

镍铬合金丝铺缝电加热织物面内剪切性能 试验研究

孙金鑫^{1,2} 郭静娴^{1,2} 徐夫慧^{1,2} 付金峰³ 崔艳超³ 孙颖^{1,2} 陈利^{1,2}

1. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387;
2. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387;
3. 天津航空机电有限公司, 天津 300308

摘要:为开发兼具抗剪切变形能力与电热性能的电加热织物,基于定制纤维铺缝(tailored fiber placement, TFP)工艺,制备了3种镍铬合金(Cr20Ni80)丝并联排列密度的电加热织物。利用万能试验机对电加热织物进行相框剪切试验,采用数字图像相关技术和红外热成像技术分析电加热织物的面内剪切性能与电热性能。结果表明:引入并联排布的Cr20Ni80丝后,电加热织物的面内剪切变形性能得到显著提升,剪切力由基布玻纤缎纹织物的1.45 N上升至电加热织物的2.50 N以上,增幅超72.41%。当Cr20Ni80丝并联排列密度为50根/(10 cm)时,电加热织物抗剪切变形能力最优。电加热织物在面内剪切变形过程中,基布玻纤缎纹织物由初始的正方形逐渐转变为菱形,纱线内部孔隙逐步被挤实,涤纶缝线与Cr20Ni80丝的正弦波形逐渐得到伸直。当剪切角持续增大至纱线锁紧状态时,电加热织物表面出现褶皱。在20 W的恒定功率下,3种电加热织物未变形时,30 s内均可升温至86℃以上,升温速率不低于2.88℃/s,面内剪切变形后3种电加热织物30 s内最高平衡温度分别达到87.1、102.0和109.6℃。研究可为高性能电热复合材料的设计与开发提供有效的工艺方案和试验参考。

关键词:电加热织物;定制纤维铺缝工艺;镍铬合金丝;面内剪切性能;电热性能

中图分类号:TB34

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)07-0001-09

Experimental study on in-plane shear properties of nickel-chromium alloy wires placement electrothermal fabrics

Sun Jinxin^{1,2}, Guo Jingxian^{1,2}, Xu Fuhui^{1,2}, Fu Jinpeng³, Cui Yanchao³, Sun Ying^{1,2}, Chen Li^{1,2}

1. Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

3. Tianjin Aviation Electromechanical Co., Ltd., Tianjin 300308, China

Abstract: To develop electrothermal fabrics with both shear resistance and electrothermal performance, three types of electrothermal fabrics with different parallel arrangement densities of nickel-chromium alloy (Cr20Ni80) wires were fabricated based on the tailored fiber placement (TFP) process. Using the universal testing machine, the frame shear tests were performed on electrothermal fabrics, and using digital image correlation and infrared thermography, the in-plane

基金项目:天津市科技计划多元重点项目(22JCZDJC00940)

收稿日期:2025-11-10

作者简介:孙金鑫,男,2002年生,在读硕士研究生,主要研究方向为功能纺织复合材料,15206634360@163.com

通信作者:孙颖,教授,研究方向为高性能编织材料和树脂基纺织复合材料,sunying@tiangong.edu.cn

shear properties and electrothermal performance of the electrothermal fabrics were analyzed. The results showed that after introducing the parallel-arranged Cr20Ni80 wires, the in-plane shear deformation performance of the electrothermal fabrics was significantly improved, with the shear force increasing from 1.45 N for the substrate glass fiber satin fabrics to more than 2.50 N for the electrothermal fabrics, an increase exceeding 72.41%. When the parallel arrangement density of Cr20Ni80 wires was 50 wires/(10 cm), the electrothermal fabric exhibited the optimal shear deformation resistance. During the in-plane shear deformation process of the electrothermal fabrics, the substrate glass fiber satin fabrics gradually transformed from the initial square to a rhombus shape, with yarn gaps compacted, and the sinusoidal waveforms of the aramid stitches and the Cr20Ni80 wires were gradually straightened. When the shear angle continued to increase to the locking state, wrinkles appeared on the surface of the electrothermal fabric. Under a constant power of 20 W, all three types of electrothermal fabrics in the undeformed state were heated to above 86 °C within 30 s, with a heating rate not less than 2.88 °C/s. After in-plane shear deformation, the maximum equilibrium temperatures of the three electrothermal fabrics within 30 s reached 87.1, 102.0 and 109.6 °C, respectively. The study provides effective process schemes and important experimental references for the design and development of high-performance electrothermal composites.

Keywords: electrothermal fabric; tailored fiber placement process; nickel-chromium alloy wire; in-plane shear property; electrothermal performance

飞机在含有过冷水滴的寒冷气候条件下飞行时,机翼前缘和发动机进气道等部位面临较高的结冰风险^[1-2]。电热防/除冰技术高效、可控,已逐渐成为研究的热点^[3-5],其中电热复合材料是满足飞行器轻量化、可设计、易于集成等要求的理想选择^[6-8]。基于定制纤维铺缝(tailored fiber placement, TFP)工艺制备的电加热织物,其通过面线和底线将镍铬合金(Cr20Ni80)丝以精确的排布形式固结到基布的上表面,既可实现单侧绝缘,又能最大限度地保留基布原有的力学性能与结构稳定性^[9-10]。但目前,有关TFP电加热织物在面内剪切变形过程中力学行为与电热性能的耦合机制,仍缺乏深入的研究。这不仅关系到复合材料的成型质量,更直接影响织物在变形状态下的功能可靠性。因此,系统展开电加热织物面内剪切性能的研究,对推动该类材料从单一功能向“功能-结构一体化”发展具有重要意义。

相框剪切试验的核心目的是,模拟并量化增强织物在曲面成型过程中的面内剪切变形行为^[11-13],为曲面铺覆的物理机制研究与工艺设计提供基础依据。Taha等^[14]对不同面密度的黄麻纤维平纹织物进行相框剪切试验,发现:织物的面密度是决定其面

内剪切阻力的关键因素,面密度越高,剪切阻力越大;低密度织物更容易发生剪切变形和纱线锁紧现象。Mei等^[15]对玻纤与丙纶混纺的斜纹织物进行相框剪切试验,发现织物的临界剪切角为40°。当剪切角小于40°时,预拉伸处理会显著增大织物的剪切力;当剪切角超过40°时,织物会发生复杂的面内变形。Ma等^[16]通过相框剪切试验比较了kevlar平纹织物与加入剪切增稠液(STF)的kevlar织物(简称STF/kevlar复合织物),发现STF/kevlar复合织物在承载能力方面优于kevlar平纹织物,且STF的剪切增稠行为在较高加载速率下更为显著,故STF/kevlar复合织物具备更高的剪切变形刚度和剪切能量吸收水平。陈利等^[17]针对预定型干态T700-12K碳纤维平纹织物开展了相框剪切试验,发现:剪切过程中经纬纱的接触面积与纱线间摩擦力呈正相关;轴向内应力对预定型织物的剪切变形具有显著的影响。罗锡林等^[18]对国产F-12芳纶平纹织物进行相框剪切试验,发现当剪切角超过57°时,织物表面会出现明显的褶皱。

本研究将基于TFP工艺,设计并制备3种Cr20Ni80丝并联排列密度的电加热织物,利用万能试

验机及数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术、红外热成像技术,测试并分析电加热织物的面内剪切性能及电热性能,以期为高性能电热复合材料的设计与开发提供有效的工艺方案和试验参考。

1 试验材料及测试方法

1.1 试验材料

电加热织物基布选取面密度为 200 g/m^2 玻纤缎纹织物(中材科技),面线和底线选择 $1.11 \text{ tex} \times 2$ 的芳纶缝线(烟台泰和),电热元件为直径 0.08 mm 的 Cr20Ni80 丝(浙江中一),具体参数见表 1。铺缝机选用 NM-PC-1 碳纤维铺缝机(上工富怡),机针选用 DB×K5 10 号针(德国格罗茨贝特),控制布线转子速度为 350 r/min 、针迹步长为 2.5 mm 。

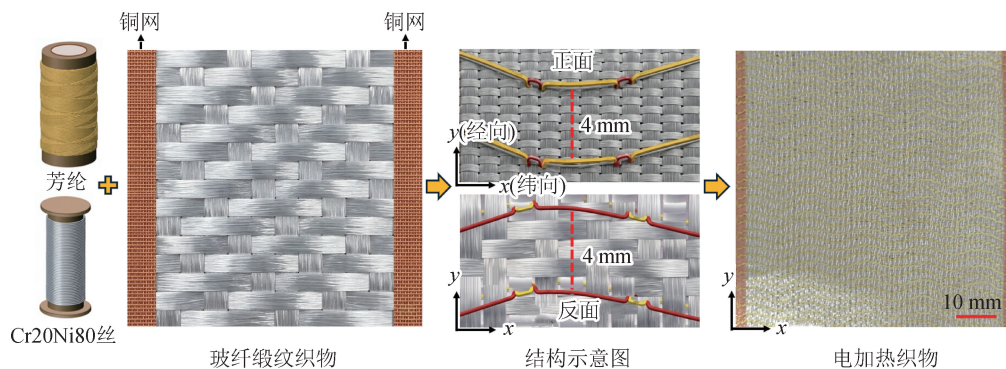


图 1 电加热织物制备示意

Fig. 1 Schematic of electrothermal fabric preparation

TFP 工艺能够精确控制作为电热元件的 Cr20Ni80 丝的铺缝路径和方向,实现材料性能与结构需求的优化匹配^[19]。利用 Wilcom Embroidery Studio 软件设计 Cr20Ni80 丝的铺缝路径为振幅 1 mm 的正弦波。本研究共设计了 3 种 Cr20Ni80 丝

1.2 电加热织物的设计与制备

电加热织物的制备流程:将 2 片 $100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的铜网电极以对称的方式固结在基布两侧,再利用芳纶面线与底线的互锁结构,将 Cr20Ni80 丝以正弦波线迹固结于基布的上表面(图 1),并最终与两侧铜网共同构成连续且均匀分布的并联电热回路。固结 Cr20Ni80 丝的面线的针距会影响电加热织物的表面平整度及力学性能,此外面线张力与布线速度也是决定最终织物结构的关键工艺参数。

并联排列密度——50、26 和 17 根/(10 cm),即沿基布经向, Cr20Ni80 丝的间距分别为 2 、 4 、 6 mm (图 2)。基布及电加热织物试样结构参数见表 2,其中 S0 试样为基布玻纤缎纹织物, E1、E2、E3 试样为制备的电加热织物。

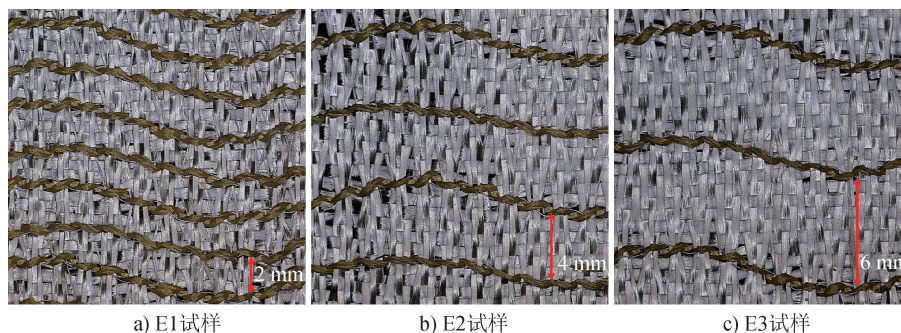


图 2 电加热织物实物照片

Fig. 2 Physical photos of electrothermal fabrics

表 2 基布及电加热织物试样结构参数

Tab. 2 Structural parameters of substrate and electrothermal fabric samples

试样 编号	Cr20Ni80 丝并联排列密度/ [根·(10 cm) ⁻¹]	织物厚度/ mm	织物经向密度/ [根·(10 cm) ⁻¹]	织物纬向密度/ [根·(10 cm) ⁻¹]	织物面密度/ (g·m ⁻²)
S0	0	0.22±0.02	180	140	240
E1	50	0.55±0.02	220	150	416
E2	26	0.43±0.02	190	145	381
E3	17	0.39±0.02	180	130	348

1.3 相框剪切试验

相框剪切试验是表征织物面内剪切行为的常用方法。参照 ASTM D8067/D8067M-17 *Standard test method for in-plane shear properties of sandwich panels using a picture frame fixture* 标准^[20],本研究先就铰接部位摩擦阻力控制、试样夹持稳定及安装等关键问

题,对试验夹具进行了针对性优化,以有效提高试验结果的精度与可靠性^[21]。测试时,试样中部的有效剪切变形区域尺寸为 100 mm×100 mm,如图 3 所示。此外,为确保试样裁切边与夹具保持平行,试样对角线方向应与拉伸加载方向重合。测试采用岛津 AGS-1KN 型试验机,其十字头加载速度为 10 mm/min。

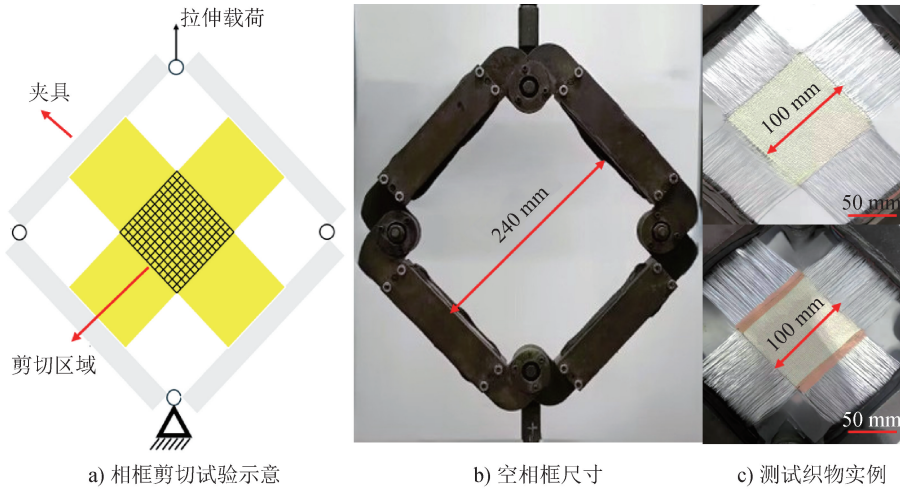


图 3 相框剪切试验

Fig. 3 Frame shear test

织物剪切变形后,相框角(θ ,°)和剪切角(γ ,°)的关系如图 4 所示,可以得到相框角与拉伸位移(d ,mm)之间的关系。此外,织物在相框剪切试验过程中的剪切力(F_s ,N)可由力学传感器测得的相关载荷值 and 对应时刻的相框角来计算。

$$\theta = 2\arccos\left(\frac{\sqrt{2}L_{\text{frame}} + d}{2L_{\text{frame}}}\right) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{\sqrt{2}L_{\text{frame}} + d}{2L_{\text{frame}}}\right) \quad (2)$$

$$F_s = \frac{F_N - F_f}{2\cos\frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

式中: L_{frame} 表示 2 个相邻铰接点之间的距离,mm;

F_N 表示织物剪切后的载荷值,N; F_f 表示装置空载时的摩擦力,N。

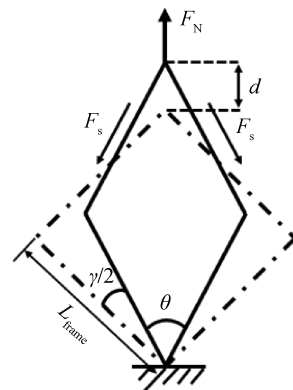


图 4 相框剪切试验中剪切变形示意

Fig. 4 Schematic of shear deformation in frame shear test

2 结果与讨论

2.1 电加热织物面内剪切性能分析

相框剪切试验过程中,基布玻纤缎纹织物和电加热织物均呈现出典型的剪切力学行为,剪切力随剪切角增大先快速上升,达到峰值后逐渐下降,之后小幅回升(图 5)。剪切力峰值普遍出现在 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的剪切角区间。剪切变形过程可分为 3 个阶段: I 阶段(剪切力上升)、II 阶段(剪切力下降)和 III 阶段(剪切力回升)。基布玻纤缎纹织物的剪切力峰值为 1.45 N,并联排布 Cr20Ni80 丝后,电加热织物的剪切力峰值均在 2.50 N 以上,增幅超 72.41%。其中,当 Cr20Ni80 丝的并联排列密度为 50 根/(10 cm) 时,电加热织物的抗剪切能力最强。

面内剪切过程中,基布玻纤缎纹织物因经纬纱浮长线较长、交织点较少而纱线间易发生相对滑移,织物结构稳定性较低。电加热织物在基布玻纤缎纹织物的基础上,引入了并联排布的 Cr20Ni80 丝和芳纶缝线,以及铜网电极,它们共同构建了一种复合增强结构——Cr20Ni80 丝和芳纶缝线通过预设的正弦波线迹与铜网电极、基布牢固结合,使得面内剪切力能够更有效地通过高强度的芳纶缝线和具有一定刚度的 Cr20Ni80 丝进行分散与传递,而不是仅仅依赖基布玻纤缎纹织物中纱线交叉点之间的摩擦力。这种复合构造增强了整体结构抵抗面内剪切变形的能力。芳纶缝线与 Cr20Ni80 丝的协同作用有助于缓解单纯因纱线转动和挤压而导致的剪切刚度急剧上升,从而显著提升了电加热织物的整体抗剪切性能。

E1 试样的抗剪切能力优于 E2、E3 试样,这主要归因于 E1 试样中 Cr20Ni80 丝与芳纶缝线的并联

排列密度更高,从而增强了织物结构的力学约束作用。面内剪切变形过程中,经纬纱线需克服相互间的摩擦力才能发生旋转和滑移。E1 试样中单位面积所含的 Cr20Ni80 丝和芳纶缝线数量最多,这增加了纱线与增强材料之间的接触点数量和接触面积。根据经典摩擦理论,接触面积的增大将直接提升纱线间的整体摩擦力,因此剪切外力需消耗更多的功以克服该阻力,宏观上表现为织物具有更高的剪切刚度和更强的抗剪切变形能力。

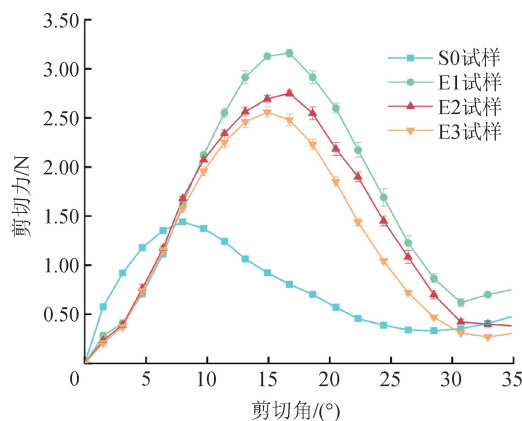


图 5 剪切力-剪切角曲线

Fig. 5 Shear force-shear angle curves

采用 VR-5200 型轮廓仪(日本基恩士)观测 E1 试样相框剪切试验过程中,基布玻纤缎纹织物的细观结构在不同剪切阶段的变化情况(图 6),可以看出:在剪切作用刚开始的 I 阶段,经纬纱在交织点处发生了相对滑移,纱线内部存在明显的孔隙,且纱线夹角仅发生了轻微改变;进入 II 阶段后,经纬纱之间开始相互挤压,纱线内部孔隙逐渐减小,同时经纬纱夹角出现显著变化;到达 III 阶段时,经纬纱进一步相互锁紧,纱线间孔隙基本被完全挤实,经纬纱夹角变化趋于平稳,表明织物已达到锁紧状态,此时织物表面出现了明显的褶皱现象。

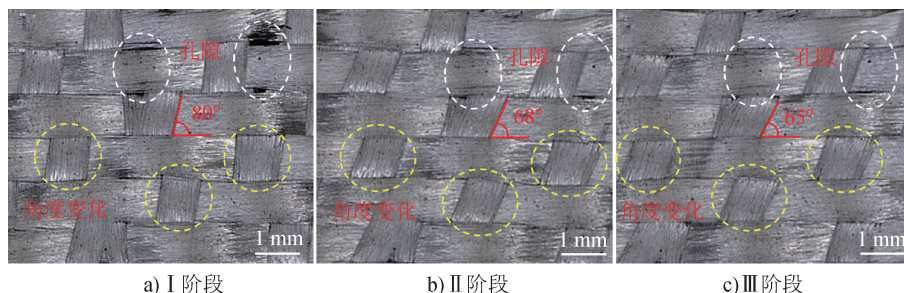


图 6 面内剪切作用下 E1 试样中基布玻纤缎纹织物的细观结构

Fig. 6 Mesoscopic structure of substrate glass fiber satin fabric in specimen E1 under in-plane shear

观察 E1 与 E3 试样在相框剪切试验中的变形行为(图 7),发现:在 I 阶段,高并联排列密度的 Cr20Ni80 丝会增强芳纶缝线与玻纤间的静摩擦力,提升电加热织物抵抗外部载荷的能力,降低剪切角增速;而含低并联排列密度 Cr20Ni80 丝的 E3 试样因静摩擦力较小而更易较早进入显著变形阶段。进入 II 阶段后,高并联排列密度的 Cr20Ni80 丝会限制芳纶缝线转动的自由度,减缓电加热织物从正方形

向菱形转变的进程,降低剪切角增速;低并联排列密度的 Cr20Ni80 丝则有利于芳纶缝线位置的调整,进而提升了电加热织物的变形性。达到 III 阶段时,高并联排列密度的 Cr20Ni80 丝通过增强芳纶缝线与玻纤间的机械互锁作用,使织物在较小的剪切角度下即达到锁紧状态,织物出现褶皱现象;而含低并联排列密度 Cr20Ni80 丝的 E3 试样,锁紧和褶皱稍有延缓。

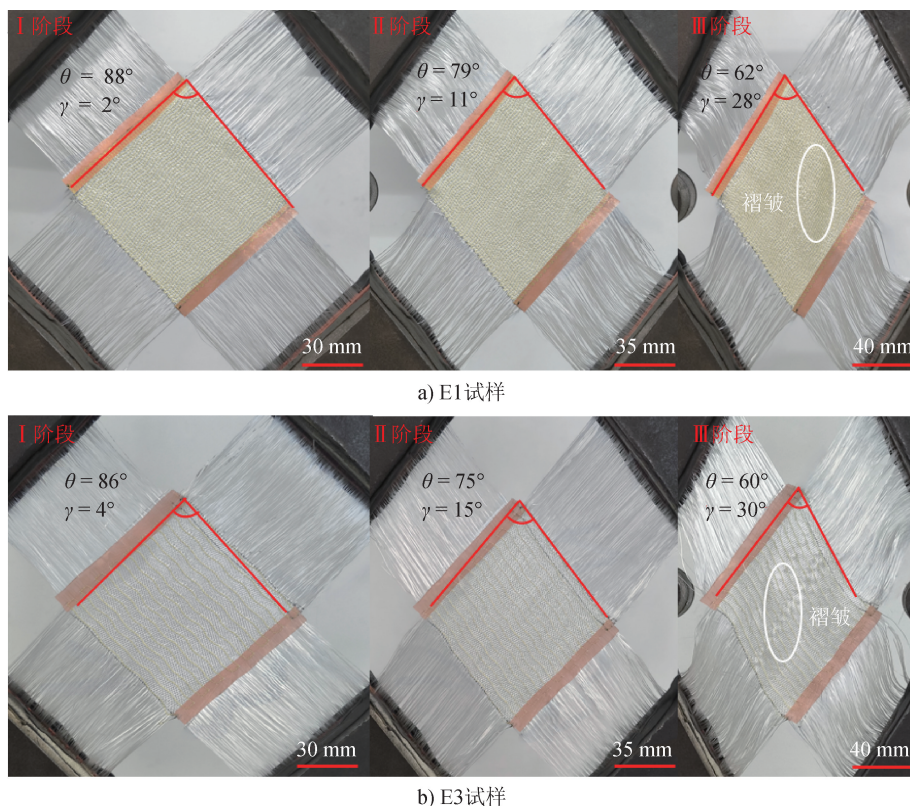


图 7 E1 与 E3 试样在相框剪切试验中的变形行为

Fig.7 Deformation behavior of specimens E1 and E3 in frame shear test

因此,优化 Cr20Ni80 丝的并联排列密度可以有效改善电加热织物的面内剪切性能,从而使其满足曲面复合材料构件铺覆过程对织物变形能力的不同需求。具体而言,E3 试样展现出更优的柔韧性和变形适应性,能在铺覆复杂曲面复合材料构件(如飞机舱门、发动机罩等)时更好地贴合模具,显著减少褶皱和架桥等缺陷^[22];对于曲率变化平缓的大型构件(如机翼蒙皮等),E1 试样更为适宜。

由前述分析可知,E1 试样的抗剪切能力最优。为深入探究其剪切变形机制,采用数字图像相关技术观测 E1 试样中心剪切区域的应变分布(图 8),可以看出: I 阶段,经纬纱接触面积逐渐增大,纤维束

之间相互挤压,芳纶缝线、Cr20Ni80 丝及玻纤间的压缩与摩擦作用增强,电加热织物表面开始发生轻微形变; II 阶段,芳纶缝线、Cr20Ni80 丝及玻纤之间进一步相互挤压并紧密接触,电加热织物被拉紧变形,剪切角增大,应变图像中可见明显集中的绿色应变区域; III 阶段,芳纶缝线、Cr20Ni80 丝及玻纤之间发生显著挤压,应变图像中出现局部红色高应变点,表明电加热织物达到了锁紧角状态,织物发生显著变形并伴随褶皱产生,此时若继续剪切,则应变图像可能将出现散斑缺失等失真现象,表现为电加热织物表面褶皱加剧,并伴随出现内部纤维抽拔、断裂等迹象。

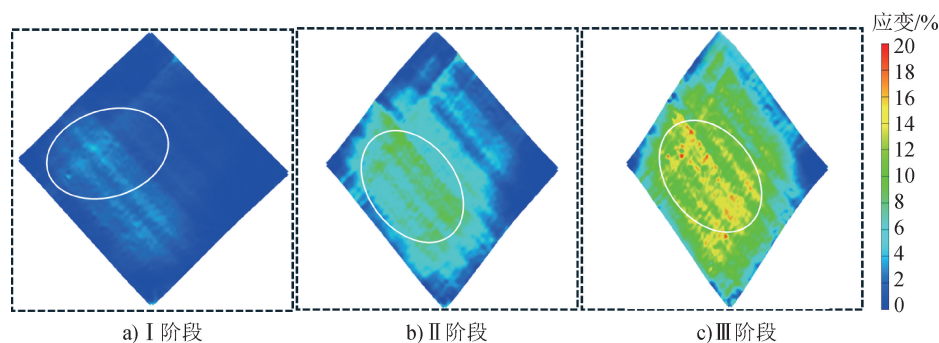


图 8 相框剪切试验中 E1 试样中心剪切区域的应变分布
Fig. 8 Strain distribution in central shear region of specimen E1 in frame shear test

2.2 电加热织物电热性能分析

使用可调式直流稳压稳流电源(汉晟普源)为电加热织物供电,控制功率在 20 W。采用 FOTRIC 热像仪采集试样的表面温度,控制观测距离为 40 cm、采集频率为 2 f/s。

测试发现:在 20 W 的功率条件下通电 30 s,3 种未变形电加热织物的最高平衡温度均上升至 86 ℃ 以上,升温速率不低于 2.88 ℃/s,具有优异的电热性能,具体参数见表 3。随着 Cr20Ni80 丝并联

排列密度的降低,电加热织物 30 s 内最高平衡温度呈现逐渐升高的趋势[图 9a)],这是因为 Cr20Ni80 丝在电加热织物中的并联排列密度降低,单位面积内 Cr20Ni80 丝的数量相应减少,在总输入功率保持不变的条件下,每根 Cr20Ni80 丝需要承担更多的功率负荷,从而导致局部功率密度显著增加。根据焦耳定律,功率密度的上升会直接引起发热体温度的提升,因此电加热织物的最高平衡温度呈现逐渐升高的趋势。

表 3 未变形电加热织物的电热性能

Tab. 3 Electrothermal performance of non-deformed electrothermal fabrics

试样编号	实际电压/V	实际电流/A	电阻/ Ω	30 s 内最高平衡温度/ $^{\circ}\text{C}$	升温速率/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$
E1	3.79	5.30	0.7	86.3	2.88
E2	4.70	4.20	1.1	101.2	3.37
E3	5.79	3.44	1.7	108.9	3.63

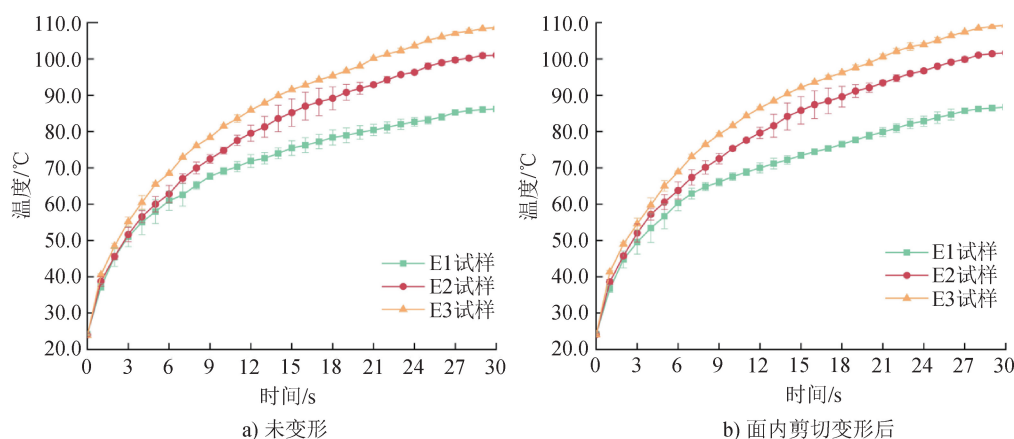


图 9 3 种电加热织物变形前后的温度-时间曲线
Fig. 9 Temperature-time curves of three types of electrothermal fabrics before and after deformation

3 种电加热织物在经历面内剪切变形的 3 个阶段后,电热性能呈现一致的变化趋势,具体见表 4 和

图 9b)。与未变形试样相比,面内剪切变形后,Cr20Ni80 丝从初始的正弦波形逐渐伸直,这一几何

形态的改变不仅有助于分散应力、保护 Cr20Ni80 丝结构完整,还会导致电加热织物温度上升。原因与面内剪切变形后导线长度增加、横截面积减小,进而电阻升高有关。

表 4 面内剪切变形后电加热织物的电热性能

Tab. 4 Electrothermal performance of electrothermal fabrics after in-plane shear deformation

试样编号	实际电压/V	30 s 内最高平衡温度/℃	升温速率/(℃·s ⁻¹)
E1	3.79	87.1	2.90
E2	4.70	102.0	3.40
E3	5.79	109.6	3.65

综上,在相框剪切试验过程中,Cr20Ni80 丝通过长度增加与横截面积减小的双重机制使得其电阻增加,导致电加热织物电热性能提升。面内剪切变形后,3 种电加热织物 30 s 内最高平衡温度分别达到 87.1、102.0 和 109.6℃,升温速率也较未变形时有所提升,表明电加热织物在面内剪切变形后仍保

持优异的电热性能。

3 种电加热织物试样面内剪切变形过程中的电热性能测试结果见图 10,可以看出:E1、E2、E3 试样均呈现出升温现象,最高平衡温度均出现在Ⅲ阶段。随着 Cr20Ni80 丝并联排列密度的降低,电加热织物表面温度呈现上升的趋势,表明电加热织物在面内剪切变形后展现出升温一致性,能够有效维持其表面温度。Cr20Ni80 丝并联排列密度的降低会改变电加热织物内部的热传导路径,热量分布更加集中,散热面积减少,从而有效抑制了热量向环境的耗散。通过 TFP 工艺引入的 Cr20Ni80 丝,能够在电加热织物承受面内剪切变形时,与基布玻纤缎纹织物保持稳固的结合,且未出现短路或线路断裂等现象,有效保障了织物在机械应力作用下的可靠性与耐久性。采用并联电路设计的电加热织物,在受到外部机械应力时会表现出更优的结构适应性与布局稳定性,能够维持持续、高效、稳定的电热性能。这些特性表明 TFP 工艺为制备具有复杂曲面外形的电热复合材料构件提供了有效的工艺路径。

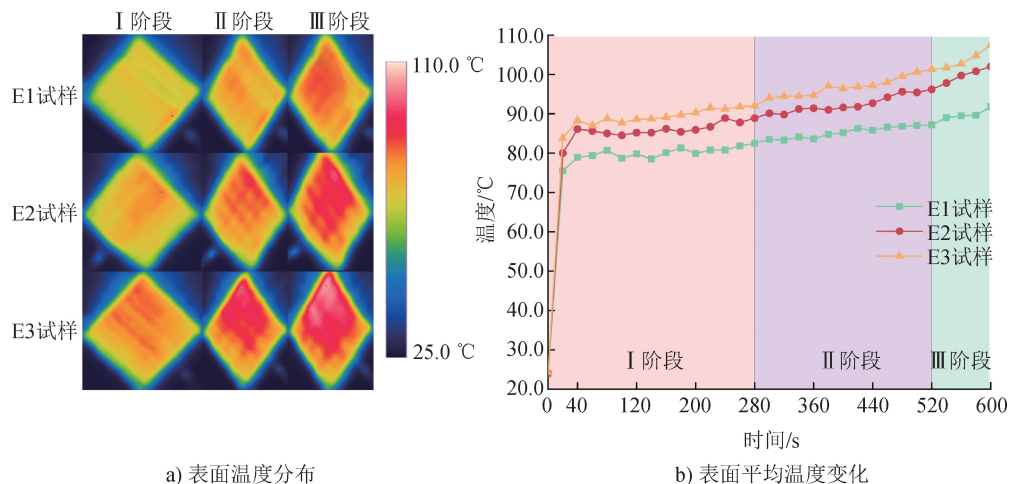


图 10 3 种电加热织物面内剪切变形过程中的电热性能

Fig. 10 Electrothermal performance of three kinds of electrothermal fabrics during in-plane shear deformation

3 结论

本研究通过相框剪切试验与电热性能测试,分析了 3 种镍铬合金丝并联排列密度的电加热织物面内剪切变形机制与电热性能,得出:

(1) 基于基布玻纤缎纹织物和 TFP 工艺制备的镍铬合金丝铺缝电加热织物,其面内剪切性能较基

布玻纤缎纹织物得到显著提升,剪切力由 1.45 N 上升至 2.50 N 以上,增幅超 72.41%。当镍铬合金丝并联排列密度为 50 根/(10 cm) 时,电加热织物抗剪切变形能力最优。

(2) 面内剪切变形过程中,电加热织物的基布玻纤缎纹织物由初始的正方形逐渐转变为菱形,纱线内部孔隙逐步被挤实,芳纶缝线与镍铬合金丝的正弦波形逐渐被拉直。当剪切角持续增大至锁紧状

态时,电加热织物表面出现褶皱。

(3)在 20 W 的恒定功率下,3 种镍铬合金丝并联排列密度的电加热织物,未变形时 30 s 内均能升温至 86 ℃ 以上,升温速率不低于 2.88 ℃/s;面内剪切变形后,30 s 内最高平衡温度分别提升至 87.1、102.0 和 109.6 ℃。电热性能的提升主要源于剪切变形过程中镍铬合金丝由初始的正弦波形逐渐被伸直,进而变长变细,导致其电阻增加,局部功率密度上升,最终表现为表面温度升高。

(4)镍铬合金丝铺缝电加热织物铺覆衬入曲面复合材料构件的过程中,可以发生一定的面内剪切变形以满足铺覆要求,且能在发生面内剪切变形的情况下仍保持电热性能。镍铬合金丝铺缝电加热织物为制备复杂曲面外形的电热复合材料构件提供了有效的工艺方案。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 徐玉貌,吕少杰,曹义华,等.旋翼桨叶结冰对直升机飞行性能的影响[J].航空动力学报,2016,31(2):399-404.
- [2] Cao Y H, Tan W Y, Wu Z L. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 75: 353-385.
- [3] Cui Y C, Chen W J, Dai N, et al. Integrated technologies for anti-deicing functions and structures of aircraft: current status and development trends[J]. Aerospace, 2024, 11(10): 821.
- [4] 王晋,纪双英,益小苏,等.飞行器防/除冰技术研究进展[J].航空制造技术,2015,58(增刊2):30-32.
- [5] Lee J S, Jo H, Choe H S, et al. Electro-thermal heating element with a nickel-plated carbon fabric for the leading edge of a wing-shaped composite application[J]. Composite Structures, 2022, 289: 115510.
- [6] 彭永超,张慧萍,崔建伟,等.浅谈纤维增强复合材料在航空工业中的应用[J].产业用纺织品,2006,24(10):1-5.
- [7] Hong X H, Dai M L, Ke C Y, et al. Graphite oxide/reduced graphite oxide surface modified carbon fiber reinforced composites for deicing and electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34(2): 77.
- [8] 应宇轩,逯晗斗,杨秋明,等.飞机电热防/除冰技术研究进展[J].复合材料学报,2025,43(9):5342-5365.
- [9] 居傲,向卫宏,崔艳超,等.基于定制纤维铺放工艺的电加热织物制备及其半球成型性能[J].纺织学报,2024,45(2):67-76.
- [10] 王守涛,居傲,郭静娴,等.含镍铬合金丝电热层复合材料低速冲击性能试验研究[J].兵工学报,2025,46(8):253-262.
- [11] 邝美玲,姜亚明,刘梁森.纬编双轴向多层衬纱织物半球形成型后的形变研究[J].产业用纺织品,2012,30(6):18-21.
- [12] Boisse P, Colmars J, Hamila N, et al. Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 141: 234-249.
- [13] Shen H, Wang P, Legrand X. In-plane shear characteristics during the forming of tufted carbon woven fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 141: 106196.
- [14] Taha I, Abdin Y, Ebeid S. Comparison of picture frame and bias-extension tests for the characterization of shear behaviour in natural fibre woven fabrics[J]. Fibers and Polymers, 2013, 14(2): 338-344.
- [15] Mei M, He Y J, Yang X J, et al. Meso/macro scale response of the comingled glass polypropylene 2-2 twill woven fabric under shear pre-tension coupling[J]. Composite Structures, 2020, 236: 111854.
- [16] Ma Y, Hong X, Lei Z K, et al. Shear response behavior of STF/kevlar composite fabric in picture frame test[J]. Polymer Testing, 2022, 113: 107652.
- [17] 陈利,张一帆,孙绯,等.预定型平纹织物的剪切模型[J].复合材料学报,2010,27(2):154-160.
- [18] 罗锡林,谭惠丰,武国军,等.国产 F-12 芳纶织物面内剪切性能[J].复合材料学报,2018,35(3):591-598.
- [19] Coppola A M, Huelskamp S R, Tanner C, et al. Application of tailored fiber placement to fabricate automotive composite components with complex geometries[J]. Composite Structures, 2023, 313: 116855.

(下转第 23 页)

- [17] 余晓珊, 邱婷婷, 郑迪力, 等. 抗菌纳米纤维素在 Lyocell/粘胶混纺纱线及织物抗菌整理应用[J]. 纤维素科学与技术, 2023, 31(4): 7-12.
- [18] 李明聪, 陈文静, 孙明楷, 等. 高吸湿抗菌 Lyocell 水刺布的制备及性能[J]. 棉纺织技术, 2025, 53(6): 36-40.
- [19] Bansal M, Chauhan G S, Kaushik A, et al. Extraction and functionalization of bagasse cellulose nanofibres to Schiff-base based antimicrobial membranes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91:887-894.
- [20] Gao C Z, Edgar K J. Efficient synthesis of glycosaminoglycan analogs [J]. Biomacromolecules, 2019, 20(2): 608-617.
- [21] Fadavi F, Abdulkhani A, Hamzeh Y, et al. Photodynamic antimicrobial cellulosic material through covalent linkage of protoporphyrin IX onto Lyocell fibers [J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2019, 39(1): 57-74.
- [22] Nostro P L, Fratoni L, Ridi F, et al. Surface treatments on Tencel fabric: grafting with β -cyclodextrin [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88(3): 706-715.
- [23] Li H L, Wu B, Mu C D, et al. Concomitant degradation in periodate oxidation of carboxymethyl cellulose[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(3): 881-886.
- [24] Yang H, Chen D Z, Ven D V M G T. Preparation and characterization of sterically stabilized nanocrystalline cellulose obtained by periodate oxidation of cellulose fibers[J]. Cellulose, 2015, 22(3): 1743-1752.
- [25] Han S, Lee M. Crosslinking reactions of oxidized cellulose fiber. II. Reactions between dialdehyde cellulose and chito-oligosaccharides on lyocell fabric [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(2): 709-714.
- [26] Han S, Lee M, Kim B K. Crosslinking reactions of oxidized cellulose fiber. I. Reactions between dialdehyde cellulose and multifunctional amines on lyocell fabric[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117(2): 682-690.
- [27] Janjic S, Kostic M, Vucinic V, et al. Biologically active fibers based on chitosan-coated lyocell fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(2): 240-246.
- [28] Zemljic L F, Sauperl O, Kreze T, et al. Characterization of regenerated cellulose fibers antimicrobial functionalized by chitosan [J]. Textile Research Journal, 2013, 83(2): 185-196.
- [29] Sarkar A K, Vora G. Imparting protective properties to Lyocell via finishing treatments[J]. AUTEX Research Journal, 2011, 11(3): 89-92.
- [30] Emam H E, Manian A P, Široká B, et al. Copper inclusion in cellulose using sodium D-gluconate complexes[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(3): 1345-1352.
- [31] Emam H E, El-Bisi M K. Merely Ag nanoparticles using different cellulose fibers as removable reductant [J]. Cellulose, 2014, 21(6): 4219-4230.
- [32] Ibrahim N A, Eid B M, Abdel-Aziz M S. Effect of plasma superficial treatments on antibacterial functionalization and coloration of cellulosic fabrics[J]. Applied Surface Science, 2017, 392: 1126-1133.
- [33] Praskalo-Milanovic J Z, Kostic M M, Dimitrijevic-Brankovic S I, et al. Silver-loaded Lyocell fibers modified by TEMPO-mediated oxidation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117(3): 1772-1779.
- [34] Milanović J, Kostić M, Dimitrijević S, et al. Antibacterial activity of selectively oxidized Lyocell fibers [J]. Contemporary Materials, 2013, 4(1): 39-45.

(上接第 9 页)

- [20] Standard test method for in-plane shear properties of sandwich panels using a picture frame fixture: ASTM D8067/D8067M-17[S].
- [21] 张一帆, 陈利, 孙绯, 等. 预定型机织物剪切变形实验研究[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 29-34.
- [22] 张明卓, 赵宇, 吴国建, 等. RTM 成型头盔外壳纤维增强体铺覆方法研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(11): 9-16.