

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.011

CCF/PEEK 锥管过棱铺丝轨迹光顺化调控及对铺放质量的影响

林因之^{1,2}, 李军利^{1,2}, 刘雯婷^{1,2}, 赵子航^{1,2}, 吴建华³, 张振江⁴, 刘钢^{1,2}(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 机械工业航空大型复杂薄壁构件智能制造技术重点实验室, 上海 201620;
3. 中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所, 西安 710089; 4. 山东中航和辉航空标准件有限责任公司, 济南 250101)

摘要: 连续碳纤维增强聚醚醚酮(CCF/PEEK)复合材料在轻量化结构制造领域具有重要应用潜力。针对 CCF/PEEK 锥管构件过棱区域自动铺丝过程中, 因路径与姿态不光顺引起的铺放缺陷及成形质量问题, 提出一种保真约束下的路径-姿态协同调控方法。该方法在尽量保持设计意图和姿态几何含义的前提下, 采用局部高斯加权法对过渡圆角区域的路径与姿态进行光顺化, 并对过棱边界附近进行二次平滑处理, 最终得到整体光顺轨迹。在相同材料、模具及工艺参数条件下, 对调控前后多层试样开展几何评价、宏观缺陷对比及成形质量分析。结果表明, 调控后的轨迹满足保真度需求; 路径转向、法向和扭转峰值变化率分别下降 18.44%、6.33% 和 1.22%。调控组过棱区域的间隙、重叠、面外褶皱和面内波纹均较基准组减轻。调控后试样厚度标准差和最大厚度差分别下降 13.58% 和 20.00%, 轴向和周向孔隙率分别下降 11.33% 和 10.84%。机理分析表明, 该方法通过改善过棱区域路径转向分配、减弱局部异常扭转并提高局部热压状态稳定性, 降低了过棱区域宏观缺陷和内部孔隙水平, 提高了多层铺放试样截面厚度均匀性。

关键词: 热塑性复合材料; 碳纤维; 聚醚醚酮; 自动铺放; 过棱区域; 铺放质量

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0092-09

Trajectory smoothing regulation for automated fiber placement in corner-transition region of CCF/PEEK tapered tubular components and its effect on layup quality

LIN Yinzhì^{1,2}, LI Junli^{1,2}, LIU Wenting^{1,2}, ZHAO Zihang^{1,2}, WU Jianhua³, ZHANG Zhenjiang⁴, LIU Gang^{1,2}(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Large Complex Thin-Walled Components of Aviation in Machinery Industry, Shanghai 201620, China;
3. AVIC Xi'an Aircraft Design and Research Institute, Xi'an 710089, China;
4. Shandong AVIC Hehui Aviation Standard Parts Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract : Continuous carbon fiber-reinforced polyether-ether-ketone (CCF/PEEK) composites have important application potential in the field of lightweight structure manufacturing. To address layup defects and forming-quality problems caused by unsmooth path and pose transitions during automated fiber placement in the corner-transition region of CCF/PEEK tapered tubular components, a path-pose collaborative regulation method under fidelity constraints was proposed. While preserving the design intent and the geometric meaning of the pose as much as possible, local Gaussian weighting method was used to smooth the path and pose in the corner-transition region. Secondary smoothing was further applied near the boundaries of the corner-transition region, and an overall smooth trajectory was finally obtained. Under the same conditions of materials, molds and process parameters, geometric evaluation, macroscopic defect comparison and forming-quality analysis of multilayer specimens were conducted before and after regulation. The results show that the regulated trajectory satisfies the fidelity requirements. The peak rates in path turning, normal direction and torsion are decreased by 18.44%, 6.33% and 1.22%, respectively. Compared with the baseline group, the adjusted group exhibits reduced gaps, overlaps, out-of-plane wrinkles and in-plane waviness in the corner-transition region. After regulation, the thickness standard deviation and maximum thickness difference of samples are decreased by 13.58% and 20.00%, respectively, while the axial and circumferential void contents are decreased by 11.33% and 10.84%, respectively. Mechanistic analysis indicates

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275449)

通信作者: 李军利, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为碳纤维复材自动铺放等

收稿日期: 2026-05-09

引用格式: 林因之, 李军利, 刘雯婷, 等. CCF/PEEK 锥管过棱铺丝轨迹光顺化调控及对铺放质量的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 92-100.

LIN Yinzhì, LI Junli, LIU Wenting, et al. Trajectory smoothing regulation for automated fiber placement in corner-transition region of CCF/PEEK tapered tubular components and its effect on layup quality[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 92-100.

that the method reduces macroscopic defects and internal void levels and improves the cross-sectional thickness uniformity of multi-layer placed specimens by improving path-turning distribution in the corner-transition region, mitigating local abnormal torsion and enhancing the stability of local thermal-compaction conditions.

Keywords : thermoplastic composite ; carbon fiber ; polyether-ether-ketone ; automated fiber placement ; corner-transition region ; layup quality

连续纤维增强热塑性复合材料具有可焊接、可修复、成型周期短和适于原位固结等特点,在轻量化结构制造领域具有良好的应用前景,其中连续碳纤维增强聚醚醚酮(CCF/PEEK)兼具碳纤维的高比强度、高比刚度和聚醚醚酮树脂的耐高温、耐化学腐蚀,是热塑性复合材料自动铺放成形中的典型材料体系^[1-3]。自动铺放技术能够实现预浸带在复杂表面上的连续高效铺放,是热塑性复合材料成形的重要方式。由于热塑性自动铺放过程伴随局部加热、压实和快速冷却,铺放质量对轨迹、姿态及工艺参数匹配关系较为敏感^[4-8]。

围绕热塑性复合材料自动铺放,现有研究主要集中在工艺参数、层间结合及铺放尺寸变化等方面。部分研究表明,铺放温度、速度和压实力会影响材料的界面结合质量和热历史,进而影响层间质量和成形稳定性^[9-13]。此外,工艺参数还会改变丝束或带材的铺放宽度、厚度等尺寸特征^[14-16]。Çelik 等^[11]研究了工艺参数对层间紧密接触发展的影响,指出紧密接触形成与挤压流动和树脂沿厚度方向的渗流行为有关;刘丰玮等^[12]则讨论了压实力对 CCF/PEEK 原位固结层间质量的影响机制,认为压实力通过改变层间接触状态和热传递过程影响层间质量;包蒙哲等^[14]研究了工艺参数对 CCCF/PEEK 预浸料单束铺放尺寸的影响。在路径与缺陷方面,已有研究表明,转向铺放会影响带材或丝束的宽度、厚度及缺陷,并可能诱发间隙、重叠、褶皱和局部变形等问题^[17-20]。Rajasekaran 等^[17]围绕热塑性带材转向铺放开展了研究,指出转向半径和铺放速度会影响带材尺寸变化和缺陷形成。Fereidouni 等^[18]对热塑自动纤维铺放(AFP)缺陷进行了系统总结,指出热塑体系中的缺陷除传统因素外,还受到材料自身状态、设备特性及热-力耦合过程共同影响;其中,转向铺放会进一步增加局部缺陷形成的复杂性。此外,Kheradpisheh 等^[19]从微观力学角度分析了自动铺放过程中的面内和面外变形特征,为理解局部波纹和褶皱缺陷提供了参考。

已有研究对热塑性复合材料自动铺放中影响铺放质量的因素和机理进行了广泛且深入的研究,为后续研究提供了宝贵参考,本文在现有研究基础上,针对锥管类构件过棱区域这一局部高风险区段展开研究。原始轨迹规划通常更关注局部铺层角度与理论轨迹的吻合,而对路径与姿态的光顺过渡考虑不足,易导致路径转向变化分配不合理和法向过渡不光顺,进而引起铺放头和丝束的局部扭转扰动,最终诱发一系列缺陷问题,影响铺放质量。基于此,本文以 CCF/PEEK 锥管过棱区域自动铺放为对象,对路径-姿态优化方法展开研究,并通过几何评价、宏观铺放缺陷及截面成形质量分析,验证路径-姿态优化方法对铺放质量改善的作用,并分析其影响机理。研究结果可为热塑性复合材料局部几何变化集中区段的自动铺放质量控制提供参考。

1 过棱区域路径-姿态优化方法

1.1 过棱区域路径-姿态不光顺问题

在前期实际铺放中发现,过棱区域较易出现多种宏观缺陷,并伴随路径转向不均匀以及铺放头局部异常扭转现象。这表明,过棱区域的成形质量不仅与材料和工艺参数有关,也与铺放路径和姿态的局部变化方式密切相关。图1为过棱区域路径-姿

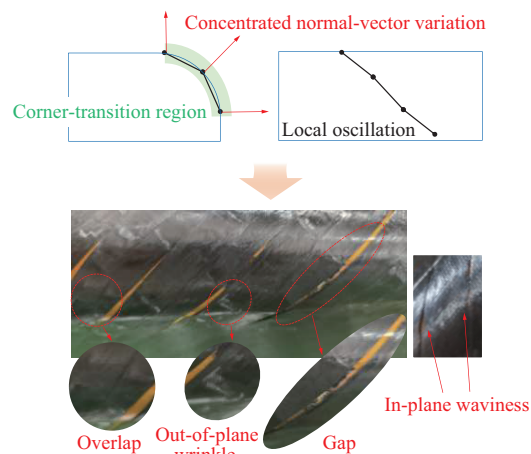


图1 过棱区域路径-姿态异常及典型缺陷示意图

Fig. 1 Schematic illustration of trajectory-pose anomalies and typical defects in corner-transition region

态异常及典型缺陷示意图。

原始轨迹设计通常更关注铺层角度,而对路径与姿态的光顺过渡考虑不足。路径方面主要表现为转向分配不合理,或存在与整体转向趋势不同的局部摆动;姿态方面,为有效压实丝束,压辊法向需与曲面法向保持基本一致。但原始轨迹法向多取自离散面片法向,相邻点之间的法向过渡未被重点考虑,易发生姿态跳变以及局部摆动。路径与姿态两类不光顺问题叠加后,易使铺放头和丝束在过棱区域产生局部扭转,破坏丝束的连续贴合和稳定压实,影响铺放质量。因此,在满足设计要求和法向保真的前提下提高路径-姿态光顺性,是改善过棱区域铺放质量的关键。

1.2 保真约束下的路径-姿态协同调控

常规轨迹光顺方法主要包括路径优化、姿态插

值、路径姿态同步光顺。若仅对路径进行处理,虽然可以改善路径变化连续性,但铺放头姿态未同步修正,造成路径与姿态不匹配,导致压辊受力轴线偏离实际型面法向,影响铺放质量;姿态插值或法向光顺方法虽然可以改善姿态变化,但无法解决路径不光顺问题。若在无保真约束下同时对路径和姿态进行光顺,虽然能获得平滑效果,但处理结果可能偏离原始设计轨迹,使姿态偏离实际型面法向,影响铺放质量。基于此,本文提出一种保真约束下的路径-姿态协同调控方法,在同一局部邻域内对路径和法向进行协同调控,并施加路径和法向保真约束,以在保持设计轨迹和法向几何含义的前提下改善过棱区域路径-姿态连续性。几种方法对比见表1。

表1 轨迹优化方法对比

Tab. 1 Comparison of trajectory optimization methods

Method	Object	Advantage	Limitation
Path smoothing	Path	Improves path continuity	Path-pose mismatch
Pose smoothing	Pose	Improves pose continuity	Limited effect on gaps/overlaps
Unconstrained path-pose smoothing	Path and pose	Stronger smoothing effect	Path and normal deviation
Proposed method	Path and pose	Path-pose continuity under fidelity constraints	Parameters depend on material and geometry

设原始轨迹点为 p_i^0 ,原始法向为 n_i^0 ,调控后结果分别为 p_i 和 n_i ,则约束条件见式(1)和式(2)。

$$\|p_i - p_i^0\| \leq \varepsilon_p \quad (1)$$

$$\angle(n_i, n_i^0) \leq \varepsilon_n \quad (2)$$

式中: ε_p 为路径保真容差; ε_n 为法向保真容差。

本文采用宽度为12.7 mm的CCF/PEEK预浸带。原始轨迹为设计中心轨迹,并通过等距偏移形成整层铺放轨迹,因此轨迹点位置不仅影响单条路径光顺性,也影响相邻丝束之间的间隙和重叠关系。若路径调整幅度过大,会破坏原始等距关系,增加局部间隙和重叠风险;若调整幅度过小,则难以有效改善路径姿态不光顺问题。综合考虑轨迹保真性和连续性改善需求,将路径保真容差取为预浸带宽度的10%,即 $\varepsilon_p=1.27$ mm。

法向保真容差用于限制姿态处理后压辊压实方向相对原始曲面法向的偏离。法向量具有明确的几何含义,若进行无约束平滑,可能使其偏离真实曲面法向,削弱压辊压实方向与模具表面的匹配关系。当法向偏角增大时,有效法向压实力降低,并可能引入附加切向作用,增加丝束滑移、扭曲和局部压实不稳定风险。结合前期铺放经验,5°偏差未引起明显额外铺放缺陷,且 $\cos(5^\circ)\approx 0.996$,有效法

向压实力损失较小。因此,本文取法向保真容差 $\varepsilon_n=5^\circ$ 。本文旨在提供一种有效的轨迹优化方法,并分析其对铺放质量的影响,最优参数的获取将在后续工作中进一步研究。

输入原始离散轨迹后,首先建立局部姿态坐标系。第 i 个轨迹点处轨迹切向 t_i 定义见式(3)。

$$t_i = \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{\|p_{i+1} - p_{i-1}\|} \quad (3)$$

局部横向方向由法向 n_i 与切向 t_i 叉乘归一化得到,对应压辊轴向。由此可构成以切向、横向和法向为基向量的局部姿态坐标系,用于统一表征路径转向、法向变化和局部扭转。

过棱区域根据法向变化集中程度判定,并对区段首尾适当延伸,以保证进入和离开过棱区时过渡自然。对于本文锥管模具,除过棱区域外,其余区域为平面,可将法向开始连续变化的位置作为过棱区域的边界。对于其他含棱边模具,可根据几何变化尺度设定法向变化量阈值进行判定。未识别为过棱区域的部分保持原始形状插补,识别出的过棱区域则进行路径-姿态协同调控。

对于识别出的过棱区域,采用局部高斯加权方式对路径和法向进行处理。设轨迹点 i 的局部邻域

为 $[i-h, i+h]$, 则路径候选值 $\tilde{p}_i$ 表示见式(4)。

$$\tilde{p}_i = \frac{\sum_{j=i-h}^{i+h} w_{ij} p_j}{\sum_{j=i-h}^{i+h} w_{ij}} \quad (4)$$

式中: w_{ij} 为邻域权重,取高斯形式,见式(5)。

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{(j-i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中: h 为邻域半宽, σ 为高斯尺度参数。 j 为第 i 个轨迹点局部邻域内各轨迹点的索引,例: $h=3, j=i-3, i-2, \dots, i+2, i+3$ 。

本文在实验中采用固定邻域宽度进行处理。通过不同邻域半宽试算发现,当 h 过小时,局部异常波动修正不足;当 h 过大时,过棱区域主变化趋势被明显平均,局部几何特征保真度降低。综合考虑光顺效果和几何特征保持,结合前期铺放结果,本文取 $h=3$,对应每个轨迹点前后各3个相邻点共同参与加权;高斯尺度参数取 $\sigma=1.5$,该值可使中心点权重最高、邻域边界点权重逐步衰减,从而在保持局部主趋势的同时提高光顺性。

法向采用同一邻域内的加权平均并归一化处理,以抑制与整体变化趋势不一致的局部摆动,并改善变化集中现象,使路径和姿态沿主趋势光顺变化,以减少铺放缺陷。得到初次结果后,进一步施加式(1)和式(2)所示保真约束:若轨迹点偏离原始轨迹超过 ε_p ,则截断至容差边界;若法向与原始法向夹角超过 ε_n ,则沿两者之间的最小转角方向将其限制在允许范围内。调控区内,以新点替换原始对应点,其余位置保持不变。为消除边界替换处可能出现的微小折点,对过棱区域边界附近少量点进行局部平滑处理。本文所述方法整体过程如图2所示。

1.3 评价指标

为定量表征本文方法的实际效果,从保真程度和路径-姿态光顺性两方面建立评价指标。

(1) 保真程度指标。

保真程度采用最大轨迹偏离 $D_{p,\max}$ 和最大法向偏角 $D_{n,\max}$ 评价。分别表征调控后轨迹和法向相对原始结果的偏离程度。

(2) 路径与姿态光顺性指标。

路径和姿态的光顺性主要体现为转向变化是否均匀、是否存在局部反向摆动、变化过程是否连续无异常停滞等。基于此,以有向变化率和最大变化率为主要评判指标,表征本文方法在几何层面的效果。

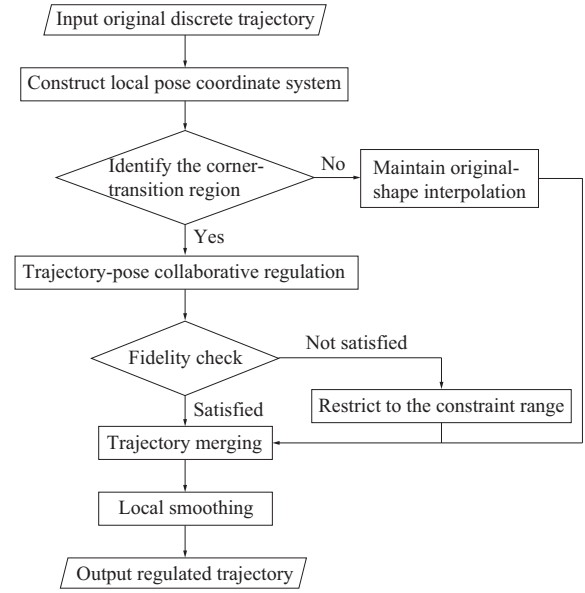


图2 路径-姿态协同调控流程图

Fig. 2 Flowchart of trajectory-pose collaborative regulation

为统一描述路径转向、姿态变化及局部扭转的局部变化特征,定义有向变化率 ω_i 的一般形式见式(6)。

$$\omega_i = \frac{\text{atan2}[(a_i \times a_{i+1}) \cdot \bar{b}_i, a_i \cdot a_{i+1}]}{\Delta s_i} \quad (6)$$

式中: Δs_i 为相邻离散点弧长; a_i 和 a_{i+1} 分别为相邻两轨迹点处待评价的单位局部方向向量; $\bar{b}_i$ 为对应的平均参考轴方向。 ω_i 的正负表示不同变化方向,具体示意图如图3所示。最大变化率取 $|\omega_i|$ 的最大值,用于表征局部变化集中的程度。

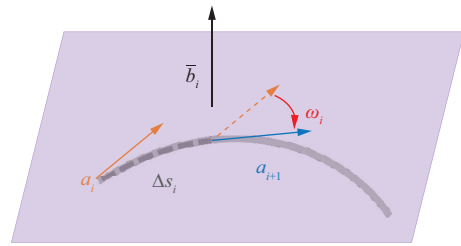


图3 有向变化率示意图

Fig. 3 Schematic illustration of directed rate of change

当 a_i 分别取路径切向、法向和横向(压辊轴向)时, $\bar{b}_i$ 对应为法向、横向和切向,式(6)可用于表征路径转向、法向和扭转的变化特征,用于评价本文方法对过棱区域局部不光顺问题的改善程度。

2 实验部分

2.1 原材料、设备与工艺参数

实验材料为CCF/PEEK预浸料,单条预浸料宽度为12.7 mm,单层厚度为0.22 mm,树脂质量分数

为34%。本文以锥管构件过棱区域自动铺放质量控制为研究对象,进行对比实验。图4为锥管模具结构尺寸及过棱区域位置。锥管模具材料为铝合金,总长 $l=1\ 120\text{ mm}$,大端长 $a_1=383\text{ mm}$,宽 $b_1=221\text{ mm}$,小端长 $a_2=345\text{ mm}$,宽 $b_2=221\text{ mm}$,过棱区域位于相邻平面过渡圆角位置,圆角半径 $r=32.5\text{ mm}$ 。

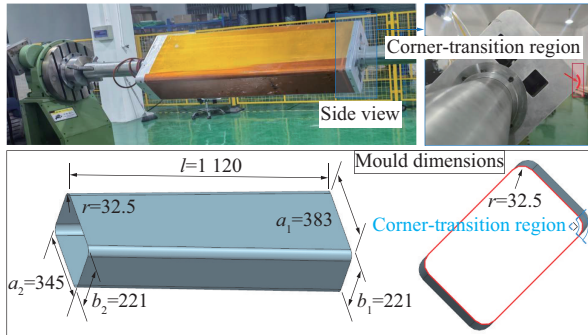


图4 锥管模具结构尺寸及过棱区域位置

Fig. 4 Structural dimensions of tapered-tube mould and location of corner-transition region

铺放实验在实验室搭建的多轴联动自动铺丝平台上进行,如图5所示。铺丝机为科岱航飞(上海)装备科技有限公司的KD-AFP-02型号铺丝机,热源形式为激光加热,压辊为聚氨酯柔性压辊,直径40 mm,宽度60 mm。铺放过程中工艺参数保持恒定:加热温度为380℃,铺放速度为80 mm/s,压实力为350 N。上述参数均来源于课题组现有CCF/PEEK激光自动铺放工艺条件。

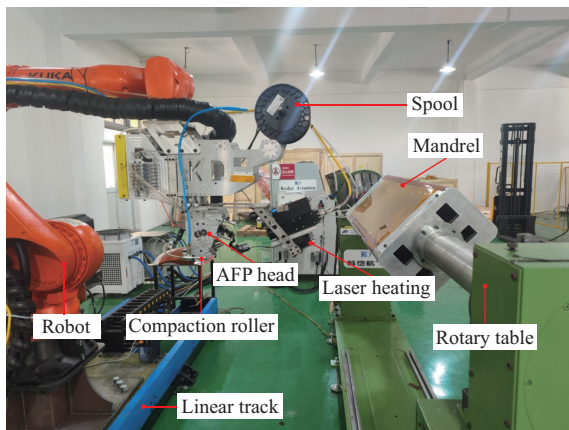


图5 自动铺丝实验平台

Fig. 5 Automated fiber placement experimental platform

对比实验中除轨迹数据处理方式外,其余条件均保持一致,包括材料批次、工艺参数和环境条件,以使质量差异主要反映轨迹调控的影响。

2.2 对比方案

为验证本文方法对锥管过棱区域铺放质量的

改善作用,设计原始轨迹组(基准组)和调控轨迹组(调控组)两组对比实验。基准组采用原始离散轨迹进行铺放,调控组采用调控后铺放轨迹。

宏观缺陷对比实验选取过棱区域缺陷较为敏感的45°代表性轨迹进行,每次连续铺放7根相邻丝束,用于比较两组间隙、重叠、面外褶皱和面内波纹等宏观缺陷情况,验证本文方法对铺放缺陷的抑制作用。此外,每组另制备1个铺层顺序为90°/0°/45°/-45°/-45°/45°/0°/90°的多层铺放试样,用于厚度均匀性和孔隙率测试。

2.3 评价方法

(1)几何评价方法。

首先对基准组和调控组进行几何层面评价,评价指标包括最大轨迹偏离、最大法向偏角、路径转向峰值变化率、法向峰值变化率和扭转峰值变化率,同时绘制三种变化率曲线。其中,前两者用于评价对原始设计意图和表面法向几何含义的保持程度,后三者和变化率曲线用于评价局部变化是否合理以及转向趋势是否稳定。

(2)铺放缺陷评价方法。

在几何评价基础上,进一步通过实际铺放结果评价本文方法对过棱区域宏观铺放质量的改善效果和作用机理。铺放缺陷评价以整体形貌观察和典型缺陷分析为主,在相同材料、模具及工艺参数条件下比较基准组和调控组在过棱区域的缺陷分布特征。

(3)成形质量评价方法。

厚度测试:每组取锥管的4个过棱区域进行截面观察和厚度测量,每个区域选取3个代表位置,分别对应进入过棱段、棱部中心位置和离开过棱段,共获得12个空间测点。为降低测量误差和局部微小起伏影响,每个测点重复测量3次,并取平均值作为该测点厚度,误差棒采用3次重复测量的标准差表示,用于反映测量误差及局部表面起伏引起的厚度离散性。最后基于各测点的平均厚度值统计每组的厚度标准差和最大厚度差,并绘制厚度分布曲线图,用于评价厚度分布均匀性。

孔隙率测试:孔隙率测试选取棱部中心位置取样,每组制备1个孔隙率测试样块。样品经打磨、超声清洗和喷金处理后,采用德国蔡司(ZEISS)公司的Sigma 360型扫描电子显微镜进行图像采集。对每个试样分别观察轴向侧面和周向侧面,为避免单一

视场造成的局部偶然性影响,在每个试样截面上沿截面宽度方向均匀选取3个代表性视场进行图像采集。视场位置尽量覆盖截面不同区域,而非随机选取局部区域,以提高孔隙率结果对整个截面孔隙分布状态的代表性。最终以3个视场孔隙率的平均值作为该截面方向的孔隙率结果。受设备样品台尺寸及抽真空镀金要求限制,将试样尺寸定为6 mm×6 mm;随后利用ImageJ软件进行灰度阈值分割,统计每张图像的孔隙面积,将孔隙面积与图像总面积的比值记为孔隙率,孔隙率测试流程如图6所示。

3 结果与讨论

3.1 调控前后路径-姿态光顺性变化

为评价过棱区域局部不光顺问题的改善效果,

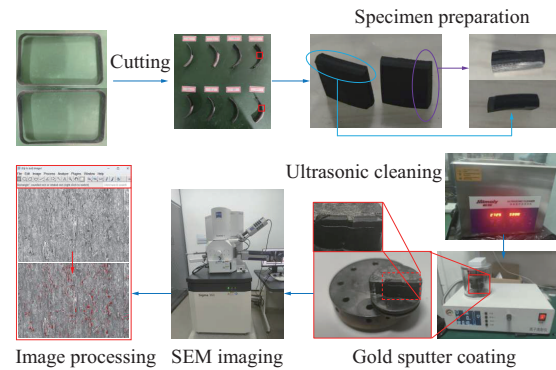


图6 孔隙率测试与图像处理流程

Fig. 6 Flowchart of porosity measurement and image processing

对基准组和调控组进行几何层面对比。表2为主要评价指标及结果,图7为三种变化率峰值对比。

表2 主要评价指标及结果

Tab. 2 Key evaluation indicators and results

Item	Baseline group	Adjusted group	Change rate/%
Maximum trajectory deviation/mm	0	1.27	—
Maximum normal deviation angle/(°)	0	5	—
Maximum path turning change rate/(°·mm ⁻¹)	0.093 27	0.076 07	-18.44
Maximum normal direction change rate/(°·mm ⁻¹)	0.880 22	0.824 47	-6.33
Maximum torsion change rate/(°·mm ⁻¹)	0.929 07	0.917 71	-1.22

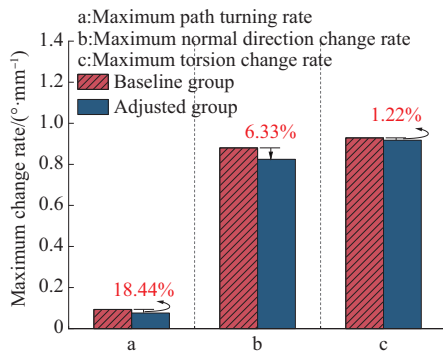


图7 三种变化率峰值对比

Fig. 7 Comparison of peak values of three rates of change

由表2和图7可见,调控后轨迹最大位置偏差为1.27 mm,最大法向偏角为5°,均满足预设保真约束。路径转向峰值变化率由0.093 27 °/mm降至0.076 07 °/mm,法向峰值变化率由0.880 22 °/mm降至0.824 47 °/mm,降幅分别为18.44%和6.33%。说明该方法改善了过棱区域路径转向变化和法向变化分配不合理问题。扭转峰值变化率由0.929 07 °/mm降至0.917 71 °/mm,降幅约为1.22%。该降幅小于路径转向和法向变化指标,其原因在于过棱区域本身存在由真实几何过渡引起的必要姿态扭转,为保证压辊法向与模具表面法向匹配,扭转变化不宜被过度削弱。因此,本文方法对扭转变化的优化目标为抑制与主变化趋势不一致的局部异常扭转。结

合图8c可见,调控后扭转变化曲线更光顺,局部异常波动减弱,反映出扭转连续性的改善。

图8为路径转向、法向和扭转变化率曲线,由图8a可见,基准组路径转向变化幅度大且变化集中,局部放大图中还可见与主转向趋势不一致的摆动现象。调控后路径转向更均匀,局部峰值降低,与主转向趋势不一致的回摆被抑制。由图8b可以看出,基准组存在局部异常停滞和突变现象,法向变化过程不够连续;调控后曲线整体更为平滑,变化沿过棱区段展开更为连续。图8c显示,调控后曲线趋势更为光顺,符合过棱区域几何变化特征,不规则异常扭转减少。

3.2 过棱区域铺放宏观缺陷对比

过棱区域几何变化集中,一旦出现路径姿态不光顺、不匹配问题,铺放头运动连续性将明显下降,进而引起局部热输入、压实接触和贴合状态波动,最终可能造成多类宏观缺陷的增加,而宏观缺陷增加又会一定程度上影响构件性能。

为进一步解释本文方法对铺放质量的影响,对基准组和调控组轨迹进行实际铺放,对比宏观缺陷。图9给出了两组过棱区域铺放效果对比。

由图9可见,基准组在过棱区域存在较明显的间隙、重叠、面内波纹和面外褶皱,调控组的整体缺

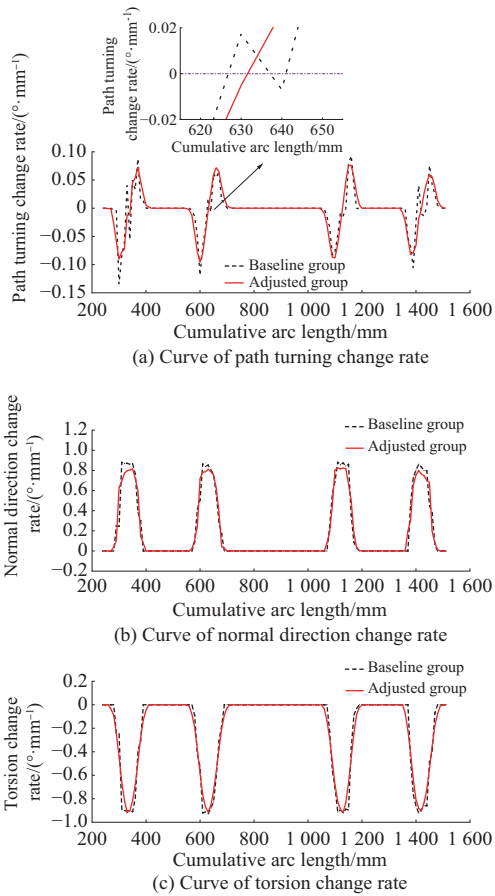


图8 调控前后变化率曲线对比

Fig. 8 Comparison of rate-of-change curves before and after regulation

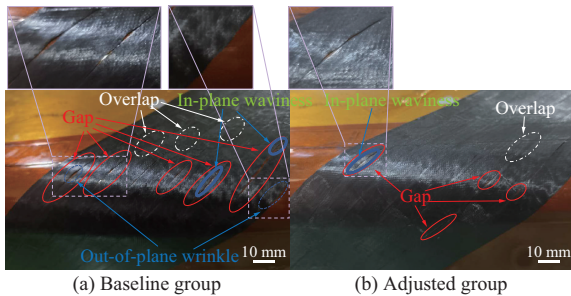


图9 过棱区域铺放缺陷对比

Fig. 9 Comparison of layup defects in corner-transition region

陷更少,缺陷尺度也更小。重叠和间隙主要与路径转向分配不均有关。局部转向过急时,丝束变形协调不足,难以同步跟随压辊转向,其实际落点偏离设计轨迹。与此同时,路径与姿态变化不匹配会引起过棱区域压实状态波动,局部区域可能出现压实不足或压实力偏大的现象。机器人运动方向的频繁调整还会导致实际铺放速度波动,进而造成局部热输入不均和丝束熔融状态不一致。压力和温度分布不均时,丝束展宽会偏离理论展宽,从而加剧间隙和重叠缺陷。褶皱主要由局部转向过急引起。

此时丝束内侧受压缩,外侧受拉伸,最终形成面外褶皱。实际加热时间较长位置树脂挤出加剧,带动纤维迁移,进而形成面内波纹。上述结果表明,锥管过棱区域铺放缺陷的产生与原始轨迹设计缺陷有关,本文方法能有效减少由原始轨迹问题引起的铺放缺陷,改善过棱区域的铺放质量。

3.3 过棱区域截面成形质量对比

为从构件成形质量角度验证本文方法有效性,对基准组和调控组的多层铺放试样进行截面观察、厚度测量和孔隙率分析。过棱区域截面形貌如图10所示,表3为多层铺放试件成形质量指标。

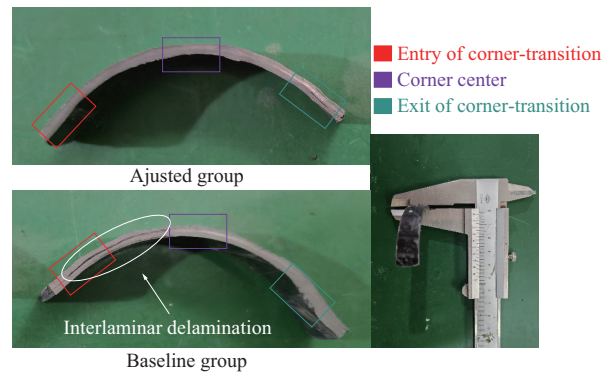


图10 过棱区域截面形貌对比

Fig. 10 Comparison of cross-sectional morphologies in corner-transition region

表3 多层铺放试样截面成形质量指标

Tab. 3 Cross-sectional forming quality metrics of multilayer layup specimens

Item	Baseline group	Adjusted group	Change rate/%
Thickness standard deviation/mm	0.128 63	0.111 16	-13.58
Maximum thickness difference/mm	0.40	0.32	-20.00
Axial void content/%	2.03	1.80	-11.33
Circumferential void content/%	2.49	2.22	-10.84

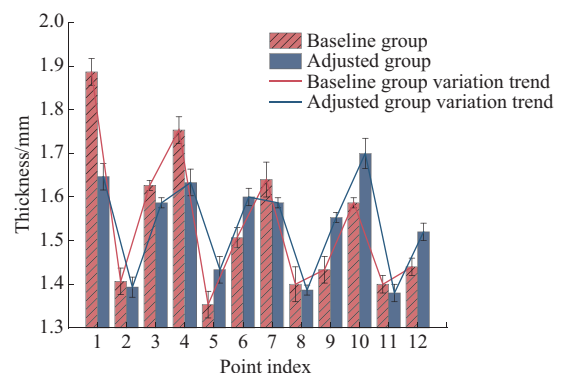


图11 过棱区域截面厚度分布对比

Fig. 11 Comparison of cross-sectional thickness distribution in corner-transition region

由图 10 可见,基准组的截面厚度变化相对较大,且部分区域可观察到分层现象,层间结合较差。根据表 3 定量分析,调控组相对于基准组的厚度标准差下降了 13.58%,最大厚度差下降了 20.00%,调控后厚度分布更加均匀。厚度分布对比如图 11 所示,由于基准组第一个测点平均厚度值 1.887 mm 与其余测点值相差过大,为排除制样过程破坏的影响,上述表 3 中指标计算时均将其排除。这些结果表明,本文方法对锥管过棱区域铺放均匀性和层间贴合状态具有改善作用。

宏观重叠和间隙是导致厚度不均的重要因素之一,重叠和间隙缺陷累积到截面上,最终表现为厚度不均。此外,丝束厚度还受局部热压状态影响,因为在压实过程中,树脂向丝束两侧流动,丝束随之变宽变薄。温度影响树脂熔融状态,压力将熔融树脂向外侧挤压。当路径与姿态变化协同性较差时,过棱区域的实际热压作用波动,导致丝束厚度不均。分层现象形成原因类似,也是轨迹协同性问题造成

局部压实不良导致的。CCF/PEEK 材料成型温度窗口较窄,丝束的层间结合须在温度窗口内施加有效压实完成与下层界面的结合。而轨迹问题使丝束在温度窗口内压实不完全,从而削弱层间结合效果。

孔隙率测试的 SEM 图见图 12。根据图 12 可以看到,调控组的大尺寸孔隙较少,孔隙率整体降低。从表 3 中也可以看到,调控组相对基准组在过棱轴向和周向的孔隙率分别下降 11.33% 和 10.84%。该变化与宏观缺陷中间隙的减少有直接关系,间隙过大会使孔隙无法被周围树脂流动填充,造成内部孔隙。除此之外,轨迹问题还会导致以下情况:热塑预浸料在加热且缺少外压约束时容易发生膨化,膨化造成内部孔隙增多、增大;局部热输入与压实状态不匹配时,树脂难以充分流动、渗入和填充微孔隙。这些也都是路径-姿态不协调导致孔隙率升高的原因。

4 结论

(1) 针对 CCF/PEEK 锥管构件过棱区域因路径

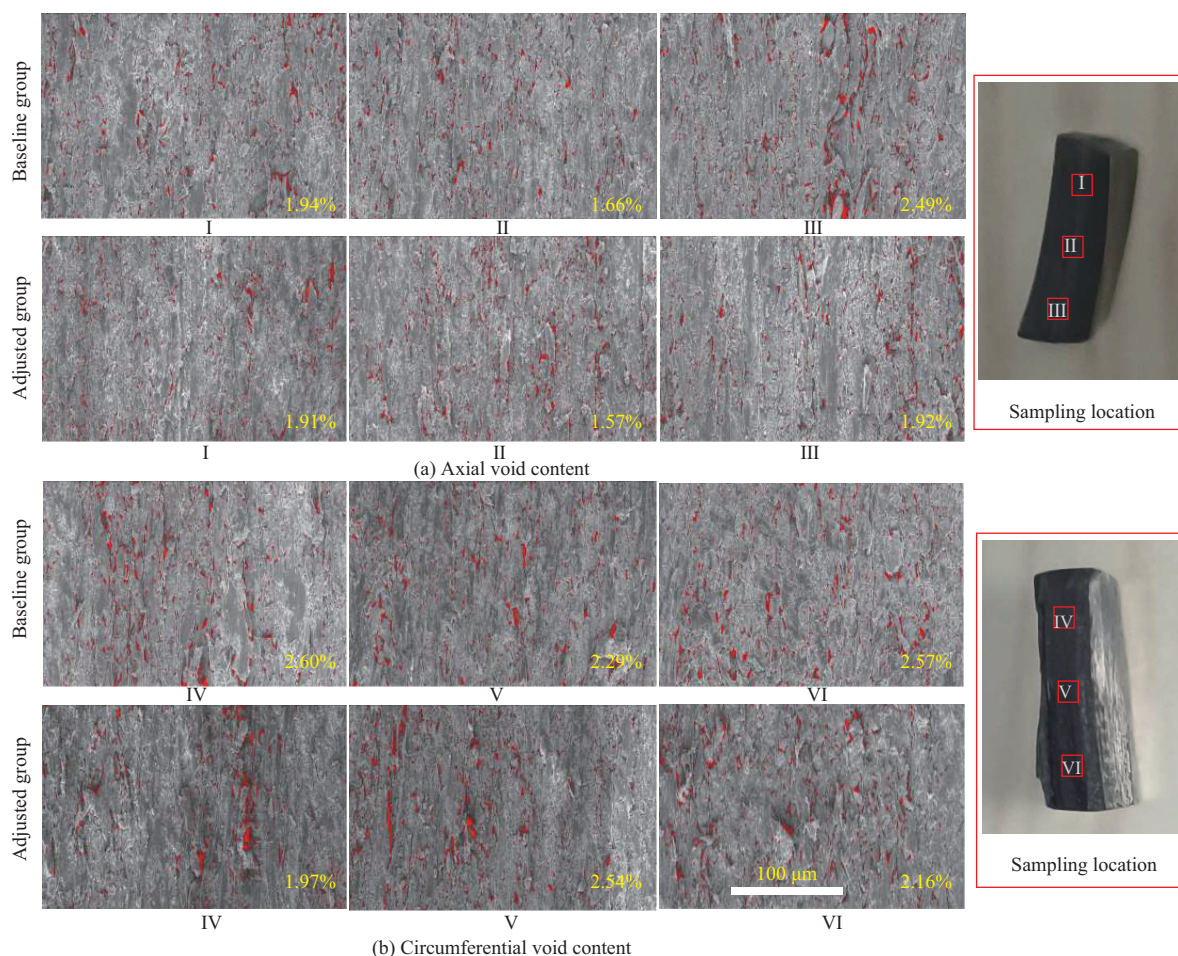


图 12 孔隙率测试 SEM 照片($\times 400$)

Fig. 12 SEM images for porosity measurement ($\times 400$)

与姿态局部变化不协调引起的铺放缺陷与成形质量问题,提出了保真约束下的路径-姿态协同调控方法,并进行了几何评价、实际铺放实验及截面质量分析。

(2)调控后满足保真要求,路径转向和法向峰值变化率分别下降18.44%和6.33%,说明该方法能够缓和过棱区域路径和法向变化集中的问题;扭转峰值变化率小幅下降1.22%,扭转变化曲线中异常波动减弱,体现了对异常扭转的抑制作用。

(3)实际铺放结果表明,调控组过棱区域的间隙、重叠、面外褶皱和面内波纹均较基准组减轻。主要原因在于,本文方法减弱了局部异常扭转和运动波动,提高了局部热输入、压实接触及丝束展宽状态的稳定性,从而抑制了缺陷形成。

(4)截面分析表明,调控组厚度标准差、最大厚度差、轴向孔隙率和周向孔隙率分别下降13.58%、20.00%、11.33%和10.84%,说明路径-姿态光顺化有利于提升内部成形质量。本文结果说明,在局部几何变化集中区段的铺放质量控制中,除工艺参数外,还应重视路径与姿态变化的协同性。

(5)所提出方法可在基本保持原始铺放路径和表面法向几何含义不变的前提下,实现过棱区域路径与姿态的协同光顺化,为局部几何变化集中区段的自动铺放轨迹优化提供可行参考。

参考文献

- [1] 王承刚,余进娟,高信康,等.热塑性复合材料缠绕技术现状及应用趋势分析[J].工程塑料应用,2023,51(8):184-188.
WANG Chenggang, SHE Jinjuan, GAO Xinkang, et al. Analysis of current situation and application filament winding technology of thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8):184-188.
- [2] BOON Y D, JOSHI S C, BHUDOLIA S K. Review: Filament winding and automated fiber placement with in situ consolidation for fiber reinforced thermoplastic polymer composites[J]. Polymers, 2021, 13(12). DOI:10.3390/polym13121951.
- [3] STOKES-GRIFFIN C M, COMPSTON P. The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of carbon fibre - PEEK manufactured using a laser tape placement process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78:274-283.
- [4] BRASINGTON A, SACCO C, HALBRITTER J, et al. Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward[J]. Composites Part C: Open Access, 2021, 6. DOI:10.1016/j.jcomc.2021.100182.
- [5] 郭鹏,杨辰光,李祥利,等.机器人化复合材料自动铺层技术综述[J].自动化学报,2024,50(5):873-897.
GUO Peng, YANG Chenguang, LI Xiangli, et al. A review on robotized automated lay-up technology for composite material manufacturing[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(5):873-897.
- [6] KHAN M A, MITSCHANG P, SCHLEDJEWSKI R. Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(4):485-499.
- [7] CHU Q Y, LI Y, XIAO J, et al. Processing and characterization of the thermoplastic composites manufactured by ultrasonic vibration - assisted automated fiber placement[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(3):339-358.
- [8] KHODAEI A, SHADMEHRI F. Intimate contact development for automated fiber placement of thermoplastic composites[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 8. DOI: 10.1016/j.jcomc.2022.100290.
- [9] YASSIN K, HOJJATI M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(12):1 676-1 725.
- [10] ZHAO D C, LIU W P, CHEN J P, et al. Interlaminar bonding of high-performance thermoplastic composites during automated fiber placement in-situ consolidation[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 58(20):2 247-2 261.
- [11] ÇELİK O, PEETERS D, DRANSFELD C, et al. Intimate contact development during laser assisted fiber placement: Microstructure and effect of process parameters[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 134. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105888.
- [12] 刘丰玮,李辉,武婷,等.压实力对激光加热辅助CF/PEEK原位固结层间剪切强度的影响机制[J].工程塑料应用,2025,53(10):71-80.
LIU Fengwei, LI Hui, WU Ting, et al. Influencing mechanism of compaction force on interlayer shear strength of laser heating-assisted CF/PEEK with in-situ consolidation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10):71-80.
- [13] BAHÖ O, AUSIAS G, GROHENS Y, et al. Simulation of laser heating distribution for a thermoplastic composite: Effects of AFP head parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7):2 105-2 117.
- [14] 包蒙哲,任永新,刘晓军,等.工艺参数对CCF/PEEK预浸料单束铺放尺寸的影响[J].工程塑料应用,2024,52(3):83-90.
BAO Mengzhe, REN Yongxin, LIU Xiaojun, et al. Effect of process parameters on the lay-up size of single bundle of CCF/PEEK prepregs[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3):83-90.

(下转第115页)