

# 服装用发热碳纤维串并联模型对 发热效率及均匀性的影响

吴官正, 张玲, 范佳璇, 董维锋, 韩晓果, 肖学良\*

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122)

**摘要:**以碳纤维丝束为发热电阻体构建均匀发热串并联模型片, 模型分为“井”型网格和“ $\infty$ ”型网格。利用扫描电镜对该碳纤维丝束进行形貌表征以探究微观发热体表面的散热特征, 同时系统地研究了碳纤维丝束柔软性、导电发热性能与其长度以及线路设计的关系; 通过调节碳纤维丝束线路结构、线路形状, 得到碳纤维网格模型发热均匀性的建议方案。

**关键词:**碳纤维; 线路设计; 发热面料; 发热均匀性

中图分类号: TB 324 文献标志码: A 文章编号: 2096-1928(2018)04-0294-07

## Study on Heat Efficiency and Uniformity of Heating Carbon Fiber Series Parallel Model

WU Guanzheng, ZHANG Ling, FAN Jiaxuan, DONG Weifeng, HAN Xiaoguo, XIAO Xueliang\*

(Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** This paper introduces two kinds of sheet heater, these are '井' and ' $\infty$ ' shape patterns, for constructing uniform heating net structures with series and parallel models. The heating sheet was composited with the shape patterns covered with two layers of nonwoven fabrics for better heat distribution. The structure and morphology of the carbon fiber composites were characterized by scanning electron microscopy to explore the micro surface heat dissipation. A systematic study was carried out for the relationship of heating performance and length and shape patterns through variation of the conductive filament structure, shape, density, etc. The application of heating carbon fiber in heating clothing was also analyzed. At the same time, the possible thermal problems of carbon fiber heating clothing are discussed.

**Key words:** carbon fiber, circuit design, heating fabric, heating uniformity

传统的保暖服装属于被动式御寒保暖, 利用纤维之间的静止空气阻隔热量散失, 但使用一段时间后该类服装的保暖性能会因空气层的变化而下降, 因而研发人员提出积极主动的发热保暖模式<sup>[1]</sup>。他们认为发热服装对御寒保暖作用更大, 特别适合某些寒冷地区的作业人员(如高海拔地区驻守士兵、登山运动员和极地考察站的工作人员等)。此类发热服装的内部装有小块面积的发热片和移动

式充电宝。目前, 市面上的发热片大多是基于碳纤维的发热丝束组合而成, 在外接 5 V 左右低压电源时, 能够快速为服装提供高效的热量, 升温速度快, 热量大, 可以起到良好的发热御寒功效, 具有很好的应用前景。

碳纤维(CF)因其高比强度、高比模量、低线膨胀系数、低密度、抗腐蚀、耐高温、优异的热及电传导性等功能特点<sup>[2]</sup>, 在飞机制造、国防军工、汽车、

收稿日期: 2018-03-23; 修订日期: 2018-06-01。

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20160157); 江苏省产学研联合创新资金项目(BY2016022-07); 江苏省“博士集聚计划”项目(1066010241170090)。

作者简介: 吴官正(1988—), 男, 硕士研究生。

\* 通信作者: 肖学良(1984—), 男, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为智能纤维材料及其复合结构。

Email: xiao\_xueliang@jiangnan.edu.cn

医疗器械、体育器材等领域有着广泛的应用<sup>[3-5]</sup>。同时,在纺织服装领域,结合碳纤维高比强度、比模量、耐疲劳、导电、发热的优良性能,如何降低碳纤维丝束的模量,使其柔软,同时保证其良好的导电发热性能,是提高碳纤维发热面料应用的关键<sup>[6]</sup>。碳纤维按用途可分为:24K(1K 为 1 000 根单丝)以下的宇航级小丝束碳纤维和 48K 以上的工业级大丝束碳纤维。碳丝束内纤维根数越多,纤维接触面积越大,发热电阻就越小,有利于发热功率的提升,但碳纤维丝束的柔软性会降低<sup>[7]</sup>。碳纤维原材料决定了其本征导电性能,通常单根碳纤维电阻率在  $5 \sim 17 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ,同时碳纤维的热膨胀系数小,导热系数大。碳纤维可以耐急冷急热,即使从  $3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温突然降到室温也不会炸裂<sup>[8]</sup>,比较适合发热纤维的性能要求。

当前较为成熟的碳纤维组合发热模式比较单一,发热面积小,发热均匀性尚待考察。为了改变这一现状,文中以碳纤维作为服装发热层,设计制备不同串并联模式的发热片。通过对碳纤维发热层进行线路设计,研究发热面料的发热效率和发热均匀性。期望得到的发热面料在小于  $10\text{ V}$  低电压下即可加热使用,达到良好的发热效果,促进人体的血液循环,满足极寒地区人员对御寒服装的性能要求。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料 聚丙烯无纺布 ( $25\text{ g/m}^2$ , 蓝色),东莞佳联达无纺布有限公司生产;6K,14K 碳纤维发热丝束,深圳东利电子有限公司生产。

1.1.2 仪器 “4001”型学生电源(供应直流电压范围  $1.5 \sim 9\text{ V}$ ),江苏树兴教学设备有限公司制造;VC890C + 胜利数字万用表,深圳驿生胜利科技有限公司制造;SU1510 扫描电子显微镜,日本日立公司制造;GM320 红外测温仪,深圳标智仪表有限公司制造;FLIR E5 红外热像仪,美国 FLIR 公司制造。

1.2 碳纤维发热模型设计

1.2.1 “ $\infty$ ”字型网格线路模型 取 4 根长  $240\text{ mm}$  的碳纤维制作成“ $\infty$ ”字型线路结构,具体如图 1 所示。图 1 中碳纤维丝束通过平铺的方式,叠加在一起,然后用双面胶固定,制得发热模块作为电路中的外接发热电阻,外接电源提供  $6\text{ V}$  电压。闭合电路开关  $5\text{ s}$  后,采集线路模型中①~③ 3 个点的发热温度<sup>[9]</sup>,记为发热片的温度分布。

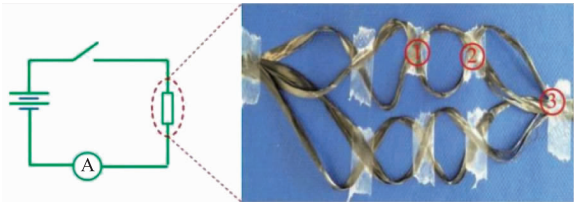


图 1 碳纤维“ $\infty$ ”型发热模型设计  
Fig.1 Design of carbon fibers with '∞' type heating model

1.2.2 “井”字型网格线路模型 分别取 6 根长  $110$  和  $240\text{ mm}$  的碳纤维丝束制作成  $6 \times 6$  网格型线路结构,具体如图 2 所示。图 2 中碳纤维丝束通过平铺的方式,叠加在一起,然后用双面胶固定,制得发热模块作为电路中的外接发热电阻。该发热模型中含有 38 个交叉点(36 加 2 个端点),外接电源同样提供  $6\text{ V}$  电压。闭合电路开关  $5\text{ s}$  后,采集网格型线路中 7 个交汇点①~⑦的发热温度,以探测该网络模型的发热均匀性。

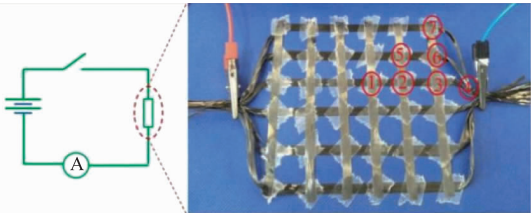


图 2 碳纤维“井”字型发热线路设计  
Fig.2 Design of carbon fibers with '井' type heating line

2 发热材料性能测试

2.1 碳纤维性能测试

2.1.1 弯曲性能测试 弯曲性能决定了碳纤维发热网格材料的柔软度。按 GB/T 1449—2005 纤维增强塑料弯曲性能进行实验,图 3 为碳纤维弯曲性能示意。分别取长  $300\text{ mm}$  的 6K,14K 碳纤维各一根,前端对齐放置在高度  $H = 6\text{ mm}$  的纸板上,以相同的力和速度向前平推两根碳纤维丝束,当向前推进的碳纤维前端着地则停止推进。记录其弯曲段的长度  $S$ ,重复 5 次,取  $S$  的平均值。

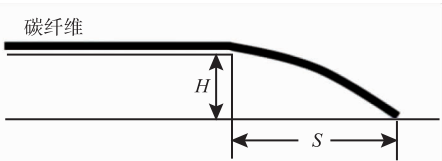


图 3 碳纤维弯曲性能测试示意  
Fig.3 Schematic diagram for testing the flexural properties of carbon fibers

2.1.2 扫描电镜分析 取少量碳纤维样品,在电子显微镜中观察其纤维的表面形貌,测试电压  $5\text{ kV}$ ,电流  $20\text{ }\mu\text{A}$ 。

2.1.3 导电性能测试 分别取长 600 mm 的 6K 和 14K 碳纤维各一束,分别测试其长度为 100,200,300,400,500,600 mm 时的电阻。

2.1.4 碳纤维丝束交叉点导电性能测试 取两根长 50 mm 的 6K 碳纤维,十字交叉,按照发热片模型的方式用双面胶固定,测试单根 50 mm 碳纤维电阻和交叉两根碳纤维的电阻。同理,测试 14K 碳纤维在交叉点处的电阻。

2.1.5 发热性能测试 类似于导电性能测试,分别取长 600 mm 的 6K 和 14K 碳纤维丝束,在丝束两端接上 6 V 电压,分别测试其长度为 100,200,300,400,500,600 mm,通电 10 min 后发热碳纤维丝束中间部位的温度。

2.2 碳纤维丝束发热模型性能测试

2.2.1 导电性能测试 分别对 6K,14K 碳纤维编织的网格模型发热片进行电阻测试,按照 GB/T 32993—2016 用数字万用表测试发热片两个接线端口之间的电阻。

2.2.2 发热性能测试 按照 1.2 方案,采集设定的测试点温度,分别探究“∞”字型 and “井”字型网格模块发热片的温度分布规律及单点温度随时间变化的规律。

3 结果与讨论

3.1 弯曲性能

图 4 为碳纤维丝束弯曲性能的测试结果。图 4 (a) 为碳丝束弯曲测试前,6K 及 14K 碳纤维束以相同的速度向前平推;图 4 (b) 为两类丝束在自身重力作用下开始发生弯曲,而得到的俯视图。通过碳纤维丝束接触底面时平推长度或距离来判断碳纤维丝束的弯曲性能<sup>[10]</sup>。由图 4 可知,14K 碳纤维前端先于 6K 碳纤维前端触碰到桌面,5 次测得 6K 碳纤维和 14K 碳纤维前端平均弯曲长度分别为 12.6 mm 和 11.3 mm。测试结果表明,14K 碳纤维丝束弹性模量低,更容易弯曲,具有更加优异的柔韧性和可加工性。作为制备柔性发热片的基材,14K 碳纤维展现出了更加优异的弯曲性能;而 6K 碳纤维的模量和刚性高于 14K 碳纤维丝束,导致在制备“∞”字型网格模型时不易控制。

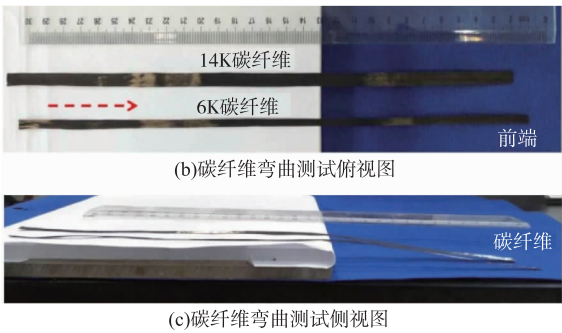


图 4 碳纤维弯曲性能测试俯视图和侧视图

Fig. 4 Front and side view of bending performance test of carbon fibers

3.2 SEM 表征分析

图 5 为 6K 和 14K 碳纤维丝束在 SEM 下表面形貌。由图 5 可知,文中使用的发热碳纤维丝直径在 5 ~ 7  $\mu\text{m}$ ,比羊绒纤维还细,纤维呈圆柱形,表面光洁,排列整齐,纤维之间理论上 是 线 接 触,在 压 力 作 用 下 会 有 面 接 触,从 而 降 低 了 丝 束 的 整 体 导 电 性。在未做喷金处理的情况下,图 5 显示了清晰的碳纤维表面形貌,表明实验使用的发热碳纤维具有优异的导电性能。另外,光洁的纤维表面说明在碳纤维交叉接触时需要有一定的压力,以减少碳纤维丝束间的接触电阻<sup>[11-12]</sup>。

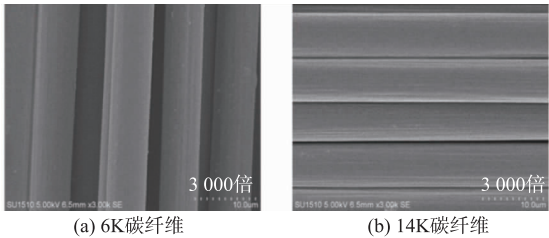
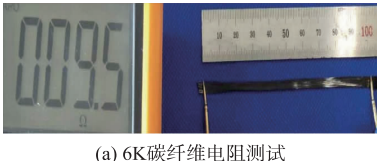
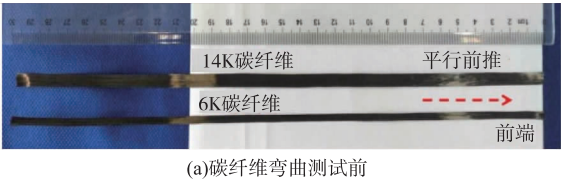


图 5 碳纤维的 SEM 图片

Fig. 5 SEM images of carbon fibers

3.3 导电性能

碳纤维丝束电阻测试如图 6 所示。由图 6 可知,在长 100 mm 的 6K,14K 碳纤维之间测试的体电阻(测试压力控制在 10 N)分别为 9.5,6.5  $\Omega$ ,证明两种碳纤维丝束具有优异的导电性能。由图 6 (c) 可知,6K,14K 碳纤维电阻值均随着长度的增加而增大,基本呈现线性增大的规律,同时测得的单束 14K 碳纤维导电性能优于 6K 碳纤维,说明碳纤维束的导电性能与测试长度和碳纤维含量有关,长度越长,纤维含量越少,则碳纤维束的电阻越大。



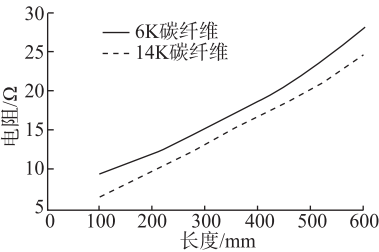
(a)碳纤维弯曲测试前

(a) 6K碳纤维电阻测试





(b) 14K碳纤维电阻测试



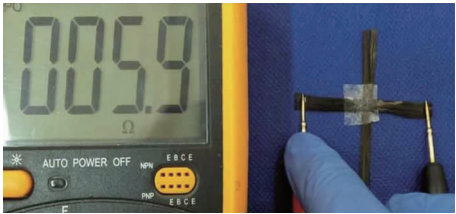
(c) 碳纤维长度与电阻的关系

图 6 碳纤维电阻测试

Fig. 6 Resistance test chart of carbon fibers

3.4 碳纤维交叉点电阻

碳纤维交叉点电阻测试如图 7 所示。两束丝束间利用双面胶粘合,粘合力度一致。图 7(a) 中长 50 mm 的 6K 碳纤维电阻为 5.9 Ω;图 7(b) 中两根长 50 mm 的 6K 碳纤维交叉点的电阻为 51.6 Ω;图 7(c) 中长 50 mm 的 14K 碳纤维电阻为 5.3 Ω;图 7(d) 中两根长 50 mm 的 14K 碳纤维交叉点电阻为 53.2 Ω。测试结果表明,长 50 mm 的 6K 和 14K 碳纤维丝束电阻相差不大,且电阻值较小。两根 6K 碳纤维丝束垂直交叉点电阻略小于 14K 碳纤维垂直交叉点电阻,表明碳纤维丝束内纤维数量与其接触点电阻略有相关性,其相关程度需进一步探索。



(a) 50 mm 6K碳纤维电阻



(b) 50 mm 6K碳纤维交叉点电阻



(c) 50 mm 14K碳纤维电阻



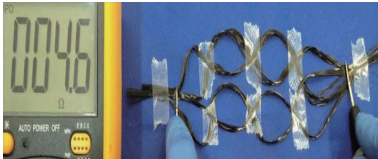
(d) 50 mm 14K碳纤维交叉点电阻

图 7 碳纤维交叉电阻的测试结果

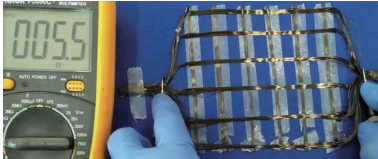
Fig. 7 Cross resistance of test results of carbon fibers

3.5 碳纤维线路电阻

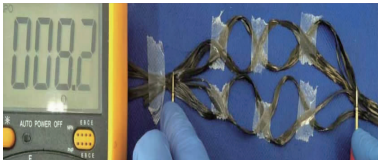
碳纤维丝束发热线路模型的电阻测试如图 8 所示。图 8(a) 和图 8(b) 中 6K 碳纤维“∞”字型网格和“井”字型网格线路模型对应两端的电阻分别为 4.6、5.5 Ω;图 8(c) 和图 8(d) 中 14K 碳纤维丝束相应的模型两端电阻分别为 8.2、8.7 Ω。由图 8 可知,“∞”字型网格和“井”字型网格线路发热模型电路中有多个重复单元格组成,单元格电路之间并联连接,所测得的电阻均小于 10 Ω,导电性能良好。在 6 V 的直流电压下,单位时间内能够释放出较多的热能,满足实际发热的应用需求。实验测得,6K 碳纤维“∞”型网格和“井”字型网格发热模型均比 14K 碳纤维对应的发热模型导电性能优良,验证了 6K 碳纤维交叉电阻小于 14K 碳纤维交叉电阻的测试结果。



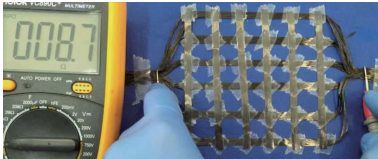
(a) 6K碳纤维“∞”字型线路电阻



(b) 6K碳纤维“井”字型线路电阻



(c) 14K碳纤维“∞”字型线路电阻



(d) 14K碳纤维“井”字型线路电阻

图 8 碳纤维线路模型的电阻测试结果

Fig. 8 Resistance test results of carbon fibers with line model

3.6 发热性能

3.6.1 单根碳纤维发热性能 图 9 为单束 6K, 14K 碳纤维导热性能的测试结果。结合图 6 的测试,随着碳纤维长度的增加,碳纤维的电阻值也逐渐增大。

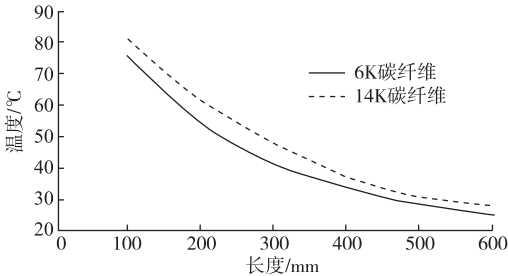
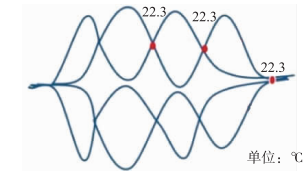


图 9 单根碳纤维丝束发热温度与丝束长度的关系

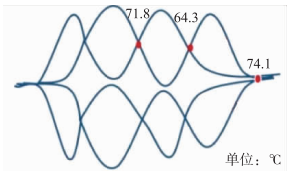
Fig.9 Relationship between the heating temperature of a single carbon fiber tow and the length of the tow

图 9 中,碳纤维丝束在 6 V 直流电压和通电 10 min 的条件下,单根 6K,14K 碳纤维丝束的发热温度随丝束长度增加而逐渐降低,且两根丝束的发热温度差距较小,14K 碳纤维丝束发热量稍大。结合碳纤维导电发热性能,以及实际发热片需求考虑<sup>[13]</sup>,一般选用≤240 mm 长的碳纤维制备发热服中的发热片较为合理。

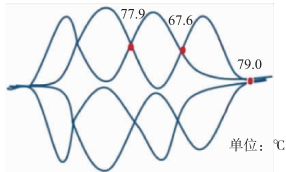
3.6.2 碳纤维线路模型的发热性能 图 10 为 6K 碳纤维“∞”字型网格线路发热性能测试结果。常温下,6V 直流电压使得“∞”字型发热片迅速升温,10 min 内在位置 3 个交叉点①,②,③温度分别达到 71.8,64.3,74.1℃,1 h 后 3 点温度仍维持在 77.9,67.6,79.0℃。图 10(d) 显示①,③两点在 6 V 电压下迅速升温至 70℃以上。在接通电源的情况下,一直稳定在 70℃以上高温;断电后,①和③点迅速降至常温,表明碳纤维丝束在通电情况下依靠释放红外线维持高温,但不具备保温性能。



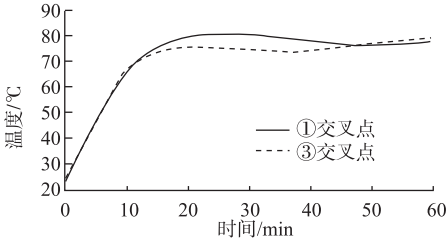
(a) 6K 碳纤维“∞”字型初始温度



(b) 6K 碳纤维“∞”字型 10 min 各交叉点温度



(c) 6K 碳纤维“∞”字型 60 min 各交叉点温度

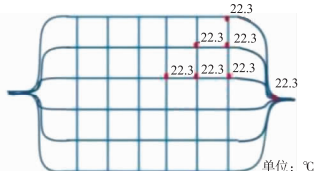


(d) 6K 碳纤维“∞”字型交叉点温度与时间的关系

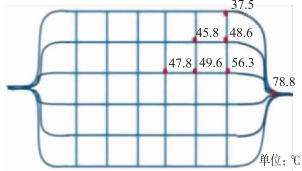
图 10 6K 碳纤维“∞”字型线路设计发热性能

Fig.10 Heating performance test chart of 6K carbon fibers with '∞' type line design

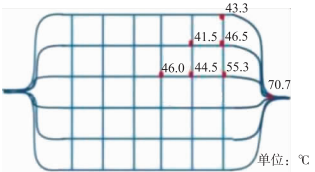
图 11 为 6K 碳纤维“井”字状网格模型的发热性能测试结果。



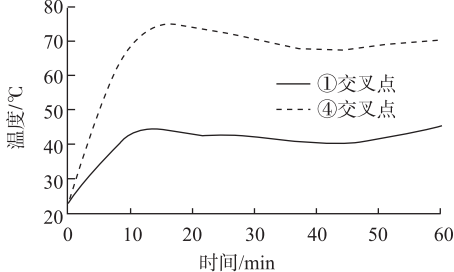
(a) 6K 碳纤维“井”字型初始温度



(b) 6K 碳纤维“井”字型 10 min 各交叉点温度



(c) 6K 碳纤维“井”字型 60 min 各交叉点温度



(d) 6K 碳纤维“井”字型交叉点温度与时间的关系

图 11 6K 碳纤维“井”字型线路设计发热性能

Fig.11 Heating performance test chart of 6K carbon fibers with '井' type line design

常温下,网格型发热片亦迅速升温,10 min 内 7 个交叉点①~⑦温度分别达到 47.8,49.6,56.3,78.8,45.8,48.6 和 37.5℃,1 h 后 7 个点温度仍维

持在 46.0,44.5,55.3,70.7,41.5,46.5 和 43.3 ℃。图 11 (d) 显示①和④两点在 6 V 电压下迅速升温,在接通电源的情况下,一直在开始测得的温度上下波动,断电后①和④点迅速降至常温。

图 12 为 14K 碳纤维丝束“∞”字型线路模型的发热性能测试结果。常温下,“∞”字型发热片迅速升温,10 min 内 3 个交叉点①~③温度分别达到 52.5,62.8,85.5 ℃,1 h 后 3 个点温度仍维持在 51.6,63.6,82.5 ℃。图 12 (d) 显示①、③两点在 6 V 电压下迅速升温至 50 ℃ 以上,在接通电源的情况下,一直稳定在 50 ℃ 以上高温,断电后①、③点迅速降至常温。

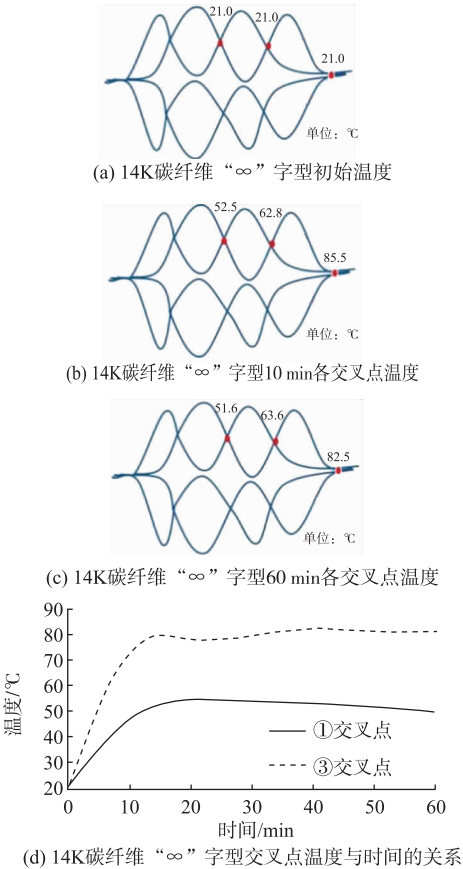


图 12 14K 碳纤维“∞”字型线路设计发热性能测试  
Fig. 12 Heating performance test chart of 14K carbon fibers with '∞' type line design

图 13 为 14K 碳纤维“井”字状网格模型的发热性能测试结果。常温下,网格型发热片迅速升温,10 min 内 7 个交叉点①~⑦温度分别达到 42.5,44.7,50.6,67.7,42.6,49.8 和 38.2 ℃,1 h 后 7 个点温度仍维持在 47.1,45.4,49.5,73.9,46.3,50.1 和 46.9 ℃。图 13 (d) 显示①、④两点在 6 V 电压下迅速升温,在接通电源的情况下,一直在 10 min 时所对应的温度上下波动,断电后①、④点迅速降至常温。

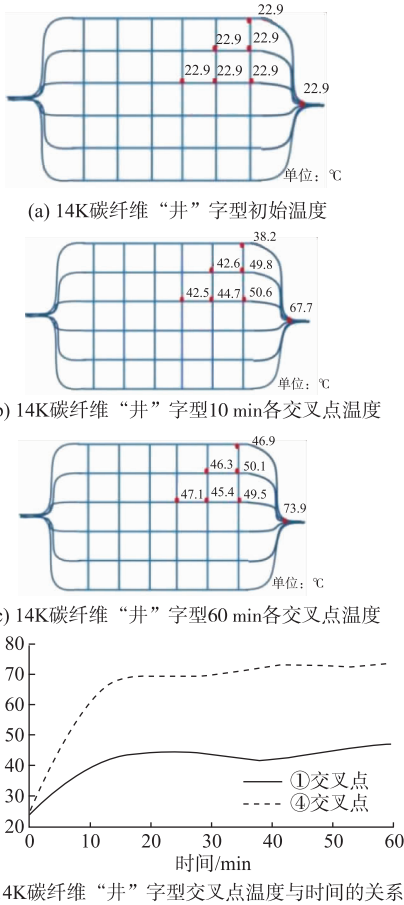


图 13 14K 碳纤维“井”字型线路设计发热性能测试  
Fig. 13 Heating performance test chart of 14K carbon fibers with '井' type line design

3.6.3 交叉点双面胶对碳纤维散热性能的影响

图 14 为交叉点双面胶影响碳纤维散热性能的对比情况。取 3 根长 80 mm 及 3 根长 60 mm 的碳纤维丝束编织成 3 × 3 网格型线路结构模型 (见图 14 (a))。制作发热片作为电路中的外接发热电阻,各交叉点均不用双面胶固定,用红外热成像仪拍得红外热成像图 (见图 14(c)),其温度范围为 25.4 ~ 82.2 ℃。将 3 × 3 网格型线路结构各交叉点用双面胶固定,得到网格型结构模型 (见图 14(b)),拍得红外热成像图 (见图 14(d)),其温度范围为 25.6 ~ 76.5 ℃。对比图 14(c) 和图 14(d) 可以看出,交叉点未粘合双面胶模型能够达到的最高温度更高,二者最高温度相差不大;但是粘合双面胶的模型,碳纤维发热丝相对而言整体发热更加均匀。由此可知,双面胶对发热碳纤维散热有一定影响,但是双面胶使得结构更加稳固,碳纤维整体发热相对而言更加均匀。

综上所述,碳纤维具有优异的发热性能,在 6 V 直流工作电压下升温迅速,且能保持相对稳定的高温状态,通过热辐射等方式向周围传递热量,断电



后降温迅速。通过比较图 10 ~ 图 13 发现,14K 碳纤维丝束“ $\infty$ ”字型线路设计和“井”字型网格型线路模型中,各点达到的温度总体上较 6K 碳纤维“ $\infty$ ”字型线路设计和“井”字型网格型线路对应点的温度高;“ $\infty$ ”字型线路设计温度分布比“井”字型网格模型更均匀,并且“井”字型网格发热片中间区域温度低、两侧温度高,存在明显的温度梯度。

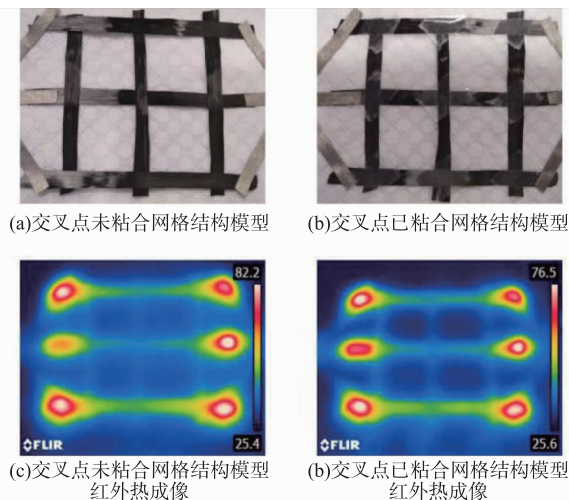


图 14 交叉点双面胶影响碳纤维散热性能的对比

Fig. 14 Comparison of cross point double-sided adhesives affecting heat dissipation performance of carbon fibers

## 4 结 语

碳纤维丝束具有优异的导电导热性能。随着单束碳纤维长度增加,其电阻呈线性增加;在两端工作电压不变时,能够达到发热温度随着长度增加而降低的效果。

文中对 6K 及 14K 碳纤维束的柔软性能进行了测试,结果发现 14K 碳纤维丝束相对柔软。在长度超过 300 mm 和 6 V 工作电压的情况下,测得单束碳纤维几乎没有发热效果。“ $\infty$ ”字型和“井”字型网格模型将每个小单元格并在一起,形成发热串并联电路。这种线路设计的发热片,总电阻值不超过 10  $\Omega$ ,可满足 6 V 低电压下的应用要求。6K 碳纤维束交叉点电阻低于 14K 碳纤维。其构成的“ $\infty$ ”字型和“井”字型网格模型电阻均较 14K 碳纤维对应的值小,导电性能和发热性能也更加优异。另外,在 6 V 直流电压下,6K、14K 碳纤维束制成的“ $\infty$ ”字型和“井”字型网格模型发热片均有良好的发热效果,在通电情况下网格能够维持恒定的温度范围,满足市场对发热片的应用要求。

## 参考文献:

- [1] CEHN Xiangtan. The heating plate of carbon fiber; 201878349U[P]. 2011-06-22.
- [2] ZHANG Xinyuan, HE Bexia, LI Jianli, et al. Property and application of high-performance carbon fiber[J]. Cotton Textile Technology, 2011, 39(4): 72.
- [3] SUNG D H, KIM M, PARK Y B. Prediction of thermal conductivities of carbon-containing fiber-reinforced and multiscale hybrid composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 133: 232-239.
- [4] ARAKELYAN S, LEE H, HAN D S, et al. Fibers composite material microwave heating visualization for carbon fibers composite material: development of tunable microstrip structures[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017: 1-6.
- [5] YUAN Jianmin, FENG Yanrong, WU Zhenjun, et al. A carbon fiber network/polypropylene composite with a low thermal expansion coefficient and high stiffness[J]. Carbon, 2017, 124:727.
- [6] SHEN Dianyu, YU Jinhong, JIANG Nan, et al. Preparation and thermal conductivity of CF @ G/epoxy composites[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7): 98-102.
- [7] YANG Bin, WANG Xinling, LIU Yuan, et al. The intermediate phase asphalt raw material and preparation method of high modulus high heat conduction carbon fiber;104151532A[P]. 2014-11-19.
- [8] LI Xiaoping, ZAHNG Xiaoping, WANG Hongwei. Progress in development and application of carbon fiber[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2005, 30(5): 24-30.
- [9] KANG Jianmin. The heating mesh of carbon fiber; 201274584U[P]. 2009-07-15.
- [10] HANG Chuanwei, LI Guoming, LI Chunhui. The flexible testing device of carbon fiber; 203519431U[P]. 2014-04-02.
- [11] YI Zengbo, FENG Libang, HAO Xiangzhong, et al. Effect of surface treatment on properties of carbon fiber and reinforced composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(1): 67-74.
- [12] LIU Baoying, WANG Xiaojun, YANG Jie, et al. Research progress of surface modification of carbon fiber[J]. Chemical Research, 2015, 8(2): 111-120.
- [13] WANG Lijuan, DANG Xiaobo, ZHANG Guanyu. Study on eleven roller drying densification electric heating device for carbon fiber precursor[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(3): 50-53.

(责任编辑:邢宝妹)