

引文格式: 蔚飞, 董九志, 陈云军, 等. 基于改进工艺的复合材料预制体单边缝合装置动作规划与试验验证[J]. 航空制造技术, 2026, 69(6): 25020203.

YU Fei, DONG Jiuzhi, CHEN Yunjun, et al. Equipment motion planning and experimental verification of one-sided stitching device for composite preform based on improved process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(6): 25020203.

# 基于改进工艺的复合材料预制体单边缝合装置动作规划 与试验验证

蔚 飞<sup>1,2</sup>, 董九志<sup>1,2</sup>, 陈云军<sup>1,2</sup>, 李 锐<sup>1,2</sup>

(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)

[摘要] 为实现复合材料预制体单边缝合(OSS)线迹的稳定成型,避免OSS装置在缝合预制体过程中出现丢环、误勾及线迹成型不稳定的现象,对原有的OSS工艺进行改进,增加了一个能够实现线迹稳定成型的拨线机构,建立拨线机构的数学模型,对拨线机构末端执行机构的轨迹进行仿真分析,证明了拨线机构设计的合理性。对OSS装置各机构的工作原理进行分析,通过确定挑线、引线、勾线与拨线机构的曲柄转角间相位差,对OSS装置4个机构的配合关系进行分析和规划,建立各机构的运动循环图,为OSS装置的调试奠定了理论基础。最后,针对不同厚度、针距、缝合速度进行了多组OSS对照试验,线迹成环率达到100%。试验结果验证了动作规划的合理性与有效性,提高了OSS线迹的稳定性,从而保证了复合材料预制体缝合质量的一致性。

关键词: 复合材料预制体; 单边缝合(OSS); 拨线机构; 线迹成型; 配合关系; 成环率

中图分类号: V26; TB332

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020203

## Equipment Motion Planning and Experimental Verification of One-Sided Stitching Device for Composite Preform Based on Improved Process

YU Fei<sup>1,2</sup>, DONG Jiuzhi<sup>1,2</sup>, CHEN Yunjun<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

[ABSTRACT] To realize stable forming of the one-sided stitching (OSS) of the composite preform and avoid missing loop, wrong hooking and unstable stitch forming during the process of stitching the preform, the original OSS process is improved, and a wire-pulling mechanism which can realize the stable forming of the trajectory is added. The mathematical model of the wire-pulling mechanism is established, and the trajectory of the end actuator of the wire-pulling mechanism is simulated and analyzed, which proves the rationality of its design. The working principle of each mechanism of the OSS device is analyzed. By determining the phase differences among the crank angles of the yarn-lifting, yarn-leading, yarn-hooking and wire-pulling mechanisms, the coordination relationship of the four mechanisms of the OSS device is analyzed and planned, and the motion cycle diagram of each mechanism is established, which lays a theoretical foundation for debugging of the OSS device. Finally, multiple controlled OSS experiments were conducted at varying parameters, including preform thickness, stitch pitch, and stitching speed. The result of loop formation rate of 100% proves the

收稿日期: 2025-06-30; 退修日期: 2025-10-07; 录用日期: 2025-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(52405406)

通信作者: 董九志, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为高性能复合材料预制体成型智能装备、复合材料缝合连接技术、机电一体化技术。

rationality and effectiveness of the motion planning, enhances the stability of the OSS trajectory, and thereby ensuring consistent stitching quality of the composite preforms.

**Keywords:** Composite preform; One-sided stitching (OSS); Wire-pulling mechanism; Stitch formation; Fitting relation; Loop formation rate

缝合复合材料<sup>[1-3]</sup>是一种先进的纺织结构复合材料,具有轻质,优异的层间性能,以及比传统层合复合材料更高的损伤容限<sup>[4-5]</sup>等优点,已被广泛应用于航空航天、汽车和军事等领域。传统的复合材料层压板主要依靠韧性较弱的聚合物基体将纤维固定在一起。在受到冲击载荷时,这类材料容易发生分层,从而导致其力学性能显著下降。相比之下,缝合复合材料通过在厚度方向引入高强度纤维,有效增强了层间结合性能,显著提升了抗分层能力,并进一步改善了层合板的抗剪切性能<sup>[6-8]</sup>。其中,单边双针缝合(One-sided stitching, OSS)技术<sup>[9-10]</sup>作为一种三维复合材料预制成型工艺,具有无需在预制体两侧同时安装缝合机构的特点,克服了传统双边缝合设备难以缝合复杂异形构件的局限。同时, OSS 工艺成本较低,效率高,是一种快速且有效的缝合方法<sup>[11]</sup>。

欧美国国家致力于将 OSS 技术应用于飞机的结构件,促进缝合设备的开发改进及应用<sup>[12-13]</sup>。美国 NASA 和波音公司通力合作,利用 OSS 技术对创新性 PRSEUS 结构进行缝合,并通过试验验证了该结构的高效承载能力<sup>[14-15]</sup>;德国 KSL 公司将单边缝合装置与机器人系统进行结合,生产风力发电叶片、飞机舱门和汽车部件<sup>[16]</sup>; ALTIN Nachtechnik 采用数控工业机器人携带单边缝合头,实现了高精度控制并生产三维预成型件<sup>[17]</sup>;密西西比州立大学使用 OSS 技术生产缝合预制件,通过拉伸试验研究缝合方向(45°和90°)对复合材料层间强度的影响<sup>[18-19]</sup>。

在国内,天津工业大学姚福林等<sup>[20]</sup>根据单边缝合线迹成型方法对单边缝合机械手末端缝合设备的本体进行了结构设计,通过缝合试验验证了缝合装置的可行性;南京航空航天大学潘杰等<sup>[21]</sup>研制了单边双针缝合原理样机,对预浸料薄件进行了缝合并验证了缝合能够提高材料的抗剪切性能;武汉理工大学田会方等<sup>[22]</sup>分析了玻璃纤维编织布单边缝合装置的缝合流程,对缝合上/下料机构进行了结构设计并对关键零件进行了有限元分析;天津工业大学凌雨风等<sup>[23]</sup>在单边缝合装置工作原理的基础上,基于线量供需平衡理念,改进了挑线机构的数学模型,提升了线迹质量,验证了单边缝合装置结构设计的合理性。但是我国对 OSS 技术的研究还处于探索和试验阶段,所研发的缝合设备还存在一定的

不稳定性。

针对单边缝合装置在缝合过程中因丢环与误勾现象而导致的线迹不稳定问题,对原先的 OSS 工艺加以改进。对单边缝合装置中各机构运动配合和时间配合的关系进行了分析与规划,建立各机构的运动循环图,并通过运动仿真与缝合试验验证了规划的合理性,提高了成环率,实现了单边缝合线迹的稳定成型,保证了单边缝合预制体的质量一致性。

## 1 OSS 技术的改进

单边缝合线迹成型主要是由一根勾线针与一根引线针共同配合完成的<sup>[24]</sup>,如图 1 所示,与水平呈 45° 夹角的引线针穿过缝料将缝线送到缝料下侧,引线针回退时因缝线与缝料的摩擦而形成了线环,勾线针在引线针回退时穿过形成的线环,将线环钩住并回到缝料的上侧,移动一个针距,然后勾线针穿过缝料上侧的线环到缝料的下侧,勾取下一个由引线针形成的线环,线环与线环之间得以互相锁定。重复上述动作形成单边缝合线迹<sup>[25]</sup>,如图 2 所示。

传统的缝合工艺中,勾线针从缝料下侧将由引线针形成的线环勾到缝料上侧后,对线环进行下一次勾取时,线环会从勾线槽中退出,缝线在没有张力的情况下会发生卷曲,无法保证勾线针每次都能在线环不断变化的情况下精准地穿入到上个线环中,有可能会从勾线针上面脱落,产生丢环现象,导致线环无法形成互锁,影响线迹成型。缝合过程中,勾线针的勾线槽是沿着缝合路径放置的,勾线针穿过上个线环勾取下个线环时,上个

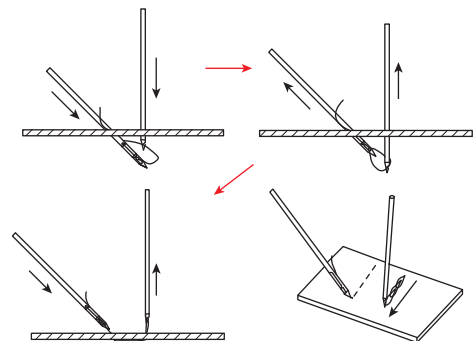


图 1 单边缝合线迹成型过程

Fig.1 Trajectory formation process of one-sided stitching

线环就会锁紧,在此过程中,上个线环会沿着针杆滑进勾线槽中,勾线槽中的两个线环相互拉紧,产生误勾现象,继续进行下一个缝合动作将会使缝线被拉断。丢环与误勾现象如图3所示。

在改进的单边缝合工艺中,为了提高线迹成型的稳定性,缝合装置中增加了一个拨线机构,辅助勾线针从线环中穿过,同时改变勾线针的朝向(勾线针的朝向与拨线钩相对应)。在缝合过程中,勾线针将线环勾到缝料上侧,由上极限位置向下运动时,在线环被拨线钩拉取的引线针穿过线环后,同时拨线机构松开线环,各机构进入下一动作循环形成单边缝合线迹,改进后的单边缝合线迹成型过程如图4所示。

勾线针将线环从缝料下侧勾到缝料上侧后,由于勾线针上线环的两根线间距离很小,拨线机构必须精准勾住两根线中的一根缝线,在和勾线针配合的过程中,勾线针从上极限位置向下运动时,需要快速勾到线环的一

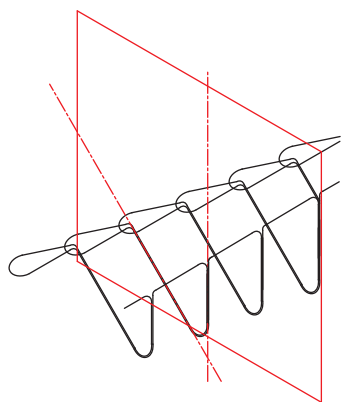


图2 单边缝合线迹

Fig.2 One-sided stitching trajectory

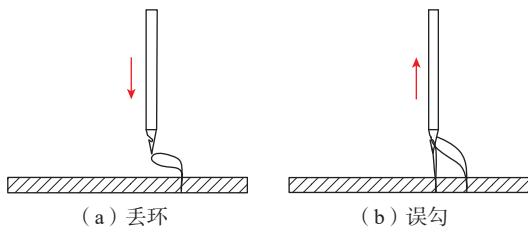


图3 丢环与误勾

Fig.3 Missing loop and wrong hooking

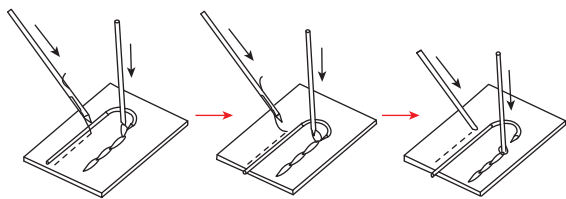


图4 改进后的单边缝合线迹成型过程

Fig.4 Trajectory formation process of improved one-sided stitching

侧,将一侧的缝线勾到勾线针的内侧,缝合装置移动一个针距,同时也要求拨线钩的运动方向由勾线针的内侧向缝合路径的方向移动。拨线钩会对离开勾线槽的线环施加一定张力,但不会对缝线产生额外的消耗,在勾线针穿过上个线环后,拨线钩能够快速松开缝线。因此,拨线机构末端执行机构的轨迹选择为近似椭圆的轨迹,同时保持椭圆轨迹长轴方向与缝合路径方向呈一定夹角,拨线钩与勾线针配合时的运行轨迹如图5所示。

## 2 单边缝合装置机构动作分析与规划

### 2.1 单边缝合装置

单边缝合装置主要由挑线机构、引线机构、勾线机构与拨线机构4部分组成,挑线机构负责对缝线的输送与收紧,引线、勾线与拨线机构负责单边缝合线迹的成型,四机构由单电机驱动,依靠同步带进行传动,单边缝合装置整体机构简图如图6所示。单边缝合装置可搭配多自由度机械臂,通过机械臂不同位姿的变化,对结构尺寸大或形状复杂的三维复合材料预制体进行缝合。

### 2.2 拨线机构数学模型建立与分析

由上述改进单边缝合工艺对拨线机构的要求可知,拨线机构在工作过程中的末端件轨迹近似为一个椭圆,

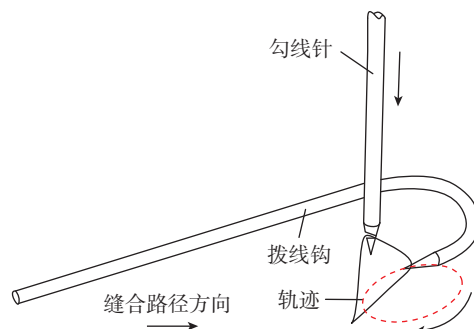


图5 拨线钩与勾线针配合时的运行轨迹

Fig.5 Trajectory formed during coordination between wire-pulling hook and yarn-hooking needle

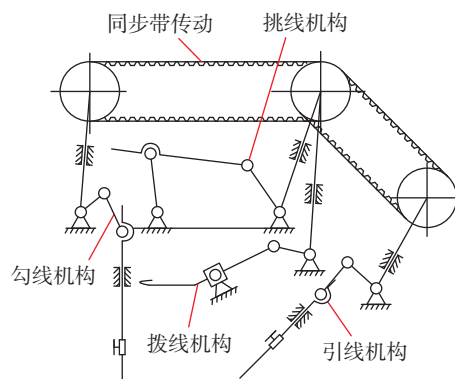


图6 单边缝合装置机构简图

Fig.6 Simplified diagram of mechanism of one-sided stitching device

根据要求所设计的拨线机构简图如图 7 所示。其中,  $l_0$  为两个机架距离  $OB$ ,  $l_1$  为曲柄长度  $OA$ ,  $l_2$  为长度  $AB$ ,  $l_3$  为长度  $BC$ ,  $l_4$  为杆长  $CD$ ,  $l_5$  为长度  $OD$  ( $l_{OD}$ );  $\theta_1$  为  $\angle AOB$  角度,  $\theta_2$  为  $\angle ABO$  角度,  $\theta_3$  为  $\angle DOB$  角度,  $\delta$  为  $\angle ACD$  角度。连接  $OD$ ,  $l_2+l_3=l$ ,  $l$  为连杆长度  $AC$ 。

在封闭图形  $OACD$  与  $OBCD$  中,可以得到

$$\begin{cases} l_{OD} \cos \theta_3 = l_0 + l_3 \cos \theta_2 - l_4 \cos(\delta - \theta_2) \\ l_{OD} \cos \theta_3 = l_1 \cos \theta_1 + (l_2 + l_3) \cos \theta_2 - l_4 \cos(\delta - \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 = l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

化简消去  $\theta_1$  得

$$\theta_2 = \arccos \frac{l_0^2 - l_1^2 + l_2^2}{2l_0l_2} \quad (2)$$

化简消去  $\theta_2$  得

$$l_2 = \sqrt{l_0^2 + l_1^2 - 2l_0l_1 \cos \theta_1} \quad (3)$$

所以有

$$l_3 = l - \sqrt{l_0^2 + l_1^2 - 2l_0l_1 \cos \theta_1} \quad (4)$$

可以求得机构末端  $D$  点在坐标系  $xOy$  中的位置为

$$\begin{cases} x_D = l_0 + l_3 \cos \theta_2 - l_4 \cos(\delta - \theta_2) \\ y_D = l_3 \sin \theta_2 + l_4 \sin(\delta - \theta_2) \end{cases} \quad (5)$$

则  $D$  点沿两坐标轴的速度为

$$\begin{cases} v_{x_D} = \dot{x}_D = -l_3\omega \cos \theta_2 - l_4\omega \cos(\delta - \theta_2) \\ v_{y_D} = \dot{y}_D = l_3\omega \sin \theta_2 - l_4\omega \sin(\delta - \theta_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\omega$  为拨线机构的曲柄角速度。

所以  $D$  点速度为

$$v_D = \sqrt{v_{x_D}^2 + v_{y_D}^2} \quad (7)$$

则  $D$  点沿两坐标轴的加速度为

$$\begin{cases} a_{x_D} = \ddot{x}_D = -l_3\omega^2 \cos \theta_2 + l_4\omega^2 \cos(\delta - \theta_2) \\ a_{y_D} = \ddot{y}_D = l_3\omega^2 \sin \theta_2 + l_4\omega^2 \sin(\delta - \theta_2) \end{cases} \quad (8)$$

所以  $D$  点加速度为

$$a_D = \sqrt{a_{x_D}^2 + a_{y_D}^2} \quad (9)$$

确定拨线机构各参数,对拨线机构进行仿真分析,

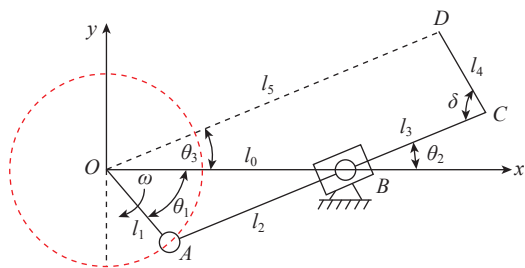


图 7 拨线机构简图

Fig.7 Simplified diagram of wire-pulling mechanism

结果如图 8 和 9 所示。其中,图 8 为拨线机构末端的轨迹曲线,可以看出拨线机构的末端运行轨迹近似为椭圆,符合预期的设计要求。

图 9 为拨线机构末端的速度和加速度曲线,可以看出,曲线光滑、无突兀跳变,末端趋于平稳,没有明显冲

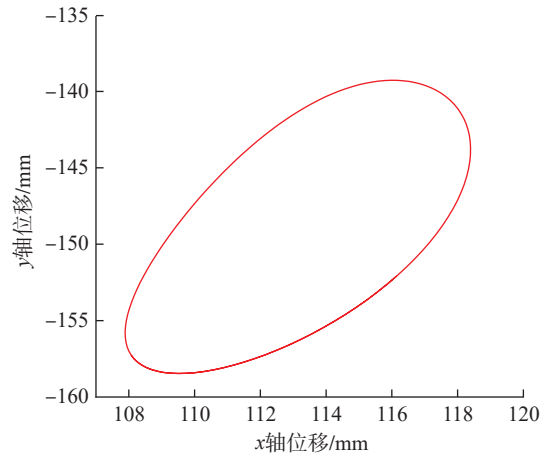
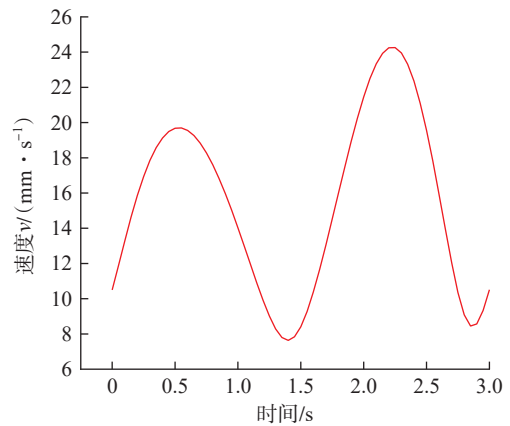
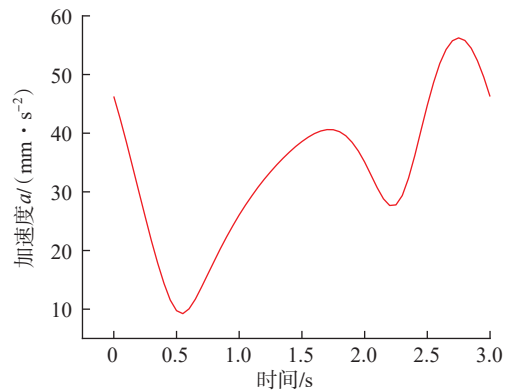


图 8 拨线机构末端轨迹

Fig.8 Tail-end trajectory of wire-pulling mechanism



(a) 拨线机构末端速度



(b) 拨线机构末端加速度

图 9 拨线机构的末端速度和加速度变化曲线

Fig.9 Variation curves of tail-end velocity and acceleration of wire-pulling mechanism

击或高频振荡,表明拨线机构设计具有良好的动力学性能,能够实现平稳运行、低冲击的运动输出。

### 2.3 拨线钩与勾线针配合关系

通过试验观察到,缝合过程中勾线针在竖直方向上做往复运动,勾线针将缝料下侧的线环勾到上极限位置时,整个过程中缝线处于张紧状态,缝合装置移动一个针距后,缝线与水平方向呈一定夹角,勾线槽与缝料上表面二分之一位置处线环间的间隙最大。当勾线针从上极限位置向下运动时,勾线槽中的缝线处于没有张力的状态,此时拨线钩的钩尖需要及时到达线环的外侧,才能对缝线施加一定的张力,以防止缝线在没有张力的情况下发生卷曲,从而影响线迹成型。当勾线针针尖到达拨线钩平面时,拨线钩已经完成拨线工作并且距离勾线针有一定距离。

拨线钩与勾线针的配合示意图如图 10 所示。其中,1 为勾线针处于上极限位置时,勾线槽所处平面;2 为勾线针处于上极限位置时,针尖所处平面;3 为拨线钩工作平面;4 为拨线钩工作完成后,勾线槽所处平面;5 为缝料表面。

为了防止拨线钩与勾线针发生干涉而引起碰撞,首先应该满足  $t_{钩1} \geq t_{针1}$ ,在勾线针穿过线环向下运动至平面 4 的过程中,拨线钩需要及时松开线环,避免拨线路径过长而造成对缝线多余的消耗,因此应该满足  $t_{钩2} \geq t_{针2}$ 。 $t_{钩1}$  为拨线钩钩尖碰到外侧线环转至勾线针正下方所用时间; $t_{钩2}$  为拨线钩从勾线针正下方转至拨线钩再松开线环所用的时间。可以得出

$$\begin{cases} t_{针1} = \frac{h}{2H} T \\ t_{针2} = \frac{d+2a}{2H} T \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $h$  为勾线针处于上极限位置时勾线槽与缝料表面的距离;  $d$  为勾线槽直径;  $a$  为勾线槽与勾线针针尖的距离;

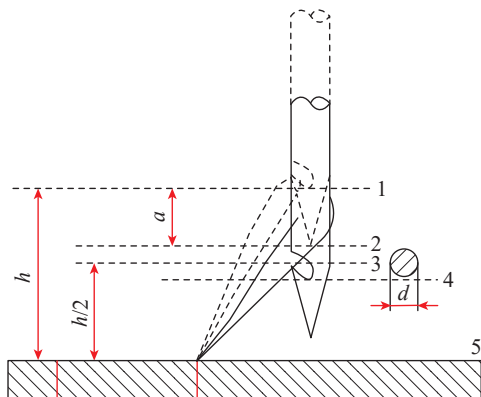


图 10 拨线钩与勾线针的配合示意图

Fig.10 Schematic of coordination between wire-pulling hook and yarn-hooking needle

距离;  $h/2$  为拨线钩所在平面与缝料表面的距离;  $t_{针1}$  为勾线针针尖从上极限位置到拨线钩平面所用时间;  $t_{针2}$  为勾线针针尖从拨线钩平面到缝料表面所用时间;  $H$  为勾线针的工作行程;  $T$  为工作周期。

拨线钩的工作区域如图 11 所示。其中,  $A_1$  点为拨线钩的起点工作位置;  $B_1$  点为勾线针轴线位置;  $C_1$  点为拨线钩的终点工作位置。根据勾线针针尖在拨线钩工作平面上/下两侧的运行情况,将拨线钩的工作角度  $\alpha$  分为  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$ ,椭圆轨迹形成过程中角速度近似等于拨线机构曲柄的角速度  $\omega$ ,可以得到  $\alpha_1 = \omega \cdot t_{钩1}$ ,  $\alpha_2 = \omega \cdot t_{钩2}$ ,且  $\alpha_1 \geq \omega \cdot t_{针1}$  和  $\alpha_2 \geq \omega \cdot t_{针2}$ ,则  $\alpha \geq \omega (t_{针1} + t_{针2})$ ,所以得到拨线机构的工作角度为

$$\alpha \geq \omega \left( \frac{h+d+2a}{2H} \right) T \quad (11)$$

### 2.4 勾线针与引线针配合分析

在缝合过程中,勾线针在竖直方向上做往复运动,将缝料下侧由引线针形成的线环勾到缝料的上表面,同时和拨线机构配合,完成线环的互锁。引线针与勾线针呈  $45^\circ$  夹角配合,在  $45^\circ$  方向上做数值往复运动,将缝线从缝料上侧送到缝料下侧形成线环,因此引线针和勾线针都采用曲柄导杆机构作为驱动机构,如图 12 所示(左侧为勾线机构,右侧为引线机构)。其中,  $S_B$  为勾线针针杆末端  $B$  点移动的距离;  $S_D$  为引线针从下止点向上移动时,针杆末端  $D$  点移动的距离。

在图 12 所示的引线针机构简图中,勾线针末端的运动变化规律可用途中  $B$  点位置的运动规律所表示,因此根据封闭图形  $OABO$  建立机构的封闭矢量方程,其中,  $l_1, l_2, l_3, l_4$  分别为杆  $AO, AB, CO', CD$  的长度;  $l_1, l_2$  分别为长度为  $l_1, l_2$  的矢量;  $y_B$  为  $B$  点相对于原点  $O$  的位置矢量;  $e^{i\gamma}$  表示复平面上单位圆上的点,即  $\cos \gamma + i \sin \gamma$ ;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  分别为杆  $AO, AB, CO', CD$  相对于坐标轴的转角;  $\omega$  为曲柄角速度; 所以有

$$l_1 + l_2 = y_B \quad (12)$$

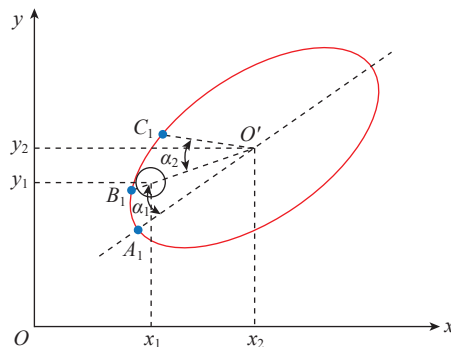


图 11 拨线钩的工作区域

Fig.11 Working area of wire-pulling hook

$$l_1 e^{j\gamma_1} + l_2 e^{j\gamma_2} = y_B \quad (13)$$

将上式展开后分离实部和虚部可得

$$\begin{cases} l_1 \cos \gamma_1 + l_2 \cos \gamma_2 = y_B \\ l_1 \sin \gamma_1 + l_2 \sin \gamma_2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

由上式  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的关系可得

$$\gamma_2 = \arcsin\left(\frac{-l_1 \sin \gamma_1}{l_2}\right) \quad (15)$$

所以得到勾线针曲柄导杆机构的针杆末端  $B$  点的位置为

$$y_B = l_1 \cos \gamma_1 + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \gamma_1} \quad (16)$$

对上式进行求导计算, 可得勾线针针杆末端  $B$  点的速度为

$$v_B = \dot{y}_B = -l_1 \omega \left( \sin \gamma_1 + \frac{l_1 \cos \gamma_1 \sin \gamma_1}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \gamma_1}} \right) \quad (17)$$

对式 (17) 求二阶导数, 可得勾线针针杆末端  $B$  点的加速度为

$$a_B = \ddot{y}_B = -l_1 \omega^2 \cos \gamma_1 - \frac{l_1^2 \omega^2 (\cos^2 \gamma_1 - \sin^2 \gamma_1)}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \gamma_1}} + \frac{l_1^4 \omega^2 \cos^2 \gamma_1 \sin^2 \gamma_1}{\left(\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \gamma_1}\right)^3} \quad (18)$$

因为引线针的驱动机构与勾线针同为曲柄导杆机构, 所以同理可得引线针针杆末端  $D$  点的位置为

$$y_D = l_3 \cos \gamma_3 + \sqrt{l_4^2 - l_3^2 \sin^2 \gamma_3} \quad (19)$$

引线针针杆末端  $D$  点的速度为

$$v_D = \dot{y}_D = -l_3 \omega \left( \sin \gamma_3 + \frac{l_3 \cos \gamma_3 \sin \gamma_3}{\sqrt{l_4^2 - l_3^2 \sin^2 \gamma_3}} \right) \quad (20)$$

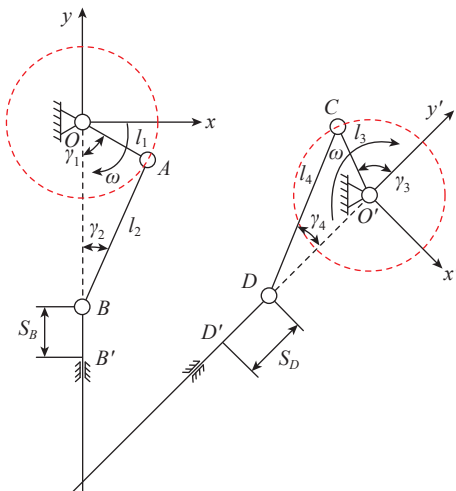


图 12 勾线针与引线针的曲柄导杆机构

Fig.12 Crank guide bar mechanisms of yarn-hooking needle and yarn-leading needle

引线针针杆末端  $D$  点的加速度为

$$a_D = \ddot{y}_D = -l_3 \omega^2 \cos \gamma_3 - \frac{l_3^2 \omega^2 (\cos^2 \gamma_3 - \sin^2 \gamma_3)}{\sqrt{l_4^2 - l_3^2 \sin^2 \gamma_3}} + \frac{l_3^4 \omega^2 \cos^2 \gamma_3 \sin^2 \gamma_3}{\left(\sqrt{l_4^2 - l_3^2 \sin^2 \gamma_3}\right)^3} \quad (21)$$

### 2.5 双针机构转角相位差

根据缝合工艺中引线针成环机理可知, 引线针在与缝料呈  $45^\circ$  夹角刺入缝料后, 沿原路径返回时缝线逐渐成环, 勾线针穿过缝料向下运动的同时, 穿过所形成的线环, 所以双针机构转角相位差可以通过分析针杆位移来确定, 即分析计算引线针从下止点向上的运动阶段和勾线针从上止点向下的运动阶段。

由图 12 可知, 勾线针从上止点开始向下运动时, 根据几何关系可以得到勾线针针杆末端  $B$  点的移动距离为

$$S_B = l_1(1 - \cos \gamma_1) + l_2(\cos \gamma_2 - 1) \quad (22)$$

利用三角函数分析  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  之间的关系为

$$\cos \gamma_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \sin \gamma_1\right)^2} \quad (23)$$

代入式 (22) 可得

$$S_B = l_1(1 - \cos \gamma_1) + l_2 \left( \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \sin \gamma_1\right)^2} - 1 \right) \quad (24)$$

同理可知, 引线针从下止点向上移动时针杆末端  $D$  点的移动距离  $S_D$  为

$$S_D = l_3(1 - \cos \gamma_3) + l_4 \left( 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l_3}{l_4} \sin \gamma_3\right)^2} \right) \quad (25)$$

当引线针沿与缝料呈  $45^\circ$  的角度刺入时, 根据多次引线针带动缝线进行的刺入试验, 当引线针从下极限位置向上运动 5~7 mm 时, 在引线针的避针位一侧便可形成最佳线环, 取引线针回退位移  $S_L = 6$  mm, 代入式 (25) 中, 由三角函数关系  $\cos^2 \gamma_3 + \sin^2 \gamma_3 = 1$ , 得到引线针曲柄导杆机构转过的角度  $\gamma_3$ 。由于引线针与勾线针的驱动机构由单电机控制, 因此引线针与勾线针曲柄导杆机构转过的角度相同。因此求得两组曲柄导杆机构之间的相位差为

$$\Delta\gamma = \pi - \gamma_3 + \gamma_1 \quad (26)$$

根据上式中得到的相位差  $\Delta\gamma$ , 在仿真软件中对双针的位置进行运动仿真, 得到引线针与勾线针末端速度与加速度随时间的变化规律, 如图 13 所示。

在形成预期理想线迹的过程中, 主要依靠引线机构与钩线机构的相互配合, 勾线针勾取线环的位置与引线针针杆的位移密切相关, 因此确定引线针与勾线针驱动

机构的相位差,能够为后续单边缝合装置整体调试过程中实现预期的工作状态提供理论依据。

### 3 机构运动循环图

由于单边缝合装置由单电机控制4个机构同步运行工作,因此各个机构的驱动曲柄角速度相同。为了更直观且清晰地观察改进工艺后的单边缝合装置中各个执行机构的运动情况、配合关系及工作区域,采用运动循环图的方法,将各机构的曲柄转轴运行 $360^\circ$ 为坐标,4个大小不同的圆代表缝合装置中不同的执行机构(图14)。最外侧第1个圆为引线针的引线工作行程,第2个圆为勾线针的勾线工作行程,第3个圆为拨线钩的工作行程,第4个圆为挑线杆的工作行程。运动循环图可以直观展示缝合装置各机构在工作过程中的特定配合位置。

以引线针处于上极限位置为缝合装置运动周期的起点,此时转轴为 $0^\circ$ ;当主轴从 $67^\circ$ 转至 $117^\circ$ 时,勾线针从上极限位置向下移动,拨线钩对勾线针从上个循环中勾取的线环进行拨取;当主轴旋转至 $210^\circ$ 时,引线针刺入到缝料中下侧,回退成环;当主轴旋转至 $232^\circ$ 时,勾线针穿过缝料下侧线环;当主轴旋转至 $360^\circ$ 时,勾

线针将线环勾到缝料上侧,引线针回到上极限位置。作为缝纫机中的通用机构——挑线机构,在所设计的单边缝合装置中的原理与作用基本相同,当主轴从 $0^\circ$ 转至 $180^\circ$ 时,挑线杆对缝线进行输送,当主轴从 $180^\circ$ 转至 $360^\circ$ 时,挑线杆对缝线进行拉回收紧。

### 4 单边缝合试验验证

在对单边缝合装置的各机构进行动作分析规划后,为了验证上述研究理论的准确性,设计并搭建了一种基于改进的单边缝合装置,如图15所示。根据上述所研究的理论结果对缝合装置进行调试,并使用该单边缝合装置分别进行单机构分步试验和连续缝合试验。

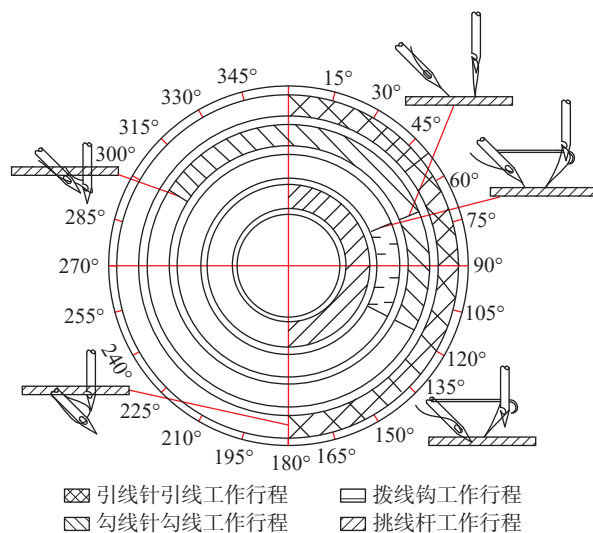
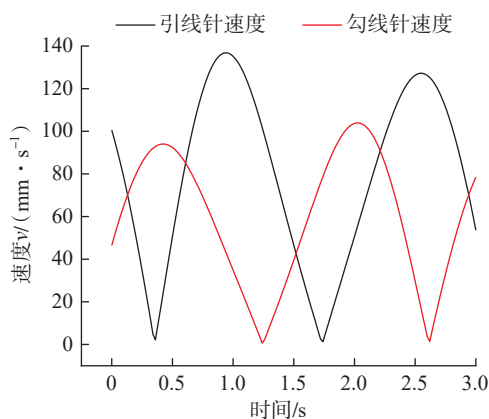
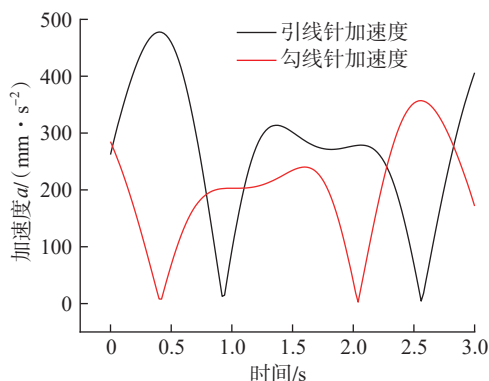


图14 四机构的运动循环图

Fig.14 Motion cycle diagram of the four mechanisms



(a) 速度变化



(b) 加速度变化

图13 双针的末端速度与加速度变化曲线

Fig.13 Variation curves of tail-end velocities and accelerations of the two needles



图15 单边缝合装置

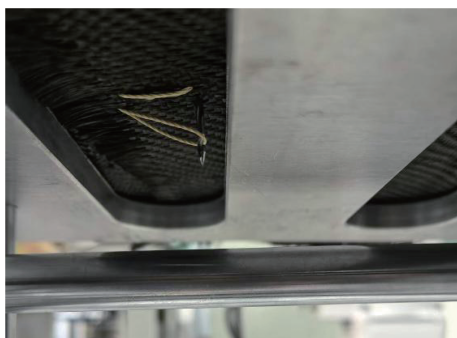
Fig.15 One-sided stitching device

单机构分步缝合试验如图 16 所示。由图 16 (a) 可知,勾线针能勾取到由引线针引至缝料下侧的线环,说明勾线机构与引线机构配合良好,挑线机构能够实现对纱线的输送和收紧。由图 16 (b)可知,拨线钩可成功拨取线环,说明拨线机构末端轨迹的选择符合改进后的工艺要求,同时拨线钩与勾线针配合良好,能够保证两个线环互锁的稳定性。

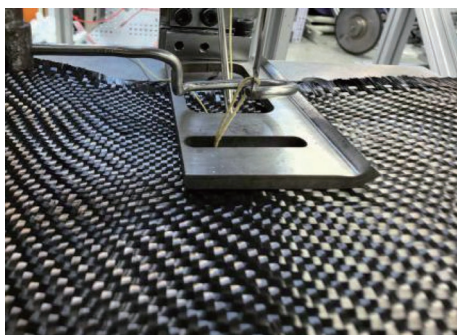
采用单边缝合装置对不同厚度的碳纤维缎纹布进行缝合试验,选用凯夫拉纤维作为缝线,设定不同厚度、针距、缝合速度,比较改进前和改进后的成环率,每次试验缝合 40 针,试验数据见表 1。在 12 次缝合试验中,各机构均配合良好,根据改进工艺所添加的拨线机构能够连续稳定地对线环进行拨取,缝合后的预制体上/下表面线迹图案如图 17 所示,缝料上侧和缝料下侧的线迹稳定,表面张力均匀,达到了预期缝合效果。

### 5 结论

(1) 针对传统单边缝合过程中容易出现丢环、误勾和线迹成型不稳定的现象,对原有的单边缝合 (OSS) 工艺进行了改进,分析了改进 OSS 工艺的线迹成型原理,增加了一种末端执行器运动轨迹近似为椭圆的拨线机构,并根据所增加的拨线机构的工作原理,改变了勾线针的钩针朝向。



(a) 勾线针勾取线环



(b) 拨线钩拨取线环

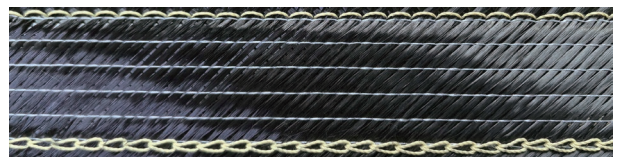
图 16 分步缝合试验

Fig.16 Step-by-step stitching experiment

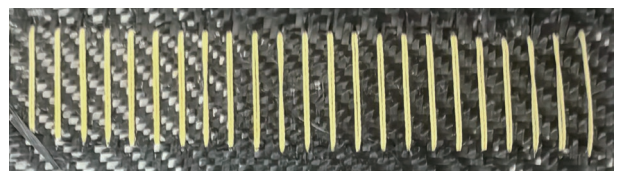
表 1 缝合试验数据

Table 1 Experiment data of stitching

序号	厚度/mm	针距/mm	缝合速度/(针/s)	缝合次数	改进前成环率/%	改进后成环率/%
1	3	5	2	40	75.0	100
2	3	5	4	40	82.5	100
3	3	8	2	40	80.0	100
4	3	8	4	40	85.0	100
5	5	5	2	40	77.5	100
6	5	5	4	40	80.0	100
7	5	8	2	40	75.0	100
8	5	8	4	40	82.5	100
9	7	5	2	40	77.5	100
10	7	5	4	40	80.0	100
11	7	8	2	40	72.5	100
12	7	8	4	40	82.5	100



(a) 缝合线迹面线



(b) 缝合线迹底线

图 17 单边缝合试验的线迹图案

Fig.17 Trajectory patterns of one-sided stitching experiment

(2) 对缝合装置中的拨线机构、引线机构与勾线机构分别建立数学模型,对各机构之间的配合关系进行了分析与规划,确定了各驱动机构之间的相位差。建立了单边缝合装置的运动循环图,为该缝合装置实现预期缝合线迹提供了理论依据。

(3) 进行多组单边缝合试验,对所分析和规划的各缝合机构配合关系进行了分步试验和连续试验。结果表明,改进的单边缝合装置各机构配合良好,缝合线迹均匀,成环率达到 100%,验证了改进单边缝合工艺的稳定性,为后续研究缝合复合材料的力学性能奠定基础。

### 参考文献

[1] SONG C Y, FAN W, LIU T, et al. A review on three-dimensional

stitched composites and their research perspectives[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 153: 106730.

[2] MOURITZ A P, COX B N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(6): 709–728.

[3] 王显峰, 高天成, 肖军. 复合材料缝合技术的研究进展[J]. *纺织学报*, 2019, 40(12): 169–177.

WANG Xianfeng, GAO Tiancheng, XIAO Jun. Research progress of stitching technology of composite materials[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(12): 169–177.

[4] ZHANG P, HU X F, BUI T Q, et al. Phase field modeling of fracture in fiber reinforced composite laminate[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161–162: 105008.

[5] 杨宏宇, 吴宁, 王玉, 等. 复合材料Tufting缝合技术的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(23): 23219–23228.

YANG Hongyu, WU Ning, WANG Yu, et al. Research progress of Tufting stitching technology of composite materials[J]. *Materials Review*, 2021, 35(23): 23219–23228.

[6] ZHAO Y L, LIU F, ZHU K J, et al. Three-dimensional printing of the copper sulfate hybrid composites for supercapacitor electrodes with ultrahigh areal and volumetric capacitances[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(2): 1537–1547.

[7] GNABA I, LEGRAND X, WANG P, et al. Through-the-thickness reinforcement for composite structures: A review[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, 49(1): 71–96.

[8] TAN K T, YOSHIMURA A, WATANABE N, et al. Effect of stitch density and stitch thread thickness on damage progression and failure characteristics of stitched composites under out-of-plane loading[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 194–204.

[9] BIGAUD J, ABOURA Z, MARTINS A T, et al. Analysis of the mechanical behavior of composite T-joints reinforced by one side stitching[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 249–255.

[10] SHAH A, LOVEJOY A E, SULLIVAN R W, et al. Pull-off behavior of stitched composite T-joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 288: 111911.

[11] PINGKARAWAT K, MOURITZ A P. Stitched mendable composites: Balancing healing performance against mechanical performance[J]. *Composite Structures*, 2015, 123: 54–64.

[12] DRAKE D A, SULLIVAN R W, CLAY S B, et al. Influence of stitching on the fracture of stitched sandwich composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 145: 106383.

[13] SAHA S, BAKER M L, SULLIVAN R W. Manufacturing a 3D stitched highly unitized PRSEUS-based conformal propellant tank: Lessons learned[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 299: 112403.

[14] VELICKI A, YOVANOF N, BARAJA J, et al. Damage arresting composites for shaped vehicles—Phase II final report: NASA/

CR–2011–216880[R]. Hampton: NASA, 2011.

[15] VELICKI A, YOVANOF N P, BARAJA J, et al. PRSEUS acoustic panel fabrication: NASA/CR2011–217309[R]. Hampton: NASA, 2011.

[16] PLAIN K P, TONG L Y. An experimental study on mode I and II fracture toughness of laminates stitched with a one-sided stitching technique[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(2): 203–210.

[17] WITHNG J. Recent development in the robotic stitching technology for textile structural composites[C]//International SAMPE Technical Conference. Long Beach: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2001: 540–550.

[18] SHAH A K, SULLIVAN R W, LOVEJOY A E, et al. Effect of stitch seam orientation on the mode I fracture energy of stitched composites[C]//AIAA SCITECH 2024 Forum. Orlando: AIAA, 2024: 2081.

[19] WHEAT A, SHAH A K, SULLIVAN R. Flatwise tensile strength of one-sided stitched composites[C]//AIAA SCITECH 2025 Forum. Orlando: AIAA, 2025: 1989.

[20] 姚福林, 李亮玉, 岳建锋, 等. 复合材料单边缝合机械手系统的机构动作规划与分析[J]. *纺织学报*, 2012, 33(11): 117–120, 126.

YAO Fulin, LI Liangyu, YUE Jianfeng, et al. Motion planning and analysis of manipulator system for single edge stitching of composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2012, 33(11): 117–120, 126.

[21] 潘杰, 文立伟, 肖军, 等. 复合材料预制件单面双针缝合装备技术研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(2): 76–81.

PAN Jie, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Research on the technology of single-sided two needles stitching equipment for composites preform[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(2): 76–81.

[22] 田会方, 刘丽君, 陈培. 复合材料单面双线缝合装置的设计[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(2): 83–86.

TIAN Huifang, LIU Lijun, CHEN Pei. Design of single-side double-line stitching device for composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(2): 83–86.

[23] 凌雨风, 何俊杰, 王天琪, 等. 基于单面缝合装置挑线机构的改进及其线迹优化[J]. *现代纺织技术*, 2025, 33(8): 35–43.

LING Yufeng, HE Junjie, WANG Tianqi, et al. Improvement of the thread take-up mechanism and its thread optimization based on a one-sided sewing device[J]. *Advanced Textile Technology*, 2025, 33(8): 35–43.

[24] LEDUC C, JONCAS S, Leclerc J S. Effect of process parameters on damage tolerance of carbon epoxy laminate preformed using one-sided stitching[C]//European Conference on Composite Materials. Seville: ECCM, 2014.

[25] GRIES T, KLOPP K. Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien: Verfahren und Anwendungen[M]. Berlin: Springer, 2007.

(责编 向阳)