



嵌入柔性传感器无缝压力袜的导电稳定性

余月琳, 陈慰来

(浙江理工大学材料与纺织学院、丝绸学院, 杭州 310018)

摘要: 在压力袜特定部位嵌入镀银纱线形成柔性传感器, 分析压力袜的耐磨性、压力值和柔性传感器的导电稳定性。在保持纺织品柔软舒适性状和压力梯度递减功能的同时, 探究通过电阻变化推导压力变化、便捷化压力检测的可能性。测试镀银纱线的力-电学性能, 并将其用于编织压力袜, 再采用控制变量法比较不同横列数、纵行数的柔性传感器在洗涤、染色、拉伸等日常使用时电阻的稳定性。结果表明: 压力袜的压力梯度符合国家标准, 具有优良的耐磨性和导电稳定性。

关键词: 无缝压力袜; 柔性传感器; 镀银纱线; 压力梯度; 导电稳定性

中图分类号: TS155.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)03-0145-06

Conductive stability of seamless compression stockings embedded with flexible sensors

YU Yuelin, CHEN Weilai

(Silk Institute, College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A silver-plated yarn was embedded in the specific part of the compression stockings to form a flexible sensor, and the abrasive resistance and pressure value of stockings as well as conductive stability of flexible sensor were analyzed. While maintaining the softness and comfort of the textile and the function of decreasing progressively the pressure gradient, this paper explored the possibility of deriving pressure changes through resistance changes and making pressure detection more convenient. The mechanical-electrical properties of the silver-plated yarn were tested, and it was used to weave the compression stockings. Then, the control variable method was applied to compare resistance stability of the flexible sensors with different number of courses and wales in daily use such as washing, dyeing, and stretching. The results show that the pressure gradient of the compression stockings conforms to the national standards, and the formed compression stockings have good abrasion resistance and conductive stability properties.

Key words: seamless compression stockings; flexible sensor; silver plated yarn; pressure gradient; conductive stability

0 引言

袜子作为贴身服装, 使用时经常受到外物摩擦, 因此摩擦压力的大小对穿戴者的使用舒适感具有较为明显的影响。人体皮肤表层血压约为 8 kPa^[1],

当外界施压超过 7 kPa 时就会让人感觉不舒畅, 若过度施压较长时间则会导致肢体肿胀。压力袜利用压力递减可使静脉深血回流, 降低下躯静脉受到的压力, 减少静脉曲张症状的产生^[2], 该功能引起了研究者的关注。例如: 曹琳等^[3]将压力袜与气压治疗

收稿日期: 2019-05-15 网络出版日期: 2019-09-03

作者简介: 余月琳(1997—), 女, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事纺织新产品开发方面的研究。

通信作者: 陈慰来, E-mail: wlchen193@163.com

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

仪结合,高蔚等^[4]将压力袜与抗栓泵结合,成功用于不同术后减少下肢静脉血栓病症的形成,证明了压力袜的实用价值。

目前,压力袜大多通过嵌入硬质传感器再外接电池进行压力检测,这种方式对袜子舒适感的影响较大。柔性传感器可以在保持纺织品柔软舒适的基础上,更为简便地实现压力检测^[5]。近年来,在柔性传感器研究方面,众多学者已进行了一系列研究。Seyedin等^[6]制备不同厚度、纬编平针结构的传感器后,测试比较电阻大小,结果表明:在100%拉长范围内,五百次循环中,一层纬编组织织物电极的阻值最大;戴忆凡等^[7]将不同尺寸的柔性传感器嵌入无缝内衣,结果表明:随着横列数增加,柔性传感器的导电性能更为优异;庞欣等^[8]成功将柔性传感器与压力袜结合,开发出一种基于柔性传感器的压力袜检测系统。

本文首先测试了导电原料的力-电学性能,然后将导电纱线用于编织压力袜,同时在特定部位嵌入柔性传感器,测试制备所得压力袜的耐磨性和压力梯度,并比较压力袜中不同横列数、纵行数的柔性传感器在洗涤、染色、拉伸等日常使用时的导电稳定性。本研究结果可为无缝压力袜产业化生产提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

77.8、111.1 dtex 镀银锦纶纱(青岛亨通伟业特织物科技有限公司);面纱选用44.4 dtex 裸氨/44.4 dtex 锦纶/44.4 dtex 锦纶形成的锦包氨纶包覆纱(海宁市龙仕达纺织有限公司);衬垫纱选用311.1 dtex 裸氨/44.4 dtex 锦纶/44.4 dtex 锦纶形成的锦包氨纶包覆纱(海宁市龙仕达纺织有限公司)。

1.2 镀银纱线性能测试

1.2.1 力学性能测试

利用XL-2型纱线强伸仪,参考GB/T 14337—2008《化学纤维 短纤维拉伸性能试验方法》。调整上下两个夹持器隔距至250 mm,拉伸速率为500 mm/min,其中预设张力采用普通丝的标准0.5 cN/tex。两种不同细度的镀银纱线分别测试50组,剔除无效

数据后取平均值。

1.2.2 导电性能测试

利用四位数字万用电表测试纱线电阻,使用origin 9.0对测得的电阻值进行线性拟合,再根据式(1)和式(2)算出纱线电阻率:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2)$$

其中: R 为电阻值, Ω ; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; L 为纱线长度, cm ; S 为纱线横截面面积, cm^2 ; D 为纱线直径, cm 。

1.2.3 编织性能测试

将准备好的77.8、111.1 dtex 镀银纱线分别嵌入压力袜中后,利用电子显微镜(放大20倍)观察成圈效果,判断是否适于编织。

1.3 压力袜编织与测试

1.3.1 压力袜编织

表1为FZ/T 73031—2009《压力袜》中关于膝下中筒压力袜压力值的规定,根据规定,采用德国迈兹专业压力袜针织机,以添纱的方式将镀银纱线分别嵌入膝盖下胫骨初隆处(后文以及图表中简称A部位)、小腿周长最大处(后文以及图表中简称B部位)、跟腱与小腿肌转变处(后文以及图表中简称C部位)和踝部周长最细处(后文以及图表中简称D部位)形成传感器。袜口为假罗纹组织,袜身采用底组织为纬平针的衬垫组织。

表1 压力袜中不同部位的压强值规定

测定项目	部位			
	膝盖下胫骨初隆处	小腿周长最大处	跟腱与小腿肌转变处	踝部周长最细处
	(A部位)	(B部位)	(C部位)	(D部位)
压力值/kPa	≥1.548	≥1.843	≥2.265	≥3.076

表2为传感器的基本参数,为探究不同横列数、纵行数、添纱方式对传感器电阻的影响,一共编织了七个样品,1、2、5号用于比较纵行数相同时,横列数变化对电阻的影响;3、4、5号用于比较横列数相同时,纵行数对电阻的影响;6号和7号用于比较77.8 dtex和111.1 dtex这两种纱线哪一种与压力袜大身组织更匹配。

表2 7种不同传感器的基本参数

参数类型	样品编号						
	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号
添纱区大小/(横列×纵行)	6×60	12×60	18×20	18×40	18×60	18×60	18×60
添纱方式	一隔三	一隔三	一隔三	一隔三	一隔三	一隔三	一隔一
镀银纱细度/dtex	77.8	77.8	77.8	77.8	77.8	111.1	77.8

1.3.2 基本性能测试

利用 YG 502 圆轨迹起毛起球仪和气囊式压力袜测试仪,参考 GB/T 4802.1—1997《纺织品 织物起球试验圆轨迹法》和 FZ/T 73031—2009《压力袜》,对样品的耐磨性和压力值进行测试。

1.3.3 导电性能测试

在编织柔性传感器时在线圈两端留 10 个左右针距的浮线,用手搓捻后通过导电铜箔缠绕,减缓镀银纱线在测量中松散或漏出^[9]。利用万用电表对传感器电阻进行测试的方法如图 1 所示,电表显示的电阻值减去铜箔电阻(测得铜箔电阻为 $1.3\ \Omega$)即为传感器电阻。电阻值浮动需低于 5%。



图1 万用电表测试传感器电阻实验图

1.3.4 洗涤、染色、拉伸后的电阻稳定性测试

对 1、2、3、4、5 号样品进行洗涤、染色和拉伸实验。

洗涤:利用水平滚筒、前门加料型海尔洗衣机,参考 GB/T 8629—2001《纺织品 试验用家庭洗涤和干燥程序》。陪洗物为 50/50 涤棉平纹漂白机织物,样品总重量为 120 g,陪洗物共放入 12 块布,达 400 g。设置洗衣机模式为化纤模式,洗涤温度为 $20\ ^\circ\text{C}$,转速为 8 r/min,水位为二档,清水洗涤 10 min,脱水 1 min,循环 30 次。结束后取出放入 SIEMENS 烘干机,调到化纤内衣模式,其温度自动设定,40 min 后取出后冷却 5 min。

染色:因袜子本身具较深的肤色,染色时采用一氯均三嗪和乙烯砷结合的双活性染料活性藏青 BF-DB,织物重量 120 g,浴比 1:20,染料浓度 1%,元明粉 40 g/L,纯碱 15 g/L, $60\ ^\circ\text{C}$ 染 60 min。结束后取出用冷水洗涤,皂煮去除表面浮色,皂煮浴比为 1:50,元明粉和纯碱均为 1 g/L, $90\ ^\circ\text{C}$ 煮 10 min,最后脱水 1 min 并烘干。

拉伸:利用 Instron 3369 型电子万能材料试验机,参考 GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能》。首先接通电源,打开气泵开关,若气压过低则先进行充气。然后调节上下夹持器距离为 200 mm,设置好安全栓后将织物夹入。Atalay 等^[10]以镀银尼龙纱线制备了纬编平针织物传感器,发现拉长为原

来的 40% 时,样品的电阻最高,为进一步分析,本次拉伸比设为 10%、30%、50% 三组,先设定为 10%,拉到该设定的百分比时仪器自动停下,用万用电表测量出电阻值后再设置为 30%,最后是 50%。

2 结果与讨论

2.1 镀银纱线性能分析

2.1.1 力学性能

表 3 为锦纶基镀银导电纱拉伸测试结果。从表 3 中发现,随着纱线细度和环境变化,纱线的力学性能也会有所不同。一般来说干态锦纶纱断裂强度为 $3.8\ \text{cN/dtex}$ 到 $6.2\ \text{cN/dtex}$,初始模量为 $7.1\ \text{cN/dtex}$ 到 $26.5\ \text{cN/dtex}$,镀银后断裂强度和模量仍处在这个范围内,由此可知镀银层对纱线的力学性能影响不大,可用于柔性传感器的编织。

表3 两种镀银纱线拉伸测试数据

纱线/ dtex	强度/ ($\text{cN}\cdot\text{dtex}^{-1}$)	模量/ ($\text{cN}\cdot\text{dtex}^{-1}$)	伸长率/ %	定伸长负 荷/ cN
77.8	4.0	16.8	30.3	14.8
111.1	4.6	26.5	30.8	32.7

2.1.2 导电性能

图 2 为镀银纱电阻线性拟合结果曲线,表 4 为纱线电阻拟合数据以及电阻率。可见,其电阻随长度增加而增大,总体呈线形且拟合度颇高,可决系数接近 1,表明所得镀银纱线的导电连续性较好。

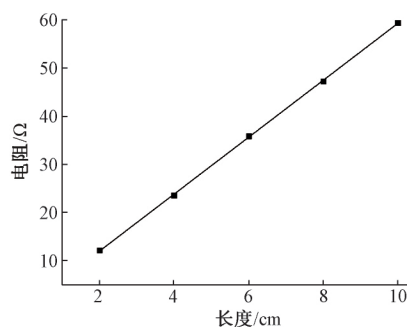


图2 77.8 dtex 镀银纱线电阻拟合

表4 77.8 dtex 镀银纱线电阻拟合数据以及电阻率

线性公式	R^2	电阻率/($\Omega\cdot\text{cm}$)
$y=5.97832X+0.2232$	0.99316	4.87×10^{-6}

图 3 为纱线氧化测试结果。镀银纱线在恒温恒湿条件下放置 28 d,因空气氧化而呈现褐色或黑色,传感器电阻增加,导电稳定性下降^[11]。在前 7 d 内电阻值增加最为明显,此后的电阻增加趋势减缓,这可能是由于纱线在前 7 d 时,外层被较多的氧化,而后导致纱线内层与空气隔开,因而减缓了氧化过程。

计算可得 10 cm 长的 77.8 dtex 镀银纱线的电阻值放置在恒温恒湿条件下 28 d 后比原始数值的增大 15.91%, 并且在实际使用中还有人体汗液的影响, 需进行表层涂敷的抗氧化处理。

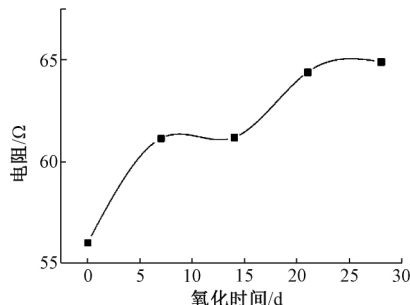


图3 77.8 dtex 镀银纱线电阻氧化测试结果

2.1.3 编织性能

图4和图5分别是两种纱线在织物表面呈现的形态,从中可以看出 77.8 dtex 纱线与大身粗细接近,成圈形状更好,所以针对 77.8 dtex 继续研究。依据张亮等^[12]的研究,可判定编织等级为2级,即其适于编织成织物。

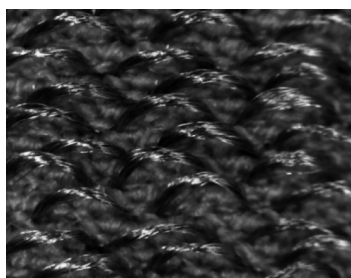


图4 77.8 dtex 镀银纱线在织物表面的形态



图5 111.1 dtex 镀银纱线在织物表面的形态

2.2 压力袜性能分析

2.2.1 基本性能

图6为摩擦后的试样,与标准卡样对比后,判定其已达到针织物耐磨的五级标准。

图7为用气囊式压力袜测试仪测得的压力值,四个部位的压力值都符合标准规定。压力袜的原理为在脚踝处支撑压力最大,沿着腿部往上压力逐步递减,在小腿最宽处减到压力最大值处的70%~90%。通过计算其他三个部位与压力最大值处的比值,A/D为50.58%,B/D为60.24%,C/D为74.19%,C部位即小腿肚处所占压力比值符合该要求。



图6 摩擦后的试样照片

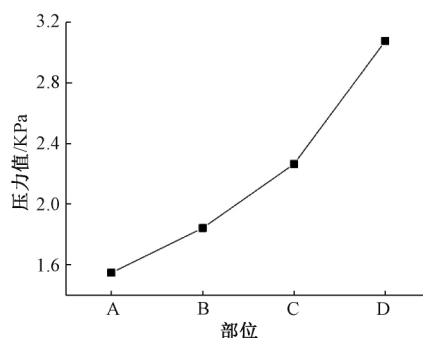


图7 不同部位压力平均值

2.2.2 导电性能

表5为电阻测试结果。在同一传感器内,从密度小到密度大的部位,电阻值逐渐增大。不同传感器之间,对比1、2、5号的电阻值得,纵行数相同时,横列数越多其电阻值越小;对比分析3、4、5号的电阻值得,横列数相同时,纵行数越多其电阻值越大;分析不同电阻之间的差值得,横列数对电阻减小的影响远大于纵行数对电阻增大的影响。

表5 不同大小的传感器的电阻值 Ω

部位	传感器编号				
	1号	2号	5号	3号	4号
A	6.6	3.6	2.8	2.2	2.7
B	6.9	4.2	3.6	2.4	3.0
C	7.5	4.6	3.7	2.8	3.2
D	8.5	5.1	3.9	3.4	3.6

2.2.3 洗涤、染色、拉伸后的电阻稳定性

分别将洗涤、染色、拉伸后测得的电阻值与原始值进行对比,用A'、B'、C'、D'表示处理后的相应位置。图8为洗涤前后电阻值,发现洗涤后电阻增大,洗衣机不断滚动使得传感器受到较多外力作用,从而可能引起电阻增大。此外,高湿环境和高温烘干环境,可能会造成导电性能不稳定,从而引起电阻值发生变化。

图9为染色后的压力袜,面纱的藏青色分布均匀和谐,色泽较好,镀银纱线的金属光泽依旧存在,

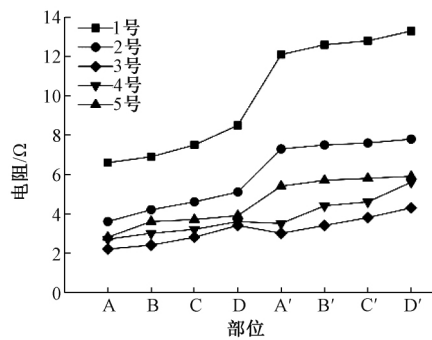


图8 洗涤前后传感器电阻变化

较为柔和,大部分线圈能够保持形状稳定。图10为染色前后电阻值,染色后电阻增大程度小于洗涤后。由于染色过程中温度和湿度对电阻的影响要大于洗涤过程,但外力作用要小于洗涤过程。由此推断:当控制染色和洗涤的时长一致时,如果洗涤后的传感器电阻增加程度依旧大于染色后,则说明外力作用对电阻增加的作用要大于温湿度。

图11为拉伸前后电阻值。总体来看,电阻一直呈现增长趋势,符合外力作用越大电阻增长越多的推断。分段来看,从原始状态拉伸10%时,其电阻增加的程度要大于从10%拉伸到30%或者从30%拉伸到50%。尤其是从30%拉伸到50%时,电阻数值增加的幅度很小。而从原始状态拉伸至10%

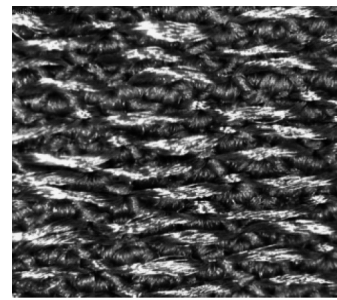


图9 染色压力袜传感器处形态

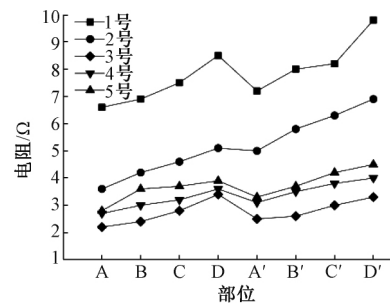
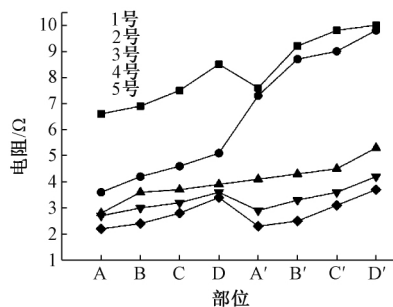
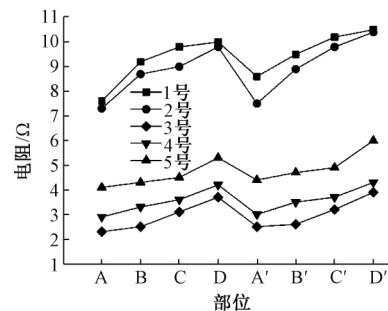


图10 染色前后电阻值变化

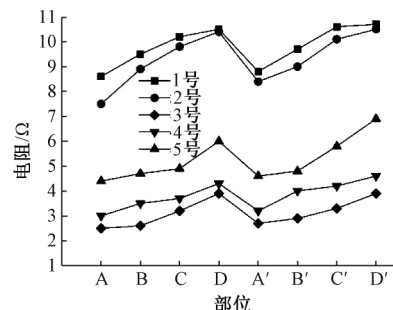
时的曲线走势、电阻数值和从原始状态拉伸50%时的非常相近,可见面对较大幅度的拉伸,其导电稳定性仍然较好。拉伸过程中,纤维和纱线都在相互滑移,甚至可能出现纤维或者纱线断裂的现象,从而影响整个传感器的电阻。



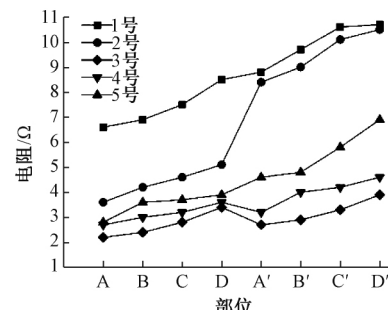
(a) 0~10%



(b) 10%~30%



(c) 30%~50%



(d) 0~50%

图11 不同拉伸程度下压力袜的电阻变化情况

洗涤对电阻稳定性影响最大,因为较大的外力作用 and 高温高湿使导电元素更快发生化学反应。而染色虽然在高温高湿下,外力作用却较小,拉伸则只

有外力作用。整个洗涤、染色、拉伸过程中并没有破坏横纵行数对其电阻影响的原有规律。因此通过电阻变化推导压力变化的想法具有一定可能性,具体

推导模型有待进一步的研究。

3 结 论

本文探讨了基于柔性传感器的无缝压力袜的导电原料测试、样本编织、样本服用性能与导电性能以及日常使用对电阻稳定性的影响。对测试结果进行分析,得到以下主要结论:

a)原料 77.8、111.1 dtex 镀银纱线的力-电学性能良好,可用于柔性传感器的编织,但 77.8 dtex 镀银纱线与大身所用纱线的粗细更为接近,成圈形状更好;而 111.1 dtex 与织物配比不够完整,宜采用 77.8 dtex 镀银纱线编织压力袜。

b)成品的耐磨性优于常规涤棉混纺袜,压力值完全符合国家标准的规定,在符合人体需求时能够有效保护下肢。

c)传感器横列数越多,纵行数越少,电阻越小,样品中 18×20 (横列 \times 纵行)的灵敏性最高。洗涤对导电稳定性影响最大,染色次之,拉伸最小。生产时先染后织,可有效减少染色对传感器造成的二次伤害。

参考文献:

- [1] 张兰, 蒋晓文. 袜品压力舒适性研究概述[J]. 针织工业, 2017(9): 24-26.
- [2] Hobson D B, Chang T Y, Aboagye J K, et al. Prevalence of graduated compression stocking-associated pressure injuries in surgical intensive care units[J]. Journal of Critical Care, 2017, 40: 1-6.
- [3] 曹琳. 抗血栓压力袜联合气压治疗仪在全盆底重建术后预防下肢深静脉血栓形成中的应用[J]. 华西医学, 2016, 31(2): 328-331.
- [4] 高蔚, 朱松颖, 梁文文, 等. 抗栓泵与梯度压力袜联合应用预防乳腺癌患者术后下肢深静脉血栓的研究[J]. 中国实用护理杂志, 2018, 34(14): 1045-1049.
- [5] 王双, 刘玮, 刘晓霞. 柔性应变织物传感器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12): 1-3.
- [6] Seyedin S, Razal J M, Innis P C, et al. Knitted strain sensor textiles of highly conductive all-polymeric fibers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(38): 21150-21158.
- [7] 戴忆凡, 陈慰来, 王金凤, 等. 集成柔性传感器无缝内衣原料与尺寸设计[J]. 现代纺织技术, 2019, 27(5): 1-8.
- [8] 庞欣, 方园, 李新阳. 基于柔性压力传感器的压力袜压力检测[J]. 浙江理工大学学报, 2017, 37(6): 759-764.
- [9] 蔡倩文, 王金凤, 陈慰来. 纬编织柔性传感器结构及其导电性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 48-53.
- [10] Atalay O, Kennon W R, Demirok E. Weft-knitted strain sensor for monitoring respiratory rate and its electro-mechanical modeling [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 110-122.
- [11] 张辉, 沈兰萍, 詹建朝. 涤纶织物不同还原剂化学镀银及防电磁波性能[J]. 材料工程, 2007, 35(5): 31-35.
- [12] 张亮. 导电纤维针织物的编织工艺优化探讨[J]. 毛纺科技, 2008, 36(12): 28-31.

(责任编辑:刘国金)