

软硬混编预制体窄缝通道连续碳纤维束引纬系统的设计及实验验证

邢力鹏^{1,2} 董九志^{1,2*} 陈云军³ 李锐^{1,2} 蒋秀明^{1,2}

1.天津工业大学机械工程学院,天津,300387

2.天津工业大学天津市现代机电装备技术重点实验室,天津,300387

3.天津工业大学控制科学与工程学院,天津,300387

摘要:为解决软硬混编预制体成形过程中窄缝通道引纬环节手工操作导致的劳动强度大、成形效率低的问题,设计出一种基于连续碳纤维束 S 形引纬轨迹的自动化引纬系统。通过分析 S 形引纬轨迹的形成机理,建立了碳纤维束位置与各机构动作的协同关系,并据此设计了以递纬机构、电子引纬机构、已引纬纱控制机构为核心的系统架构。样机实验表明该系统能在窄缝通道中实现 12.5 纬/分钟的连续稳定引纬。

关键词:软硬混编预制体;窄缝通道引纬;连续碳纤维束;S 形轨迹;引纬系统

中图分类号: TB332

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Experimental Verification of a Narrow-channel Continuous Carbon Fiber Tow Weft Insertion System for Soft-Hard Blended Preforms

XING Lipeng^{1,2} DONG Jiuzhi^{1,2*} CHEN Yunjun³ Li Rui^{1,2} JIANG Xiuming^{1,2}

1.School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin, 300387

2.Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tiangong University, Tianjin, 300387

3.School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin, 300387

Abstract: To address the issues of high labor intensity and low forming efficiency caused by manual weft insertion in narrow channels during the forming processes of soft-hard blended preforms, an automated weft insertion system was developed based on an S-shaped trajectory of continuous carbon fiber tow. The formation mechanism of the S-shaped trajectory was analyzed to establish the synergistic relationship between carbon fiber bundle positioning and coordinated multi-mechanism motions. A system architecture was designed, with the weft delivery mechanisms, electronic weft insertion mechanisms and post-insertion control mechanisms as the core components. Prototype experiments demonstrate that the system achieves continuous and stable weft insertion in narrow channels at a rate of 12.5 picks per minute.

Key words: soft-hard blended preform; narrow-channel weft insertion; continuous carbon fiber tow; S-shaped trajectory; weft insertion system

0 引言

碳/碳(C/C)复合材料因其优异的抗烧蚀、抗热冲击性和耐摩擦性能而广泛用于航天热结构和热防护部件^[1-4]。航天推进技术的不断发展对固体运载火箭发动机的性能提出更高要求。喉衬作为发动机推力转化的核心部件,其结构与制造工艺直接影响发动机性能^[5-6]。

目前,C/C喉衬预制体的制备技术包括针刺成形、细编穿刺成形、软硬混编成形^[7-10]。针刺与细编穿刺技术相对成熟^[11-12],但前者存在层间性

能不足的缺陷,后者在大尺寸预制体制备中面临结构局限性,难以满足高性能发动机的需求。为克服上述缺陷,HOU等^[13]将碳纤维束与刚性碳纤维棒(碳棒)作为增强体,通过混合编织技术将三向碳纤维束精准排布于碳棒间隙形成的窄缝通道中,获得结构整体性显著增强的多向预制体,显著提高了C/C复合材料的力学和热力学性能^[14-18]。

现有研究集中于软硬混编预制体复合成形后的性能表征,对预制体制备过程中的关键工艺——窄缝通道(宽度小于2 mm)连续碳纤维束

引纬技术的研究存在不足。传统引纬常采用剪纬工序^[19],这会破坏碳纤维的连续性,导致预制体结构松散、孔隙率分布不均,影响致密化均匀性,降低复合材料的力学性能。因此,如何实现窄缝通道内连续碳纤维束的高效引纬,成为制约软硬混编预制体成形技术发展的关键难题。针对这一问题,本文提出一种基于 S 形引纬轨迹的窄缝通道连续碳纤维束引纬工艺,并设计了相应的机械结构和控制系统。样机实验验证了该技术的可行性。

1 引纬系统的功能需求分析

1.1 窄缝通道连续碳纤维束引纬轨迹

工装系统由 2 个均布工装孔(正六边形排列)的导向模板组成,将碳棒插入直径略大的工装孔位,形成碳棒阵列,如图 1a 所示。碳棒阵列内部间隙构成了有序引入连续碳纤维束的窄缝通道。如图 1b 所示,引纬系统将连续碳纤维束沿 S 形引纬轨迹引入窄缝通道。碳纤维束在通道内部形成 2 条纬纱轨迹,并在相邻两通道过渡处环绕碳棒形成锁边结构。这种设计能有效锁紧织物,增强预制体结构的整体稳定性。

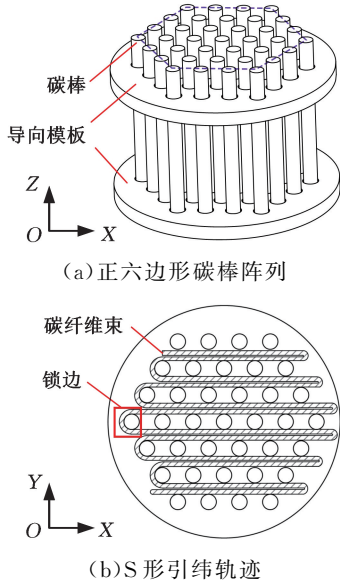
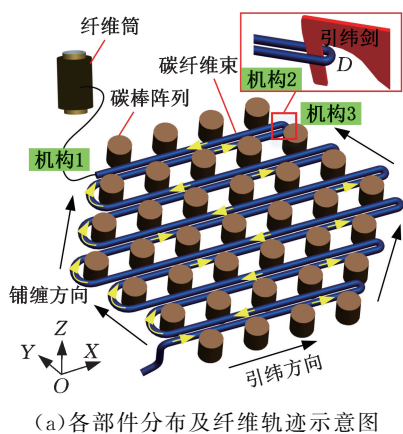


图 1 碳棒阵列工装及 S 形引纬轨迹示意图
Fig.1 Carbon rod array tooling system and S-shaped weft insertion trajectory

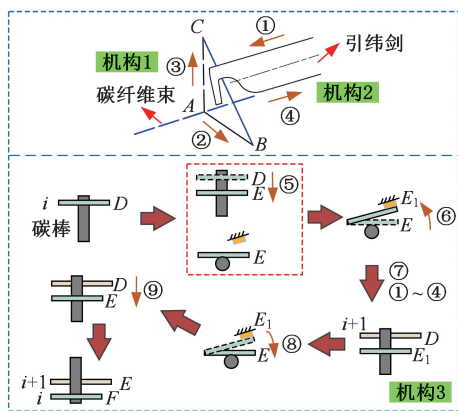
1.2 连续碳纤维束 S 形引纬轨迹的形成机理

为实现图 1b 所示的连续碳纤维束 S 形引纬轨迹,通过分析引纬过程中碳纤维束的位置变化,系统研究碳纤维束运动与机构动作的配合关系,进而揭示连续碳纤维束 S 形轨迹的形成机理,如图 2 所示。

纤维筒与机构 1 安置在碳棒阵列左侧,碳纤



(a) 各部件分布及纤维轨迹示意图



(b) 编织过程示意图

图 2 S 形引纬轨迹形成机理

Fig.2 Formation mechanism of S-shaped weft insertion trajectory

维束从纤维筒退绕后,首先由机构 1 导向并精确送入引纬剑前端的钩槽内;在碳棒阵列右侧安置机构 2、机构 3,其中,机构 2 负责沿引纬方向将碳纤维束引入窄缝通道;机构 3 完成钩槽内碳纤维束的卸载,并将其稳固于通道中。执行机构 1~3 通过协同动作完成单通道内碳纤维束的铺放与定位,随后 X-Y 运动平台携带执行机构组沿铺缠方向进行通道转换,通过循环作业在碳棒阵列间隙中逐步形成连续的 S 形引纬轨迹。各机构空间分布与纤维运动轨迹如图 2a 所示。

具体编织过程如图 2b 所示。引纬剑沿 X 轴负方向穿过窄缝通道运动至机构 1 所在侧(动作 ①——进剑)。初始状态下,碳纤维束延伸方向与引纬剑轴线均平行于 X 轴。为有效引纬,机构 1 需对碳纤维束执行精确定位操作:首先通过机械装置将碳纤维束 AB 段调整至与 Y 轴平行的方向,并固定 B 点(动作 ②——控纬);随后将 A 点碳纤维束沿 Z 轴提升高度 H,使 AB 段形成与 X-Y 平面成 θ 角的倾斜段,并精准导入引纬剑前端的钩槽区域(动作 ③——提纬);捕获碳纤维束后,引纬剑携带碳纤维束沿引纬方向退出窄缝通

道(动作④——回剑),在通道中形成 2 条纬纱轨迹,完成一个通道的引纬工作。

将引纬后碳纤维束的初始位置定义为引纬位置 D ,此时的碳纤维束仍滞留于引纬剑钩槽内,需将其卸载至位置 E (动作⑤——控纱)。另外,连续碳纤维束按预设 S 形轨迹引纬形成的纤维层结构,在碳棒阵列左侧通过环绕碳棒锁边固定,右侧保持开放结构。这种连续引纬方式导致相邻通道的碳纤维束(定义为第 i 纬和第 $i+1$ 纬)产生张力传递效应,具体表现为:当引入第 $i+1$ 纬时,已铺放的第 i 纬会在张力作用下被牵引出通道。为解决张力传递的问题,需通过机构 3 将卸载后的第 i 纬临时固定至夹纱位置 E_1 (动作⑥——夹纱-固定),避免后续引纬时的张力对其产生影响。完成固定后,由 X-Y 运动平台控制碳棒阵列两侧所有机构转换至下一通道(动作⑦——寻位),并重复动作①~④,将第 $i+1$ 纬引入至位置 D 。在引入新纬纱后,首先将固定的第 i 纬释放至位置 E (动作⑧——夹纱-释放),随后通过机构 3 同步完成 2 个关键动作:将第 $i+1$ 纬定位至位置 E ,同时推动第 i 纬至织口位置 F (动作⑨——打纱)。第 i 纬固定后,即可继续引入新的纬纱。系统循环执行上述动作即可在窄缝通道中形成 S 形连续引纬轨迹。

1.3 引纬系统总体架构

根据连续碳纤维束 S 形引纬轨迹的形成机理,构建窄缝通道自适应引纬系统的总体架构。如图 3 所示,引纬系统主要由筒子架、递纬机构、碳棒阵列、电子引纬机构、已引纬纱控制机构、X-Y 运动平台组成。由于碳纤维是一种高脆性的材料,在织造过程中易产生毛羽甚至发生断裂,影响碳纤维类预制体的成形质量和成形效率,因此采用织造一体化技术^[20],即碳纤维束在筒子架退绕

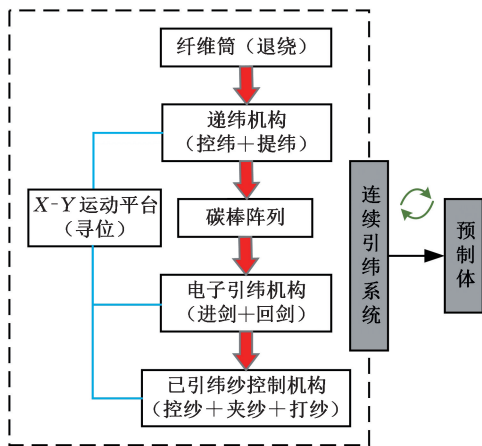


图 3 引纬系统总体架构

Fig.3 Overall architecture of weft insertion system

后直接进入引纬系统,最大限度地减少碳纤维束的损伤。

2 引纬系统的关键技术

2.1 碳纤维束预处理技术

图 4 为预处理阶段的碳纤维束纱路示意图,碳纤维束自纤维筒依次通过导纱元件、断纱检测器、限位辊和张力调节装置。导纱元件确保碳纤维束沿预定路径的平滑过渡。断纱检测器实时监测碳纤维束的连续性,一旦检测到断裂或缺失,系统立即警报并采取相应的应对措施。为增强碳纤维束的稳定性并提高其编织性能,碳纤维束在绕过限位辊下方时会浸渍助剂。张力装置对碳纤维束施加适量的预张力,使碳纤维束在编织过程中保持直线形态,避免松弛或过度伸长。

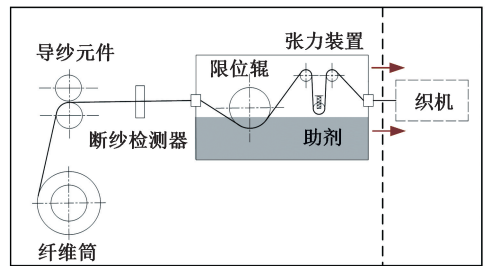


图 4 碳纤维束预处理纱路示意图

Fig.4 Schematic diagram of carbon fiber bundles pretreatment yarn

2.2 窄缝通道变程递纬技术

预处理后的碳纤维束进入递纬机构。如图 5 所示,递纬机构分步执行控纬和提纬动作。

1)控纬。碳纤维束通过提纬杆上的瓷环孔,由控纬杆绕转轴 O_1 顺时针旋转角 η_1 ,将碳纤维束精准引导至预设位置(B 点)。控纬杆与配合面在 B 点配合,固定碳纤维束。此时,碳纤维束的 AB 段恰好位于引纬剑钩槽正下方,如图 5a 所示。

2)提纬。提纬杆绕转轴 O_2 逆时针旋转角 η_2 ,将碳纤维束 AB 段的 A 点提升至 C 点。此时,碳纤维束 BC 段与水平面呈 45° 夹角,并精准导入引纬剑前端的钩槽区域,如图 5b 所示。

为优化引纬时序,在引纬剑启动进剑运动的同时,递纬机构同步执行控纬动作;引纬剑进剑运动结束时,立即执行提纬动作,实现工序衔接。

2.3 窄缝通道变程引纬技术

为使碳纤维束引纬长度与窄缝通道长度匹配,引纬机构采用伺服电机驱动和计算机控制相结合的电子引纬方式。如图 6 所示,电子引纬机构由集成的齿带传动平台和引纬剑组成。齿带传

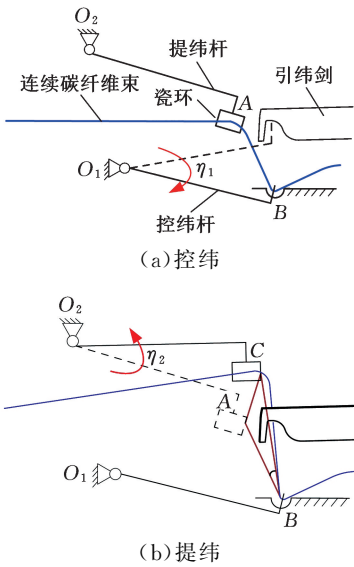


图 5 递纬机构工作原理

Fig.5 Working principle of weft delivery mechanism

动平台采用传动比为 1 : 1 的齿轮齿带结构,将伺服电机的旋转运动转换为滑台的水平往复运动。工具钢制成的引纬剑通过螺栓与滑台刚性连接,在滑台驱动下穿过窄缝通道进行引纬。通过伺服控制系统调节电机转角来动态调整引纬动程,并依据预设的速度曲线规划电机的运动规律获得理想的引纬特性。

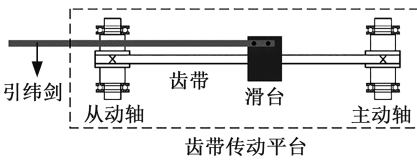


图 6 电子引纬机构示意图

Fig.6 Schematic diagram of electronic weft insertion mechanism

2.4 窄缝通道检测技术

窄缝通道的宽度约 2 mm,采用厚度 1.5 mm 的引纬剑引纬时,引纬剑单侧与碳棒的理论间隙为 0.25 mm。数以万计的碳棒不可避免地存在扭曲或棱边等缺陷,可能导致引纬剑通过窄缝通道时与碳棒发生干涉甚至撞断碳棒,中断预制体的成形。因此,每次引纬前检测窄缝通道的可通过性至关重要。

基于光电检测原理开发的窄缝通道检测系统由数字光纤放大器和专用光学探头组成。光学探头集成了极细光点透镜和平行光透镜,可产生直径 1.5 mm 的检测光束。该光束能有效通过 2 mm 宽的窄缝通道,接收端通过测量透射光强和光斑偏移量实现通道可通过性的量化判定。通道的实际宽度小于设定阈值 1.5 mm 时,系统将自动判定通道宽度不满足要求。此时,需详细检查并及

时移除存在缺陷的碳棒,确保引纬过程的连续性。

2.5 窄缝通道已引纬纱控制技术

引纬剑通过回剑运动将碳纤维束引入窄缝通道,需依次执行控纱、夹纱和打纱动作,从而实现碳纤维束从引纬剑钩槽到窄缝通道的精准转移与铺放。图 7 所示为集成了控纱、夹纱和打纱动作的已引纬纱控制机构。该机构由六连杆控打机构(3-4-5-6-7-8)及四连杆夹纱机构(1-2-3-9)组成,其中,控打机构将杆 4 的转动转化为滑块 8 的直线运动,夹纱机构将活塞杆 1 的往复直线运动转化为杆 3 的摆动。

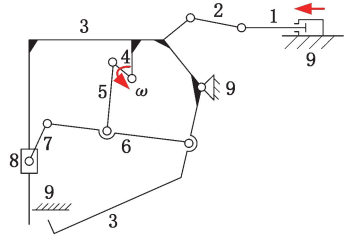


图 7 已引纬纱控制机构简图

Fig.7 Schematic diagram of the post-insertion control mechanism

控打机构末端杆(以下简称控打杆)为“C”形,通过螺栓安装在滑块 8 上。杆 4 驱动滑块 8 沿导轨下行时,控打杆同步下移。控打杆上端执行控纱动作,下端执行打纱动作。

夹纱机构末端杆(以下简称夹纱杆)刚性于驱动杆 3 的末端。驱动杆 3 顺时针旋转时,夹纱杆随动并与机架 9 的夹持面接触,产生夹持力,固定碳纤维束。驱动杆 3 逆时针旋转时,夹纱杆与夹持面分离,释放碳纤维束。

已引纬纱控制机构的工作原理如图 8 所示,控打杆向下移动时,其上端将第 $i+1$ 纬移从位置 D 至位置 E ,下端将第 i 纬从位置 E 打向位置 F 。此时,第 i 纬铺放在窄缝通道中,标志着该纬引纬工序的完成。夹纱杆顺时针旋转角 α 至位置 E_1 ,夹紧第 $i+1$ 纬,便可继续下一通道的引纬工作。

该设计将控打机构整体安装在杆 3 上,通过杆 3 的旋转运动驱动夹纱杆实现夹纱动作的同时,还带动控打杆同步旋转,避免了控打杆返回初始位置过程中,其下端与固定在位置 E_1 处的 $i+1$ 纬干涉,确保引纬过程的连续性。

3 控制系统设计

3.1 控制系统的硬件设计

软硬混编预制体窄缝通道连续碳纤维束引纬系统是采用伺服控制技术、气动控制技术和传感器检测技术的复杂工程系统。松下 PLC(FPXH-

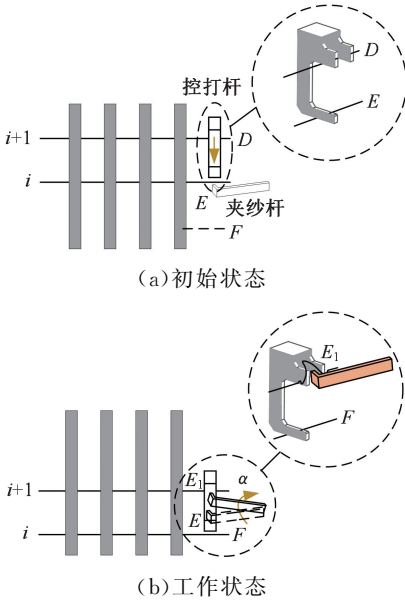


图 8 已引纬纱控制机构工作原理

Fig.8 Working principle of weft controlling mechanism after insertion

C60T)作为核心控制单元,确保各执行机构的精确协调作业。人机交互采用昆仑通态触摸屏 TPC1162Hii,实时监控运行状态。控制系统硬件组成如图 9 所示。

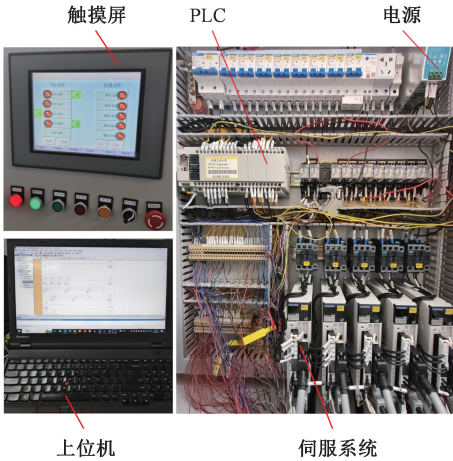


图 9 PLC 控制系统硬件组成

Fig.9 Hardware composition of PLC control system

3.2 控制系统的软件设计

3.2.1 伺服轴运动控制参数的计算

为简化系统各伺服单元运动轴的脉冲计算,采用安川伺服驱动调试软件 SigmaWin+ 内部配置的电子齿轮功能,确定 X 轴平台、Y 轴平台及引纬伺服单元轴的电子齿轮比 I 与脉冲数 P_s :

$$I = \frac{P_i \Delta P}{R \Delta S} \quad (1)$$

$$P_s = \frac{\Delta}{\Delta P} \quad (2)$$

式中: P_i 为编码器分辨率; ΔP 为一个指令脉冲的移动量; R 为减速比; ΔS 为负载轴旋转一圈的移动量; Δ 为轴运

动进给量。

为计算各轴的进给量,构建伺服单元运动轴参数计算模型,如图 10 所示,图中,引纬点、递纬点分别为引纬剑在通道的起始位置及终止位置。两点的间距即为引纬剑的动程:

$$L_i = a + b + w_i \quad (3)$$

式中: a 、 b 分别为引纬点和递纬点与碳棒阵列正六边形边缘的水平距离; w_i 为窄缝通道 i 的长度。

根据碳棒阵列的结构特征,窄缝通道长度 w_i 呈现“小—大—小”的对称变化趋势。第 i 个窄缝通道的长度为

$$w_i = w_{n+1-i} = \begin{cases} l + (i - 0.5)d_1 & i = 1, 2, \dots, 0.5n \\ l + (n - i + 0.5)d_1 & i = 0.5n + 1, 0.5n + 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中: l 为碳棒阵列的边长; d_1 为两碳棒的中心距; n 为窄缝通道数量。

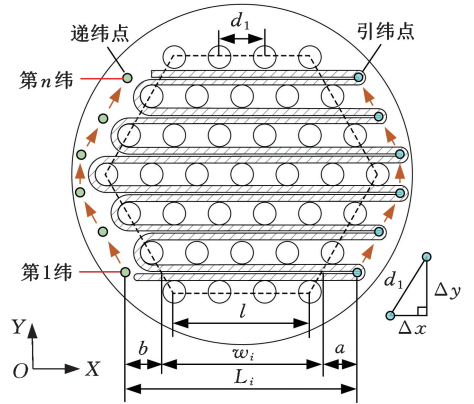


图 10 伺服运动轴参数计算模型

Fig.10 Calculation model of the servo motion axis parameters

X-Y 运动平台在运动过程中,参数 a 、 b 恒定,驱动平台上的机构沿正六边形碳棒阵列边缘精确运动。X 轴平台在 X 向往复移动,Y 轴平台在整个插补位移过程中始终沿 Y 轴正向移动。X-Y 运动平台的进给量 Δx 、 Δy 分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= d_1 \sin 30^\circ \\ \Delta y &= d_1 \sin 60^\circ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将各轴进给量代入式(1)、式(2),并结合表 1 所示的伺服单元参数,可计算出电子齿轮比及所需脉冲数。

表 1 伺服单元参数表

Tab.1 Servo unit parameter table

项目	X 轴运动平台	Y 轴运动平台	引纬伺服单元
结构	丝杠螺母	丝杠螺母	齿轮齿带
R	1 : 1	1 : 10	1 : 1
$\Delta S/\text{mm}$	5	10	78
$\Delta P/\mu\text{m}$	1	1	5
P_i	11 777 216	11 777 216	11 777 216

3.2.2 控制程序设计

操作人员通过触摸屏配置织造参数并启动主程序,PLC 根据参数调用相应的子程序,并通过处理传感器反馈的信号实现多机械执行机构的运动协调控制,完成软硬混编预制体窄缝通道变动程引纬工作。系统的程序运行流程如图 11 所示。

织造之前,全面检测所有关键机械组件的原位功能。之后,X-Y 运动平台沿碳棒阵列边缘进行精确的插补运动。引纬剑伸出前,探测通道的可通过性,随后根据通道长度的变化执行相应的变动程引纬运动。引纬过程中,若检测到断纬(碳纤维束的缺失或断裂),系统报警并结束工作,等待操作人员的处理。初始时,通道计数器设为零。每完成一个通道的引纬工作,计数器数值自动加 1 直至预设的阈值 n ,此时,一个纤维层的引纬工作完成。纤维层累积高度满足预定要求后,系统自动停止运行。

4 引纬系统实验验证

为验证引纬系统在窄缝通道中引入碳纤维束的可行性,研制实验样机(图 12)对碳棒阵列进行连续碳纤维束引纬实验。

实验材料为康本 HT-1 3k 碳纤维束及同型号碳纤维束制成的碳棒。碳棒阵列内切圆直径为 350 mm,高度为 40 mm,形成的窄缝通道数目 n 为 108。鉴于预制体窄缝通道的对称性,选取前 54 个通道进行引纬实验,实验结果如图 13 所示。

实验结果表明设计的引纬系统可在窄缝通道中完成连续碳纤维束的引纬工作,验证了系统的

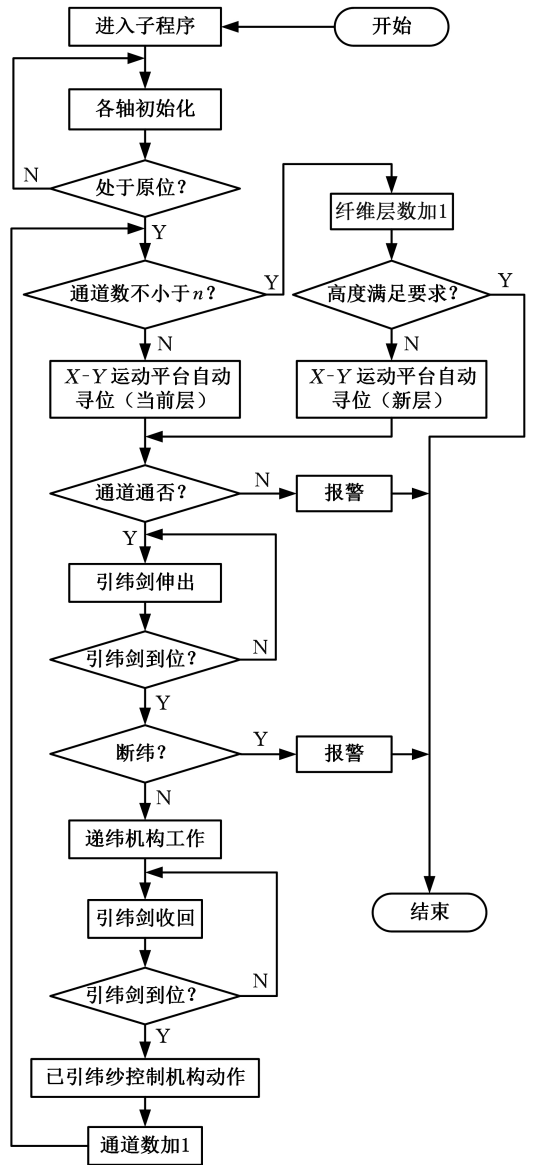


图 11 程序运行流程图

Fig.11 Program running flow chart

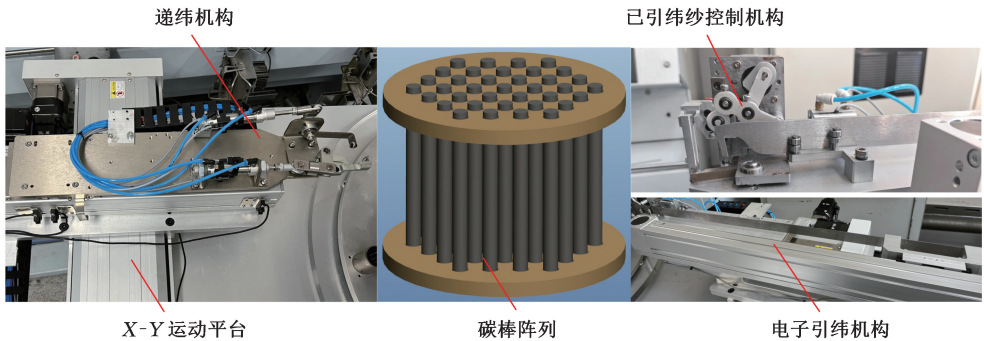


图 12 引纬系统实验样机

Fig.12 Experimental prototype of weft insertion system

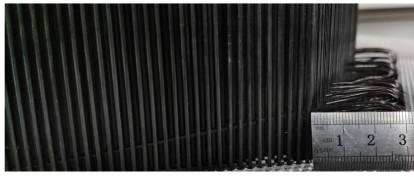
可行性。纤维层锁边质量符合工艺要求,织口侧碳纤维束排列整齐且预留长度控制在 30 mm 左右。为更直观地观察实验引纬轨迹,将纤维层提升至碳棒阵列最上方,如图 13c 所示。碳纤维束引纬长度与窄缝通道长度匹配,且在窄缝通道中

沿预期的 S 形轨迹引纬;54 个通道中未发现缺纱或断纱,保证了碳纤维束的连续性。

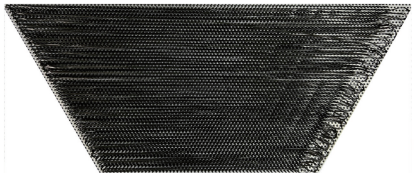
在保证引纬效果的前提下对系统性能进行评估,利用上位机采集 54 个通道所用的引纬时间 T_i (从引纬剑启动至完成第 i 通道碳纤维束铺设)



(a) 锁边效果图



(b) 织口效果图



(c) 连续碳纤维束 S 形引纬轨迹

图 13 引纬实验结果

Fig.13 Experimental results of weft insertion

并计算引纬速率 v 。将结构参数 $a = 30 \text{ mm}$, $b = 20 \text{ mm}$, $l = 194.4 \text{ mm}$, $d_1 = 3.6 \text{ mm}$ 代入式(3)、式(4), 得到引纬距离

$$S_i = 2L_i = 485.2 + 7.2i \quad i = 1, 2, \dots, 54 \quad (6)$$

根据图 14 所示的 i 通道引纬距离及引纬时间求得引纬速率

$$v = 60 \times 54 / \sum_{i=1}^{54} T_i = 12.5 \text{ 纬 / 分钟} \quad (7)$$

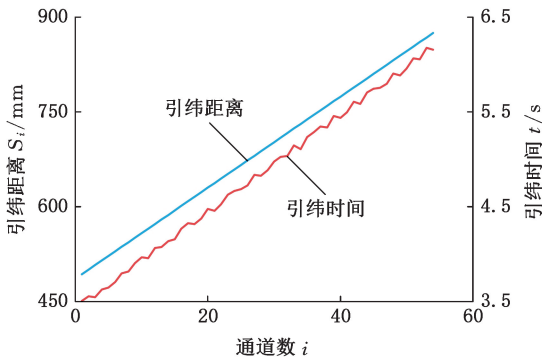


图 14 引纬实验数据

Fig.14 Experimental data of weft insertion

5 结论

1) 针对软硬混编预制体成形过程中的窄缝通道引纬手工操作劳动强度大、成形效率低的问题, 基于连续碳纤维束 S 形引纬轨迹设计了专用的窄缝通道自适应引纬系统。

2) 通过分析连续碳纤维束 S 形引纬轨迹的形成机理构建了系统架构。通过构建的伺服单元运动轴参数计算模型确定了各运动轴的电子齿轮比和所需的脉冲数, 并利用 PLC 和触摸屏搭建了引

纬控制系统。

3) 样机实验结果表明, 系统能将碳纤维束沿 S 形轨迹连续稳定引入窄缝通道, 碳纤维束锁边效果质量符合工艺要求且在织口侧排列整齐, 引纬速率达到 12.5 纬/分钟。

参考文献:

- [1] 单忠德, 刘阳, 范聪泽, 等. 复合材料预制体成形制造工艺与装备研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(23):2774-2784.
SHAN Zhongde, LIU Yang, FAN Congze, et al. Research on Forming Manufacturing Technology and Equipment of Composite Preforms[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23):2774-2784.
- [2] ZHANG Jin, LIN Gang, VAIDYA U, et al. Past, Present and Future Prospective of Global Carbon Fibre Composite Developments and Applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 250: 110463.
- [3] LI Siyuan, SHAN Zhongde, DU Dong, et al. Friction and Damage of Carbon Fiber in Tow-metal Friction during the Formation of Flexible-oriented Three-dimensional Composite Preforms[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 57(30):4687-4698.
- [4] KIM M, KIM Y. A Thermo-mechanical Properties Evaluation of Multi-directional Carbon/Carbon Composite Materials in Aerospace Applications[J]. Aerospace, 2022, 9(8):461.
- [5] 马帅, 郭健鑫, 周磊, 等. 固体火箭发动机技术发展综述[J]. 火箭推进, 2023, 49(2):1-14.
MA Shuai, GUO Jianxin, ZHOU Lei, et al. Review on Technology Development of Solid Rocket Motor[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2023, 49(2):1-14.
- [6] 张军, 严科飞, 樊哲, 等. 喷管碳/碳复合材料喉衬工程化问题探讨[J]. 炭素, 2023(3):26-29.
ZHANG Jun, YAN Kefei, FAN Zhe, et al. Discussion on Engineering of Carbon/Carbon Composite Pipe Lining for Nozzle[J]. Carbon, 2023(3):26-29.
- [7] 刘昱君, 刘希艳, 党艺旋. 针刺技术在复合材料预制成型体中的研究进展[J]. 山东纺织科技, 2021, 62(6):4-7.
LIU Yujun, LIU Xiyan, DANG Yixuan. Research Progress of Needle-punching Technology in Composite Materials Preforms[J]. Shandong Textile Science & Technology, 2021, 62(6):4-7.
- [8] 吴小军, 杨杰, 杨云鹏, 等. 细编穿刺 C/C 喉衬材料烧蚀微结构及损伤机理[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(4):594-600.
WU Xiaojun, YANG Jie, YANG Yunpeng, et al.

- Ablative Microstructure and Damage Mechanism of the Fine Weave Pierced C/C Throat Material[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(4): 594-600.
- [9] 朱昭君, 强洪夫, 王哲君. 固体火箭发动机喉衬用轴编 C/C 复合材料的细观热结构特性分析[J]. 推进技术, 2019, 40(7):1651-1658.
ZHU Zhaojun, QIANG Hongfu, WANG Zhejun. Thermo-structural Characteristics Analysis on Mesoscopic of 4D Carbon/Carbon Composites of Throat in Solid Rocket Motor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(7):1651-1658.
- [10] 李皎, 陈利, 姚天磊, 等. 类回转预制体针刺机器人系统设计[J]. 纺织学报, 2023, 44(7):207-213.
LI Jiao, CHEN Li, YAO Tianlei, et al. Design of Needling Robot System for Quasi-rotary Preforms [J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(7): 207-213.
- [11] 李彦璋, 贺辛亥, 程攀, 等. 碳纤维立体穿刺预制体成型技术发展现状与思考[J]. 纺织器材, 2024, 51(1):65-68.
LI Yanzhang, HE Xinhai, CHENG Pan, et al. Development Status and Consideration of Carbon Fiber Stereo Puncture Prefabrication Molding Technology[J]. Textile Accessories, 2024, 51(1):65-68.
- [12] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20):64-79.
SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research of 3D Advanced Aerospace Composite Preforms Forming Technology and Equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 64-79.
- [13] HOU Xiao, CHENG Wen, CHEN Ni, et al. Preparation of a High Performance Carbon/ Carbon Composite Throat Insert Woven with Axial Carbon Rods[J]. New Carbon Materials, 2013, 28 (5):355-362.
- [14] 徐竹, 郑佳文. 固体火箭发动机 C/C 复合材料喷管喉衬的成型工艺研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(9):222-225.
XU Zhu, ZHENG Jiawen. Molding Technology of Solid Rocket Motor C/C Throat Liner [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(9):222-225.
- [15] 王富强, 张力, 陈建. 大型固体火箭发动机喷管喉衬技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50 (6):8-14.
WANG Fuqiang, ZHANG Li, CHEN Jian. Overview of Large Solid Rocket Motor Throat Develop-
ment [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(6):8-14.
- [16] MEI Baolong, DONG Jiuzhi, REN Hongqing, et al. Research and Modelling of Fiber Deformation Mechanism of 3D Four-direction Preform under Compression Loading[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(17/18):4329-4341.
- [17] WANG Chunguang, TIAN Weiping, TANG Min. Study on Mechanical Properties and Failure Mechanism of Axial Braided C/C Composite[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 2021(1):2520598.
- [18] 朱昭君, 王学仁, 强洪夫. 温度参数下轴编 C/C 复合材料的超高温热结构性能分析[J]. 推进技术, 2022, 43(6):290-299.
ZHU Zhaojun, WANG Xueren, QIANG Hongfu. Analysis of Ultra High Temperature Thermo-structural Characteristics of Four-directional Carbon/Carbon Composites with Temperature Parameter[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(6):290-299.
- [19] 权国明, 吴红, 刘琳, 等. 剑杆织机工艺参数设定的探讨[J]. 纺织器材, 2022, 49(增刊 1):1-4.
QUAN Guoming, WU Hong, LIU Lin, et al. Discussion on Parameter Setting of Rapier Loom[J]. Textile Accessories, 2022, 49(S1):1-4.
- [20] 王海涛, 尉寄望, 张元, 等. 航空用碳纤维织物制造工艺探讨[J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47 (5):70-75.
WANG Haitao, WEI Jiwang, ZHANG Yuan, et al. Discussion on Weaving Technology of Aviation Carbon Fiber Fabric[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2022, 47(5):70-75.

(编辑 张 洋)

作者简介:邢力鹏,男,1998年生,博士研究生。研究方向为碳纤维复合材料预制体成形装备技术。发表论文 2 篇。E-mail: 17320698225@163.com。董九志*(通信作者),男,1981年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为复合材料预制件成形技术、新型纺织机械机电一体化技术。发表论文 33 篇。E-mail:dongjiuzhi@tiangong.edu.cn。

本文引用格式:

邢力鹏,董九志,陈云军,等.软硬混编预制体窄缝通道连续碳纤维束引纬系统的设计及实验验证[J].中国机械工程,2025,36(7):1512-1519.

XING Lipeng, DONG Jiuzhi, CHEN Yunjun, et al. Design and Experimental Verification of a Narrow-channel Continuous Carbon Fiber Tow Weft Insertion System for Soft-Hard Blended Preforms[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1512-1519.