

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.014

锁纱工艺对柔性导向三维织物线圈成型的影响

于向蕾^{1,2}, 臧勇¹, 胡培利², 刘丰²

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 中国机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 锁纱工艺是三维织物成型的重要工艺, 决定三维织物的纤维体积分数, 影响三维织物的力学性能。为实现三维织物Z向高质量锁纱, 研究了柔性导向三维织物锁纱线圈残余拉伸强度损伤规律。设计了碳纤维三维织物线圈成形磨损试验装置, 开展引纱速率、引纱针直径、纱线K数、引纱力等不同成形工艺参数对线圈残余拉伸强度影响试验, 采用拉伸试验评价了线圈残余拉伸强度, 建立了引纱力与线圈残余拉伸强度关系预测模型。结果表明, 引纱速率对线圈残余拉伸强度影响不大, 可以提高引纱速率实现高效织造; 当引纱针直径小于0.3 mm时, 碳纤维丝因弯曲性能差导致线圈残余拉伸强度明显降低, 为引纱针设计提供了依据; 当碳纤维K数小于6 K时, 线圈残余拉伸强度随着纤维K数减少而略有降低; 当碳纤维K数大于6 K时, 线圈残余拉伸强度随着纤维K数增加而明显降低; 引纱力与线圈残余拉伸强度呈指数关系, 预测值与实际值最大相对差值为7.48%。上述工作为实现三维织物成型的高效高质量锁纱提供了数据支撑。

关键词: 碳纤维; 三维织物; 锁纱工艺; 成形工艺参数; 线圈损伤

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0107-07

Influence of lock-stitching technology on formation of flexible guided three-dimensional fabric loops

YU Xianglei^{1,2}, ZANG Yong¹, HU Peili², LIU Feng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract : Locking yarn process is an important process of three-dimensional fabric forming, which determines the fiber volume fraction of three-dimensional fabric and affects the mechanical properties of three-dimensional fabric. To achieve high-quality Z-direction yarn locking in 3D woven fabrics, the damage mechanism of the residual tensile strength of yarn locking loops during flexible guided 3D weaving was investigated. A novel three-dimensional fabric loop forming wear test device was designed. The effects of different forming process parameters such as yarn insertion speed, latch needle diameter, yarn K-number and yarn insertion force on the residual tensile strength of the loops were tested. Tensile tests were employed to evaluate the residual tensile strength of loop, and a predictive model was established to correlate yarn insertion force with the residual tensile strength of the loops. The results show that the residual tensile strength of the loop is not affected by the yarn insertion speed that can be increased to achieve efficient weaving. The residual tensile strength of the loop is significantly reduced due to the poor bending resistance of the fibers with the diameter of the latch needle less than 0.3 mm, which provides a basis for the design of the latch needle. When the fiber K-number is less than 6 K, the residual tensile strength of the loop decreases slightly with the decrease of the fiber K-number. When the fiber K-number is greater than 6 K, the residual tensile strength of the loop decreases significantly with the increase of the fiber K-number. There is an exponential relationship between the yarn insertion force and the residual tensile strength of the loop, and the maximum relative difference between the predicted value and the actual value is 7.48%. This study provides essential data support for achieving high efficiency and high quality lock yarn in 3D woven fabric manufacturing.

Keywords : carbon fiber ; three-dimensional woven fabric ; yarn locking process ; forming process parameters ; yarn loop abrasion

通信作者: 臧勇, 教授, 博士生导师, 研究方向为塑性加工工艺与装备

收稿日期: 2025-10-27

引用格式: 于向蕾, 臧勇, 胡培利, 等. 锁纱工艺对柔性导向三维织物线圈成型的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 107-113.

YU Xianglei, ZANG Yong, HU Peili, et al. Influence of lock-stitching technology on formation of flexible guided three-dimensional fabric loops[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 107-113.

三维复合材料相比于传统的二维复合材料,在抗分层、抗冲击以及抗层间剪切等方面展现出显著优势,已经实现了从一般结构件向主要受力件突破、从小尺寸向大尺寸迈进、从结构简单化向结构复杂化发展^[1-2],在航空航天、军事装备、交通运输及新能源装备等领域具有广阔的发展前景^[3-4]。三维织物是三维复合材料的增强相,目前三维织物制备常用的技术方法有三维编织技术^[5-6]、三维机织技术^[7-8]、柔性导向三维织造技术^[9-10]等。三种技术的锁纱本质都是克服预制体横向纱线回弹来控制预制体纤维体积分数。在三维编织技术中,预制体的锁纱方式是通过增加纱线张力实现预制体密度控制;在三维机织技术中,通过控制经纱张力和打纬力实现锁纱功能;柔性导向三维织造技术是先设计在Z向设计导向阵列,然后沿着导向阵列间隙铺设X/Y向纤维,最后通过引纱针将纤维穿过导向阵列孔位,再穿过前一个线圈,实现线圈与线圈互锁,完成三维预制体织造,成形原理如图1所示。

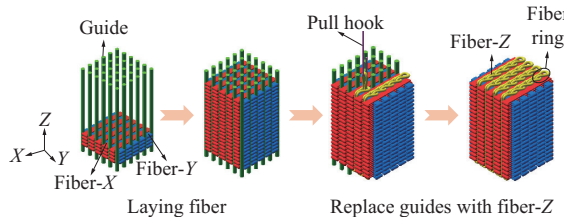


图1 三维织物成形原理

Fig. 1 Principles of 3D fabric forming

目前,对柔性导向三维织造技术的锁纱工艺研究较少,主要集中在二维结构复合材料的锁纱工艺研究。由于柔性导向三维织物具有片层状结构,因此将二维纤维布或者层合板通过缝合纱线固定在一起的三维缝合工艺^[11]对于探究柔性导向三维预制体的锁纱工艺具有很强的参考作用。学者们在提高线圈成形质量方面开展了相关研究,范晓健等^[12]利用摩擦学原理对工业缝纫机机针进行了改进设计,降低了机针孔对碳纤维缝合线的剪切应力,提高了线圈的成形质量,达到了降低断线率的目的。吴承原等^[13]分析了碳纤维缝合线在缝合过程中张力变化规律并建立了悬链线模型,优化了缝合装置挑线机构,解决了在缝合过程中缝合线因张力过大而产生较大磨损的问题,稳定了线圈的成形质量。张天成等^[14]利用仿真分析与试验相结合的方法研究了缝合不同厚度碳纤维布时线环最佳成形位置,实现了缝合装置的刺料机构和钩针机构正确配合。姚

福林等^[15]针对单边缝合技术建立了缝合过程中缝合线瞬时需求量模型,结合缝合装置的运动规律,完成了通过控制供线量实现线圈成形稳定性的目标。碳纤维具有较强的拉伸强度,但是其弯曲性能极差,因此目前以碳纤维作为缝合线且能够量产的预制体厚度为30 mm。为进一步提升碳纤维作为缝合线的应用空间,宋宗建^[16]开展了大厚度碳/碳复合预制体缝合装置研究,将预制体厚度提升到了70 mm。柔性导向三维预制体可以用来制备发动机喉衬等大尺寸产品,其厚度超过100 mm,但目前对其锁纱研究较少,还没有相关数据可供参考,且锁纱工艺还未实现机械化,对人工依赖较大。由于线圈成形质量决定锁纱力大小,因此其直接影响了锁纱工艺的成形质量,笔者通过开展锁纱工艺参数与线圈成形质量关系研究,主要探讨了引入速率、引纱针直径、纤维K数、纤维张力等工艺参数的影响,为柔性导向三维预制体机械化锁纱提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维束:T300-40B,规格1、3、6 K,日本东丽株式会社;

含导向阵列的三维织物:柔性导向三维织物X/Y向纤维均为双股3K的T300-40B碳纤维束,层密度4.5 mm/10层,Z向为直径1.0 mm的304不锈钢棒,相邻导向棒中心距2.4 mm;

树脂材料:Easy Composites IN2 环氧树脂,AT30慢速固化剂,英国Easy Composites公司;

丙烯酸结构AB胶:ergo1309,瑞士Kisling公司。

1.2 主要仪器与装备

碳纤维线圈成形磨损试验装置:自制,如图2所

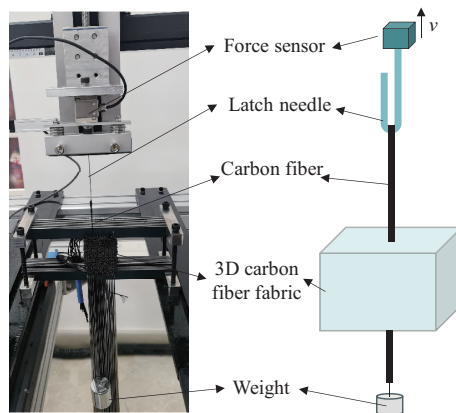


图2 磨损试验装置

Fig. 2 Wear test device

示,其中引纱针采用U型304不锈钢针;

力传感器:DYLY-106,量程0~1 kg,蚌埠大洋传感器工程有限公司;

万能试验机:LGS-50K,昆山鹭工精密仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): Gemini 300,德国ZEISS公司。

1.3 实验设计

1.3.1 碳纤维线圈成形试验

模仿线圈成形过程,用U型引纱针钩住碳纤维束,此时碳纤维束由单股变为双股,沿Z向穿过三维织物孔位,如图1所示。在试验开展过程中,为防止三维织物孔直径因碳纤维束穿过磨损造成扩大,每

组试验中每个三维织物孔位只允许碳纤维束穿过2次。试验环境温度为20~25℃,相对湿度40%~70%。

1.3.2 试验参数

为研究在替纱工艺中碳纤维线圈的残余拉伸强度,开展不同成形工艺参数的线圈成形试验。试验参数见表1。纤维K数是指由多少千根纤维丝组成一束纤维。试验工艺参数中的碳纤维规格由已有的纤维束组合而成。2 K纤维由两束1 K纤维组成,4 K纤维由一束3 K纤维和一束1 K纤维组成,8 K纤维由一束6 K纤维和两束1 K纤维组成,10 K纤维由一束6 K纤维、一束3 K纤维和一束1 K纤维组成,12 K纤维由两束6 K纤维组成。

表1 线圈成形试验工艺参数

Tab. 1 Parameters of yarn loop forming test process

Test group	Traction force/kg	Diameter of latch needle/mm	Fiber K-number/K	Yarn drawing velocity/(mm·min ⁻¹)
V	0.2	0.3	6	6/60/120/180/240/300
D	0.2	0.1/0.2/0.3/0.4	6	60
K	0.2	0.3	2/4/6/8/10/12	60
F	0/0.2/0.4/0.6/0.8	0.3	6	60

1.3.3 复丝制备

取环氧树脂和慢速固化剂按照质量比100:30搅拌均匀并消泡,将已损伤的碳纤维丝展开浸泡其中,2~4 min后取出,用刮板将多余树脂去掉,将纤维丝一端固定在固化架上,纤维丝保持自然悬垂状态,固化温度为室温,固化时间24 h。将碳纤维复丝以挂针位置为中点修剪出总长250 mm长度,在其两端分别用AB胶粘贴尺寸50 mm×20 mm的加强片,固化温度为室温,固化时间24 h,完成标准拉伸样件制备,如图3所示。

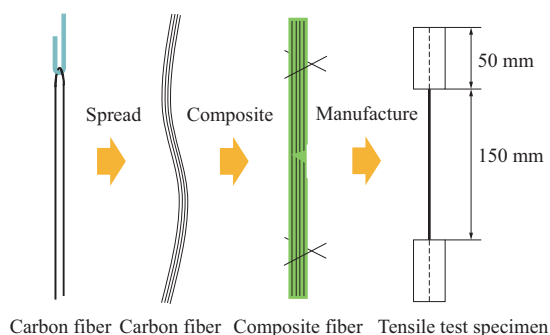


图3 复合丝材制备过程

Fig. 3 Preparation process of composite wire

1.3.4 碳纤维线圈残余拉伸强度评价测试

为探究线圈在引纱过程中的损伤程度,按照GB/T3362-2017将1.3.3节中制备的复丝测试样件进行拉伸强度测试,用线圈残余拉伸强度作为评价

线圈损伤程度的指标。使用万能试验机对纤维复丝进行拉伸性能测试,拉伸速度5 mm/min,纤维复丝工作段长度150 mm。

2 结果与讨论

2.1 引入速率对线圈残余拉伸强度影响

开展不同引入速率的线圈成形试验,将SEM观测的线圈损伤形貌展示如图4所示,从图片清晰观测到碳纤维丝发生集中断裂,符合引纱过程中的损伤情况,主要是因为引纱过程中碳纤维受到引纱针的剪切作用造成。

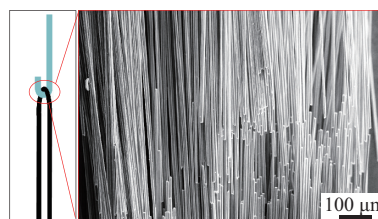


图4 线圈损伤形貌

Fig. 4 Damage morphology of yarn loop

采集纤维复丝的残余拉伸强度,将不同引入速率下的残余拉伸强度均值绘制成图5。碳纤维丝拉伸强度约为3 500 MPa,图5中线圈质量趋于稳定阶段的复丝残余拉伸强度最小值为2 648 MPa,磨损量约为852 MPa,相对损失量为24.34%,纤维强度损失较大。这部分的损伤可能与引纱针直径、纤维K数、引纱力等因素有关,需要进一步开展研究。同

时由图5可以发现,随着引纱速率的增加,复丝的残余拉伸强度变化趋势不明显,残余拉伸强度最大值为2 822 MPa,最小值为2 648 MPa,相对差值仅为6.17%,且没有明显规律性,可以认为引纱速率对线圈残余拉伸强度影响不显著。这可能是因为速率变化过程中纱线受力不变。因此在进行替纱工艺中可以选择较快的引纱速率来提高替纱效率。

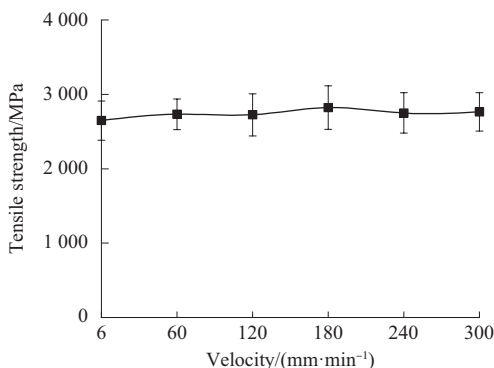


图5 线圈残余拉伸强度与引纱速率关系

Fig. 5 Relationship between residual tensile strength of yarn loop and yarn drawing velocity

2.2 引纱针直径对线圈残余拉伸强度的影响

引纱针是线圈形成的关键结构,对线圈残余拉伸强度有最直接的影响,因此本文开展了不同引纱针直径的线圈成形试验。将不同引纱针直径对应的复丝残余拉伸强度和纤维损伤强度变化绘制成图6。由图6残余拉伸强度曲线可以发现,引纱针直径由0.1 mm增加到0.2 mm时,残余拉伸强度增加明显,而引纱针直径由0.2 mm增加到0.4 mm时,残余拉伸强度较前一段变化平缓。由图6损伤强度曲线可以看出,引纱针直径为0.1 mm时,损伤强度为1 089 MPa,减少为碳纤维原始拉伸强度的31.11%,损伤量显著;当直径为0.2 mm时,损伤强度为294

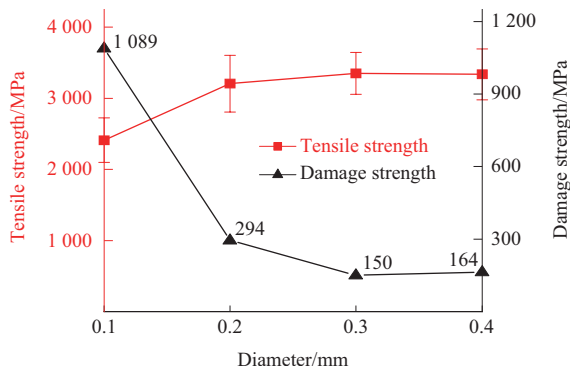


图6 线圈残余拉伸强度、损伤强度与引纱针直径关系

Fig. 6 Relationship between residual tensile and damage strength of yarn loop and diameter of latch needle

MPa,相对减少8.40%,损伤明显改善。当直径为0.3、0.4 mm时,损伤强度为150、164 MPa,相对减少4.29%、4.69%,损伤程度趋于稳定。综上可知,当引纱针直径小于0.3 mm时,线圈残余拉伸强度明显降低,这可能与纤维弯曲状态以及纤维与引纱针的相互作用力有关。为了进一步探究纤维损伤的主要原因,将不同引纱针直径的引纱力绘制成图7,并绘制了碳纤维在引纱针处的弯曲状态,如图8所示。

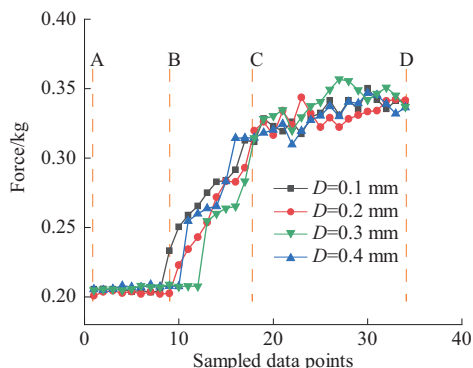


图7 引纱力与引纱针直径关系

Fig. 7 Relationship between yarn drawing force and diameter of latch needle

图7中AB段为引纱针进入织物孔位阶段,因此引纱力仅为纤维张力,所以该段为直线;BC段为Z向纤维在引纱针牵引作用下进入织物孔位阶段,此时引纱力为纤维张力与Z向纤维所受摩擦力之和,因此该段引纱力值呈逐渐上升趋势;CD段为Z向纤维完全穿过织物孔位阶段,该段引纱力为纤维张力与Z向纤维所受摩擦力之和,由于Z向纤维所受摩擦力已达到最大值,因此该段力值曲线变化趋于稳定且数值最大。由CD段可以看出不同引纱针直径对应的引纱力变化不明显,因此不同引纱针直径造成的纤维损伤与引纱力相关性不大。

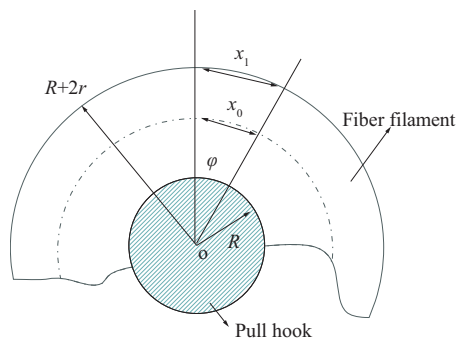


图8 碳纤维弯曲示意图

Fig. 8 Carbon fiber bending diagram

进一步探究纤维弯曲与线圈损伤的关系。根据图8得到延伸率公式,见式(1)。因为 φ 为小偏角,

根据三角形平行线分线段成比例定理得到式(2)。联立式(1)和式(2)得到式(3)。T300的碳纤维延伸率为5%,由式(3)可知,引纱针直径最小为0.22 mm,因此当引纱针直径为0.1 mm时纤维丝损伤较大,引纱针直径为0.2 mm时纤维丝损伤较小,引纱针直径为0.3、0.4 mm时,损伤状态趋于稳定。因此在对引纱针结构设计时要选择适当的引纱针直径,可以减少因引纱针结构造成的纤维弯曲损伤。

$$\varepsilon \geq \frac{x_1 - x_0}{x_0} \quad (1)$$

$$\frac{x_0}{x_1} = \frac{R + r}{R + 2r} \quad (2)$$

$$R \leq r \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: R 为引纱针半径; r 为纤维丝半径; ε 为伸长率; φ 为小偏角; x_0 为 φ 角对应的纤维丝中性轴弧长; x_1 为 φ 角对应的纤维丝外侧弧长。

2.3 纤维K数对线圈残余拉伸强度影响

三维织物Z向孔位中引入纤维的规格直接影响着织物整体纤维体积分数,同时也决定着织物Z向力学性能,是三维织物成型的关键参数,因此开展不同纤维规格对线圈残余拉伸强度试验探究其对线圈残余拉伸强度的影响规律可以为纱线规格选择提供依据。不同纤维K数成形的线圈的残余拉伸强度如图9所示。可以发现,当纤维K数低于6 K时,复丝残余拉伸强度最大值与最小值间相差223 MPa,相对差值为6.66%。当纤维K数高于6 K时,复丝残余拉伸强度由3 350 MPa降为2 732 MPa,降幅为618 MPa,相对降低了18.45%。这可能是因为纤维K数增加引起织物对Z向纤维的摩擦力增加,从而导致引纱力增加。因此将引纱力进行统计绘图如图10所示。

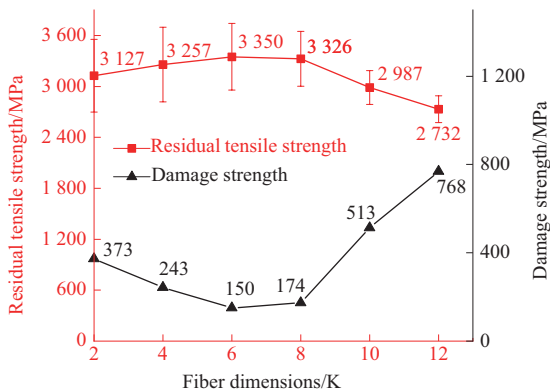


图9 线圈残余拉伸强度、损伤强度与纤维K数关系

Fig. 9 Relationship between residual tensile and damage strength of yarn loop and fiber K-number

示。图10中AB段为引纱针进入织物孔位阶段,引纱力仅为纤维张力,所以该段呈现直线状态;BC段为Z向纤维在引纱针牵引作用下进入织物孔位阶段,引纱力为纤维张力与Z向纤维所受摩擦力之和,不同K数纤维的摩擦力不同,因此引纱力值上升趋势不同;CD段为Z向纤维完全穿过织物孔位阶段,该段引纱力为纤维张力与Z向纤维所受摩擦力之和,此时Z向纤维所受摩擦力已达到最大值,引纱力趋于稳定。由CD段可以看出纤维K数低于6 K时引纱力增加量不明显,而图9中纤维损伤强度却随着纤维K数减少而降低,说明引纱力与该部分纤维损伤相关性不大,主要原因是纤维K数减少造成纤维强度降低;纤维K数高于6 K时引纱力增量显著,与图9中纤维损伤量变化趋势一致。因此可以认为引纱力是影响线圈残余拉伸强度的重要因素。

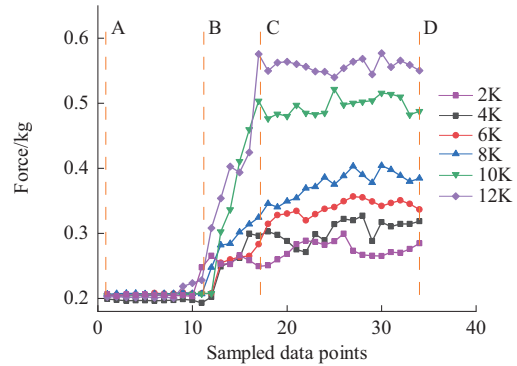


图10 引纱力与纤维K数关系

Fig. 10 Relationship between yarn drawing force and fiber K-number

2.4 引纱力与线圈残余拉伸强度关系

通过对引纱针进行受力分析可知,引纱力值是纤维所受摩擦力和纤维张力的总和。通过改变纤维张力来改变引纱力,从而探究引纱力与线圈残余拉伸强度关系。根据以上试验结果采用引纱针直径0.3 mm、纤维6 K、引纱速率120 mm/min的试验参数开展引纱试验和复丝拉伸试验,记录数据绘制成图11。可以发现,纤维张力低于0.2 kg时,复丝残余拉伸强度比未损伤的纤维的拉伸强度最大降低150 MPa,仅相对减少4.29%,影响不显著;当随着纤维张力增加到0.4、0.6、0.8 kg时,复丝残余拉伸强度比未损伤的纤维的拉伸强度分别降低294、1 023、1 829 MPa,分别相对减少8.4%、29.23%、52.26%,降幅显著,说明引纱力对线圈残余拉伸强度影响显著,并且引纱力越大,线圈损伤越严重。

为进一步探究引纱力与线圈残余拉伸强度的关系,对图11中的数据分析,可以看出线圈残

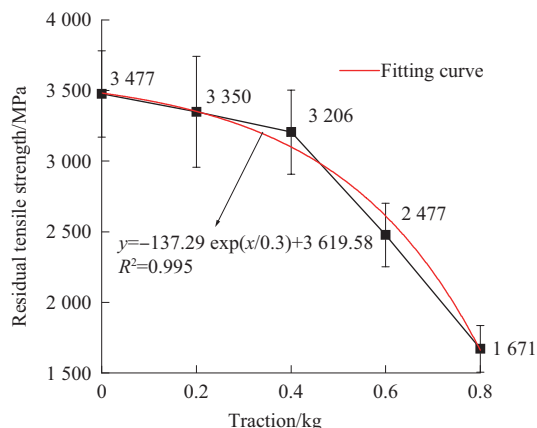


图11 线圈残余拉伸强度与引纱力关系

Fig. 11 Relationship between residual tensile strength of yarn loop and yarn drawing force

余拉伸强度与引纱力呈非线性关系。这主要是因为随着引纱力增加,线圈处纤维丝受到更大的压缩,已知纤维束横向压缩试验中接触点数目与纤维体积分数呈现一阶指数增长趋势^[17],接触点数目增加必然引起接触面积增加,从而使纤维丝间摩擦力增加,导致线圈残余拉伸强度急剧下降。依据以上推断使用指数拟合方法对数据进行拟合分析,获得式(4),其中 x 为引纱力, y 为残余拉伸强度。残余拉伸强度随引纱力变化的拟合优度 $R^2=0.995$,拟合方程对线圈残余强度变化的描述较为准确。拟合方程仅适用于纤维损伤与引纱力相关性比较大的工况,因此将2.3节中纤维8 K、纤维10 K、纤维12 K下CD段的引纱力取平均值带入式(4)得到纤维残余拉伸强度预测值,并与实际值进行对比,见表2,最大相对差值为7.56%。因此开展引纱工艺要密切关注引纱力,确保线圈残余强度能够满足锁纱力要求,防止X/Y向织物回弹。

$$y = -137.29 \exp(x/0.3) + 3619.58 \quad (4)$$

表2 线圈残余拉伸强度预测值与实际值对比

Tab. 2 Comparison of predicted and actual values of yarn loop residual tensile strength

Fiber K-number/ K	Traction force/kg	Predicted value/MPa	Actual value/MPa	Relative difference/%
8	0.37	3 148	3 326	5.35
10	0.49	2 917	2 987	2.34
12	0.56	2 732	2 540	7.56

3 结论

(1)设计了引纱工艺参数对线圈质量影响试验,搭建了线圈成形试验装置。

(2)引纱速率对纤维残余拉伸强度影响不大,可以通过提升引纱速率提高预制体织造效率。

(3)引纱针直径小于0.3 mm时,线圈残余拉伸强度降低明显;纤维束规格大于6 K时,线圈残余拉伸强度下降迅速;这均表明采用线圈作为锁纱方式时应特别关注引针直径与Z向纱线规格的匹配。

(4)试验表明引纱力与纤维残余拉伸强度呈近似指数关系,建立了二者的预测模型,拟合优度0.995,预测值与实际值最大相对差值7.56%。通过该模型可以预测不同引纱力的线圈残余拉伸强度以满足锁纱力要求。

参考文献

- [1] 陈利,李汶庭,焦伟.高性能复合材料三维织物增强技术发展[J].纺织导报,2025(5):32-38.
CHEN Li, LI Wenting, JIAO Wei. Development of 3D textile reinforcement technology for high-performance composites[J]. China Textile Leader, 2025(5):32-38.
- [2] WANG Z P, ZHANG G L, ZHU Y X, et al. Theoretical analysis of braiding strand trajectories and simulation of three-dimensional parametric geometrical models for multilayer interlock three-dimensional tubular braided preforms[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(19/20):4 306-4 322.
- [3] 杨宁,刘丰,杜悟迪,等.径棒法三维预制体建模及结构参数的影响[J].工程塑料应用,2025,53(5):95-101.
YANG Ning, LIU Feng, DU Wudi, et al. Modeling of radial carbon rods weaving 3D preforms and influence of structural parameters [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5):95-101.
- [4] 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):2 774-2 784.
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):2 774-2 784.
- [5] LI J, YIN Y, HUANG Q, et al. Three-dimensional braiding machine with variable braiding pattern[J]. Journal of The Textile Institute, 2024, 115(10):2 011-2 019.
- [6] GAO C T, SUN H Y, GU J P, et al. Dynamic modeling of a three-dimensional braided composite thin plate considering braiding directions[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2025, 46(1):123-138.
- [7] JING K K, XIE S C, ZHANG Y F, et al. Impact resistance of 3D woven fabrics and composites: A review[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 213. DOI:10.1016/j.tws.2025.113262.
- [8] 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.
- [9] LIU Y, SHAN Z, LYU Z, et al. Systematic deformation model of a square guide bar array in a flexible oriented 3D woven process[J].

- Composite Structures, 2022, 280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114849.
- [10] LIU Y, SHAN Z D, LIU F, et al. Optimization control of guide bar array deformation in flexible-oriented 3D woven process[J]. Polymer Composites, 2024, 45(6):5 386–5 398.
- [11] 艾涛,王汝敏. Kevlar缝合复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2005(1):64–67.
AI Tao, WANG Rumin. Progress in stitched composites with kevlar yarns[J]. Materials Reports, 2005(1):64–67.
- [12] 范晓健,李晶. 碳纤维缝纫线用机针的改进[J]. 纺织器材, 2016, 43(1):34–36.
FAN Xiaojian, LI Jing. Improvement of the sewing needle of carbon fiber application[J]. Textile Accessories, 2016, 43(1): 34–36.
- [13] 吴承原,董九志,蒋秀明. 复合材料预制体双边缝合装置挑线机构优化设计与缝线张力研究[J]. 复合材料科学与工程, 2024(10): 103–109.
WU Chengyuan, DONG Jiuzhi, JIANG Xiuming. Optimal design of take-up mechanism and suture tension of composite prefabricated double-sided suture device[J]. Composites Science and Engineering, 2024(10):103–109.
- [14] 张天成,耿争言,董九志,等. 大厚度预制体缝合装置的关键技术分析[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(1):208–213.
ZHANG Tiancheng, GENG Zhengyan, DONG Jiuzhi, et al. Research on the key technology of stitching large-thickness preforms stitching device[J]. Machine Design and Research, 2023, 39(1):208–213.
- [15] 姚福林,李亮玉,岳建锋,等. 复合材料单边缝合机械手线迹稳定成型技术研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13):60–67.
YAO Fulin, LI Liangyu, YUE Jianfeng, et al. The stitch stable forming technology of one-side sewing manipulator applied in composite material[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13):60–67.
- [16] 宋宗建. 70 mm厚炭/炭复合材料预制体缝合装置研究[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
SONG Zongjian. Research on 70 mm thick C/C composite prefabricated stitching device[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019.
- [17] 郭慧,孙绯,高岩,等. 高性能纤维束横向压缩变形机理[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(4):395–399.
GUO Hui, SUN Fei, GAO Yan, et al. Deformation mechanism of high performance fiber bundles under transverse compressive stresses[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2014, 40(4):395–399.