫芯板, 由于导流网的存在, 上蒙皮流动速度大于下蒙皮, 上、下蒙皮的树脂流动分别呈现中间快两边慢和中间慢两边快的趋势, 最终上、下蒙皮预制体的树脂充模时间不一致, 在尾端产生树脂流动前沿交汇并形成空气

包裹, 增加了出现干斑、孔隙等缺陷的风险。对于单面开槽的泡沫芯板, 由于下表面导流槽的存在, 树脂在下蒙皮的流动速度高于上蒙皮, 因此下蒙皮充满后, 树脂逆向向上渗透。虽然开槽处理可以有效提高泡沫夹芯零件下蒙皮的充模效率, 但也增加了产生干斑、孔隙缺陷的风险。对于打孔处理的泡沫芯板, 孔洞在上、下蒙皮构建了树脂流动通道, 树脂从充模时间较短的一侧沿孔流至另一侧蒙皮, 然后逐渐向四周扩散, 与该侧流动树脂共同填充整个蒙皮, 使两侧的树脂充模时间趋于一致, 从而有效提高树脂充模质量。相较于无预处理工艺, 单面开槽预处理工艺为下蒙皮的树脂提供了快速流道, 引导树脂快速渗透至下蒙皮预制体; 打孔预处理工艺为树脂提供了垂直通道, 消除了上、下蒙皮之间树脂流动速度差异, 使其能同步浸润, 从而降低树脂汇合时裹挟气泡的风险。同时, 打孔也有助于气体的排出, 进一步减少孔隙与干斑的产生。

树脂在预制体内流动时, 不同的压力会产生不同的树脂流动行为。零件上同一位置上、下蒙皮内的树脂压力差, 称为上下压力差。上下压力差过大, 会使上、下蒙皮内树脂流速不同, 最终流速较快的部分树脂逆向回流, 两部分交汇处空气不易排出, 形成干斑、孔隙等缺陷。泡沫芯板树脂充模后的树脂压力场分布如图 3 所示。对于无处理泡沫芯板和单面开槽的泡沫芯板, 在注胶过程后期, 由于上、下蒙皮树脂浸润速度不一致, 泡沫芯上、下表面出现压力差, 且无法平衡, 该区域易产生孔隙、干斑等缺陷, 因此刻槽处理能在一定程度上缩小上、下蒙皮压力差, 但无法从根本上消除上下压力差。打孔处理的泡沫芯板, 上、下蒙皮的压力基本相同, 这是因为, 泡沫芯经过打孔处理后, 孔洞在上、下蒙皮间形成了通道, 有效平衡了上、下蒙皮树脂压力, 这表明打孔处理可以有效均衡上、下压力差, 提升树脂充模质量。

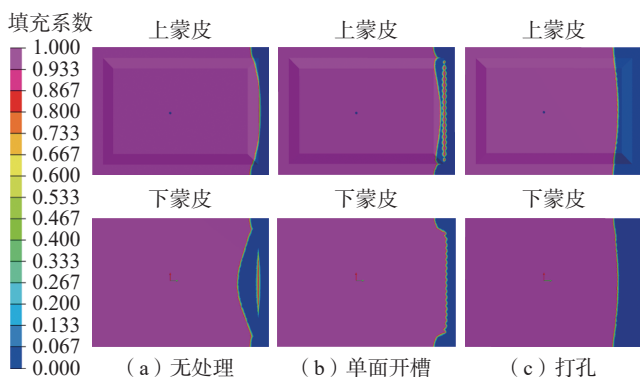


图 2 不同工艺下的树脂流动情况

Fig.2 Resin flow situation under different processes

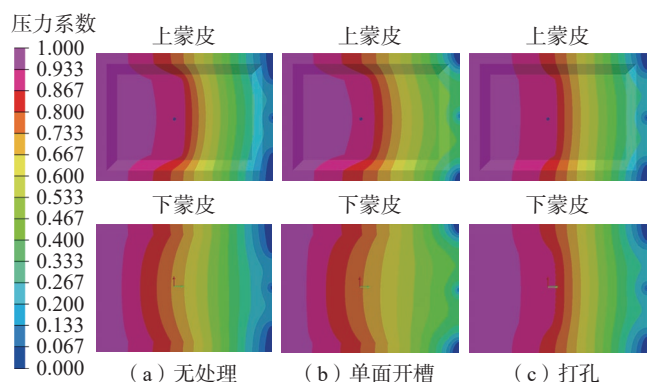


图 3 不同工艺下充模后的树脂压力分布

Fig.3 Resin pressure distribution after filling under different processes

2 试验

2.1 试验材料

试验用泡沫夹芯板的尺寸为 735 mm × 500 mm × 15 mm, 试验所用树脂为中航复材生产的 5284VARI 单组分环氧树脂; 增强材料为威海光威生产的 T300 级织物 CF3031, 单层固化厚度为 0.245 mm; 泡沫芯为中科恒泰生产的 Cascell[®]75 WH-HT; 上、下蒙皮铺层结构均为 [45/0/0/45], 厚度均为 0.98 mm; 真空袋为 DPT1000; 密封胶带为 GS43MR; 剥离层为 Bleed Lease B。泡沫芯材的处理方法为单面开槽处理和打孔处理, 处理方法与 1.1 节相同。采用 VARI 工艺成型, 成型后泡沫夹芯板厚度为 (17 ± 1.3) mm。

2.2 测试与表征

为测定泡沫夹芯层结构的滚筒剥离强度、弯曲强度和拉伸强度, 按照相关力学测试标准, 将制备的试样进行机械加工, 并使用万能试验机分别开展 3 项测试, 测试试样尺寸及测试标准如表 1 所示。在滚筒剥离试验中, 通过机械滚筒装置施加剥离力并记录载荷-位移曲线, 以评估界面处理工艺的效果; 通过弯曲试验测定弯曲强度和弯曲模量, 用以评价面板与芯材的层间结合质量; 通过平面拉伸试验计算拉伸强度, 以考察芯材与面板的结合性能。每项测试均制备 10 个试样进行重复测定, 以确保数据的可靠性和准确性。

2.3 力学性能结果及分析

各项测试均进行多次测量。表 2 列出了各项测试结果的平均值及其对应的离散系数。数据显示, 各项结果的离散系数均小于 7%, 表明测试具有较高的可靠性。部分经过力学性能测试的试样形貌如图 4 所示。

经过打孔和刻槽处理后, 泡沫芯板各项力学性能均满足实际使用需求。对比不同泡沫芯处理方式的夹芯板力学性能测试结果可知: 在弯曲强度方面, 经打孔处理的泡沫夹芯板具有最高值, 达 281 MPa, 相较于未经处理的泡沫芯强度提升 16.6%。这是由于经打孔预处理泡沫夹芯板内部树脂形成了销钉状增强结构, 从而显著提高了泡沫夹芯复合材料的弯曲强度^[17]。与刻槽处理的芯板相比, 打孔处理的芯板孔洞形状为规则的圆形且分布均匀, 可有效分散载荷, 降低局部应力峰值; 刻槽

处理会更容易出现应力集中, 进而导致裂纹产生。而在滚筒剥离强度测试中, 相比于无预处理、打孔处理的泡沫芯板, 刻槽处理的泡沫芯板在开槽侧表现出明显更高的强度, 其剥离强度达 18.5 MPa, 较无预处理试样提升 52.9%。这是由于刻槽处理使得固化后的树脂形成栅格结构, 起到了类似加强筋的作用, 这对泡沫夹芯板的力学性能起到了增强的作用^[18]。虽然打孔处理的泡沫芯板内的销钉结构有一定的强化作用, 但效果较弱, 无法显著提升剥离强度。在平拉测试中, 打孔处理的泡沫芯板强度高于刻槽处理和无处理的泡沫芯板, 打孔处理的泡沫芯板平拉强度相较于无处理和刻槽处理的泡沫芯板分别提高了 18.9% 和 17.4%。经过打孔处理的泡沫芯在垂直蒙皮的方向上形成了连接上、下蒙皮的柱状树脂, 在平拉时可提供加强作用。相较于刻槽处理或无处理的泡沫芯, 经打孔处理的泡沫芯内部会形成柱状树脂

表 1 试样尺寸及测试标准

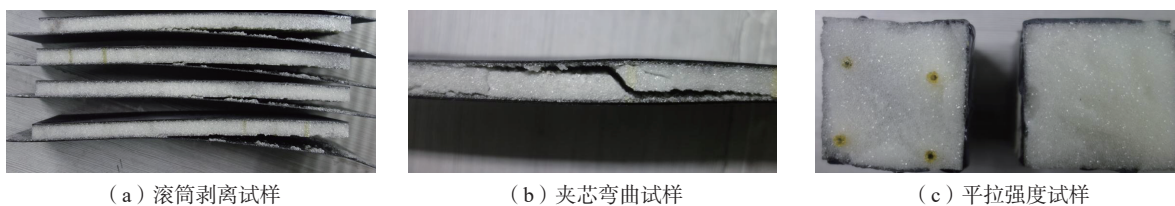
Table 1 Sample size and testing standards

测试项目	试样尺寸	测试标准
滚筒剥离	305 mm × 76 mm	ASTM D 1781—98
夹芯弯曲	250 mm × 80 mm	GB/T 1456—2021
平拉	80 mm × 13 mm	ASTM C 297

表 2 力学性能测试结果

Table 2 Mechanical performance test results

测试项目	泡沫芯处理方式	强度/MPa	离散系数/%
滚筒剥离	无处理	12.1	4.46
	刻槽 (开槽侧)	18.5	6.70
	刻槽 (非槽侧)	12.4	4.13
	打孔	12.6	4.69
夹芯弯曲	无处理	241	3.42
	刻槽	272	5.89
	打孔	281	5.48
平拉	无处理	1.59	5.15
	刻槽	1.61	6.00
	打孔	1.89	2.87



(a) 滚筒剥离试样

(b) 夹芯弯曲试样

(c) 平拉强度试样

图 4 力学性能测试试样形貌

Fig. 4 Samples topography for mechanical performance testing

增强体。该结构对泡沫芯起到强化作用,在平拉测试中需要消耗更高的能量以拉断这些树脂柱,从而使得泡沫芯板的平拉强度显著提升。

在力学性能方面,经打孔处理的泡沫夹芯试板表现出更优的整体性能。此外,相较于打孔处理,对泡沫芯材进行刻槽处理存在加工难度大、过程复杂、生产效率低的问题。因此,对泡沫芯材进行打孔处理是更为有效的预处理方法。

3 结论

以 PMI 泡沫夹芯复合材料的 VARI 成型为研究对象,对比分析了不同泡沫芯预处理方式对树脂充模过程及固化后材料力学性能的影响,主要结论如下。

(1) 刻槽和打孔处理均可提高复合材料泡沫夹芯零件的成型效率;相较于打孔处理的泡沫芯板,无处理和单面开槽的泡沫芯板出现上、下蒙皮预制体的树脂充模时间不一致的可能性较大,更容易产生干斑、孔隙缺陷;对泡沫芯板进行打孔处理更有助于提高树脂充模质量。

(2) 对泡沫芯进行打孔和刻槽处理的泡沫夹芯板的各项力学性能均满足实际使用需求,刻槽处理更有助于提高复合材料的力学性能,但由于发生缺陷的概率更高,工艺稳定性较差。

(3) 综合考虑加工难度、内部质量及工艺稳定性,在 VARI 工艺中采用打孔的方式对泡沫夹芯进行处理,可以较好地满足航空复合材料的生产要求,是更有效的泡沫夹芯复合材料质量调控方法。

参考文献

[1] 张国庆,滕超逸. 航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2024, 44(2): 1-12.

ZHANG Guoqing, TENG Chaoyi. Current status and development trend of advanced structural materials technology in aerospace field[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(2): 1-12.

[2] 赵安安,王林文,王浩军,等. 复合材料液体成型技术的航空应用[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4): 145-150.

ZHAO Anan, WANG Linwen, WANG Haojun, et al. Application of liquid composite molding technology on aeronautics[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4): 145-150.

[3] 白娅萍,成艳娜,刘训新,等. 复材框架结构泡沫夹芯舱门制造技术[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7): 91-95.

BAI Yaping, CHENG Yanna, LIU Xunxin, et al. Manufacturing technology of foam sandwich door of composite frame structure[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 91-95.

[4] SEIBERT H F. Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures[J]. Reinforced Plastics, 2006, 50(1): 44-48.

[5] 郭俊刚,张新娟,田亦瑶,等. 复合材料液体成型技术在飞机上的应用及发展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(2): 85-91.

GUO Jungang, ZHANG Xinjuan, TIAN Yiyao, et al. Development and application of liquid composite molding technique on aircraft[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(2): 85-91.

[6] 张璇,沈真. 航空航天领域先进复合材料制造技术进展[J]. 纺织导报, 2018(S1): 72-79.

ZHANG Xuan, SHEN Zhen. Progress in manufacturing technology of composite materials in the aerospace field[J]. China Textile Leader, 2018(S1): 72-79.

[7] 刘琦,闫恩玮,田亦瑶,等. 双曲率全高度泡沫夹层复合材料胶接固化成型技术研究[J]. 粘接, 2023, 50(1): 58-61.

LIU Qi, YAN Enwei, TIAN Yiyao, et al. Research on forming technology of double-curvature full-height foam sandwich composite[J]. Adhesion, 2023, 50(1): 58-61.

[8] 贾欲明,韩全民,李巧,等. 泡沫夹层结构在飞机次承力结构中的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 52(1/2): 8-12.

JIA Yuming, HAN Quanmin, LI Qiao, et al. Application of foam sandwich structure in aircraft secondary load-carrying structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(1/2): 8-12.

[9] 孙煜,刘强,黄峰,等. VARI成型不同处理方法泡沫夹芯复合材料工艺及性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(9): 89-92.

SUN Yu, LIU Qiang, HUANG Feng, et al. Study on process and mechanical properties of the VARI forming foam-core sandwich composite by different handing methods[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(9): 89-92.

[10] WANG B, WU L Z, JIN X, et al. Experimental investigation of 3D sandwich structure with core reinforced by composite columns[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 158-165.

[11] HALIMI F, GOLZAR M, ASADI P, et al. Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(15): 1853-1863.

[12] TRUXELA, AVILÉS F, CARLSSON LA, et al. Influence of face/core interface on debond toughness of foam and balsa cored sandwich[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2006, 8(3): 237-258.

[13] 张家莹,段跃新,肇研,等. VARI成型泡沫夹芯壁板结构界面性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(1): 73-82.

ZHANG Jiaying, DUAN Yuexin, ZHAO Yan, et al. Interface properties of foam-core sandwich structures fabricated by VARI process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1): 73-82.

[14] 苏霞,闫超,李祎桑,等. 高密肋结构整体壁板VARI成型技术研究[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(4): 59-64.

SU Xia, YAN Chao, LI Yishen, et al. Research on VARI forming technology of integral wall panel with high-density rib structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53(4): 59-64.

[15] 陈斯,吴海亮,杨忠,等. 圆环夹层复合材料VARI树脂充模模拟研究[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(4): 8-15.

CHEN Si, WU Hailiang, YANG Zhong, et al. Simulation study of VARI resin filling for circular sandwich composite[J]. Fiber Composites, 2023, 40(4): 8-15.

[16] YAN C, LI Y S, SU X, et al. Resin flow analysis for the foam core sandwich spoiler by vacuum-assisted resin injection process[J]. Materials, 2022, 15(15): 5279.

[17] YAN C, XU X W, WANG T L, et al. Effect of resin pins on the failure behavior of foam core sandwich beams under three-point loading[J]. ACS Omega, 2022, 7(42): 37834-37845.

[18] 杨蕾,李天凯,谭伯杨,等. 泡沫芯材开槽打孔方式对风电叶片轻量化的影响[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(3): 44-48.

YANG Lei, LI Tiankai, TAN Boyang, et al. Influence of foam core material slotting and drilling methods on lightweight of wind turbine blades[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2024, 50(3): 44-48.

(责编 阳光)