

DOI: 10. 13475 / j. fzx. 20171102406

用于含 Z 向钢针立体织物的钢针置换夹持器设计

董九志^{1,2}, 梅宝龙^{1,2}, 蒋秀明^{1,2}, 杨景朝^{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)

摘要 为解决人工逐根置换钢针以及传统夹持器在工作过程中存在的不足, 设计了适用于钢针置换的专用钢针夹持器。该装置由楔形滑块、薄壁弹性夹持器等组成, 通过楔形滑块对薄壁弹性夹持器产生压力使薄壁楔形夹持器发生弹性形变, 转化为薄壁楔形夹持器对钢针的压力, 以满足夹紧钢针的要求。这种专用钢针夹持器自动化程度高, 定位精准, 能快速实现夹紧与松弛; 并对钢针夹持器工作过程进行受力分析, 以保证钢针置换工作可靠、持续进行。为验证工作原理的可行性, 设计了夹持置换钢针实验, 结果表明, 钢针夹持器原理可行, 工作可靠, 可达到使用要求。

关键词 含 Z 向钢针立体织物; 钢针夹持器; 受力分析; 钢针置换实验

中图分类号: TH 122 文献标志码: A

Design and experimental study on steel needle gripper of replacement of Z directional steel needles in three-dimensional fabric

DONG Jiuzhi^{1,2}, MEI Baolong^{1,2}, JIANG Xiuming^{1,2}, YANG Jingzhao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract In order to overcome the defect of manual replacement of steel needles and the defect of conventional gripper during the operation process, a special steel needle gripper for the replacement of steel needles was designed. The device comprises a wedge block, a thin walled elastic gripper, etc., and the pressure of the wedge block on the thin walled elastic gripper causes the elastic deformation of the thin walled elastic gripper, which is converted into a pressure on the steel needle, meeting the requirements of gripping steel needles. The special steel needle gripper has a high degree of automation and accurate positioning, and can quickly achieve gripping and relaxation. By the force analysis of the working process of the steel needle gripper, it guarantees that the replacement of steel needle is reliable and continuous. In order to verify the feasibility of the working principle, an experiment for the gripping replacement of steel needle was designed. The result shows that the steel needle gripper has feasible principle and reliable operation.

Keywords three-dimensional fabric with Z direction steel needle; steel needle gripper; force analysis; replacement experiment of steel needle

整体穿刺是织造立体织物的一种工艺技术, 整体穿刺立体织物是一种结构特殊的碳纤维立体织物^[1], 可由整体穿刺技术织造而成, 具有良好的整体结构和较高的纤维体积分数, 可作为高性能隔热

隔热碳/碳复合材料的优良基材^[2]。我国的整体穿刺技术最先由南京玻璃纤维研究院实现重大技术突破^[3], 该院生产的整体穿刺立体织物经碳复合制成的碳/碳复合材料已成功用作高性能隔热材料, 使我

收稿日期: 2017-11-14 修回日期: 2018-09-04

基金项目: 天津市科技支撑重点计划项目(15ZCZDZX00840)

第一作者简介: 董九志(1981—), 男, 讲师, 博士。主要研究方向为新型纺织机械设计制造及自动化、机电一体化技术。

通信作者: 梅宝龙, E-mail: 15532583033@163.com。

国在该领域跻身于世界先进水平^[4]。

为配合整体穿刺立体织物的生产,南京玻璃纤维研究院研制的高精度液压整体穿刺机用于实施叠层机织碳布与 Z 向钢针阵列整体刺布、移布、加压密实等操作,提高了立体织物生产的自动化程度及效率^[5],但由于设备老化或控制精度低,已不能满足细编穿刺织物生产的需求。2013 年,在江苏省机械设计研究院的参与下对其进行了技术改进^[6]。2015 年,天津工业大学研制了由电动机驱动的整体穿刺机,该穿刺机对穿刺与压实机构、传动机构及工作台进行设计,具有较高重复定位精度,可实现对叠层机织碳布进行整体穿刺与加压密实功能^[7]。

整体织物穿刺编织过程中,对从穿刺机上移下的含有 Z 向钢针的织物拆除定位模板,然后安装于专用的工作台上,使织物平卧。从 Z 向钢针的一端——置换出钢针,从另一端对应位置将碳纤维引入到织物内部,采用单根连续纤维缝合方式^[8],由碳纤维置换所有钢针后,便完成了机织碳布整体穿刺织物的编织全过程。

穿刺机上的钢针在穿刺模板的约束下等距密排,导致钢针间距小,传统的夹持器不能满足换针过程中对钢针的夹持。虽然传统夹持器能夹持直径小于等于 1.2 mm 的钢针,但由于其端部直径远大于钢针针间距,在夹持钢针过程中可与周围的钢针发生干涉;同时在钢针置换过程中,夹持器需要频繁地夹紧与松弛,传统的夹持器在螺纹副的作用下夹紧,结构复杂,不能快速地完成夹紧与松弛,效率低。针对单根连续碳纤维逐根置换钢针的需求,本文设计了专用钢针夹持器,并对其工作过程进行受力分析和仿真,同时验证了工作原理的可行性。

1 钢针夹持器结构与工作过程分析

钢针置换工艺流程如图 1 所示。图 1(a) 为含 Z 向钢针阵列的机织碳布整体穿刺织物,图 1(b) 为碳纤维置换钢针并进行锁扣,图 1(c) 为机织碳布整体穿刺织物。钢针置换机构是钢针置换及纤维锁扣装置的重要组成部分,用于完成取针置换工作,其结构如图 2 所示。该机构由钢针夹持器、气缸、直线滑轨滑块组件、专用夹紧装置等组成。钢针夹持器所含部件为薄壁弹性夹持器与楔形滑块,薄壁弹性夹持器由专用夹紧装置夹紧,楔形滑块固定于直线滑轨滑块上,由气缸驱动其往复直线运动,完成对钢针的夹紧与松弛。

薄壁弹性夹持器孔直径略大于钢针直径,壁厚较薄,其端面上有 3 个均匀分布的开口,薄壁弹性夹

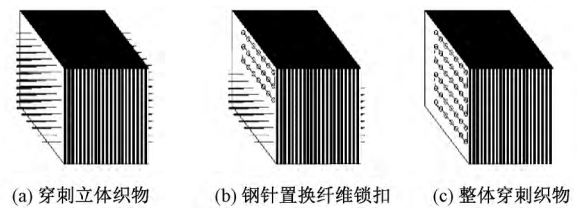


图 1 含 Z 向钢针立体织物钢针置换工艺流程
Fig. 1 Technological process of replacing Z direction steel needle 3-D fabric. (a) 3-D fabric with Z direction steel needle; (b) Steel needle replacement and fiber locking; (c) Piercing 3-D fabric

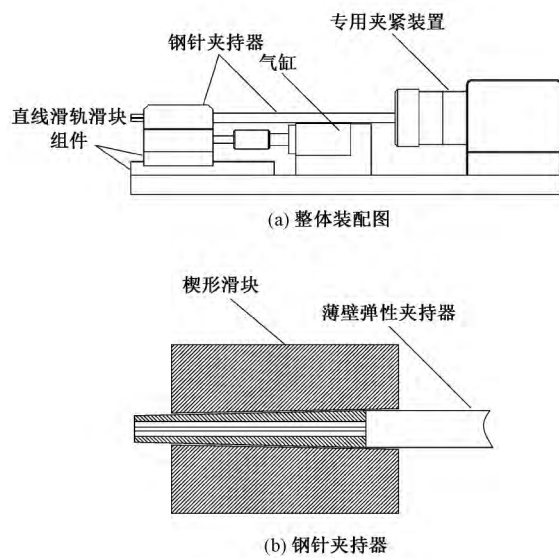


图 2 钢针置换机构

Fig. 2 Replacement mechanism of steel needle.

(a) Whole assembly drawing; (b) Steel needle gripper

持器端面如图 3 所示。选用经调质处理的弹簧钢(65 Mn)作为薄壁弹性夹持器的材料,由于该材料在受力后发生弹性形变,孔内壁对钢针产生压力以夹紧钢针,当外力消除后能快速恢复至初始状态,实现对钢针快速地夹紧与松弛。

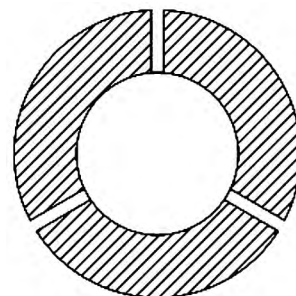


图 3 薄壁弹性夹持器端面

Fig. 3 End face of thin walled elastic gripper

楔形滑块与薄壁弹性夹持器的锥度一致,接触面光滑,以保证钢针夹持器往复工作的摩擦力较小,其模型如图 4 所示。钢针夹持器楔形滑块的驱动力

由气缸提供,合外力转化为施加在薄壁钢针夹持器上的均布载荷,使薄壁弹性夹持器发生弹性形变对钢针夹紧。初始状态为楔形滑块与薄壁弹性夹持器同轴且间隙均匀。置换时,钢针夹持器逐渐接近钢针并保证钢针进入钢针夹持器,当满足夹持深度时,楔形滑块在气缸的作用下向后运动,其与薄壁钢针夹持器的间隙逐渐减小,对薄壁弹性夹持器的压力增加,使薄壁弹性夹持器产生弹性形变,钢针夹持器内壁对钢针产生夹紧力,其力的大小满足取针的受力要求。

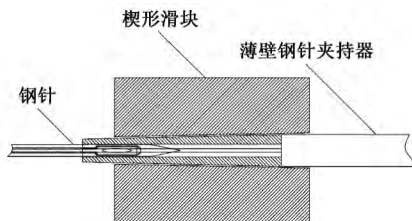


图 4 钢针夹持器夹紧钢针模型
Fig. 4 Clamping steel needle model of steel needle gripper

夹紧钢针后,薄壁弹性夹持器与楔形滑块同步运动,保持钢针被夹紧的状态。待钢针从立体织物中完全取出,楔形滑块在气缸的作用下向前运动,薄壁弹性夹持器受力逐渐减小,其内壁对钢针的夹紧力也逐渐减小,待恢复到初始位置,完成一次夹针过程。在逐根钢针置换的过程中,重复上述工作过程。

2 钢针夹持器力学分析与计算

2.1 钢针受力分析

含 Z 向钢针的立体织物碳布经纬叠层均匀分布,钢针针距等距排列,处于钢针附近的碳纤维受到钢针圆形截面的挤占向钢针外滑移绕过钢针,此为碳纤维绕针弯曲。绕针弯曲的原因是钢针挤占平直的碳纤维,碳纤维绕针弯曲在钢针附近,碳布中的纤维产生绕针弯曲将呈现一定均匀分布的特性。穿刺过程中碳布经钢针针尖进入钢针锥体段,碳纤维绕针弯曲伸长由小到大,作用在钢针的作用力也由小到大,所以在钢针直径处碳纤维对钢针的作用力达到最大,但 Z 向钢针受到绕针弯曲的碳纤维的作用力具有随机性,会由于碳布结构设计的不合理,经纬纱线密度不均,钢针排列不够垂直等增大钢针受到的作用力。理论上碳布经钢针锥体段进入钢针直径处,钢针受到经纬纱线的作用力最大,设最大作用力为 P_{wmax} ,如图 5 所示。

钢针在单层碳布受到的最大静摩擦力为

$$f_{max} = \mu P_{wmax} \quad (1)$$

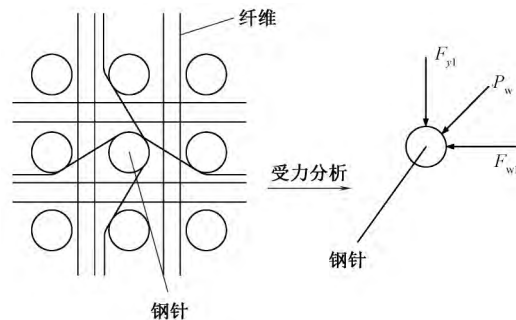


图 5 钢针处于碳纤维绕针弯曲受力示意图
Fig. 5 Sketch of steel needle in bending of carbon fiber around needle

式中 μ 为钢针与纤维的摩擦因数。

含 Z 向钢针立体织物由 n 层正交叠层碳布加压密实而成,所以 Z 向钢针受到的最大作用力为 $F = nf_{max}$,即为最大静摩擦力。钢针置换过程中,钢针逐渐被碳纤维取代,钢针受到碳布的作用力逐渐减小,其受力示意图如图 6 所示。

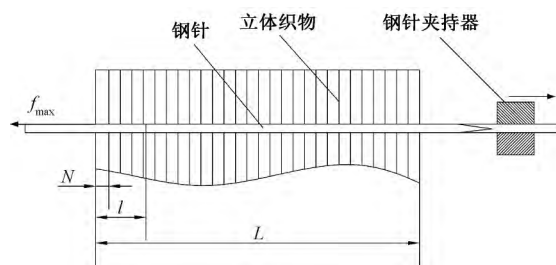


图 6 置换钢针受力示意图
Fig. 6 Sketch of displacement steel needle under force

钢针受摩擦力变化为

$$F = \frac{L-l}{N} f_{max} \quad (2)$$

式中: L 为 Z 向钢针立体织物的总体厚度, μm ; l 为被置换钢针移动的距离, μm ; N 为每层碳布的厚度, mm 。

综上所述,钢针夹持器夹持钢针的力大于 Z 向钢针受到的最大作用力 F ,即可保证钢针能顺利从立体织物中置换出。

2.2 钢针夹持器受力分析

由钢针夹持器工作过程可知,楔形滑块对薄壁弹性夹持器的轴向力使薄壁弹性夹持器发生弹性形变,该形变使夹持器内孔变小,孔内壁对钢针产生压力夹紧钢针^[9]。

2.2.1 楔形滑块对薄壁弹性夹持器的受力分析

钢针夹持器外壁与中心线的夹角为 α ,内壁与中心线的夹角为 ε 。受力后,假定圆锥面上所有点的位移均沿轴向方向且彼此相等。薄壁弹性夹持器

受力前后的变形和位移情况如图 7 所示。取半径为 r (mm) 处的单元体, 轴向宽度为 u (mm), 厚度为 b (mm)。取半径为 $r+r'$ 处的圆锥形截面, 两截面相距 r' , 轴向形变为 du , r' 与 x 轴的夹角为 θ ($^\circ$)。可得该单元体上的径向正应变为

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta(r')}{r'} = \frac{(u+du)\cos\theta - u\cos\theta}{r'} = \frac{du}{r'}\cos\theta = \varepsilon_0\cos\theta \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_0 = \frac{du}{r'}$ 。

假定单元体只处于单向受力状态, 即只受 σ_r 作用, 根据胡克定律得到该单元体径向正应力为 $\sigma_r = E\varepsilon_r = E\varepsilon_0\cos\theta = \sigma_0\cos\theta$, 其中 $\sigma_0 = E\varepsilon_0$, σ_0 代表圆锥面 r 处轴线上的正应力, 其值可由平衡方程 $\sum F_x = 0$ 确定。

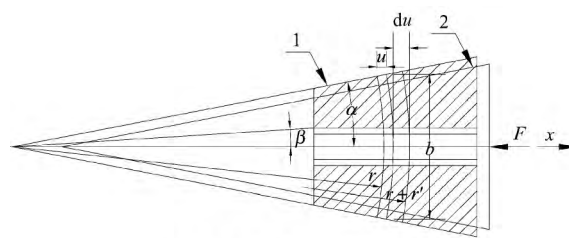
$$F = \sigma_r S = \sigma_r 2 \int_{\beta}^{\alpha} br' \cos\theta d\theta = \frac{1}{2} br' \sigma_0 (\sin 2\alpha - \sin 2\beta) + br' \sigma_0 (\alpha - \beta) \quad (4)$$

由以上平衡方程可知圆锥面上的应力为

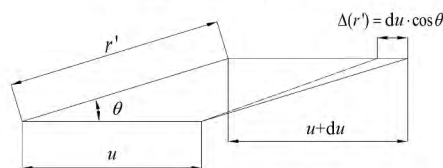
$$\sigma_0 = \frac{2F}{br' [\sin 2\alpha - \sin 2\beta + 2(\alpha - \beta)]} \quad (5)$$

可得正应力的计算公式为

$$\sigma_r = \frac{2F\cos\theta}{br' [\sin 2\alpha - \sin 2\beta + 2(\alpha - \beta)]} \quad (6)$$



(a) 薄壁弹性夹持器的变形和位移



(b) 单元体的变形和位移

1—受力前的状态; 2—受力后的状态。

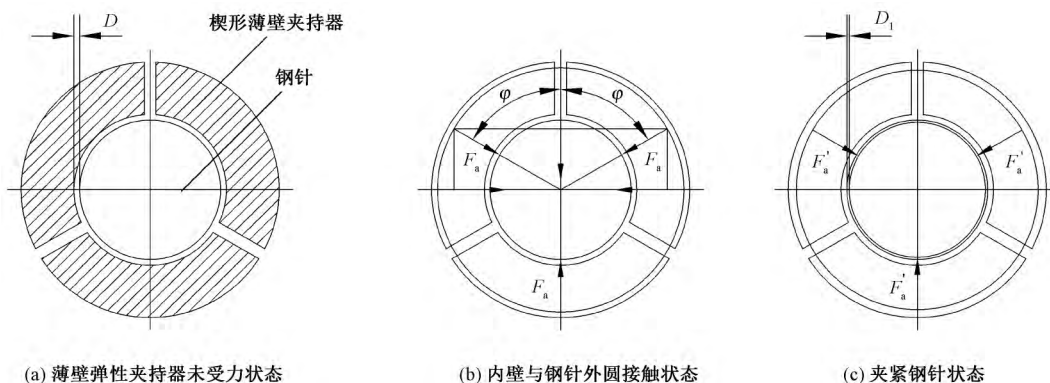
图 7 楔形滑块对薄壁弹性夹持器的受力分析

Fig. 7 Force analysis of wedge block to thin walled elastic gripper. (a) Deformation and displacement of thin walled elastic gripper; (b) Deformation and displacement of unit body

式中: σ_r 为单元体径向正应力, Pa; S 为圆锥面接触面积, mm^2 ; E 为材料的弹性模量, Pa; β 和 α 分别为薄壁弹性夹持器锥面的始末角 ($^\circ$)。

2.2.2 薄壁弹性夹持器对钢针的受力分析

薄壁弹性夹持器对钢针夹持过程的 3 个阶段如图 8 所示。由图 8(a) 可知, 薄壁弹性夹持器未受力时, 钢针夹持器内壁与钢针外圆之间的间隙 D 。



(a) 薄壁弹性夹持器未受力状态

(b) 内壁与钢针外圆接触状态

(c) 夹紧钢针状态

图 8 薄壁钢针夹持器对钢针的受力分析

Fig. 8 Force analysis of thin walled steel needle gripper to steel needle. (a) Non forced state of thin walled elastic gripper; (b) Contact state between inner wall and steel needle; (c) State of clamping steel needle

假设楔形滑块对单个夹持器端面的压力相等, 即单个端面受合外力 F_a 。图 8(b) 是当夹持器承受合外压力达到 F_1 时, 力的方向指向圆心。内壁与钢针外圆接触, 间隙消除, 但孔壁没有压力。根据力的平衡条件, 薄壁弹性夹持器承受压力计算公式为:

$$F_a = \sigma_r A \quad (7)$$

$$F_1 = 2F_a \cos\varphi - F_a \quad (8)$$

由以上平衡方程可知

$$F_1 = \sigma_r A (2\cos\varphi - 1) \quad (9)$$

当压力再增大时, 钢针外圆与钢针夹持器内壁之间产生了压力, 压力达到 P 时, 夹持器端面压力由 F_a 增加到 F'_a , 即承受合外压力 F_2 , 方向指向圆心, 在该力的作用下钢针夹持器产生径向扩张量 D_1 , 如图 8(c) 所示。根据力平衡条件, $F_2 = P -$

F_1 , 可得

$$F_2 = P - \sigma_r A (2 \cos \varphi - 1) \quad (10)$$

式中: A 为楔形滑块与钢针夹持器接触面积, mm^2 ; φ 为 F_a 与垂直方向的夹角 ($^\circ$)。

3 钢针夹持器仿真分析

为验证上述理论计算的正确性, 利用 Ansys 软件分析计算出钢针夹持器对钢针的夹紧力和使用寿命。

薄壁弹性夹持器材料选定 65Mn 钢, 输入材料参数泊松比为 0.237 5, 弹性模量为 1.98×10^{11} Pa, 材料密度为 7.85 kg/m^3 , 拉伸屈服强度为 9.8×10^8 Pa。输入钢针夹持器模型, 建立楔形滑块内圆锥面与薄壁弹性夹持器外圆锥面、薄壁弹性夹持器内圆柱面与钢针接触, 类型选择摩擦接触, 摩擦因数为 0.2。对其进行网格划分, 单元类型选择 Mesh200, 固定约束选定薄壁弹性夹持器圆柱面, 运动设置选定楔形滑块内圆锥面, 对钢针施加 x 正方向的力, 即钢针所受的最大静摩擦力, 由实际测得为 3.3 N; 对楔形滑块施加 x 负方向的力 F 。钢针夹持器的受力 F 来自气立可 NU-10-10 型气缸, 实际工作时为 6 个大气压, F 取理论结果的 70% 得轴向力 F 为

$$F = 1.01 \times 10^5 \times 6 \times \pi \times 5^2 \times 10^{-6} \times 70\% \text{ N} = 33.3 \text{ N}$$

施加轴向力由 0 N 增加至 33.3 N, 通过 Ansys 软件计算钢针受到最大压力(如图 9 所示), 得到钢针受到压力随施加载荷变化的曲线。

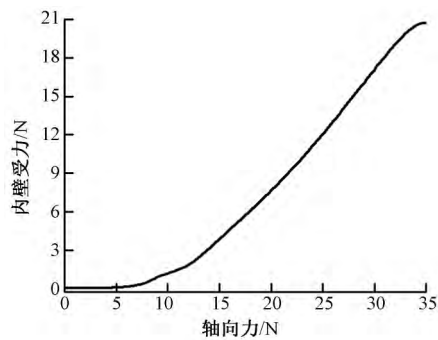


图 9 钢针受压随轴向力的变化曲线

Fig. 9 Change curve of pressure of steel needle with axial force

由图 9 可知, 当加载的力小于 7.5 N 时, 钢针夹持器孔壁未接触到钢针, 钢针不受压力。随着加载的力逐渐增大, 钢针的受力逐渐增加, 当加载的力等于 33.3 N 时, 钢针夹持器产生向内的径向扩张, 钢针受力最大为 20.7 N, 大于钢针所受最大静摩擦力, 可保证将钢针置换。

在满足钢针夹持器夹持钢针力的同时, 设计中

还要考虑其疲劳寿命。仿真计算出钢针夹持器在反复夹持工作时的寿命为 1×10^6 h, 可靠性好, 满足设计要求。

4 实验验证

实验采用艾普 SF-300 N 型数显高精度拉力推力计, 该设备具有工作跟踪模式和峰值保持模式, 其精度为 $\pm 0.5\%$, 满足实验过程中钢针夹持器的受力变化和精度要求。选用碳布厚度为 0.25 mm, 碳布正交叠层经穿刺机穿刺、加压密实, 层间距为 0.68 mm, 含 Z 向钢针立体织物的厚度为 32 mm。

测力计测出含 Z 向钢针立体织物钢针所受的最大静摩擦力为 3.3 N。在钢针夹持器夹持钢针的过程中, 随着轴向力的逐渐增大, 薄壁弹性夹持器发生弹性形变, 当轴向力为 8.7 N 时, 内壁与钢针接触, 但钢针不受力。当轴向力为 19.4 N 时, 钢针夹持器夹紧钢针, 大于钢针所受的最大静摩擦力, 完成钢针置换工作, 实验测试过程如图 10 所示。

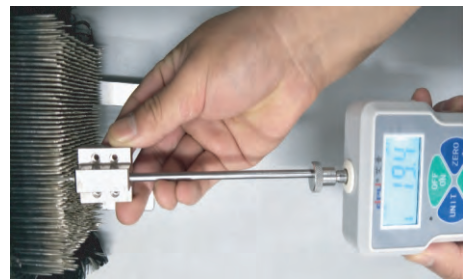


图 10 实验测试过程

Fig. 10 Experimental testing process

为验证钢针夹持器工作的可靠性与稳定性, 进行了 10 次钢针夹持实验, 结果见表 1。

表 1 实验结果统计表

Tab. 1 Statistical table of experiment results N

实验编号	轴向力	钢针受力
1	19.4	5.7
2	19.6	6.0
3	19.9	6.5
4	19.5	5.8
5	19.7	6.0
6	19.5	5.7
7	19.4	5.7
8	19.9	6.4
9	19.4	5.6
10	19.6	5.9

钢针夹持置换实验中, 10 次钢针夹持实验均顺利地将钢针置换, 成功率为 100%; 当夹紧力为 19.4 N 时, 钢针被顺利置换。表明钢针夹持器工作原理正

确,工作稳定可靠,满足钢针置换要求。

5 结 论

针对含 Z 向钢针的立体织物人工逐根置换钢针的不足及传统夹持器不能满足实际需求现状,设计了适用于钢针置换的专用钢针夹持器。该专用钢针夹持器自动化程度高,定位精准,能快速实现夹紧与松弛。对钢针夹持器工作过程进行受力分析与仿真发现,钢针置换工作可靠,能持续进行。为验证工作原理的可行性,进行了夹持置换钢针的实验,结果表明钢针夹持器原理可行,工作可靠。 **FZXB**

参考文献:

- [1] ROLINDK P G. 146. Properties and application of Mod-3 pierced fabric reinforced carbon/carbon composites [J]. Carbon, 1973, 11(6): 690.
- [2] 朱建勋. 细编穿刺织物的结构特点及性能 [J]. 宇航材料工艺, 1998(1): 41 - 43.
ZHU Jianxun. The structural characteristics and properties of fine weave pierced fabric [J]. Aerospace Materials and Technology, 1998 (1): 41 - 43.
- [3] 朱建勋. 碳布整体穿刺织物编织工艺与结构参数优化 [D]. 南京: 东南大学, 2003: 2 - 21.
ZHU Jianxun. Carbon fiber integrated piercing fabrics braiding technology and parameter optimization [D]. Nanjing: Southeast University, 2003: 2 - 21.
- [4] 朱建勋, 何建敏, 周之刚, 等. 整体穿刺机织布顶弯模式下的钢针针尖形态优化 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2004, 37(8): 690 - 694.
ZHU Jianxun, HE Jianmin, ZHOU Zhigang, et al. Optimizing of the form of steel needlepoint based on bending of woven in the integrated piercing process [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology Edition), 2004, 37 (8): 690 - 694.
- [5] 朱建勋, 何建敏, 王海燕. 正交叠层机织布整体穿刺工艺的纤维弯曲伸长机理 [J]. 中国工程科学, 2003, 5(5): 59 - 62.
ZHU Jianxun, HE Jianmin, WANG Haiyan. The mechanism of fiber bending and elongation in the integrated piercing process of orthogonal laminated woven fabrics [J]. Engineering Science, 2003, 5 (5): 59 - 62.
- [6] 邢晓熙, 徐澄. 台达 PLC 与触摸屏在细编穿刺机上的应用 [J]. 机械设计与制造工程, 2013(2): 84 - 85.
XING Xiaoxi, XU Cheng. The application of delta PLC and touch screen to fine knitting machine [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2013 (2): 84 - 85.
- [7] 董九志, 蒋秀明, 杨建成, 等. 立体织物整体穿刺钢针阵列布放装置研制及实验验证 [J]. 纺织学报, 2015, 36(3): 115 - 120.
DONG Jiuzhi, JIANG Xiuming, YANG Jiancheng, et al. Experimental study and development of integrated piercing steel needles array laying device of 3-D fabric. Journal of Textile Research, 2015, 36 (3): 115 - 120.
- [8] 张立泉, 朱建勋, 张建钟, 等. 三维机织结构设计和织造技术的研究 [J]. 玻璃纤维, 2002(2): 3 - 7.
ZHANG Liqun, ZHU Jianxun, ZHANG Jianzhong, et al. Study on the design and weaving technology of 3-D woven fabric [J]. Glass Fiber, 2002 (2): 3 - 7.
- [9] 李文玉. 液性塑料夹具中的薄壁套筒的力学分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2010(4): 54 - 55.
LI Wenyu. Mechanical analysis of thin-walled sleeve in liquid plastic fixture [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2010(4): 54 - 55.