

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017090180805

石墨烯电加热服装的服用性能研究

崔志英^{1,2} 杨诗慧² 张妍² 曾艺佳² 王朝晖²

(1. 东华大学 海派时尚设计及价值创造协同创新中心, 上海 200051; 2. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051)

摘要: 石墨烯纤维在力学、电学、热学方面的优异性能,使其在导电纤维、电加热服装等方面有着广阔的发展前景。研究了石墨烯电加热服装的电热性能和热舒适性能,对石墨烯发热织物的热稳定性、功率密度、升温速度、发热均匀度等电热性能进行了测试,并利用暖体假人测试了服装的保暖性能。通过与碳纤维发热织物比较得出:石墨烯发热织物具有良好的热稳定性,且功率密度高、升温速度快、发热均匀性好。环境温度为5℃和-5℃时,石墨烯电加热服装的加热效率显著大于碳纤维加热服装,发热保暖效果优异;在低温-5℃环境下,石墨烯电加热组合服装仍能满足人体热舒适性的需求。

关键词: 石墨烯; 电加热服装; 电热性能; 热舒适性

中图分类号: TS 941.77

文献标志码: A

Evaluation on performance of electrically heated graphene garment

CUI Zhiying^{1,2}, YANG Shihui², ZHANG Yan¹, ZENG Yijia¹, WANG Zhaohui^{1,2}

(1. Shanghai Style Fashion Design & Value Creation Collaborative Innovation Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Fashion and Art Design Institute, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Graphene fiber has great prospect in many fields such as conductive fiber, electrically heated clothing, etc., for its outstanding properties in mechanics, electricity and thermal property. In this paper, electro-thermal properties and thermal comfort of electrically heated graphene garment were studied. Electric-thermal properties of heated graphene fabric such as thermal stability, power density, rate of temperature increase and heating uniformity were tested. In addition, thermal insulation of garments was tested by a thermal manikin. Results show that heated graphene fabric has excellent thermal stability, high power density, high rate of temperature increase, and good heating uniformity compared with heated carbon fiber fabric. Heating efficiency of graphene garment is much higher than that of carbon fiber garment when temperature was set at -5℃ and 5℃, indicates that electrically heated graphene garment has excellent heating effects and thermal insulation. The graphene clothing ensemble can still meet the requirement of human thermal comfort when the temperature is at -5℃. Therefore, this paper provides some scientific guidance for people to choose heated clothing reasonably.

Keywords: graphene; electrically heated garment; electric-thermal property; thermal comfort

随着社会的发展及消费者对服装多样化的需求,防寒服装在满足保暖性的同时更加注重轻便、舒适等性能。现代电子技术、传感技术、材料科学的发

展为智能轻便防寒服的发展提供了技术支持^[1-2],如电加热服装通过外加产热装置,对人体主动加热起到保暖的效果^[3-4],较好地满足了低温作业人员的需求。

近年来国内外学者对电加热织物及服装进行了研究,陈莉^[5]、LIU等^[6]研制了银丝和镀银纤维作为导电纤维的纬编针织物和机织物,对其电热性能进行了测试与评价。许静娴等^[7]研发了镀银纱线电热针织物,探讨了不同组织结构对织物电热性能的影响。SONG等^[8]比较了碳纤维电加热服装和

收稿日期: 2017-09-20

基金项目: 上海市浦江人才计划(16PJC002); 上海市设计学IV类高峰学科资助项目(DD18005)

第一作者简介: 崔志英,副教授,博士,主要研究方向为服装功能与舒适性。通信作者: 王朝晖, E-mail: wz_hsh2007@dhu.edu.cn。

化学加热服装的舒适性能,得到电加热服装的热阻、加热效率等均优于化学加热服装。PAR等^[9]探讨了寒冷环境下,碳纤维发热元件离开人体皮肤的距离与多层服装系统总热阻的关系。以上研究主要对金属纤维或碳纤维电加热织物及服装进行了研究,而新型纳米材料石墨烯相关的电加热服装鲜有报道。

石墨烯纤维因其高导电、高导热、较高的强度和良好的柔性而得到广泛关注^[10],可用于散热材料、导电织物、储能材料等,适用于制备柔性电子织物^[11]。目前,石墨烯在纺织品及功能服装领域的应用成为研究的热点。本文选用石墨烯电加热服装,对其电热性能和寒冷环境下的热舒适性能进行研究,通过与碳纤维电加热服装的比较,分析石墨烯电加热服装的特点,为人们合理选择电加热服装提供参考,同时为设计户外防寒服提供科学指导。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验选用的石墨烯发热织物规格为14 cm × 14 cm × 1.01 cm(长 × 宽 × 厚),质量21.76 g,织物经纬纱间隔排列石墨烯导电纤维和玻璃纤维,经纱采用涤纶,并在经纬纱间隔编织高分子铜箔作为电极,连接5 V 直流稳压电源。图1为加热织物示意图。

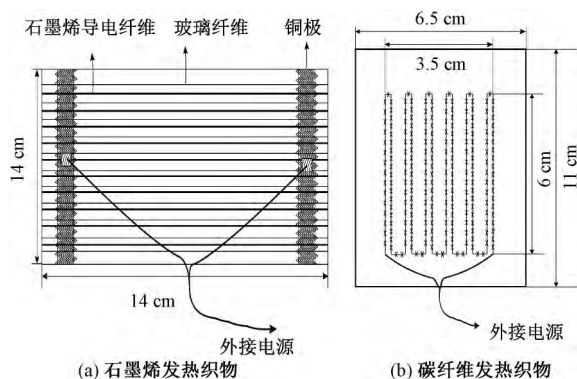


图1 加热织物示意图

选用碳纤维发热织物作为对照织物,织物规格为6 cm × 11 cm × 2.2 cm(长 × 宽 × 厚),3片质量为21.97 g。碳纤维发热织物是将碳纤维嵌入2层涤纶毡之间固定,两端作为电极,连接5 V 直流稳压电源。

1.2 热稳定性测试

热稳定性指电热元件表面温度一定的情况下,其电阻的稳定性,用电阻变化率来表征,电阻变化率越小,加热元件的热稳定性越好。实验采用UT300 A 红外测温仪测试织物表面温度,VC890C + 数字万用表测量电阻。发热织物电阻率的计算公

式为:

$$\lambda = \frac{R_0 - R_r}{R_r} \times 100\%$$

式中: λ 为电阻变化率,%; R_0 为电热元件的初始电阻, Ω ; R_r 为电热元件加热后的电阻, Ω 。

1.3 升温速度

升温速度是指输入一定电压下,发热织物表面温度随时间的变化情况。测试时将发热织物置于隔热装置中,输入5 V 稳压电压,采用MikroScan 7600PRO 红外热像仪测试织物几何中心的核心温度(间隔10 s),测试时仪器距离织物中心的垂直距离为80 cm。

1.4 发热均匀度

织物表面发热均匀性是指发热织物发热温度的一致性,即织物表面瞬时温度的分布情况。根据GB/T 7287—2008《红外辐射加热器试验方法》,对织物表面9个部位的温度进行测试,采用MikroScan 7600PRO 红外热像仪测试织物表面温度,利用MikroSpec 4.0 软件对红外热像图像进行分析,计算温度分布系数(即温度分布不均匀度)。温度分布系数值越小,说明发热织物表面温度分布越均匀。温度分布系数计算公式如下:

$$a = \frac{1}{T_z} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_z)^2}$$

式中: T_z 为发热织物几何中心处的温度值,K; T_i 为发热织物第*i*点的温度值,K; n 为除发热织物几何中心处测温点外的测温点数目; a 为温度分布系数。

1.5 热舒适性能

利用暖体假人,将实验舱的环境温度分别设置为5、-5℃,相对湿度为50%,风速为0.4 m/s,采用恒皮温模式(即假人表面温度设定为33℃)控制暖体假人,测试服装的加热功率和加热效率。实验时电脑软件实时记录假人各区段的皮肤温度和功率,计算出服装加热效率,计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100\%$$

式中: P_0 为无加热元件时消耗的功率,W/m²; P_1 为有加热元件时消耗的功率,W/m²; ε 为加热元件的加热效率,%。

实验用服装参数如表1所示,其着装方式为:上装为内衣+衬衣+马甲+夹克,下装为内衣+长裤,服装总质量为1930 g。将质量、有效发热面积相近的发热织物(石墨烯发热织物196 cm²、碳纤维发热织物198 cm²)分别放置于马甲的背部。图2为电加热马甲示意图。利用暖体假人测试未加热及加热状态下服装的保暖性能。

表1 实验用服装参数

服装	成分	质量/g
内衣	棉	340
衬衣	棉	280
马甲	面里料: 聚酯纤维; 填充物: 腈纶	250
夹克	面里料: 聚酯纤维; 填充物: 白鸭绒 70 g	660
长裤	棉	400



图2 电加热马甲示意图

2 实验结果与讨论

2.1 热稳定性能

在环境温度 20 °C 条件下,石墨烯发热织物的电阻为 5.0 Ω,碳纤维发热织物 3 片并联的电阻为 10.0 Ω。织物的电阻变化率与电加热温度关系的曲线如图 3 所示。由图可知: 2 种加热织物随着表面温度的升高电阻均逐渐变小,电阻变化率增大。温度上升至 31 °C 时,石墨烯发热织物和碳纤维发热织物的电阻分别为 4.93、9.78 Ω,电阻变化率为 1.4%、2.2%;当温度上升至 45 °C 时,石墨烯发热织物的电阻变化率为 9.0%,碳纤维发热织物的电阻变化率为 11.2%。温度继续上升,2 种织物电阻趋于稳定,热稳定性都较好,在相同的工作温度下,石墨烯加热织物的电阻变化率小于碳纤维加热织物。

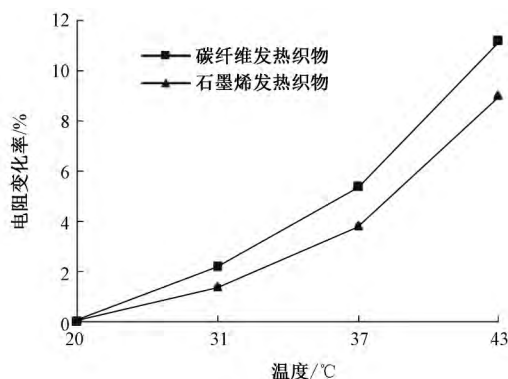


图3 织物电阻变化率与温度关系的曲线

2.2 升温速度

试样在通电状态下织物表面几何中心温度上升曲线如图 4 所示。从图可知,随着时间的延长,加热织物表面的温度均呈现上升趋势。通电初期,织物

的温度迅速上升,通电一段时间后,上升逐渐趋缓直至稳定。这是因为通电初期织物的产热量大于散热量,随着织物温度的上升,织物与外界环境的温差增大,散热量逐渐增大,直至等于产热量,最后织物表面温度趋于稳定。

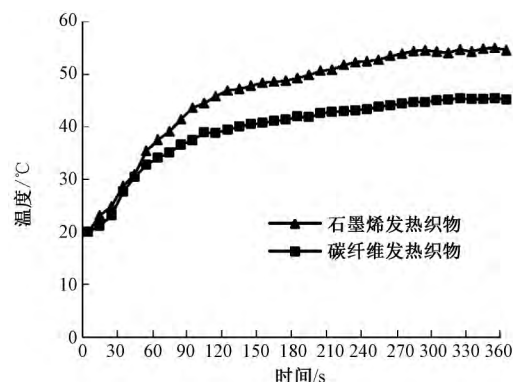


图4 电加热织物升温曲线

在输入稳压电源 5 V 下,石墨烯发热织物温度升至 35 °C 需要 50 s,而碳纤维发热织物需要 70 s,这是由于石墨烯发热织物电阻较小,因此通电初期温度升高的速度较快。织物表面温度继续上升至 45 °C,石墨烯发热织物的升温速度仍保持原来的趋势,所需时间为 110 s;而碳纤维发热织物升温速度则趋缓,所需时间为 300 s。经过 360 s 电加热后,石墨烯发热织物温度升至 54.6 °C,而碳纤维发热织物温度基本不变,为 45.2 °C,二者温度相差 9.4 °C,差异较大。对 2 种织物的瞬时核心温度进行单因素方差检验,统计结果显示: 2 种织物的升温速度存在显著差异 ($P < 0.05$)。因此,在输入相同的电压下,石墨烯加热织物的瞬时温度较高、热惯性小、热响应时间短,升温速度较碳纤维织物快。

2.3 织物发热均匀性

织物表面温度分布系数的实验结果如图 5 所示。由图可知,石墨烯发热织物的温度分布系数介于 0.004 ~ 0.008 之间较稳定,碳纤维发热织物的温度分布系数范围较大,为 0.001 ~ 0.017。当织物几何中心的温度低于 311 K (38 °C) 时,碳纤维发热织物温度分布系数均低于石墨烯发热织物,均匀性较好。随着温度的升高,碳纤维织物的温度分布系数逐渐增大,温度为 318 K (45 °C) 时,石墨烯和碳纤维发热织物的温度分布系数分别为 0.007、0.015,石墨烯发热织物呈现更优的发热均匀性。这是因为在升温初期,石墨烯纤维热响应时间短,升温快,故高温与低温呈现明显差异,随着温度的升高,温度差异逐渐减小,分布系数呈现在小范围内波动的情况。而碳纤维热响应时间长,升温慢,在低温的情况下表现出良好的均匀性,随着温度的升高,织物表面温度

分布不均匀性更明显,分布系数逐渐增大。

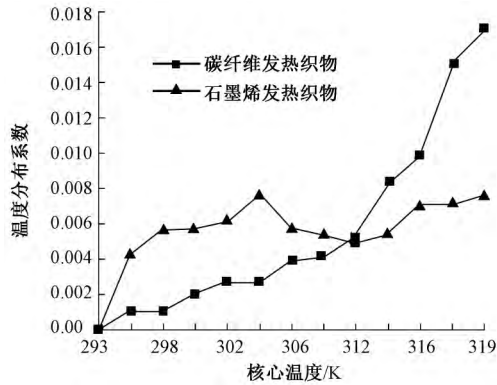


图5 织物表面温度分布系数

对红外热像图进行定量分析,提取发热织物中心温度为45℃时的图像,各温度分布比例如图6所示。由图可知,石墨烯发热织物温度主要集中于39.5~46.4℃之间,所占比例为62.3%;其次为36.0~39.4℃之间,为9.5%。而碳纤维发热织物温度在43.0~46.4℃之间的比例最大,为33.5%;其次为低温区域22.0~25.4℃,为17.9%;其余各低温区域和高温区域的占比接近,温度分布分散,均匀性较差;而石墨烯发热织物两端高温和低温区域面积占比较低,中间温度区域占比大,进一步说明石墨烯发热织物温度集中分布,均匀性较好。

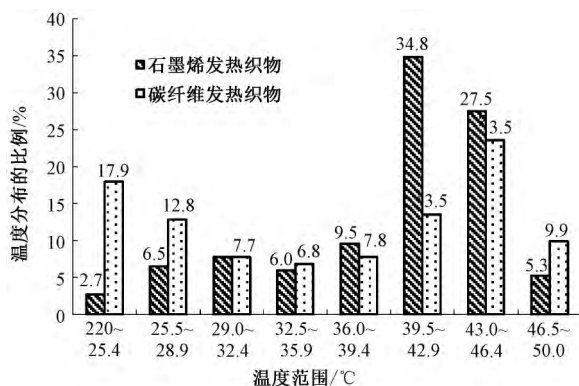


图6 几何中心温度为45℃时的温度分布比例图

2.4 热舒适性能

穿着电加热组合服装的暖体假人加热效率如表2所示。在环境温度5℃下,未进行通电加热,暖体假人的热量消耗(P)为113.62 W/m²,穿着碳纤维加热服装时,暖体假人热量消耗减少至97.20 W/m²,加热效率(ε)为14.5%;穿着石墨烯电加热服装,暖体假人热量消耗减少至83.57 W/m²,加热效率为26.4%。根据GB/T 24254—2009《纺织品和服装冷环境下需求热阻的测定》,人体步行或轻度作业时新陈代谢生热量约为100 W/m²,故在环境温度5℃条件下,石墨烯及碳纤维加热组合服装都能满

足人体热舒适状态的要求。

表2 不同环境温度下电加热服装的加热效率

加热纤维	环境温度5℃		环境温度-5℃	
	$P/(W \cdot m^{-2})$	$\varepsilon/\%$	$P/(W \cdot m^{-2})$	$\varepsilon/\%$
未加热	113.62	-	169.70	-
碳纤维	97.20	14.5	154.48	9.0
石墨烯	83.57	26.4	131.11	22.7

在环境温度为-5℃时,穿着碳纤维、石墨烯发热组合服装,暖体假人的热量消耗比环境温度5℃时多,分别为154.48、131.11 W/m²,同时加热效率也减小,分别为9.0%和22.7%。这是由于人体与环境的温差增大,热量越容易散失,导致功率损耗增大、加热效率降低。不同环境温度下,石墨烯发热织物的加热效率均明显大于碳纤维发热织物的加热效率。-5℃的环境条件下,人体中等强度的手工作业新陈代谢产热约为140 W/m²,而穿着碳纤维电加热服装人体达到舒适状态时需要消耗154.48 W/m²,说明在-5℃环境条件下,穿着碳纤维电加热组合服装从事中低等强度的作业时,其保暖性不能满足。对不同环境温度下消耗的功率进行LSD检验,得到 P 值均小于0.05,表明未加热、碳纤维及石墨烯组合服装的加热效率差异显著。因此,在服装中置入辅助加热装置可以显著增加服装的保暖性,且置入石墨烯织物的加热效果更佳。低温环境-5℃下,石墨烯电加热组合服装的保暖性更优异,中等强度手工作业时仍能满足人体达到热舒适状态的需求。

暖体假人各部位消耗的功率如图7所示。在环境温度为5℃和-5℃下,头部均为热量损失最多的区域,其次为左右小腿。穿着碳纤维或石墨烯发热组合服装,各部位的能量损耗均减少,加热效果明显。环境温度5℃时,胸背部位加热效率最高为50.22%,其次是臀腹部位34.67%、其他部位的热量损耗也均减少。因此,在躯干部分进行电加热不仅可以减少加热区域的热损,也可以减少其他部位的热量损失,且越接近热源的部位热量损耗减少得越多。

3 结论

本文对石墨烯电加热服装的电热性能和热舒适性性能进行了研究,实验结果表明:

①石墨烯发热织物具有良好的热稳定性;石墨烯发热织物升温速度较碳纤维发热织物快,瞬时温度高,热惯性小,热响应时间短,温度分布均匀性好。

②环境温度为5℃和-5℃时,石墨烯电加热

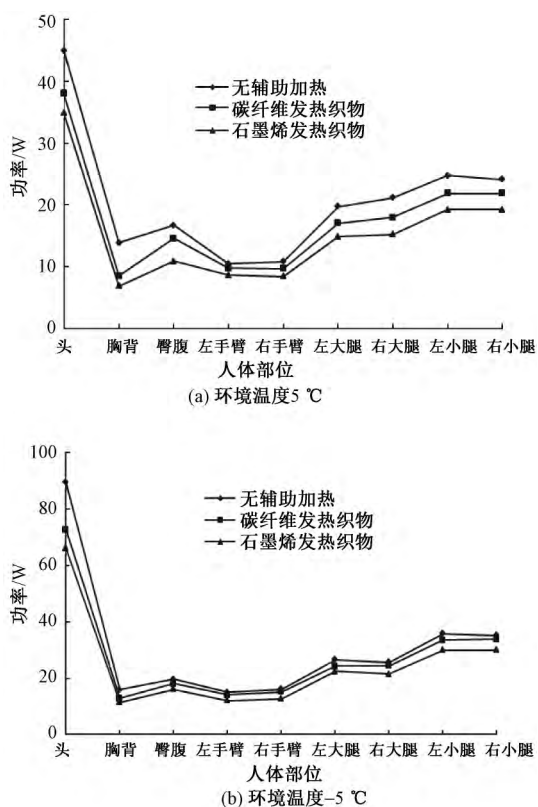


图7 5℃和-5℃时暖体假人各部位消耗的热量

组合服装的加热效率分别为 26.4%、22.7%，显著高于碳纤维加热组合服装。在服装中置入辅助加热装置可以显著增加服装的保暖性，且置入石墨烯导电织物的加热效果更佳。低温环境 -5℃ 下，石墨烯电加热组合服装仍能满足人体达到热舒适状态的需求，加热保暖性能更优异。

综上所述，利用加热元件对服装加热可以显著提高服装的保暖性能，从而增强服装在冷环境下对人体的防护效果；石墨烯电加热服装加热均匀、升温速度快、保暖性能优异，有着更为广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 田苗,李俊. 智能服装的设计模式与发展趋势[J]. 纺织学报, 2014, 35(2): 109-115.

[2] 易莉莉. 智能服装的贴心设计及其发展潜力分析[J]. 毛纺科技, 2016, 44(3): 63-67.

[3] 柯莹,张向辉. 电加热服结构及其性能评价方法[J]. 纺织导报, 2016(11): 122-123.

[4] 庄梅玲,张晓枫. 电热服的热性能评价[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2004, 19(2): 54-58.

[5] 陈莉,刘皓. 可加热纬编针织物的电热性能[J]. 纺织学报, 2015, 36(4): 50-54.

[6] LIU Hao, ZHANG Yi, CHEN Li, et al. Development and characterization of flexible heating fabric based on conductive filaments [J]. Measurement, 2012, 45: 1855-1865.

[7] 徐静娴,刘莉,李俊. 镀银纱线电热针织物的开发及性能研究[J]. 纺织学报, 2016, 37(12): 24-28.

[8] SONG Wenfang, LAI Dandan, WANG Faming. Evaluating the cold protective performance(CPP) of an electrically heated garment(EHG) and a chemically heated garment(CHG) in cold environments[J]. Fibers and Polymers, 2015, 16(12): 2689-2697.

[9] PAR Huiju, HWANG Soo-kyung, LEE Joo-Young, et al. Impact of electrical heating on effective thermal insulation of a multi-layered winter clothing system for optimal heating efficiency [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2016, 28(2): 254-264.

[10] 张清华,张殿波. 石墨烯与纤维的高性能化[J]. 纺织学报, 2016, 37(10): 145-152.

[11] 张克勤,杜德壮. 石墨烯功能纤维[J]. 纺织学报, 2016, 37(10): 153-157.