

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.011

软模辅助 RTM 工艺在三维编织复合材料制备中的应用

章宇界^{1,2}, 叶鹏华^{1,2}, 李翔宇^{1,2}, 史文锋^{1,2}, 周琳赞^{1,2}

(1. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112; 2. 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要: 三维编织复合材料因其结构的高度整体性, 具有较高的层间结合强度和抗冲击损伤能力, 在面临航天器复合材料轻量化、大承载、耐极端环境等需求时, 可通过一体化设计三维编织结构实现。然而面对具有高度整体性的复杂三维编织结构任务需求, 因合模困难, 导致此类复合材料研制难度也大大增加。针对某立体多腔体三维编织接头的研制需求, 根据其编织体编织结构特性, 提出对三维五向编织部位选用软模辅助树脂传递模塑(RTM)的工艺方法。首先介绍了软模工艺原理和整体模具结构设计, 然后对关键参数工艺间隙进行了优化, 制备了不同工艺间隙下的三维编织平板试验件, 结果表明当工艺间隙为试验件壁厚的 5% (0.4 mm)、软模膨胀压强为 2 MPa 时, 平板试验件能够实现柔性合模且具有较低的孔隙率。根据试验结果制备了三维编织接头软模并与金属芯模组集成芯模组合体, 在组合体上进行整体三维编织后成功合模注胶制得接头组件。采用工业计算机断层扫描对该接头进行内部缺陷检测, 未发现连续性孔隙或大尺寸缺陷, 同时测试了纤维体积分数和孔隙率, 两者均满足设计指标要求, 且孔隙率低至 0.74%。上述结果表明软模辅助 RTM 工艺在降低合模难度、保证制件纤维体积分数、提升制件内部质量方面具备显著优势, 适用于三维五向编织结构。

关键词: 三维编织; 软模辅助树脂传递模塑工艺; 合模; 工艺间隙; 孔隙率; 组合芯模

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0081-07

Application of soft mould assisted RTM process in preparation of three-dimensional braided composites

ZHANG Yujie^{1,2}, YE Penghua^{1,2}, LI Xiangyu^{1,2}, SHI Wenfeng^{1,2}, ZHOU Linyun^{1,2}

(1. Shanghai Composite Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aerospace Resin Based Composites, Shanghai 201112, China)

Abstract : Three-dimensional braided composites possess a highly integrated structure, resulting in superior interlaminar bonding strength and impact damage resistance. When the composites are confronted with requirements of the spacecraft composites such as lightweighting, high load-bearing capacity, extreme environment resistance, these properties can be achieved through the design of integrated 3D braided structures. However, complex three-dimensional braiding structures with high integrity can cause difficulties in mould closing, which greatly increases the difficulty of developing such composites. For the structural characteristics of the braided body of a certain three-dimensional multi-cavity braided joint, the process method of soft mould assisted resin transfer molding (RTM) was selected for three-dimensional five-directional braided parts of the joint, and the soft mould process principle and overall mould structure design were introduced. The process gap of key parameters was optimized, and three-dimensional braided flat plates were prepared under different process gaps. The results show that when the process gap is 5% of the plate thickness (0.4 mm) and the soft mould expansion pressure is 2 MPa, the three-dimensional braided flat plate can realize flexible mould closing and has low porosity. Based on the test results, a three-dimensional braided joint soft mould was prepared and assembled with metal core mould to form core mould assembly, after integral three-dimensional braiding on the assembly, the mould was successfully closed for resin injection to produce joint. Industrial computed tomography was used to detect internal defects in the joint, and no continuous pores or large-scale defects were found. Meanwhile, the fiber volume fraction and porosity were tested, both met the requirements of design specifications, with porosity as low as 0.74%. The above results show that soft mould assisted RTM

通信作者: 史文锋, 硕士, 研究员, 研究方向为复合材料结构设计与制造工艺

收稿日期: 2025-07-07

引用格式: 章宇界, 叶鹏华, 李翔宇, 等. 软模辅助 RTM 工艺在三维编织复合材料制备中的应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10):81-87.

ZHANG Yujie, YE Penghua, LI Xiangyu, et al. Application of soft mould assisted RTM process in preparation of three-dimensional braided composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10):81-87.

process has significant advantages in reducing mould closing difficulty, ensuring fiber volume fraction of the product, and improving product internal quality, and is applicable to three-dimensional five-directional braided structure.

Keywords : three-dimensional braiding ; soft mould assisted resin transfer molding ; mould closing ; process gap ; porosity ; core mould assembly

随着航天技术不断发展,碳纤维复合材料已逐渐在航天承力主结构中承担重任,如卫星中的桁架结构、承力筒结构、天线框架等。面对载人登月、建立月面基地等深空探测的任务需求,航天复合材料结构也面临轻量化、大承载、耐空间极端环境、超稳、智能化等新要求和新挑战^[1-4]。其中大承载、耐空间极端环境要求复合材料沿各方向分布的纤维相互交织在一起,不存在层间界面,从而具有很高的抗撕裂性和抗剪性,同时也不存在层间剥离问题,能满足极端恶劣的空间工作环境要求^[5],而层合复合材料在极端环境下易产生层间热应力而分层,耐疲劳性较差,不能满足以上需求。

另一方面,三维编织复合材料作为先进复合材料的代表之一^[6],从根本上克服了层合复合材料易分层的致命弱点,具有较高的层间强度和抗冲击损伤能力,这主要在于内部三维编织纱线构成了空间互锁网状结构(图1),具有高度的整体性,微小裂纹在通过纤维束之间界面时被异向纤维阻隔而不能继续扩展,具有更高的损伤容限。随着三维编织技术的发展,三维编织预成型件结构已发展为三维五向、六向、七向等结构^[7-11],主要通过增加五向纱、六向纱及七向纱,使得编织体长度、宽度、高度方向均有直纱分布,从而能进一步有效约束各个方向的形变,使得结构更趋向各向同性。三维多向编织结构因在不同编织参数下具备截然不同的力学性能,故可通过结构设计,在构件各部位采用不同的编织结构及参数,既能保证结构一体化,又可保证承载性能。然而面对具有高度整体性的复杂结构三维编

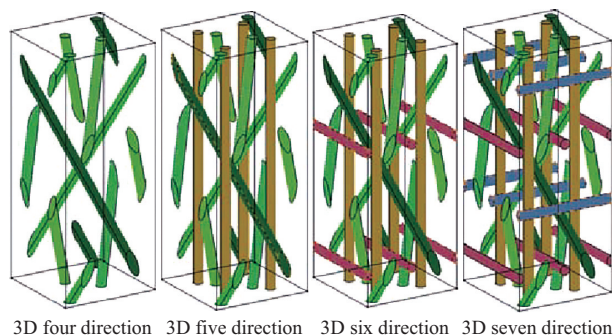


图1 三维编织结构示意图

Fig. 1 Three-dimensional braiding structure diagram

织复合材料的任务需求,该类复合材料的研制难度大大增加,这对工艺水平也提出了更高的要求。

三维编织预成型体结构一般需要通过树脂传递模塑(RTM)等工艺实现纤维集合体的浸润并固化成型。RTM采用密闭模具实现注胶,模具通常为阴阳模结构以保证成型制件的尺寸精度及表观质量。传统RTM工艺存在模具合模难度高的难题,主要是由于预成型体在自由状态下为蓬松状态,在合模时易夹料而损伤纤维,这一问题对复杂的三维编织复合材料结构件来说尤为突出,合模不到位不仅难以保证模具气密性,尺寸精度也无法达到工艺要求,且成型后一旦加工,三维编织整体结构将受到破坏,故需寻求更为先进的工艺方法并对其进行验证。

1 软模辅助RTM工艺

软模辅助RTM工艺是近年发展起来的一种改进型RTM工艺,在国内外有少量报道,如使用软模辅助RTM工艺可制备简单腔体复合材料构件^[12-16],陈博^[17]介绍了软模辅助RTM的特点,Su等^[18]介绍了软模辅助RTM的软模设计。另外,使用充气软模辅助RTM可以制备复合材料管件^[19-22]。

软模辅助RTM典型模具结构如图2所示,主要将硬质芯模改为由硬质芯模和软模组成的组合芯模,利用软模的柔软特性及增加工艺间隙来降低合模难度。软模辅助RTM工艺有以下突出优势:一是采用软模可降低模具合模难度,保证模具密封性、制件内部质量和尺寸精度;二是软模在模具加热过程中膨胀而对预成型体挤压,起到压实排气、提高制品纤维体积分数、降低孔隙率,最终提高复合材料性能的作用;三是在软模和制件之间设计了工艺间隙,待降温后软模收缩即可快速地将制件从模腔中

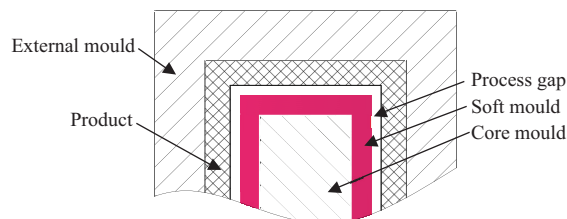


图2 软模辅助RTM模具结构示意图

Fig. 2 Mould structure diagram of soft mould assisted RTM

脱去,使得成型复杂形状的复合材料构件不再受到限制。

软模材料可选用硅橡胶,该材料具有良好的体积弹性模量和热膨胀系数,软模受热膨胀加压原理如图3所示,可分为4个阶段:①初始膨胀段(图3a),芯模受热膨胀填充工艺间隙;②加压膨胀段(图3b),芯模进一步膨胀并挤压坯料直至设计壁厚;③保温恒压段(图3c),此时芯模不再膨胀,压力保持恒定,在高温高压下进行固化;④降温卸压段(图3d),随着温度的下降,芯模收缩,压力降低直至消失。

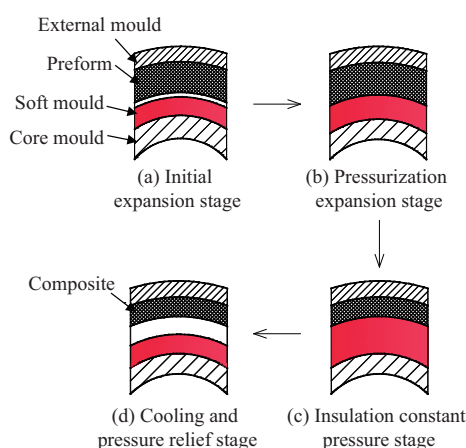


图3 软模膨胀加压原理

Fig. 3 Pressurization principle of soft mould expansion

软模尺寸设计及工艺间隙设计为软模辅助RTM工艺的关键技术,需选择合适参数以兼顾膨胀压强与预成型体合模要求。与通常的软模膨胀工艺不同,软模辅助RTM工艺的工艺间隙不宜过大,否则会导致注胶过程中树脂沿工艺间隙通道流动而不沿着壁厚方向渗透,即“走捷径”,造成大面积纤维干斑,而工艺间隙过小则影响合模。软模的膨胀压强计算原理见公式(1),可通过控制软模尺寸及工艺间隙调整软模体积,兼顾膨胀压强与合模要求。

$$P = K \frac{[(1 + C\Delta T)^3 - 1]V_1 - V_0}{V_0} \quad (1)$$

式中: P 为体积膨胀压强; K 为体积弹性模量; C 为软模材料热膨胀系数; ΔT 为树脂凝胶温度与软模浇注温度的差值; V_1 为软模浇注体积; V_0 为产品型腔体积。

目前,从软模辅助RTM工艺公开的报道来看,对应制件结构一般为单腔体或近平面构型,且预成型体为铺层预成型件,未见立体多腔三维编织预成

型体的RTM工艺技术,故须展开三维编织结构对软模辅助RTM工艺适用性的应用研究。

2 模具结构设计

2.1 制件结构及性能要求

图4为某立体多腔体三维编织接头(以下简称“三维编织接头”)的结构尺寸示意图,其共有5个腔体(主体+4个支管),空间最大包络尺寸为450 mm×450 mm×550 mm,支管壁厚为4 mm和8 mm,主体及法兰部位壁厚为8 mm,设计质量为5.75 kg。制件整体材料为CCF800H/TDE-85[#]碳纤维三维编织增强环氧复合材料,根据承载需要,设计方将主体及法兰部位设计为三维六向编织结构,将支管部位设计为三维五向编织结构,同时要求主体三维六向编织结构中的部分纱线穿插于支管三维五向编织结构中,实现整体结构的网状交联。三维编织接头的纤维体积分数要求为50%±5%,孔隙率≤3%,且制件内部不得存在连续性孔隙或大尺寸缺陷。

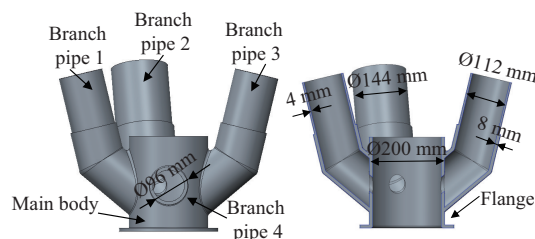


图4 立体多腔体三维编织接头示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three-dimensional braided multi-cavity joint

2.2 制件结构分析及模具方案

三维编织接头预成型体在编织完成后为蓬松状态,若整体均采用“硬质芯模+硬质外模”的模具结构,外模拼块间会产生挤料现象,不仅破坏纤维连续性,而且影响合模,故软模辅助RTM工艺成为首选。考虑到主体为三维六向编织结构,在其环向有六向直纱分布(图5),直纱在编织体内部基本伸

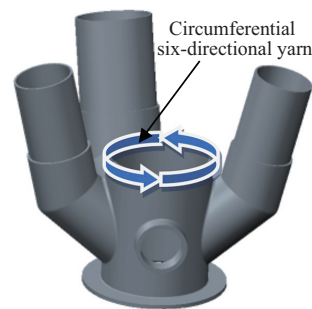


图5 环向六向纱分布

Fig. 5 Circumferential six-directional yarn distribution

直,会约束软模受热膨胀,从而使软模难以将主体坯料压实。而支管为三维五向结构,环向无直纱,软模受热膨胀约束阻力小,更适合采用软模加压工艺。综上分析,拟采用支管部位为“硬质芯模+硅橡胶软模”组成的组合芯模、主体及法兰为硬质金属芯模的总体芯模方案。

2.3 模具结构

芯模整体结构设计如图6所示,其中支管1至支管3因带有折角,直接采用一体金属芯模难以脱模,故对金属芯模在折角位置进行分段,并将分段后折角内侧的金属芯模设计为外侧包覆可溶性材料的金属芯模,脱模时将可溶性材料去除后即可将内侧金属芯模抽出。对于可溶性材料,采用上海力诺建筑装饰材料公司生产的工业石膏;对于软模采用湖北航聚科技股份有限公司生产的E650双组份液体硅橡胶,其线膨胀系数为 $2.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,体膨胀系数为 $6.9 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,体积弹性模量为270 MPa,邵氏硬度为50。

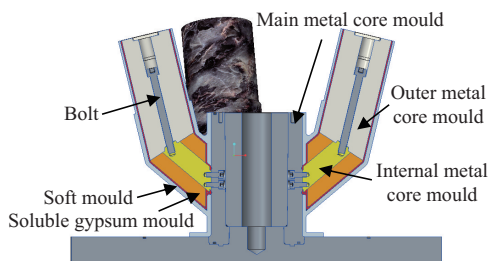


图6 整体芯模示意图

Fig. 6 Schematic diagram of overall core mould

外模结构如图7所示,由拼块、盖板、底板组成整体外箍框,密封框上下端面设置有密封槽,密封胶条与盖板、底板压紧后,即可实现模具整体密封。拼块间设置密封槽、密封胶条以实现区域密封,防止注胶时树脂“走捷径”。图8为注胶过程仿真优化,图中红色部位表示注胶过程中树脂已通过且已经注透的区域,绿色代表当前树脂注胶位置,蓝色

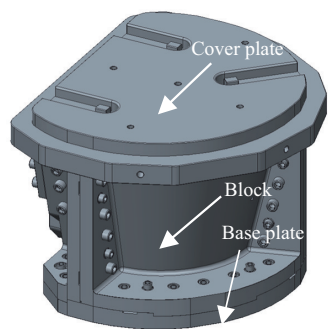


图7 整体外模示意图

Fig. 7 Schematic diagram of overall external mould

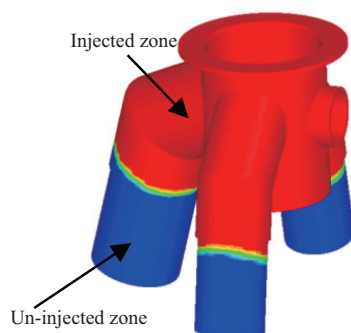


图8 注胶过程仿真

Fig. 8 Resin injection process simulation

表示树脂尚未通过的区域。通过仿真优化,确保不存在注胶路径薄弱点后,外模设计完成。

3 软模尺寸与工艺间隙优化试验

3.1 主要原材料

环氧树脂:TDE-85[#],天津晶东化学复合材料有限公司;

固化剂:甲基四氢苯酐,上海鼎晨环保科技有限公司;

促进剂:二甲氨基甲基苯酚,上海华谊树脂有限公司;

碳纤维:CCF800H 2-12K,威海拓展纤维有限公司。

3.2 主要仪器及设备

注胶机:自制;

组合式行列编织机:天津工大航泰复合材料科技有限公司;

电热鼓风干燥箱:106,上海航天设备制造总厂有限公司;

理化干燥箱:LG150,上海源正试验仪器有限公司;

恒温水浴装置:CS501,上海博讯医疗生物仪器有限公司;

分析电子天平:FA1004,上海良平仪器仪表有限公司;

循环水式多用真空泵:SHB-III,天津市赛得利斯试验分析仪器制造厂。

3.3 平板试验

复合材料软模膨胀工艺中的压强设计值一般取0.5~2 MPa,工艺间隙一般取壁厚的5%~20%。RTM注胶工艺中工艺间隙偏大会导致树脂“走捷径”而无法浸透预制体,造成孔隙率高,故软模辅助RTM的工艺间隙需要控制在较低范围内,同时考虑

到支管的壁厚最厚位置达到8 mm,需要更高的膨胀压强保证压实坯料,故选择2 MPa作为膨胀压强,其中 $\Delta T=115\text{ }^{\circ}\text{C}$ (通过树脂凝胶温度与软模浇注温度差值得到)。工艺间隙需通过试验进行确定,试验采用三维五向编织平板进行验证,分别从合模难度和孔隙率等方面进行评价。图9为三维编织平板的模具结构图,其中平板理论厚度为8 mm,与三维编织接头的支管最厚部位厚度相同,分别按壁厚的5%~10%给出工艺间隙(见表1),同时保证约2 MPa的膨胀压强,得到硅橡胶软模尺寸见表1。

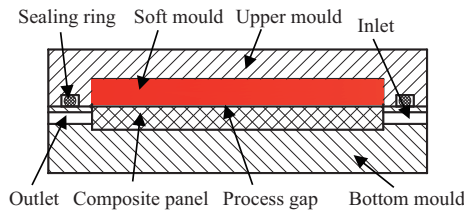


图9 平板模具结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of flat mould structure

表1 不同平板壁厚比例的工艺间隙、软模厚度和膨胀压强

Tab. 1 Process gaps, soft mould thickness, and expansion pressure with different proportions of flat plate wall thickness

Items	Proportion of flat plate wall thickness/%					
	5	6	7	8	9	10
Process gap/mm	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80
Thickness/mm	4.37	5.24	6.11	6.99	7.86	8.73
Pressure/MPa	2.03	2.01	2.00	2.02	2.01	2.00

按表1制备不同厚度与工艺间隙的E650硅橡胶片材,并编织三维五向平板编织体(编织参数与三维编织接头支管相同)进行合模和注胶试验,其中编织体主要编织参数为花节长度5 mm、花节宽度3.6 mm。

将三维五向平板编织体放入平板模具中进行合模,模具经气密性检测合格后置于70 °C电热鼓风干燥箱中,同时进行胶液配制,将TDE-85[#]环氧树脂、甲基四氢苯酚、二甲氨基甲基苯酚按质量比100:140:1混合并真空脱泡处理后放置于70 °C电热鼓风干燥箱中。待模具温度与树脂温度均达到70 °C后开始RTM注胶并升温至135 °C保温5 h固化。脱模后,放置于150 °C电热鼓风干燥箱中后处理3 h,最后按JC/T 287-2010测试各平板的孔隙率。

表2统计了不同工艺间隙下编织体的合模难度和制品孔隙率测试数据,在工艺间隙为平板壁厚的5%~8% (0.4~0.64 mm)的情况下,能够实现合模且孔隙率低于3%,且当工艺间隙控制在壁厚的5% (0.4 mm)时,孔隙率最低,平板表面观饱满无贫胶,如图

10a所示;而在工艺间隙达到壁厚的9% (0.72 mm)以上时,虽能轻松合模,但平板的孔隙率大于3%,且平板表面存在肉眼可见的贫胶,如图10b所示。

表2 合模难度与孔隙率评价

Tab. 2 Mould closing difficulty and porosity evaluation

Items	Process gap/mm					
	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80
Mould closing difficulty	Slightly difficult	Medium	Easy	Easy	Easy	Easy
Porosity/%	0.51	0.97	2.16	2.95	3.37	3.61



(a) Low process gap (0.4 mm)

(b) High process gap (0.8 mm)

图10 高、低工艺间隙下三维编织平板的表面状态

Fig. 10 Surface conditions of three-dimensional braided flat plates under high and low process gaps

3.4 接头软模尺寸与工艺间隙确定

根据3.3的试验结果,选择最大壁厚的5%即0.4 mm作为三维编织接头的软模工艺间隙,通过修正软模的内外径并保证膨胀压强约为2 MPa,最终得到软模的内外径尺寸见表3。

表3 软模尺寸

Tab. 3 Soft mould dimensions

Items	Branch pipe 1	Branch pipe 2	Branch pipe 3	Branch pipe 4
Inner diameter/mm	94.0	126.1	94.0	69.9
Outer diameter/mm	103.2	135.6	103.2	79.2

4 三维编织接头制备

根据表3的尺寸使用E650液体硅橡胶制备软模并组装芯模组合体,在芯模组合体上进行整体编织,编织后的状态如图11所示,对三维编织接头预成型体末端进行适量修剪后,依次将外模拼块组装至编织体上进行装模(图12),并使用天津市天锻压力机有限公司的315T型液压机辅助合模,发现合模过程中未发生夹料现象,且合模间隙优于0.1 mm。

与平板编织体相同,在整体模具经气密性检测合格后进行模具预热、树脂配胶、真空脱泡和树脂预热等工序,然后开始注胶。注胶时采用了分布式出胶策略:首先在真空负压-0.1 MPa条件下逐步排出内部大气泡,待大气泡排尽后再采取逐级加压法



图11 三维编织接头预成型体

Fig. 11 Three-dimensional braided joint preform

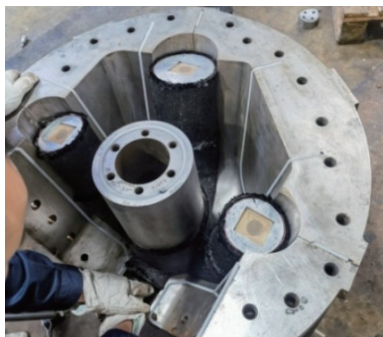


图12 装模过程

Fig. 12 Mould assembling process

加压至 0.6 MPa 进一步压缩并排出小气泡,待各出口不再有连续性小气泡排出后结束注胶,但仍保持注胶压力 0.6 MPa 以防内部气泡扩大直至固化结束,最后在电热鼓风干燥箱中完成升温固化,其固化参数同编织体平板。

固化结束将制品外模脱去,取出支管中外侧金属芯模,再将石膏溶解去除并取出内侧金属芯模,最后取出硅橡胶软模并脱去主体段金属芯模,脱模后的制件状态如图 13 所示,可以看出制件整体外观饱满无贫胶现象,制件壁厚及型面精度均达到预期要求。



图13 实际成型的三维编织接头

Fig. 13 Three-dimensional braided joint under practical molding

5 接头内部质量检测

5.1 内部缺陷检测

采用德国 YXLON 公司的 Y. CT. Modular 计算机断层扫描(CT)设备对三维编织接头内部质量进行

CT检测,如图 14 所示。图 14 右下位置为三维重建后的 3D 产品示意图,其余三视图为空间坐标上的截面视图。通过调整 X, Y, Z 坐标值可对重构的模型内部质量进行可视化观察以发现异常部位。经筛选分析,未发现三维编织接头内部存在连续性孔隙或大尺寸缺陷,制件密度分布均匀,说明注胶充分、成型质量良好,软模设计和注胶工艺参数设计合理。



图14 三维编织接头CT检测

Fig. 14 CT inspection of three-dimensional braided joint

5.2 性能测试

将支管 1 至支管 4 端部取样并按 GB/T 3855-2005 及 JC/T 287-2010 测试制件的纤维体积分数及孔隙率,测试设备及条件同平板试验件,结果见表 4。由表 4 看出,各项数据均满足设计指标要求,且孔隙率低至 0.74%,已达到热压罐加压固化类复合材料件的水平,这也进一步印证软模辅助 RTM 工艺在三维编织复合材料结构件制造方面的显著优势,可满足兼顾较高纤维体积分数和低孔隙率的制造要求。

表4 三维编织接头的纤维体积分数及孔隙率

Tab. 4 Fiber volume fraction and porosity of three-dimensional braided joint

Items	Branch pipe 1	Branch pipe 2	Branch pipe 3	Branch pipe 4	Average
Fiber volume fraction/%	51.15	52.16	51.12	50.95	51.35
Porosity/%	0.91	0.55	0.87	0.62	0.74

6 结论

通过选用软模辅助 RTM 工艺对某立体多腔体三维编织接头进行研制,分别介绍了软模工艺原理和整体模具结构设计,对关键参数工艺间隙进行了优化,制备了不同工艺间隙下的三维编织平板试验件,并根据工艺间隙试验结果和编织结构体的编织特性,设计了三维五向编织支管对应的软模,成功制备了三维编织接头,实现了厚壁立体多腔体三维编织复合材料制件的高质量制造。制件内部成型质量及尺寸精度均符合预期,达到了柔性合模、低

孔隙率制造的目的。由此得到的结论如下。

(1)软模辅助RTM工艺对三维五向编织结构的适用性良好,不仅可降低合模难度,且能够实现膨胀加压,符合制件的高纤维体积分数及低孔隙率制造标准。

(2)软模辅助RTM工艺中,软模的工艺间隙设计较为关键,当软模的工艺间隙为制件最大壁厚的5% (0.4 mm)、膨胀压强约为2 MPa时,可以保证良好的成型质量。

参考文献

- [1] 石文静,高峰,柴洪友.复合材料在航天器结构中的应用与展望[J].宇航材料工艺,2019,49(4):1-6.
SHI Wenjing, GAO Feng, CHAI Hongyou. Application and expectation of composite in spacecraft structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(4):1-6.
- [2] 王恒生,程艳婷.复合材料在航天领域中的研究与应用进展[J].化工科技,2013,21(2):67-70.
WANG Hengsheng, CHENG Yanting. Advance on research and application of the composite materials in the aerospace engineering [J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2013, 21(2): 67-70.
- [3] 冯志海,李俊宁,田跃龙,等.航天先进复合材料研究进展[J].复合材料学报,2022,39(9):4 187-4 195.
FENG Zhihai, LI Junning, TIAN Yuelong, et al. Research progress of advanced composite materials for aerospace applications[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9):4 187-4 195.
- [4] 章令晖,周宏志,李明珠,等.航天复合材料技术述评[J].高科技纤维与应用,2015,40(3):22-28.
ZHANG Linghui, ZHOU Hongzhi, LI Mingzhu, et al. Review of aerospace composite technology[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2015, 40(3):22-28.
- [5] 郝新超,胡杰.三维编织技术在航空航天中的应用[J].中国科技信息,2019(21):25-26.
HAO Shichao, HU Jie. Application of three-dimensional weaving technology in aerospace[J]. China Science and Technology Information, 2019(21):25-26.
- [6] 曾涛,姜黎黎.三维编织复合材料力学性能研究进展[J].哈尔滨理工大学学报,2011,16(1):34-41,47.
ZENG Tao, JIANG Lili. Development of investigation into mechanical properties of 3D braided composites[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(1):34-41, 47.
- [7] 张昌贺,杜宇.三维编织技术发展现状及其复合材料的应用[J].纺织器材,2024,51(5):61-67,72.
ZHANG Changhe, DU Yu. Development status of three-dimensional braiding technology and application of its composite materials[J]. Textile Accessories, 2024, 51(5):61-67, 72.
- [8] 李金超,张一帆,孙菲,等.三维五向编织复合材料的力学性能分析I:细观结构模型[J].复合材料学报,2009,26(1):150-155.
LI Jinchao, ZHANG Yifan, SUN Fei, et al. Mechanics analysis of three-dimensional five-directional braided composites I : Micro-structural model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(1): 150-155.
- [9] 李典森,卢子兴,陈利,等.三维六向编织复合材料弹性性能理论预测[J].复合材料学报,2006,23(4):112-118.
LI Diansen, LU Zixing, CHEN Li, et al. Theoretical prediction of the elastic properties of three-dimensional and six-directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23 (4):112-118.
- [10] 卢子兴,夏彪,王成禹.三维六向编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测[J].复合材料学报,2013,30(5):166-173.
LU Zixing, XIA Biao, WANG Chengyu. Progressive damage simulation and strength prediction of three-dimensional and six-directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5):166-173.
- [11] 唐驹.三维七向编织复合材料细观结构与力学性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
TANG Ju. Research on micro structure and mechanical properties of 3D&7D braid composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [12] 刘钧,尹昌平,曾竟成,等.软模/真空辅助RTM工艺用模具设计与制备[J].玻璃钢/复合材料,2004(5):33-35.
LIU Jun, YIN Changping, ZENG Jingcheng, et al. Mould design and fabrication for resin transfer molding assisted by flexible mould and vacuum[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2004 (5):33-35.
- [13] 曾竟成,尹昌平,刘钧.软模辅助RTM成型舱段构件及其性能研究[J].材料工程,2006,34(6):28-32.
ZENG Jingcheng, YIN Changping, LIU Jun. Fabrication of the cabin component by flexible-mould assisted RTM process and its performance[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, 34(6): 28-32.
- [14] 肖加余,曾竟成,江大志.航天主结构复合材料及其软模辅助RTM成型工艺[J].航天返回与遥感,2007,28(2):49-52,64.
XIAO Jiayu, ZENG Jingcheng, JIANG Dazhi. Composite structures for aerospace industry and its fabrication with rubber assisted resin transfer molding[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(2):49-52, 64.
- [15] 杜刚,肖加余,曾竟成,等.软模辅助RTM工艺整体制备复合材料推力筒技术[J].复合材料学报,2007,24(4):46-50.
DU Gang, XIAO Jiayu, ZENG Jingcheng, et al. Fabricating composite thrust cylinder integrally by thermal expansion mould assisted RTM process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4):46-50.
- [16] LEGRAND M, PHAM NGOC Q A. A study of the feasibility of a monoblock racing motorcycle rim[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(3):453-458.

(下转第115页)