

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.012

新型多束碳纤维缠绕技术的轨迹仿真分析与实验验证

梁建国^{1,2,3}, 邵启楠¹, 刘江林^{1,2,3}, 武婷¹, 赵晓冬¹, 薛玉钦¹, 张珂婧¹(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学先进成型与智能装备研究院, 太原 030024;
3. 新疆智能装备研究院, 新疆阿克苏 842008)

摘要: 高压储氢容器作为主流的储氢载体, 其生产效率和服役性能取决于纤维缠绕技术。鉴于单束纤维缠绕(SFW)存在的局限性, 包括纤维交叉、应力集中、生产效率低, 本文开发了一种新型多束纤维缠绕(MFW)工艺, 搭建了多束碳纤维缠绕设备, 并对MFW进行理论研究、轨迹仿真分析与实验验证。首先, 构建了MFW理论模型, 根据子午线旋转映射的机理, 获得可变滑移系数的非测地线轨迹, 并运用到MFW技术上, 获得吐丝嘴运动轨迹; 随后, 依据线性模拟的仿真数据, 搭建多束碳纤维缠绕设备进行实验, 精确匹配输入Spline曲线至输出实验轨迹, 实现多束纤维同步精准缠绕。SFW工艺下完整缠绕时间约为286 min, 而使用MFW工艺缠绕仅需28 min完成相同任务, 缠绕效率得到显著提高; 此外, 采用SFW与MFW技术制作了缠绕制品高压储氢容器, 并进行爆破试验。爆破压力对比试验结果表明, 采用MFW技术制造的储氢容器爆破压力达到129.9 MPa, 较SFW工艺制造的104.5 MPa提升了约24.3%, 充分验证了MFW技术制作的储氢容器承载能力更加优异, 为MFW技术的推广应用奠定了基础。

关键词: 高压储氢容器; 多束纤维缠绕技术; 变滑移系数非测地线; 缠绕效率; 爆破压力

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0086-10

Trajectory simulation analysis and experimental validation of novel multi-filament carbon fiber winding technique

LIANG Jianguo^{1,2,3}, SHAO Qinan¹, LIU Jianglin^{1,2,3}, WU Ting¹, ZHAO Xiaodong¹, XUE Yuqin¹, ZHANG Kejing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Advanced Forming and Intelligent Equipment Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Xinjiang Intelligent Equipment Research Institute, Aksu 842008, China)

Abstract: As the mainstream hydrogen storage medium, the production efficiency and service performance of high-pressure hydrogen storage vessels depend on filament winding technology. In view of the limitations of single-fiber winding (SFW), including fiber crossings, stress concentrations, and low production efficiency, a novel multi-filament winding (MFW) technique was developed and the multi-filament carbon fiber winding equipment was constructed, then the theoretical research, trajectory simulation analysis, and experimental validation of the novel MFW technique were conducted. First, a theoretical model of MFW was established. Based on the mechanism of meridian rotation mapping, the variable slippage coefficient non-geodesic trajectory was obtained and innovatively applied to MFW technology to obtain the motion trajectories of the filament nozzle. Subsequently, based on simulation data from linear modeling, the multi-filament winding equipment was constructed for experimentation. The input Spline curve was precisely matched with the output experimental trajectory to achieve synchronous and precise winding of multiple fibers. Under SFW process conditions, the complete winding time was approximately 286 minutes, whereas the MFW winding completes the same task in just 28 minutes, significantly enhancing winding efficiency. Additionally, high-pressure hydrogen storage vessels were fabricated using SFW and MFW technique for conducting burst tests. The results from burst pressure comparison tests indicate that the vessel produced by the MFW technique achieves a burst pressure of 129.9 MPa, which represents a 24.3% increase compared to the 104.5 MPa of vessels produced via SFW. It fully verifies the stronger load-bearing capacity of the hydrogen storage vessels produced by the MFW technology and establishes a foundation for the popularization and application of the MFW technology.

Keywords: high-pressure hydrogen storage vessels; multi-filament winding (MFW) technique; variable slippage coefficient non-geodesic trajectory; winding efficiency; burst pressure

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD0701601), 国家自然科学基金项目(52075361), 山西省科技重大专项(20201102003)

通信作者: 梁建国, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料制备技术及装备

收稿日期: 2025-11-21

引用格式: 梁建国, 邵启楠, 刘江林, 等. 新型多束碳纤维缠绕技术的轨迹仿真分析与实验验证[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 86-95.

LIANG Jianguo, SHAO Qinan, LIU Jianglin, et al. Trajectory simulation analysis and experimental validation of novel multi-filament carbon fiber winding technique[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 86-95.

纤维缠绕复合材料压力容器凭借其卓越的性能,广泛应用于军事和商业,涵盖航空航天、武器壳体、氢能储运等领域^[1-4],其中高压储氢容器是主要储氢载体。高压储氢容器的生产效率和服役性能取决于纤维缠绕技术,在制品结构中,复合材料层是承受压力的关键部分^[5-6]。因此,高压储氢容器在得到大量使用的同时,其高效缠绕成型技术也受到了广泛关注,缠绕工艺的好坏直接决定了制品的整体性能,故新型缠绕工艺与设备的研发和创新非常重要。

目前,缠绕制品成型技术主要为单束纤维缠绕(SFW)。SFW技术采用单束同层往复成型,存在同层纤维交叉导致局部应力集中的问题,且缠绕效率低。由于长丝编织引起的局部波动,影响了复合材料的力学性能,故大量文献从多个角度进行了研究。Shen等^[7-8]通过转换纤维交叉区域的坐标,分析了纤维交叉和起伏对刚度破坏的影响,然后利用层压理论验证了纤维交叉区域的应变比层压区域的应变至少高出1.07倍。孟晓旭等^[9]为研究纤维交叉起伏形态与孔洞对复合材料力学行为的影响,基于数字图像相关技术,通过准静态拉伸试验,对比分析了开孔复合材料层合板与开孔纤维缠绕板的拉伸性能与破坏机制。Uddin等^[10]研究了不同类型缠绕模式下复合材料飞轮盘的应力分布,并验证了使用传统的层压结构力学分析往往会低估应力水平。沈创石^[11]通过建立了一种考虑纤维交叉的有限元模型,发现屈曲临界载荷与模态显著依赖于缠绕角、长径比和层数,且在特定参数[如缠绕角($10^{\circ}\sim 30^{\circ}$)、小长径比或多层缠绕]下,纤维交叉效应不可忽略。Guo等^[12]提出一种考虑纤维交叉和起伏的新型纤维缠绕复合材料有限元分析方法,给出了不同缠绕方式的复合材料圆管的屈曲载荷计算结果,分析了纤维缠绕马赛克图案对复合材料圆柱体力学性能的影响。

本文采用编缠一体化思想,突破传统纤维缠绕方法的瓶颈问题,开发新型多束纤维缠绕(MFW)工艺,并搭建了多束碳纤维缠绕设备,以多孔出纱构型为基础,空间分布式协同(芯模与吐丝嘴之间的协同运动)驱动多束碳纤维同步缠绕,实现同层平行无间隙缠绕。在保证制品性能的基础上,实现相邻纤维相互平行互不重叠,成功避免了同层纤维间由于交叉重叠引起的应力集中问题,显著提升了螺旋缠

绕效率,满足了大批量生产需求,实现了储氢容器高质、高效缠绕成型。

缠绕图案的优化设计是复合压力容器设计中的重要问题之一,为提高缠绕制品的服役性能与缠绕效率,许多文献对线型轨迹进行设计优化。Guillon等^[13]在二维轴对称模型中基于测地线设计了封头处的纤维线型轨迹,提出了封头处的纤维铺层新模型,成功预测了复合材料在封头区域的复杂行为。Zu等^[14]借助微分理论和缠绕原理,推导出了不同切点类型下的非测地线轨迹,最终提出了一种基于非测地线轨迹的复合材料压力容器缠绕参数优化设计方法;与此同时,借助连续介质理论和非测地线定律,证明使用非测地线绕组可以显著提高圆形环形容器的结构效率;另外提出了一种结合气态氢环形压力容器结构优化和可缠绕性的综合程序,确定了新型卷绕机的传动比和运动学解,所得的纤维轨迹适合满足各种缠绕模式^[15-16]。Dalibor等^[17-18]发现采用非测地线法缠绕喷管可提高纤维方向应力与剪应力比值,改善力学性能。Zhang等^[19]分别采用整体非测地线法、测地线、圆环截面的测地线和圆柱端截面的非测地线制备复合材料弯管,发现整体采用非测地线比局部采用非测地线的复合材料弯管性能更好。Liang等^[20]利用非测地线缠绕方程,提出一种圆形截面芯模、椭球头复合材料压力容器过渡层设计方法,实现了不同工艺层之间平滑过渡,避免了过渡层在实际缠绕过程中的打滑现象,有效提高了缠绕过程的自动化程度。Wang等^[21-22]在考虑带宽和稳定绕组约束的同时优化绕组参数,设计了一种可变滑移系数的非测地线轨迹(NVSCNG)缠绕复合材料压力容器的设计方法,并以NVSCNG作为穹顶纤维路径设计模式,确定了压力容器封头形状的最佳几何参数,验证了NVSCNG可改善穹顶的结构性能。Almeida等^[23]提出了可变角度复合材料圆柱体的缠绕策略,并通过遗传算法优化获取每个设计结构的最大轴向屈曲载荷,发现变角度设计纤维缠绕可大幅度提升产品的材料强度。由此可得出,相较于测地线,采用NVSCNG的缠绕制品展现更优异的服役性能与结构效率。

为克服传统SFW技术存在的纤维交叉问题,本团队已构建了纤维在细观尺度上交叉的本构模型,结合数字图像相关(DIC)技术,对SFW技术和MFW技术进行了三点弯曲对比试验,同时研究了采用

MFW工艺制备的碳纤维增强聚合物复合材料层压板在冲击载荷作用下的失效行为,在相同的冲击速度下,采用MFW技术制备的复合材料层压板在最大接触力、吸收能量以及层间和层内损伤方面表现出更优异的抗冲击能力,不仅提高了复合材料层压板的承压能力,而且克服了同批次缠绕产品实际缠绕效率低、纤维交叉等缺陷,证明了MFW技术具有显著的缠绕效率和优异的成品性能^[24-25]。但未针对新型MFW技术进行轨迹分析,未对SFW与MFW工艺下的缠绕制品进行爆破性能的对比以进一步验证MFW的优异性。因此,本文针对新型MFW工艺进行理论研究、轨迹分析与实验验证,并搭建可实现同层无交叉缠绕的多束碳纤维缠绕设备,进行相关线型仿真与爆破试验,进一步证明MFW工艺的优异性。

1 线型仿真

1.1 主要设备

传统SFW工艺采用单束同层往复成型,存在同层纤维交叉导致局部应力集中的问题,且缠绕效率低;MFW工艺以解决纤维交叉现象作为出发点,将纤维按照类似层合板的铺设方式进行内衬表面缠绕,采用沿正负缠绕角交替缠绕。但单束纤维无法满足该运动需求,因此为了实现交替缠绕的目的,需采用多根纤维同步缠绕。因此,MFW工艺根据回转体的结构特性,将纱线沿着周向均匀分布,缠绕中实时改变纤维的展纱宽度,使生成的纱线运动轨迹在三维空间相对平行,即可实现内衬表面无交叉纤维缠绕,充分发挥碳纤维复合材料的承载性能,实现储氢容器轻量化、低成本,并兼具高效稳定缠绕,解决了SFW工艺存在的缺陷及缠绕设备缠绕效率低、制品质量一致性差等问题^[26]。

结合新型的MFW技术,提出了“编-缠”一体化思想,并设计开发了多束碳纤维缠绕设备,其主要由配电箱、螺旋缠绕装备、环向缠绕装备与纱架组成,如图1所示。纤维缠绕过程中,决定缠绕效率的关键在于螺旋缠绕阶段,单束纤维缠绕机只有单个吐丝嘴按照预设轨迹进行往复缠绕运动,即使增加工位数也无法显著减少螺旋缠绕阶段的用时。螺旋缠绕装置由架体和环形分布吐丝嘴构成,架体设有通孔引导芯模运动,24束吐丝嘴则负责同步伸出纤维。当芯模到达指定位置,通过精确控制吐丝嘴的进给与旋转、芯模的平移与旋转这四大自由度,

并在恒定悬纱的约束下,确保机构各部分按照预定轨迹完成同步出纱与运动,进而快速实现同层纤维的无交叉紧密排布,充分发挥纤维复合材料的性能优势,显著提升螺旋缠绕效率,为变展纱缠绕理论提供实际可操作性。

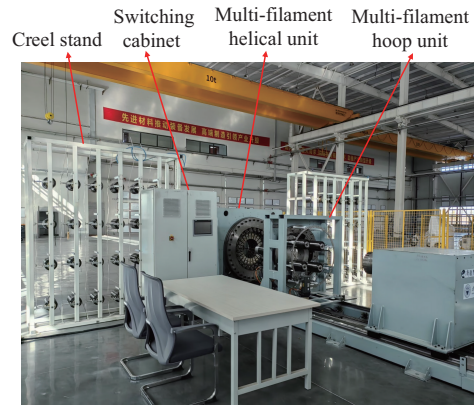


图1 多束碳纤维缠绕设备图

Fig. 1 Multi-filament carbon fiber winding equipment diagram

1.2 MFW工艺

在工艺设计过程中,发现MFW缠绕工艺中每束纤维的线型类似于SFW缠绕工艺中单切点线型,而该线型在储氢容器封头位置实际缠绕过程中造成了近极孔位置纤维的堆积和交叉现象,不仅会产生富树脂区,而且复合材料易发生应力集中。基于此,创新地提出了封头段纤维变展纱缠绕理论,即根据内衬封头段外径逐渐变化的结构特性,实时改变纤维的展纱宽度,最大程度避免了纤维间堆叠现象,且彻底解决了SFW技术中存在的纤维交叉缺陷,图2为MFW技术原理图,图里的 X 、 A 、 Z 、 φ 分别对应着螺旋缠绕中芯模的进给运动、吐丝嘴的旋转运动、吐丝嘴的进给运动和芯模的旋转运动。

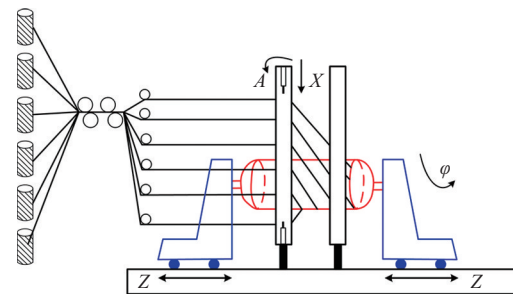


图2 MFW技术原理图

Fig. 2 MFW technology schematic diagram

在MFW工艺中,多个吐丝嘴的同步平行运动无法实现多切点缠绕线型,其单个吐丝嘴缠绕过程中在极孔处均会产生一个切点,类似于单切点纤维

缠绕线型。若多束纱线均按照单切点线型进行缠绕,在内衬的近极孔处会产生严重的纤维交叉现象,而在近极孔区域会产生较大范围的纤维重叠现象,进而产生的复合材料层富树脂区与应力集中极大程度影响了储氢容器的安全性。因此,需要结合内衬结构特征与单切点线型特点,对多束纤维缠绕工艺在封头段的路径进行优化。储氢容器内衬从封头极孔处到赤道过渡区域,外径大小是不断变化的,将该结构特性与单切点缠绕线型相结合,以克服相邻纤维间的重叠与交叉为目的,创新地提出了多束变展纱纤维缠绕理论,其原理如图3所示。根据封头段外径时时变化的特点,不断调整纤维的展纱宽度,从而解决了单切点缠绕线型的弊端,提升了纤维缠绕层的承压能力。

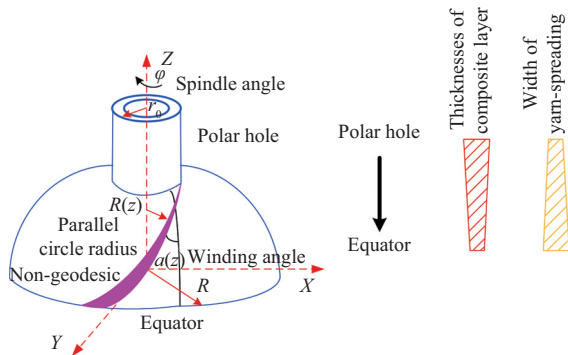


图3 变展纱纤维缠绕理论图

Fig. 3 Theoretical diagram of fiber winding with variable yarn-spreading

从图3可知,纤维展纱宽度与复合材料层厚度呈现了反比例关系,也就是说,在内衬近极孔处,即外径最小的位置,为避免纤维重叠与堆积,其展纱宽度是最小的;而在赤道过渡区域,纤维的展纱宽度则是最大的,即为纤维的理论宽度。因此,近极孔处纤维缠绕层的厚度是最大的,而赤道位置纤维缠绕层的厚度基本与单束纤维缠绕工艺相同,相邻纤维间相差一个带宽。纤维缠绕层厚度由极孔处到赤道位置呈现出逐渐减小的变化,在极孔处纤维无重叠、无架空,在整个封头区域纤维无交叉。而且因每个复合材料层均从极孔处或近极孔处开始缠绕,该位置纤维厚度是最大的,因此与SFW线型纤维缠绕层相比较,多束变展纱缠绕线型复合材料层的平均厚度更大,不仅解决了SFW线型纤维重叠、架空的弊端,而且克服了纤维缠绕层性能不足的劣势,实现纤维稳定缠绕。

1.3 线型模拟

在复合压力容器的设计中,测地线轨迹是通过

芯模的任意两点之间最稳定的路径,但实际缠绕过程中,纤维与芯模之间的摩擦不可避免;本节引入NVSCNG,运用到新型的MFW工艺上,利用纤维束与芯轴之间的摩擦,可实现多束纤维缠绕,扩大了复合材料层的可设计性,大大提高纤维落纱轨迹的精确性,避免出现纤维滑纱与缠绕不均等问题^[27-28]。

球体与椭球体的参数方程 \vec{G} 和 \vec{P} 见式(1)和式(2)。

$$\vec{G} = [R \cos \nu_2 \cos \nu_1 \quad R \cos \nu_2 \sin \nu_1 \quad R \sin \nu_2] \quad (1)$$

$$\vec{P} = [a \cos u_2 \cos u_1 \quad a \cos u_2 \sin u_1 \quad b \sin u_2] \quad (2)$$

式中: R 为球的半径; ν_1 表示纬向角坐标; ν_2 表示纵向角坐标; a 为椭球体的长半轴; b 为椭球体的短半轴; u_1 表示经纬方向角坐标; u_2 表示纵向角坐标; $\cos a = \frac{R_c}{b}$, R_c 为极孔半径; ν_1, ν_2 和 u_1, u_2 有相同的取值范围。

根据式(1)和式(2),两者的映射矩阵 A 见式(3)。

$$A = \begin{pmatrix} \frac{a}{R} & & \\ & \frac{a}{R} & \\ & & \frac{b}{R} \end{pmatrix} \quad (3)$$

依据子午线旋转映射机理,获得椭球面缠绕轨迹方程见式(4)。

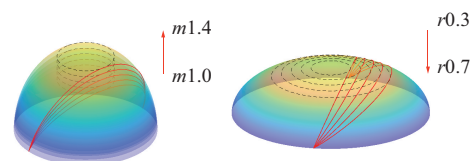
$$P^G = G \cdot R_x \cdot A \quad (4)$$

式(4)中的旋转矩阵 R_x 见式(5)。

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin a & \cos a \\ 0 & -\cos a & \sin a \end{pmatrix} \quad (5)$$

图4表示为NVSCNG轨迹,图4a和图4b分别为不同椭球率与极孔半径的落纱点轨迹。 r 表示不同极孔半径与球体半径的比值($r = \frac{R_c}{R}$), m 表示不同的椭球率($m = \frac{b}{R}$)。

图4显示,当椭球率保持恒定时,椭球形状保



(a) Trajectories of the drop point for different ellipsoidal rates (m) (b) Trajectories of the drop point for different polar hole radii (r)

图4 NVSCNG轨迹分布

Fig. 4 NVSCNG trajectory distribution

持不变,而极孔半径逐渐增大;另一方面,当极孔半径恒定时,椭球体沿短轴方向的形状呈现自下而上的上升趋势。随着极孔半径与椭球率的变化,落纱点轨迹持续调整以保持与极孔边缘的切线关系。这些观测结果证实了所提出的NVSCNG轨迹的可行性。

缠绕成型过程中,以芯模坐标系为动坐标系,全局坐标系为静坐标系,根据动坐标系中的落纱点(NVSCNG)轨迹,控制悬纱长度 L_0 一定,运用动静坐标系之间的转换关系,求得静坐标系中吐丝嘴运动轨迹方程。图5a为恒定悬纱长度约束条件下的吐丝嘴空间运动轨迹示意图,图5b为动静坐标系转换示意图。

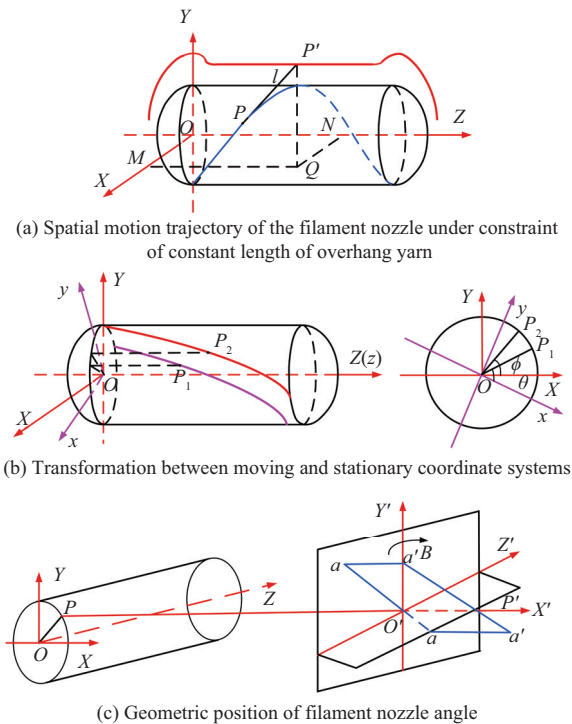


图5 恒定悬纱长度约束条件下的吐丝嘴空间运动轨迹、动静坐标系转换示意图和吐丝嘴摆角几何位置

Fig. 5 Schematic diagram of spatial motion trajectory of filament nozzle under constraint of constant length of the overhang filament, transformation between moving and stationary coordinate systems and geometric position of filament nozzle angle

设在静坐标系 $OXYZ$ 中 $P_1 \begin{pmatrix} X = R \cos \theta \\ Y = R \sin \theta \end{pmatrix}$, 其中 θ 为中心转角, 当动坐标系 $Oxyz$ 转过 φ 角后, P_1 点到达 P_2 点, P_2 点在动坐标系中的坐标为 $P_2 \begin{pmatrix} x = R \cos \theta' \\ y = R \sin \theta' \end{pmatrix}$, 在静坐标系中的坐标

$$\text{为 } P_2 \begin{pmatrix} X = R \cos(\theta' - \varphi) \\ Y = R \sin(\theta' - \varphi) \end{pmatrix}.$$

根据上述分析得到式(6)。

$$\begin{aligned} & [R \cos(\theta' - \varphi), R \sin(\theta' - \varphi)] = \\ & [R \cos \theta', R \sin \theta'] \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

由于 $\begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$ 为正交矩阵, 即可得动静坐标系之间的转换关系, 见式(7)。

$$(X, Y, Z) = (x, y, z) \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

设纤维轨迹上存在一点 $P(r_1 \cos \theta, r_1 \sin \theta, z)$, 则过 P 点的切线方程见式(8)。

$$\frac{x_0 - r \cos \theta}{r' \cos \theta - \theta' r \sin \theta} = \frac{y_0 - r \sin \theta}{r' \sin \theta + \theta' r \cos \theta} = \frac{z_0 - z}{1} = k \quad (8)$$

式中: x_0, y_0, z_0 为静坐标。

根据合比定理化简得到式(9)。

$$\frac{X - r \cos \phi}{r' \cos \phi + \theta' r \sin \phi} = \frac{Y + r \sin \phi}{-r' \sin \phi + \theta' r \cos \phi} = \frac{Z - z}{1} \quad (9)$$

式中: ϕ 为落纱角。

在螺旋缠绕中, 考虑到芯模表面轮廓曲率是不断变化的, 使纱束以渐变的宽度贴覆在芯模表面, 要求吐丝嘴存在左右方向上的偏摆运动, 即 B 向摆角 α 。同时由于缠绕张力的影响, 为了避免在偏摆过程中存在纤维滑线所产生的线型紊乱, 纤维 $P'O'$ P 在其与吐丝嘴 aa' 交点 O 处张力的合力必须与 aa' 垂直, 所以在缠绕过程中必须调整 aa' 的 B 向摆角 α 。

由公式(7)可知纤维在静坐标系中的悬线方程为式(10)。

$$\vec{T} = (r' \cos \phi + \theta' r \sin \phi, -r' \sin \phi + \theta' r \cos \phi, 1) \quad (10)$$

将静坐标系绕 Z 轴旋转 $\frac{(n-1)\pi}{12}$ 得到在吐丝嘴处的动坐标系, 旋转矩阵见式(11)。

$$R_n = \begin{pmatrix} \cos \frac{(n-1)\pi}{12} & -\sin \frac{(n-1)\pi}{12} & 0 \\ \sin \frac{(n-1)\pi}{12} & \cos \frac{(n-1)\pi}{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

根据前面的分析可知, 当纤维在吐丝嘴上不滑动时, aa' 将同时与悬线和 $O'X'$ 垂直, 设静坐标系

$OXYZ$ 中的单位矢量分别为 \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} ,按式(12)求取混积。

$$(\vec{i}, \vec{k}, \vec{T}) = (\vec{T}, \vec{i}, \vec{k}) = (\vec{T} \times \vec{i}) \cdot \vec{k} \quad (12)$$

求得式(13)。

$$\tan A = \frac{1}{r' \sin \phi - \theta' r \cos \phi} \quad (13)$$

设悬纱长度为 L_0 ,结合式(9)则得式(14)。

$$k = \frac{L_0}{\sqrt{(r' \cos \theta - \theta' r \sin \theta)^2 + (r' \sin \theta + \theta' r \cos \theta)^2 + 1}} \quad (14)$$

令 $\delta = \arctan r'$,则 $r' = \tan \delta$,又由于式(15),令

$X_\alpha = \sqrt{[k(r' \sin \theta + \theta \cdot r \cos \theta) + r \sin \theta]^2}$,即螺旋缠绕装备四轴各轴运动方程见式(16)。

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\sqrt{1 + (r')^2} \tan \alpha}{r} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \varphi = \theta + \phi \\ X = X_\alpha + \sqrt{[k(r' \cos \theta + \theta \cdot r \sin \theta) + r \cos \theta]^2} \\ Z = z + k \\ A = \arctan \frac{\cos \delta}{\sin \delta \sin \phi - \tan \alpha \cos \phi} \end{cases} \quad (16)$$

式中: φ 为主轴转角; X 为吐丝嘴进给位置; Z 为芯模平移位置; A 为吐丝嘴转角。

运用Matlab软件,设置悬纱长度 $L_0=40$ mm,采用四阶龙格库塔法对螺旋缠绕装备四轴运动方程进行求解,考虑芯模轮廓和极孔轮廓在平面坐标系 ZX 中的位置,获得不同悬纱长度($L_0=40、50、60$ mm)对吐丝嘴在空间的运动轨迹与对应主轴转角的影响,如图6所示。

图6为多束碳纤维缠绕机在一个完整绕线周期的运动规律,不同的颜色代表不同的悬纱长度。图6a显示了吐丝嘴的水平和径向运动轨迹,图6b显示了主轴角度的变化,图6c显示了吐丝嘴旋转角度的变化。由图6可知,悬纱长度的变化对吐丝嘴轨迹的运动形状的影响较大,但悬纱长度的变化并不影响各阶段主轴转角的差值,这与悬纱长度的变化不会对纤维铺在芯模的轨迹产生影响这一特征是相符合的。这里 P_1 和 P_2 对应于椭圆封头顶上 $r=82$ mm的两点, P_0 是极孔圆上的一点。在 P_1 到 P_2 的过程中,纤维带逐渐向极孔移动,发生接触,然后远离极孔。

在螺旋缠绕过程中,以恒定悬纱长度为约束条件,通过精确控制吐丝嘴与芯模的进给、旋转运动四个自由度,确保机构各部分按照预定轨迹完成同

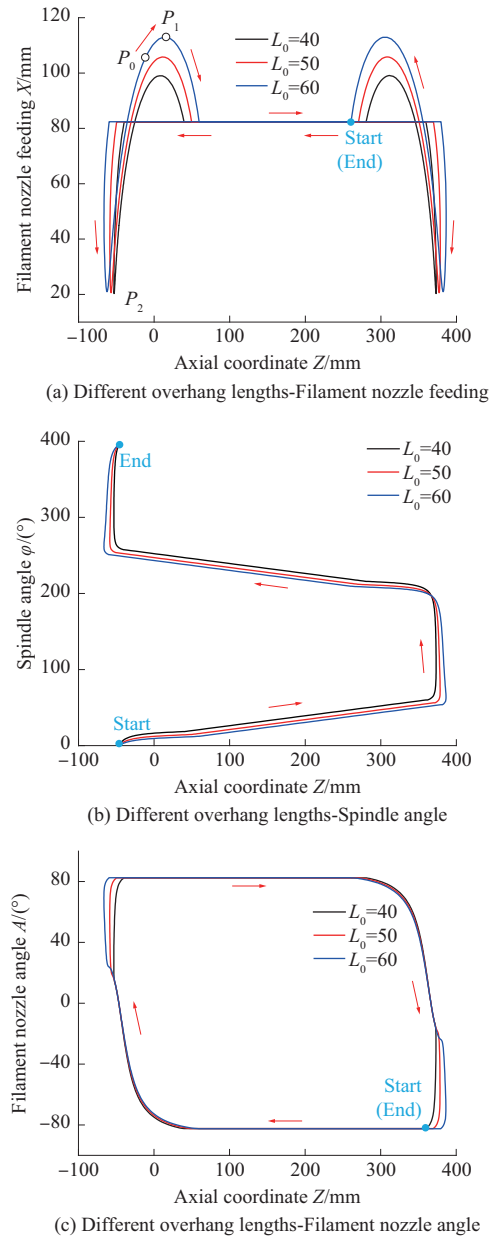


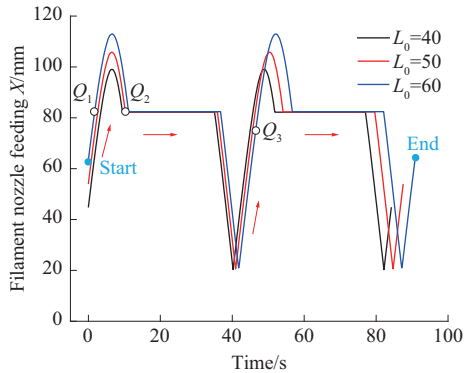
图6 不同悬纱长度下各轴沿芯模轴向上的运动轨迹

Fig. 6 Motion trajectories of each axis along core mould axis under different overhang yarn lengths

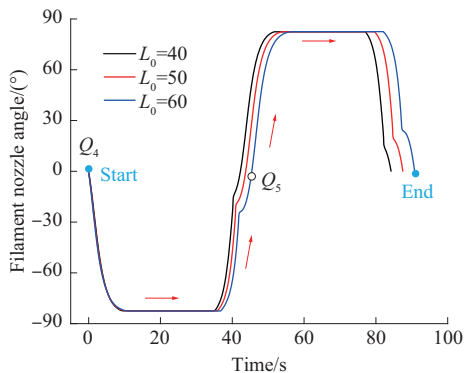
步出纱与运动,进而快速实现同层纤维的无交叉紧密排布。其中,吐丝嘴的进给与旋转运动为保证缠绕精度的关键。为实现这一目标,在吐丝嘴的运动控制上引入恒定出纱速度运动约束,旨在确保螺旋缠绕能够遵循预设轨迹运动,进一步提升缠绕的精确度和稳定性。

图7a为在恒定出纱转速时的吐丝嘴进给运动轨迹,图7b为在恒定出纱转速的吐丝嘴旋转运动轨迹;不同颜色代表不同的悬纱长度,图7中显示悬纱长度 $L_0=40$ mm时缠绕时间最短,选取 $L_0=40$ mm作

为多束碳纤维螺旋缠绕装备的 Spline 驱动曲线。图中 Q_1 、 Q_2 、 Q_4 、 Q_5 对应于椭球封头顶上的两点, Q_1 、 Q_4 是左极孔圆上一点, Q_2 、 Q_5 为左封头与筒身交界处一点。在 Q_1 到 Q_3 (右封头上的一点) 的过程中, 吐丝嘴逐渐从远离左极孔, 然后向右极孔靠近, 与之对应吐丝嘴转角从 Q_4 向 Q_5 转变。



(a) Constant yarn speeds-Filament nozzle feeding



(b) Constant yarn speeds-Filament nozzle angle

图7 恒定出纱转速时不同悬纱长度下吐丝嘴运动轨迹

Fig. 7 Motion trajectories of filament nozzle under different overhang yarn lengths at a constant yarn delivery speed

2 MFW 实验

实验通过自动缠绕程序, 形成凸轮轨迹数组。利用西门子-1500 伺服电机精确驱动, 确保了缠绕机的各轴能够严格按照预定轨迹进行精确运动, 采用上限位传感器测量, 实现了吐丝嘴运动数据采集。运用博途中的 HMI 交互界面, 实现螺旋缠绕运动轨迹的实时可视化, 带来更加直观与便捷的监控界面, 为碳纤维缠绕装备的进一步优化与升级奠定了坚实基础。

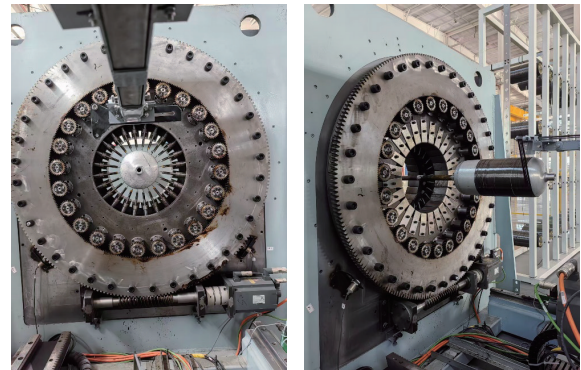
2.1 线型实验

首先, 在 Matlab 中完成数据准备, 验证并完善驱动函数与运动轨迹坐标; 然后, 导入 Matlab 数据, 形成凸轮轨迹数组, 并通过编写自动缠绕程序, 控制缠绕机的各轴按照预定轨迹精确运动, 同时利用

HMI 交互界面实现运动轨迹的实时可视化。图 8 为多束碳纤维缠绕运行图, 图 8a 显示了多束设备整体缠绕图, 图 8b 显示了螺旋缠绕, 图 8c 显示了环向缠绕。



(a) Multi-filament carbon fiber winding equipment diagram



(b) Multi-filament helical unit

(c) Multi-filament hoop unit

图8 多束碳纤维缠绕运行图

Fig. 8 Multi-filament carbon fiber winding process diagram

当驱动电机转速为 800 r/min 时, 缠绕系统吐丝嘴的动态响应关系如图 9 所示。

图 9 中 Spline 为线型模拟的驱动曲线, Test 为多束碳纤维缠绕机中吐丝嘴的实际运动轨迹; 图 9a、图 9b 分别是恒定出纱转速下的吐丝嘴进给与旋转运动轨迹。多束碳纤维缠绕设备读取数据时, 采用贝赛尔插补算法, 该算法理论上能够提供精确曲线, 但设备实际运行中, 存在多级传动机构, 以及摩擦、齿间间隙等问题, 导致 Spline 输入轨迹与实际输出轨迹在不同位置出现不同程度的微小偏差。

实验结果表明, 多束纤维缠绕实验获得的吐丝嘴运动轨迹与 Spline 曲线之间差值大致稳定在 ± 5 mm 之间, 吐丝嘴旋转轨迹与 Spline 曲线之间差值稳定在 $\pm 4^\circ$ 之间, 精确匹配输入 Spline 曲线至输出实验轨迹, 实现了多束纤维同步精准缠绕。

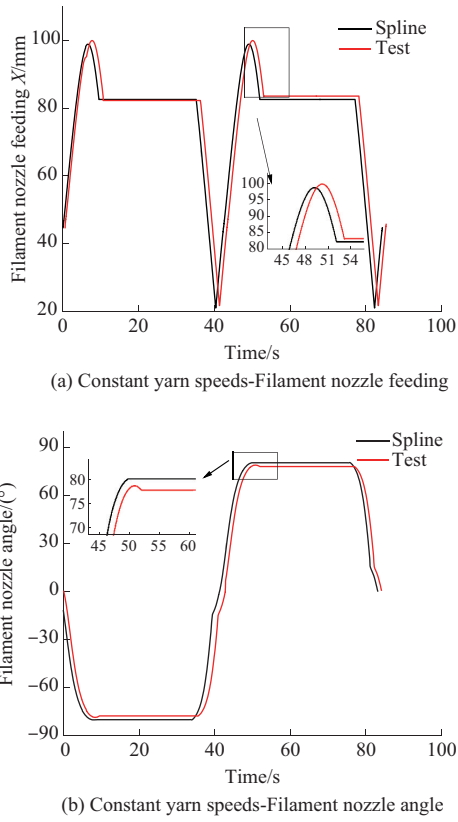


图9 吐丝嘴动态响应关系图

Fig. 9 Dynamic response relationship diagram of filament nozzle

2.2 爆破试验

采用规格为外径82 mm、长度320 mm、材料为6061T6的铝合金内衬,本试验以工作压力为35 MPa的Ⅲ型碳纤维高压储氢容器为研究对象,并运用网格理论进行铺层设计。表1为纤维缠绕层顺序与缠绕角设置^[29]。

MFW线型缠绕过程中,缠绕设备驱动电机的转速为800 r/min,24束纤维同时供纱,SFW工艺下

表1 纤维缠绕层顺序与缠绕角设置

Tab. 1 Sequence of fiber winding layers and winding angle settings

Winding method	Winding angle/(°)	Number of winding layers	Winding thickness/mm
Hoop	90	8	1.44
Helical	±10	1	0.36
Hoop	90	2	0.36
Helical	±12	1	0.36
Hoop	90	2	0.36
Helical	±14	1	0.36
Hoop	90	2	0.36
Helical	±16	1	0.36
Hoop	90	2	0.36
Helical	±16	1	0.36
Hoop	90	2	0.36
Helical	±25	1	0.36
Hoop	90	2	0.36

完整缠绕时间约为286 min,而采用MFW缠绕仅需约28 min完成相同任务,充分展现了MFW技术的卓越效率,螺旋缠绕效率提高数10倍。缠绕后将这两支储氢容器放置固化炉中进行高温旋转固化。由室温升至112 °C,并保温4 h,然后由112 °C降至室温;在升降温过程中固化炉电机转速为6 r/min。

图10为高压储氢容器制备流程图,图10a为单束设备缠绕图,图10b为多束设备缠绕图,图10c为缠绕后高压储氢气瓶。鉴于五切点线型为SFW工艺中常用缠绕线型^[30-31],将五切点线型储氢容器放置在单束碳纤维缠绕机上进行缠绕,而将MFW线型的储氢容器放置在多束碳纤维缠绕设备上缠绕,采用相同的铺层顺序与层数,进行内衬外表面复合材料层的纤维缠绕制备,SFW与MFW都采用威海茗跃新材料有限公司制备的型号为24T20000碳纤维预浸料,其展纱宽度为10 mm,预浸料的性能参数见表2。

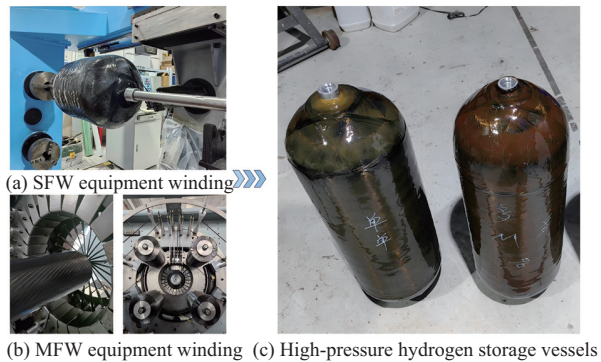


图10 高压储氢容器制备

Fig. 10 Manufacturing of high-pressure hydrogen storage vessel

表2 预浸料的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of prepreg

Parameters	Symbol	Numerical value
Modulus of elasticity (E)/GPa	E_1, E_2, E_3	150.0, 8.41, 8.41
Shear modulus (G)/GPa	G_{12}, G_{23}, G_{13}	5.42, 3.48, 5.42
Poisson ratio (ν)	$\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$	0.42, 0.48, 0.42
Density/(g·cm ⁻³)		1.78
Prepreg thickness/mm		0.183

爆破后的储氢容器如图11所示,图11a为SFW线型储氢容器爆破图,图11b为MFW线型储氢容器爆破图,可知采用SFW线型的储氢容器在过渡段位置发生爆破,而MFW线型储氢容器爆破失效位置在筒身段。与SFW线型相比较,MFW线型更加满足GB/T 35544-2017中气瓶的设计安全准则,即储氢容器在筒身段发生破坏^[32]。

图12为两种线型储氢容器爆破压力曲线,其中



(a) SFW hydrogen storage cylinder (b) MFW hydrogen storage cylinder

图 11 不同缠绕技术的储氢容器爆破试验结果

Fig. 11 Burst test results of hydrogen storage vessels with different winding techniques

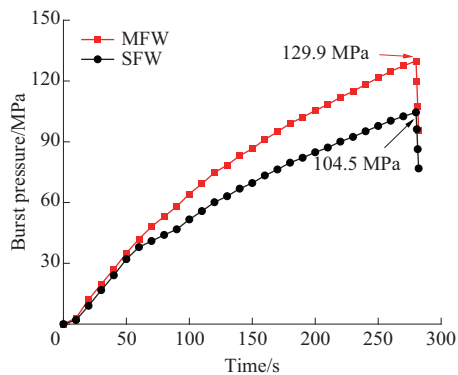


图 12 不同工艺储氢容器爆破压力曲线

Fig. 12 Burst pressure curves for hydrogen storage vessels with different technologies

SFW 线型储氢容器爆破压力为 104.5 MPa, 而多束碳纤维缠绕成型的 MFW 线型储氢容器爆破压力为 129.9 MPa, 较于 SFW 线型提高了约 24.3%, 两支储氢容器爆破压力呈现出的趋势表明多束线型储氢容器纤维缠绕层的承载能力更好。

爆破试验结果揭示了传统单束缠绕的储氢容器在纤维交叉问题上存在的缺陷, 这直接影响到缠绕制品高压储氢容器的成品性能。相比之下, 多束碳纤维缠绕制品展现出了更为优异的性能。

3 结论

(1) 引入 NVSCNG 并运用到 MFW 技术中, 以恒定悬纱长度为约束条件, 推导出关于 MFW 的吐丝嘴运动轨迹, 依据线型模拟的仿真数据进行相应的实验, 精确匹配输入 Spline 函数至输出仿真与实验轨迹, 实现了多束纤维同步精准缠绕, 结果表明, 采用 SFW 的完整缠绕时间约为 286 min, 而采用 MFW 进行缠绕仅需约 28 min 完成, 显著提升了气瓶缠绕效率。

(2) 采用五切点线型的 SFW 储氢容器爆破压力为 104.5 MPa, 而 MFW 工艺下的多束线型储氢容器爆破压力为 129.9 MPa, MFW 工艺下的多束线型储氢容器爆破压力相较于 SFW 线型储氢容器提高了

约 24.3%, 验证了 MFW 工艺下多束线型储氢容器的承载能力更加优异。

参考文献

- [1] STAFFELL I, SCAMMAN D, VELAZQUEZ ABAD A, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system[J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(2):463–491.
- [2] 李智勇, 陆冬青. 新型大容积高压储氢容器的研制[J]. *机械制造*, 2025, 63(7):29–34, 52.
- [3] LI Zhiyong, LU Dongqing. Development of new type of large-volume high-pressure hydrogen storage vessel[J]. *Machinery*, 2025, 63(7):29–34, 52.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] SHARMA P, SARDAR H H, NEOGI S. Thermomechanical processing of Type-4 composite cylinders under static load[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105465. DOI: 10.1016/j.est.2022.105465.
- [7] 刘长喜, 姜旭, 王佳杰, 等. 纤维缠绕复合材料压力容器的多尺度分析与性能预测[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(11):115–122.
- [8] LIU Changxi, JIANG Xu, WANG Jiajie, et al. Multiscale analysis and performance prediction of filament-wound composite pressure vessel[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(11):115–122.
- [9] 王雪莹. 热负荷诱发 III 型高压储氢气瓶及缠绕层材料失效机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- [10] WANG Xueying. Failure mechanism of type III high pressure hydrogen storage tanks and winding layer materials induced by thermal loads[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [11] SHEN C S, HAN X P. Damage and failure analysis of filament wound composite structure considering fibre crossover and undulation[J]. *Advanced Composites Letters*, 2018, 27(2). DOI: 10.1177/096369351802700202.
- [12] SHEN C S, HAN X P, GUO Z X. A new method for calculating the stiffness of filament wound composites considering the fibre undulation and crossover[J]. *Advanced Composites Letters*, 2014, 23(4). DOI: 10.1177/096369351402300402.
- [13] 孟晓旭, 晏石林, 李永静, 等. 考虑纤维起伏的开孔纤维缠绕复合材料结构拉伸破坏[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(11):6 673–6 683.
- [14] MENG Xiaoxu, YAN Shilin, LI Yongjing, et al. Tensile failure of open-hole filament wound composite structures considering fiber undulation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(11): 6 673–6 683.
- [15] UDDIN M S, MOROZOV E V, SHANKAR K. The effect of filament winding mosaic pattern on the stress state of filament wound composite flywheel disk[J]. *Composite Structures*, 2014, 107: 260–275.

- [11] 沈创石. 纤维交叉缠绕复合材料圆柱壳的屈曲分析[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2024, 42(5):27–35.
Shen Chuangshi. Buckling analysis of fiber crossover wound composite cylindrical shells[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, 2024, 42(5):27–35.
- [12] GUO Z X, LI Z G, CUI J J, et al. The effect of winding patterns on the mechanical behavior of filament-wound cylinder shells[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2020, 16(3): 508–518.
- [13] GUILLON D, ESPINASSOU D, PICHON P, et al. Manufacturing, burst test and modeling of high pressure thermoplastic composite overwrap pressure vessel[J]. Composite Structures, 2023, 316(15). DOI:10.1016/j.compstruct.2023.116965.
- [14] ZU L, XU H, WANG H B, et al. Design and analysis of filament-wound composite pressure vessels based on non-geodesic winding [J]. Composite Structures, 2019, 207:41–52.
- [15] ZU L, KOUSSIOS S, BEUKERS A. Design of filament-wound circular toroidal hydrogen storage vessels based on non-geodesic fiber trajectories[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(2):660–670.
- [16] 祖磊, 肖康, 张骞, 等. 不等极孔纤维缠绕线型轨迹及工艺研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2021(7):48–54.
ZU Lei, XIAO Kang, ZHANG Qian, et al. Research on filament winding line path and technology of unequal pole hole[J]. Composites Science and Engineering, 2021(7):48–54.
- [17] DALIBOR I H, LISBÔA T V, MARCZAK R J, et al. Optimum slippage dependent, non-geodesic fiber path determination for a filament wound composite filament nozzle[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2020, 82. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.103994.
- [18] DALIBOR I H, LISBÔA T V, MARCZAK R J, et al. A geometric approach for filament winding pattern generation and study of the influence of the slippage coefficient[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41:1–16. DOI:10.1007/s40430-019–2083-2.
- [19] ZHANG B, XU H, ZU L, et al. Design of filament-wound composite elbows based on non-geodesic trajectories[J]. Composite Structures, 2018, 189:635–640.
- [20] LIANG J G, XUE Y Q, LI Y H, et al. Design of continuous transition line pattern between layers of composite pressure vessel[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2025, 44(11/12): 620–633.
- [21] WANG Y, XU H. Design method of variable slippage coefficient non-geodesic filament-wound composite pressure vessels[J]. Polymer Composites, 2024, 45(5):3 950–3 964.
- [22] WANG Y T, XU H J, SONG H, et al. Determining the optimal dome shape using a novel variable slippage coefficient non-geodesic[J]. Polymer Composites, 2024, 45(13):11 730–11 742.
- [23] ALMEIDA J H S, ST-PIERRE L, WANG Z H, et al. Design, modeling, optimization, manufacturing and testing of variable-angle filament-wound cylinders[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 225. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109224.
- [24] ZHAO X D, LIANG J G, LIU J L, et al. A novel multi-filament winding technique for type III composite pressure vessel: From CFRP cross-undulation concept to structural performance validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(45): 17 237–17 250.
- [25] ZHAO X D, LIANG J G, ZHAO C J, et al. Experimental and numerical analysis of low-velocity impact behavior of wound products using multi-filament winding technique[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25:7 292–7 306.
- [26] ZHENG J Y, LIU X X, XU P, et al. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(1):1 048–1 057.
- [27] ZENG W L, HU W H, LIU H, et al. Finite element analysis of glass fiber winding molding of HDPE pressure vessel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1965. DOI: 10.1088/1742-6596/1965/1/012050.
- [28] GUO K T, WEN L H, XIAO J Y, et al. Design of winding pattern of filament-wound composite pressure vessel with unequal openings based on non-geodesics[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2020, 15. DOI:10.1177/1558925020933976.
- [29] DAI Y C, ZHENG C X, LIN J, et al. Winding pattern design of composite cylinders considering the effect of fiber stacking[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111306.
- [30] ZHOU J, CHEN J Q, ZHENG Y C, et al. Dome shape optimization of filament-wound composite pressure vessels based on hyperelliptic functions considering both geodesic and non-geodesic winding patterns[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(14):1 961–1 969.
- [31] 郭巍, 黄浩, 苑大超, 等. FRP 汽车储气罐缠绕参数对力学性能的影响[J]. 工程塑料用, 2020, 48(2):53–59.
GUO Wei, HUANG Hao, YUAN Dachao, et al. Influence of winding parameters of FRP vehicle air tanks on mechanical properties[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2):53–59.
- [32] LIU P F, CHU J K, HOU S J, et al. Numerical simulation and optimal design for composite high-pressure hydrogen storage vessel: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4):1 817–1 827.