

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.015

碳纤维复合材料真空辅助树脂灌注高立面成型工艺优化

张乐显, 张峰嘉, 陈文龙, 罗琦, 拓天可, 吴医博

(洛阳船舶材料研究所, 河南洛阳 471023)

摘要: 碳纤维复合材料因其高强度、高模量及轻量化等优势,在船舶、航空航天等领域具有广泛应用前景。然而,采用真空辅助树脂灌注(VARI)工艺在大尺寸、大厚度碳纤维复合材料高立面成型过程中易出现树脂堆积、缺胶及分层等缺陷,严重制约产品质量与成型效率。本研究从实际生产需求出发,系统研究了碳纤维表面处理方式、纤维织物铺覆方式、注胶温度及注胶管路布局等关键工艺参数对大尺寸、大厚度碳纤维复合材料VARI工艺高立面成型的影响。实验结果表明,采用乙烯基型上浆剂处理的碳纤维织物可显著提高复合材料的力学性能;在碳纤维预制体上下表面各增加1层玻璃纤维导流层,有助于改善树脂浸润效果,且力学性能损失可控;注胶温度控制在20~25℃时,可实现树脂流动与凝胶时间的最佳平衡;注胶管路间距设置为500 mm时,可兼顾注胶效率与真空密封质量。通过优化工艺参数,成功制备出高度为3 m、宽度为0.6 m的碳纤维复合材料构件,其表面无缺陷且超声检测无明显气泡。本研究为大尺寸、大厚度复杂结构碳纤维复合材料产品的VARI成型提供了可靠工艺指导,具有重要的工程应用价值。

关键词: 碳纤维复合材料;大厚度复合材料;VARI成型;注胶;工艺优化

中图分类号: TQ327.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0133-07

Optimization of high-vertical molding process for carbon fiber reinforced composites by vacuum assisted resin infusion

ZHANG Lexian, ZHANG Fengjia, CHEN Wenlong, LUO Qi, TUO Tianke, WU Yibo

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer composites have broad application prospects in fields such as ships and aerospace due to their advantages of high strength, high modulus and lightweight. However, during the vacuum assisted resin infusion (VARI) process for forming large-scale, thick composites with high-vertical surfaces, defects like resin accumulation, resin deficiency and delamination frequently occur, severely limiting product quality and molding efficiency. For practical production requirements, the effects of key process parameters including carbon fiber surface treatment methods, fabric layup techniques, infusion temperature and resin delivery pipeline layout on high-vertical molding of large-sized by VARI, thick composites were systematically investigated in this study. Experimental results indicate that carbon fabrics treated with vinyl-based sizing agents significantly enhance composite's mechanical properties. Adding a layer of glass fiber flow media on both the top and bottom surfaces of the carbon fiber preform enhances resin infiltration while the loss of mechanical properties is controllable. Controlling infusion temperature between 20–25 °C, it can achieve optimal balance between resin flow and gel time. When the spacing of the glue injection pipeline is set at 500 mm, it can simultaneously ensure the injection efficiency and the quality of vacuum sealing. Through optimized process parameters, carbon fiber composite component with a height of 3 meters and a width of 0.6 meters was successfully fabricated with a defect-free surface and no significant bubbles detected by ultrasonic testing. This study provides reliable process guidance for VARI molding of large-scale, thick-walled complex-shaped carbon fiber reinforced polymer composite products, demonstrating significant engineering application value.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer composite ; thick-walled composite ; VARI molding ; resin injection ; process optimization

通信作者: 张峰嘉, 工程师, 研究方向为复合材料液体成型工艺

收稿日期: 2026-05-01

引用格式: 张乐显, 张峰嘉, 陈文龙, 等. 碳纤维复合材料真空辅助树脂灌注高立面成型工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 133–139.

ZHANG Lexian, ZHANG Fengjia, CHEN Wenlong, et al. Optimization of high-vertical molding process for carbon fiber reinforced composites by vacuum assisted resin infusion[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 133–139.

碳纤维复合材料(CFRP)凭借其高强度、高模量、低密度、耐腐蚀、抗疲劳和减振降噪等优点^[1-2],广泛应用于能源、交通、航空航天、船舶等领域,支撑国家重大装备与基础设施建设,已成为国家发展的战略材料^[3]。而真空辅助树脂灌注(VARI)工艺作为一种复合材料液体成型的主要制造技术^[4-5],是在真空作用下,利用树脂的流动、渗透实现对纤维及其织物浸渍,并在真空下固化成型的技术,其结构尺寸适应性广、精度高、性能好、成本低及环保性能好,是目前碳纤维复合材料主要成型工艺之一。

在VARI成型工艺中,注胶温度、树脂凝胶时间、纤维织物铺层方式、导流介质、流道布置和管路切换等工艺参数直接影响注胶效果与产品质量,研究人员对此也进行了广泛研究。

注胶温度和树脂凝胶时间直接影响树脂在纤维预制体中的渗透效果与固化情况,是影响VARI工艺注胶效果和产品质量的关键因素。魏俊伟等^[6]研究了乙烯基树脂体系中促进剂含量以及温度变化对固化反应时间的影响,并根据VARI工艺实际情况,初步确定了树脂的参考固化温度和凝胶时间。Shevtsov等^[7]研究了注胶温度与树脂黏度对流动过程的影响,发现适当提升注胶温度可改善树脂在纤维预制体中的渗透情况。然而,不同树脂体系、不同纤维体系、不同构件形状等情况下,树脂的最佳注胶温度和凝胶时间不尽相同,需要结合实际情况进行分析^[8-9]。在此基础上,合理的导流介质^[10]、树脂流道设计^[11]、真空管路设计^[12]等不仅有助于避免缺胶等缺陷,还可以缩短注胶时间,提升注胶效率。Jiang等^[13]分析了不同注胶方法对树脂流动过程的影响,发现在样件上下表面中心位置注胶并通过控制压力来维持恒定注胶流量的注胶方法能有效缩短注胶时间。在纤维织物设计方面,TAPA Arnauld等^[14]用实验和数值模拟的方法研究了纤维铺层顺序对VARI工艺制造的玻璃纤维复合材料轴向压溃性能的影响,证明了合理的纤维铺层设计可以有效改善产品的力学性能。

对于碳纤维复合材料而言,由于原始碳纤维表面能低、缺乏活性官能团,与树脂结合较弱,因此除了上述影响因素外,碳纤维织物的表面处理方式^[15-17]也是影响复合材料产品成型质量的重要因素。因此,在碳纤维织物的制备过程中,通常会在其表面涂覆上浆剂,以改善其表面性能与加工性能^[18]。

在传统研究中,研究人员通常单独分析某一因素对VARI成型过程与最终复合材料产品质量的影响,但在实际的生产过程中,复合材料产品质量受多个工艺参数的共同作用^[19-20],现有研究通常综合考虑多个工艺因素进行工艺优化,探究适当的成型工艺参数,才能获得符合设计需求的复合材料产品。Yogavardhan等^[21]分析了真空压力、树脂黏度、固化温度及树脂流速等工艺参数对VARI工艺孔隙成型的影响。Kumar等^[22]研究了注胶压力、纤维铺层及树脂黏度等工艺参数对双轴向玻璃纤维复合材料成型过程的影响。然而,现有的复合材料VARI成型多因素工艺参数研究对象多为小尺寸薄壁构件,对于实际生产中常出现的大尺寸、大厚度碳纤维复合材料VARI高立面成型的工艺参数优化研究相对较少,而碳纤维相比于玻璃纤维更难渗透,同时受重力效应影响,其工艺参数设计至关重要,若设计不合理,将会导致局部树脂堆积下坠、缺胶、干斑、分层和气泡等缺陷,甚至出现树脂未充满预制体即固化的情况,导致注胶失败;此外,注胶时间越长,在固化过程前漏气风险也越大。因此,本文将通过VARI成型工艺试验优化,综合考虑碳纤维表面处理方式、纤维织物铺层设计、注胶温度及注胶管路布置等多个因素,进行合理的工艺参数设计,以实现大尺寸、大厚度碳纤维复合材料VARI工艺高立面快速高质量成型。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维织物A:T700级,面密度400 g/m²,单层厚度为0.4 mm,乙烯基型上浆剂,自制;

碳纤维织物B:T700级,面密度400 g/m²,单层厚度为0.4 mm,环氧型上浆剂,市售;

高强玻璃纤维织物:面密度230 g/m²,单层厚度为0.2 mm,南京玻璃纤维研究设计院有限公司;

乙烯基酯树脂:黏度150~300 mPa·s (25 °C),市售;

过氧化甲乙酮固化剂:荷兰阿克苏诺贝尔公司;

异辛酸钴促进剂:常州天马集团有限公司。

1.2 仪器及设备

真空泵:322001,德国ILMVAC公司;

材料力学试验机:5967,美国Instron公司;

高立面透明模具:自制。

1.3 工艺试验方法

本文采用 VARI 工艺,首先用清洁剂彻底清洁透明模具表面,并用脱模剂进行处理,然后将碳纤维织物通过定型剂铺敷在透明模具上,铺敷过程中每铺覆 10 层纤维布利用真空袋膜抽真空进行预压,每次预压 2 h 以上。铺敷完成 40 层碳纤维织物后依次铺敷脱模布、导流网、注胶管和真空管,最后进行双层真空袋膜密封,抽真空使压力稳定至 ≤ -0.090 MPa(关闭真空泵 10 min 后能保持的控制状态),如图 1 所示,进行树脂配制、消泡、注胶,目视测量树脂流动前锋位置,树脂完全充满纤维预制体后停止注胶,常温固化 48 h 以上脱模。

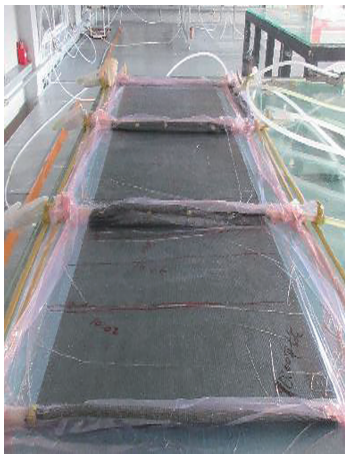


图1 碳纤维复合材料注胶工艺试验图

Fig. 1 Experimental diagram of CFRP infusion process

1.4 力学性能测试

按照 GB/T 1447-2005、GB/T 1449-2005、GB/T 30969-2014 对试样进行拉伸、弯曲、短梁剪切测试。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维表面处理优化研究

纤维增强树脂基复合材料的性能是由树脂基体、增强材料及两者界面的性能共同决定的。碳纤维复合材料的力学性能很大程度与纤维表面处理有关,目前市售的碳纤维织物表面涂覆的上浆剂类型主要适合于环氧树脂基体使用。本实验采用的树脂为乙烯基酯树脂,为了确保复合材料力学性能,采用不同类型上浆剂处理的碳纤维织物进行成型试验,在其他工艺参数完全相同情况下,研究不同上浆剂类型对碳纤维织物 VARI 成型注胶效率及力学性能影响。

碳纤维表面上浆剂对树脂流动过程的影响见表 1,可以看出,在其他工艺参数相同情况下,由于乙烯基树脂与乙烯基上浆剂具有相同的化学主链,

其化学亲和力优于乙烯基树脂与环氧型上浆剂的组合,因此在相同时间内,乙烯基上浆剂处理的碳纤维织物表层及底层树脂流动前锋距离均大于环氧型上浆剂处理的碳纤维织物,树脂在碳纤维预制体中渗透速度更快,注胶效率更高。

表1 碳纤维表面上浆剂对树脂注胶效率影响(25℃)

Tab. 1 Effect of carbon fiber surface sizing agent on resin infusion efficiency (25℃)

Item	Carbon fiber fabric A	Carbon fiber fabric B
Sizing agent	Vinyl-based	Epoxy-based
Top resin flow front (60 min)/mm	650	600
Bottom resin flow front (60 min)/mm	500	450

进一步对两种不同上浆剂织物成型的复合材料力学性能进行对比测试,测试结果见表 2,乙烯基上浆剂与乙烯基树脂的界面相容性更好,其处理的碳纤维织物成型的复合材料拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量、剪切强度均显著大于环氧型上浆剂处理的碳纤维复合材料,综合力学性能更好。因此,在乙烯基酯树脂体系下优先选择乙烯基型上浆剂处理的碳纤维织物。

表2 碳纤维表面上浆剂对复合材料力学性能影响(25℃)

Tab. 2 Effect of carbon fiber surface sizing agents on mechanical properties of composites (25℃)

Item	Carbon fiber fabric A	Carbon fiber fabric B
Sizing agent	Vinyl-based	Epoxy-based
Tensile strength/MPa	954	757
Tensile modulus/GPa	62	55
Flexural strength/MPa	750	655
Flexural modulus/GPa	56	44
Shear strength/MPa	38	22

2.2 纤维织物铺敷方式优化研究

与玻璃纤维相比,碳纤维直径小,织物中纤维堆积紧密,纤维织物的比表面积大,且碳纤维表面活性低、树脂更难浸润,因此树脂在碳纤维预成型体的渗透率更低。为改善大厚度碳纤维预制体的树脂浸润性,本文通过增加不同玻璃纤维自导流层的方式,对树脂的注胶效率和成型后的复合材料力学性能进行对比研究。

分别在碳纤维预制体上表面增加 1 层玻璃纤维织物导流层、下表面增加 1 层玻璃纤维织物导流层以及上下表面各增加一层玻璃纤维织物导流层后,对树脂流动过程的影响见表 3。

从表 3 可以看出,在碳纤维预制体上表面增加 1 层玻纤织物导流层,可以促进树脂在碳纤维预制体

表3 织物铺覆方式对树脂注胶效率影响(25℃)

Tab. 3 Effect of fabric layup method on resin infusion efficiency (25℃)

Fabric layup method	Top resin flow front (60 min)/mm	Bottom resin flow front (60 min)/mm
Pure carbon fiber	650	500
Add one layer of glass fabric to the top surface	660	500
Add one layer of glass fabric to the bottom surface	650	512
Add one layer of glass fabric to each of the top and bottom surfaces	660	526

内的流动,改善树脂对预制体上层的浸润情况,在碳纤维预制体下表面增加1层玻纤织物导流层,可以改善树脂对预制体下层的浸润情况,而在碳纤维预制体上下表面各增加1层玻璃纤维织物导流层,

则可以改善树脂对预制体整体的浸润效果。

进一步对不同织物铺覆方式成型的复合材料力学性能进行对比测试,测试结果见表4。

表4 织物铺覆方式对复合材料力学性能影响(25℃)

Tab. 4 Effect of fabric layup method on mechanical properties of composite (25℃)

Item	Pure carbon fiber	Add one layer of glass fabric to the top surface	Add one layer of glass fabric to the bottom surface	Add one layer of glass fabric to each of the top and bottom surfaces
Tensile strength/MPa	954	936	935	932
Tensile modulus/GPa	62	61	61	60
Flexural strength/MPa	750	748	749	745
Flexural modulus/GPa	56	55	55	54
Shear strength/MPa	38	38	39	38

四种织物铺覆方式成型后的复合材料力学性能几乎一致,综合考虑注胶效率及力学性能,最终选择在碳纤维预制体上下表面各增加1层玻纤维织物的铺覆方式,相比于纯碳纤维,由于玻璃纤维力学性能较弱,其成型的复合材料拉伸强度仅降低2.31%,拉伸弹性模量下降3.33%,弯曲强度下降0.67%,弯曲模量降低3.57%,剪切强度不变,在可接受范围内。

2.3 注胶温度优化研究

树脂黏度是VARI成型中的关键工艺参数,若树脂黏度太大,会导致树脂在纤维织物中流动性差,难以完全充满织物,造成缺胶、白斑和分层缺陷,导致复合材料力学性能下降。本实验使用的树脂体系为耐海洋环境性能优异的乙烯基酯树脂,其黏度较低,适用于VARI成型工艺。但由于树脂黏度会随着温度发生变化,从而引起树脂流动性的变化,本实验仍需通过不同注胶温度对注胶效率的影响研究以确定适宜的注胶温度。

为保证实验的合理性及可靠性,注胶温度选择实际生产中常用的温度,分别为15、20、25、30℃,通过控制生产中常用的固化剂比例,探究不同温度下乙烯基树脂的流动性及凝胶时间范围,实验结果见表5。从表5可以看出,随着注胶温度上升,树脂黏

度下降,其在碳纤维预制体中的流动与浸润速度变快,树脂可控的凝胶时间变短;当树脂温度过高时,在不加促进剂的情况下,凝胶时间过短、工艺窗口窄,不适合大型复合材料成型。因此,综合考虑树脂流动性与凝胶时间,大厚度大尺寸CFRP成型的注胶适宜温度确定为20~25℃。

表5 注胶温度对注胶效率的影响

Tab. 5 Effect of injection temperature on injection efficiency

Item	15℃	20℃	25℃	30℃
Top resin flow front (60 min)/mm	400	550	650	630 resin cured
Bottom resin flow front (60 min)/mm	250	420	500	520 resin cured
Adjustable gel time range/h	1-4	1-2	1-1.5	0.92

2.4 注胶管路布局优化研究

大厚度、大尺寸碳纤维复合材料成型需要梯度接力注胶,注胶工艺相比常规VARI工艺复杂度更高,因此注胶管路布局是大尺度、大厚度复合材料VARI成型的重要工艺参数。管路距离大则管路数量少,真空袋膜开口少,袋膜真空密封质量高,但管路距离过大则会使各注胶管路之间的树脂流动时间过长,易出现树脂还未流动到下一道注胶管路即凝胶的情况,导致注胶失败;若管路距离小,则管路数量多,真空袋膜开口多,袋膜真空密封的漏气风

险增大。因此,需要通过实验确定最佳的管路布局方式。本实验中,根据实际生产情况,分别设置注胶管路间距为 600、500、400、300 mm 四种方案,探究不同方案下的树脂流动情况,试验结果见表 6。

表 6 注胶管路布局对注胶效率的影响(25 °C)

Tab. 6 Effect of injection pipeline arrangement on injection efficiency (25 °C)

Item	Distance between pipeline/mm			
	600	500	400	300
Top resin flow front (60 min)	630	650	655	658
Bottom resin flow front (60 min)	480	500	503	505

从表 6 可以看出,随着注胶管路间距的缩短,树脂浸润碳纤维预制体速度加快,但注胶管路间距小于 500 mm 后,这种变化趋势变缓,如图 2 所示,这可能是由于注胶管路间距小于 500 mm 后,树脂在纤维束内的微观浸润成为影响树脂流动的主要因素,而此时的浸润速度受限于树脂浸润纤维单丝的本征物理过程,缩小注胶管路间距对其影响较小。综合考虑注胶效率和管路设置的数量等因素,管路间距确定为 500 mm。

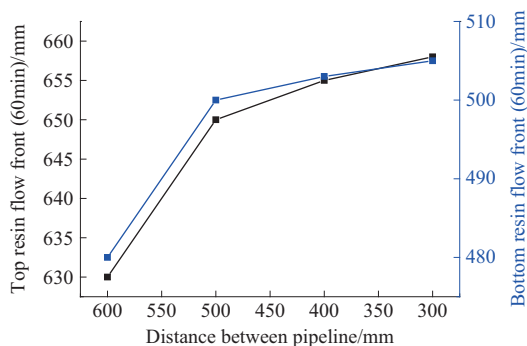


图 2 树脂流动前锋距离与管路间距变化关系图

Fig. 2 Relationship diagram between resin flow front distance and distance variation between pipeline

2.5 大尺寸、大厚度碳纤维复合材料成型验证实验

本文通过以上试验确定了大尺寸、大厚度碳纤维复合材料 VARI 成型工艺参数,即采用乙烯基型上浆剂处理的碳纤维织物,铺设 40 层,并在碳纤维预制体上下表面各铺设 1 层玻纤织物促进树脂流动,注胶管路间距设置为 500 mm,注胶温度控制在 20~25 °C,树脂凝胶时间控制在 1.5 h,采用梯度接力注胶方式完成高度为 3 m、宽度为 0.6 m 的碳纤维复合材料(试制结构为上宽下窄的梯形结构,顶部宽度为 1 m,底部宽度为 0.6 m,制品厚度 16 mm)成型,如

图 3 所示。

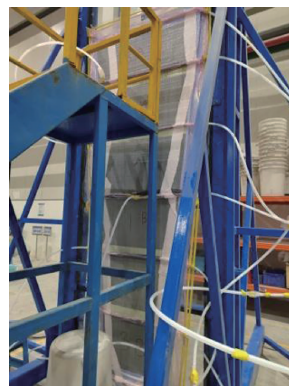


图 3 碳纤维复合材料 VARI 高立面成型过程图

Fig. 3 Process diagram for VARI high-aspect molding of CFRP

成型后的复合材料表面无缺胶、白斑和分层等缺陷,如图 4 所示,从试样顶部至底部进行超声无损检测,每间隔约 0.6 m 典型位置的无损检测如图 5 所示,成型质量良好。

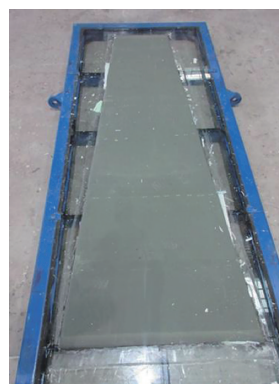


图 4 脱模后复合材料成品

Fig. 4 Composite product after demolding

最终产品的力学性能见表 7,证明了通过上述实验获得的成型工艺参数适用于大尺寸、大厚度碳纤维复合材料 VARI 成型,为后续大尺寸、大厚度复杂结构碳纤维复合材料构件的成型提供了可靠参考。

3 结论

(1)从实际生产角度出发,通过多组对照实验,系统探究了纤维表面处理方式、织物铺覆方式、注胶温度及注胶管路布局等工艺参数对大尺寸、大厚度碳纤维复合材料高立面 VARI 成型工艺的影响。

(2)实验结果表明:在乙烯基树脂体系下,经过乙烯基上浆剂处理的碳纤维织物制备出的复合材料力学性能更优异;采用在碳纤维预制体上、下表面各增加 1 层玻纤织物的铺覆方式,能够在几乎不影响产品力学性能的基础上改善树脂在纤维预制

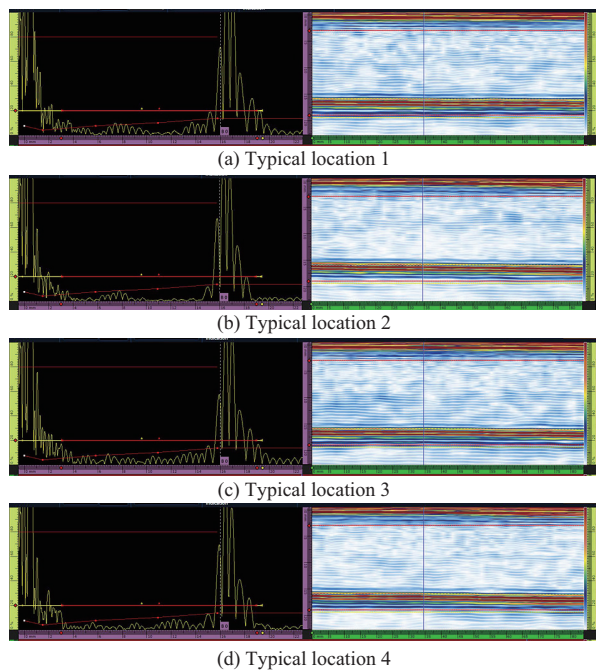


图5 超声无损检测结果

Fig. 5 Ultrasonic non-destructive testing results

表7 最终产品的力学性能

Tab. 7 The mechanical properties of the final composites part

Tensile strength/ MPa	Tensile modulus/ GPa	Flexural strength/ MPa	Flexural modulus/ GPa	Shear strength/ MPa
941	61	742	53	39

体中的浸润情况;综合考虑树脂的流动性与凝胶时间,在本文所用的乙烯基树脂体系下,大厚度大尺寸碳纤维复合材料成型的注胶适宜温度确定为20~25℃;综合考虑注胶效率、管路设置数量及真空密封等因素,大尺寸、大厚度碳纤维复合材料高立面VARI成型工艺中注胶管路间距可确定为500 mm。

(3)上述工艺参数优化后,大尺寸、大厚度碳纤维复合材料成型的最佳工艺参数组合为乙烯基上浆剂处理的碳纤维织物、上下表面各增加1层玻璃纤维织物导流、注胶温度20~25℃、注胶管路间距500 mm,通过试验验证,该工艺参数组合获得了成型质量良好的碳纤维复合材料产品,证明了上述工艺参数的合理性与可靠性,为后续大尺寸、大厚度复杂结构碳纤维复合材料产品的成型提供了有效参考依据。

参考文献

[1] 高军鹏,王婷婷,李伟东,等.高刚度混杂碳纤维复合材料的制备与性能[J].材料工程,2024,52(11):35-40.
GAO Junpeng, WANG Tingting, LI Weidong, et al. Preparation and properties of high stiffness hybrid carbon fibers composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(11):35-40.

[2] 陈文,黄哲,杨帆,等.基于国产T300级碳纤维复合材料C型肋结构成型工艺[J].高科技纤维与应用,2024,49(1):64-69.
CHEN Wen, HUANG Zhe, YANG Fan, et al. Forming process of C-shaped rib structure based on domestic T300 carbon fiber composite[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2024, 49(1):64-69.

[3] LU X, DING J C, PENG X Q, et al. A focused review of the draping process and its impact on the resin infusion in Liquid Composite Molding[J]. Thin-Walled Structures, 2024. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112362.

[4] 杨旭静,张良胜,李茂君,等.碳纤维复合材料超声振动辅助RTM工艺的浸润特性[J].复合材料学报,2021,38(12):4 161-4 171.
YANG Xujing, ZHANG Liangsheng, LI Maojun, et al. Impregnation characteristics of carbon fiber composite during ultrasonic vibration assisted RTM process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12):4 161-4 171.

[5] ZHANG F J, GUO H C, LU X, et al. A novel dielectric sensor design for identifying the direction of resin flow front in liquid composite molding[J]. Composites Communications, 2025, 53. DOI:10.1016/j.coco.2024.102241.

[6] 魏俊伟,张用兵,郭万涛. VARI用乙烯基树脂黏度特性及固化工艺研究[J].材料工程,2010(S1):149-153.
WEI Junwei, ZHANG Yongbing, GUO Wantao. Study of viscosity characteristics and curing process of vinyl ester resins in VARI[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(S1):149-153.

[7] SHEVTSOV S, ZHILYAEV I, CHANG S H, et al. Multi-criteria decision approach to design a vacuum infusion process layout providing the polymeric composite part quality[J]. Polymers, 2022, 14(2). DOI:10.3390/polym14020313.

[8] 蔡焯梦,刘宾宾,高聪.碳纤维前罩总成VARI成型工艺及其性能研究[J].合成纤维,2022,51(4):46-49, 64.
CAI Yemeng, LIU Binbin, GAO Cong. Study on VARI forming process and properties of carbon fiber front cover assembly[J]. Synthetic Fiber in China, 2022, 51(4):46-49, 64.

[9] 庄恒飞. VARI工艺纤维体积分数/厚度变化规律及控制研究[D].上海:东华大学,2015.
ZHUANG Hengfei. Study on the variation law and control of the thickness and volume fraction via VARI technology[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.

[10] 涂伟,郑贤义,赵鹏.基于VARI工艺的复合材料成型技术探讨[J].广船科技,2014,34(3):37-40.
TU Wei, ZHENG Xianyi, ZHAO Peng. Discussion on composite molding technology based on VARI process[J]. GSI Shipbuilding Technology, 2014, 34(3):37-40.

[11] 纵海,苏跃增,俞炜,等.典型曲面构件的VARI工艺模拟分析及实验验证[J].高分子材料科学与工程,2010,26(11):156-159.
ZONG Hai, SU Yuezeng, YU Wei, et al. VARI simulation of typical surface part and relevant experimental analysis[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(11):156-159.

[12] 郭绍华,张东致,冉安国,等. VARI工艺在大型曲面复合材料制

- 件上的工程化应用研究[J]. 粘接, 2017, 38(8):64–67.
- GUO Shaohua, ZHANG Dongzhi, RAN Anguo, et al. Engineering application of VARI process in manufacturing of large curve-surface composite parts[J]. Adhesion, 2017, 38(8):64–67.
- [13] JIANG Y, XU J Z, LIU M J, et al. Simulation study and optimization strategies for vacuum infusion of GFRP hoses based on resin time-viscosity variables[J]. Polymers, 2024, 16(10). DOI:10.3390/polym16101328.
- [14] TAPA Arnauld Robert, 王继辉, 王昌增, 等. 纤维铺层顺序对 VARI 工艺制备的泡沫填充 GFRP 矩形管轴向压溃性能影响的实验和数值模拟[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(9):87–97.
- ROBERT T A, WANG Jihui, WANG Changzeng, et al. Experimental and numerical analysis of the effect of stacking sequence on axial crush performance of foam-filled gfrp rectangular tubes manufactured using vari process[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(9):87–97.
- [15] 戚桂铭. 碳纤维树脂基复合材料界面改性及玻璃纤维树脂复合材料 VARI 工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- QI Guiming. Interface modifications of carbon fiber reinforced resin composite and study of VARI process of glass fiber reinforced resin composite[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [16] 张为苏, 杨常玲, 姚莉丽, 等. 炭纤维表面性质及上浆剂对炭纤维聚碳酸酯复合材料界面性能的影响[J]. 新型炭材料, 2019, 34(1):76–84.
- ZHANG Weisu, YANG Changling, YAO Lili, et al. Effect of surface properties and sizing agents on interfacial properties of carbon fiber reinforced polycarbonate composites[J]. New Carbon Materials, 2019, 34(1):76–84.
- [17] 刘佳. 碳纤维增强聚醚砜复合材料用水性上浆剂的关联性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- LIU Jia. The association research of using aqueous sizing agent on the carbon fiber reinforced polyethers sulfone composite[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [18] 赵如意. 上浆剂与碳纤维和树脂间的竞争反应及其对复合材料界面性能的影响[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.
- ZHAO Ruyi. Competitive reaction between sizing and carbon fiber with resin and its influence on interfacial properties of composite[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.
- [19] WANG X, GUO X F, LI S Q, et al. Study on the process parameters and mechanical properties of thermoplastic sandwich panels with a vacuum infusion method[J]. Polymer Composites, 2025, 46(S1):S400–S412.
- [20] OUEZGAN A, MALLIL E H, ECHAABI J. Manufacturing routes of vacuum assisted resin infusion: Numerical investigation[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(21):3 221–3 236.
- [21] YOGAVARDHAN S G N, LAVANYA K V V. Optimization of resin infusion processes in composite manufacturing: An experimental study on void formation[J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2024, 12(11):1 587–1 598.
- [22] KUMAR A, KUMAR D. Vacuum assisted resin transfer Moulding process review and variability analysis using Taguchi optimization technique[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50:1 472–1 479.