

不锈钢丝 / 桑蚕丝复合导电纱的制备与性能研究

张鲁燕, 杨莹莹, 侍康妮, 祝成炎, 田 伟

(浙江理工大学 a. 材料与纺织学院、丝绸学院; b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室 杭州 310018)

摘要: 为开发柔性传感器用高性能导电纱, 文章采用包缠工艺将不锈钢丝与桑蚕丝进行包覆, 制备了 8 种不锈钢丝 / 桑蚕丝复合导电纱, 研究了芯纱、外包纱规格对复合导电纱的表观形态结构、力学性能和表面摩擦性能的影响, 并通过测量定速拉伸过程中电阻的变化分析其导电性能。结果表明: 在制备的 8 种复合导电纱中, 直径为 0.035 mm 不锈钢丝与 88.9 dtex 桑蚕丝包覆得到的复合导电纱条干均匀度最好, 复合导电纱的断裂强度较好, 表面摩擦系数最小, 灵敏度最大。综合分析复合导电纱的各项性能, 得出直径为 0.035 mm 不锈钢丝与 88.9 dtex 桑蚕丝包覆得到的导电纱性能最好。

关键词: 不锈钢丝; 条干均匀度; 力学性能; 摩擦系数; 导电性能

中图分类号: TS102.64

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2019)03-0001-06

引用页码: 031101

Study on preparation and properties of stainless steel wire/silk composite conductive yarn

ZHANG Luyan, YANG Yingying, SHI Kangni, ZHU Chengyan, TIAN Wei

(a. College of Materials and Textiles Silk Institute; b. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to develop the high-performance conductive yarn used for the flexible sensor, eight kinds of stainless steel wire/silk composite conductive yarns were prepared by wrapping technology. The effects of core yarn and cladding yarn specifications on the apparent morphology, mechanical properties and surface friction properties of the composite conductive yarns were studied and the conductivity was analyzed by measuring resistance changes in the process of constant-speed stretching. The results show that among eight kinds of composite conductive yarns, the composite conductive yarn coated by the stainless steel wire with diameter of 0.035 mm and 88.9 dtex silk has the best yarn evenness. In addition, the breaking strength is good, the surface friction coefficient is the lowest, and the sensitivity is the best. By synthetically analyzing the properties of composite conductive yarn, it is concluded that the composite conductive yarn coated with 0.035 mm stainless steel wire and 88.9 dtex silk has the best properties.

Key words: stainless steel wire; yarn evenness; mechanical properties; friction coefficient; conductivity

近年来,智能服装已广泛应用于航空航天、军事、健康护理及监测等领域,并越来越受到人们的关注^[1]。纺织服装可以大面积覆盖在人体上,除了比其他材料具有更好的柔软性、舒适性外,还具备灵活地嵌入传感器等优势,因此它是作为传感器的绝佳载体^[2]。智能服装系统集成了通讯元件、传感器、微

型计算机等装置,传感器能实现信息的快速储存与处理,是实现智能化的关键^[3-4]。通过纺织材料来制作传感器可以与纺织服装更好地融合为一体,其中常用的纺织材料为导电纤维^[5]。为了提高融合了信息技术和纺织技术的智能纺织品等产品性能,高性能导电纱线和织物的开发成为了当前的研究热点之一^[6]。

目前,针对智能服装柔性传感器的导电材料,多集中在涂覆型导电纤维及金属纤维与普通纤维的混纺研究^[7-9],但织物的柔软性、舒适性等服用性能并不理想。金属拥有优良的导电性能,不锈钢丝

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2019-01-10

作者简介: 张鲁燕(1993—),女,硕士研究生,研究方向为蚕丝产品的开发。通信作者: 祝成炎,教授, cyzhu@zstu.edu.cn。

兼具纤维的柔软性和金属的导电、导热、耐腐蚀等性能,是理想的导电纤维,但金属纤维较差的抱合力和可纺性限制了它的发展,因此金属丝常与涤纶纤维混合编织制备导电针织物^[10-11]。在天然纤维中,桑蚕丝因柔和的光泽、软糯的手感及优良的吸湿透气性得到消费者的青睐。本文选用2种不同规格的不锈钢丝、4种不同规格的桑蚕丝作为芯纱与外包纱,采用包缠工艺开发出8种不锈钢丝/桑蚕丝复合纱,在获得稳定的传感性能和改善单独的金属丝在织造过程中勾丝、易断、磨损等问题同时,使纱线织造的机织物或者针织物又兼具桑蚕丝良好的服用性能^[12]。通过研究包缠工艺对复合纱形态结构、力学性能、摩擦性能和导电性能的影响,测试复合导电纱在拉伸过程中电阻的变化,分析结构参数对其灵敏度的影响,为复合导电纱在后期柔性传感器的制备及其在智能纺织品领域的应用提供理论依据。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料:为保证织物柔软舒适等服用性能,选用直径分别为0.021 mm(25.6 dtex)、0.035 mm(78.8 dtex)的不锈钢金属长丝(莱芜龙志金属纱线有限公司),线密度规格分别为44.4、88.9、130.0、177.8 dtex的4种常见桑蚕丝(金富春丝绸科技股份有限公司)。

仪器:JKV 260/240 空心锭子包覆机(中国人民解放军第四八零六工厂),KSZX 真空定形快速蒸箱(江苏佳联华机械制造有限公司),XY218 倒筒机(浙江新亚纺织机械有限公司),LEICA DM2700P 偏光显微镜(北京中辉徕博仪器有限公司),XL-2 型纱线强伸度仪(上海利浦应用科学技术研究所),LFY-110 型纱线动态摩擦系数测定仪(山东省纺织科学研究院),VICTOR VC890C + 数字万用表(深圳市驿生胜利科技有限公司),INSTRON 3369 型电子万能材料试验机(英斯特朗试验设备贸易有限公司)。

1.2 复合导电纱的制备

分别采用不同直径的2种不锈钢丝为芯纱,不同线密度的4种桑蚕丝为外包纱,在空心锭子包覆机上制备8种不同规格的复合导电纱。其中复合工艺参数为:包覆速度13 970 r/min,锭速13 880 r/min,捻度1 750 捻/m,捻向采用Z捻,张力0.4 g。将包缠纱用真空定形快速蒸箱定型,再倒筒后即得到如表1

所示8种不锈钢丝/桑蚕丝复合导电纱。

表1 复合纱规格参数

Tab. 1 Specification parameters of composite yarn

试样编号	芯纱不锈钢丝 线密度/dtex	外包纱桑蚕丝 线密度/dtex
1 [#]	25.6	44.4
2 [#]	25.6	88.9
3 [#]	25.6	130.0
4 [#]	25.6	177.8
5 [#]	78.8	44.4
6 [#]	78.8	88.9
7 [#]	78.8	130.0
8 [#]	78.8	177.8

1.3 性能测试

1.3.1 复合纱表面形态分析

将置有复合纱的载玻片放在 LEICA DM2700P 偏光显微镜的载物台上,先用低倍镜找到目标并移到视野的中心,然后转换使用高倍镜,调整观察的亮度、放大倍数等参数后得到清晰的复合纱表面形态图片。在 Photoshop 中打开复合纱表面形态图,在不同部位测量纱线的屈曲波高5次,记录测试结果并取平均值。

1.3.2 复合纱强伸性测试

在纱线性能测试之前,先将制备的复合纱试样置于温度20℃、相对湿度65%的标准温湿度条件下调湿24 h至平衡。根据 GB/T 3916—2013《纺织品卷装纱 单根纱线断裂强力和断裂伸长率的测定(CRE法)》的测试规定,设置测试的参数分别为:夹距200 mm,试样的拉伸速度100 mm/min,预加张力0.05 cN/dtex。在纤维强伸度仪上测试8组试样的强伸性,每个试样重复测试20次,记录测试结果并取平均值。

1.3.3 复合纱摩擦性能的测试

将试样置于标准环境中调湿24 h后,将复合纱不断地喂入 LFY-110 型纱线动态摩擦系数测定仪的滚动辊,与摩擦体稳定摩擦,进行摩擦系数的测定。根据标准 ASTM D 3108—2001《纱线与固体材料之间摩擦系数的标准试验方法》的测试规定,设置测试的参数分别为:测试速度100 m/min,时间6 s,包角90°,初张力20 cN。在纱线动态摩擦系数测定仪上测试每个试样的摩擦系数,每个试样重复测试20次,记录测试数据并计算平均值。

1.3.4 复合纱导电性能的测试

测试前,将各试样放置在标准环境中静置24 h。

为避免仪器短路,将 INSTRON 3369 型电子万能材料试验机的常用夹头内侧放入具有绝缘作用的橡胶片。测试时设置夹距 100 mm,采用电阻较低、厚度超薄的铜片为导出电极,将试样和铜片一头固定在夹头内侧,用 VICTOR VC890C + 数字万用表的夹头夹住铜片的另一头测出初始电阻 R_0 并记录。以拉伸速率为 15 mm/min 拉伸,每拉伸 1 mm 时暂停强力仪,每个试样拉伸 10 mm,同一种复合纱测试 10 次,记录每次拉伸下的电阻值并计算平均值。

复合导电纱可以感受材料内外部的刺激,并随之产生响应,实现电信号的探测和传输,因此复合纱的电信号响应精度可评价其传感性能。灵敏度是衡量柔性传感器测试精度的重要指标之一,灵敏度系数(gauge factor, GF)可以用来表征在拉伸作用下复合导电纱电阻变化的灵敏度,计算公式如下:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} = \frac{(R - R_0)/R_0}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: ΔR 为拉伸前后电阻的变化量, Ω ; R_0 为拉伸前复合纱的电阻, Ω ; R 为拉伸后复合纱的电阻, Ω ; ε 为复合纱的伸长率, %。

2 结果与分析

2.1 复合纱形态结构分析

通过对不锈钢丝/桑蚕丝复合纱在显微镜下的微观结构观察可评价复合纱的成型结构、条干均匀度,不同规格的复合纱的形态结构分别如图 1 所示。屈曲波高是指纱线屈曲波的波峰与波谷之间的垂直距离,复合纱的成型结构可用屈曲波高来表征,测试示意如图 2 所示。

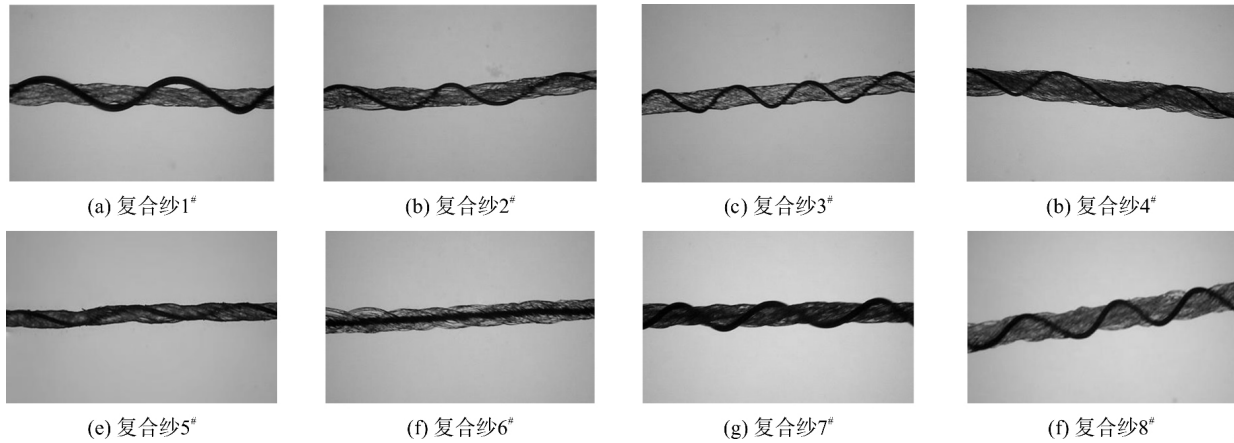


图 1 复合导电纱的形态结构(×400)

Fig. 1 Morphology and structure of composite conductive yarn(×400)

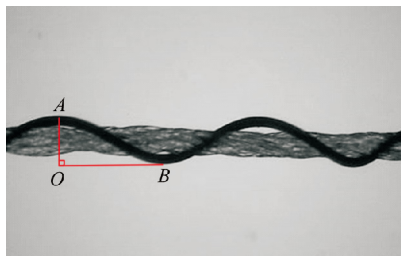


图 2 纱线屈曲波高

Fig. 2 Buckling wave height of yarn

图 1 中颜色较深的纱线为不锈钢丝芯纱,颜色较浅的纱线是为桑蚕丝外包纱。分别测量每个试样的屈曲波高 OA 长度,其大小分别为 0.126、0.115、0.137、0.143、0.105、0.01、0.139、0.262 mm,即试样屈曲波高的大小排序为: $8^\# > 4^\# > 7^\# > 3^\# > 1^\# > 2^\# > 5^\# > 6^\#$ 。复合纱 $3^\#$ 、 $4^\#$ 、 $7^\#$ 和 $8^\#$ 的芯纱和外包纱的复合贴合度较好,但是芯纱产生了不同程度的扭曲,屈

曲波高较大,这可能是由于外包纱线密度为 177.8 dtex 和 130.0 dtex 时,芯纱与外包纱线密度相差太大导致复合纱的条干均匀度较差;复合纱 $1^\#$ 的芯丝与外包纱之间产生缝隙,屈曲波高比复合纱 $2^\#$ 、 $5^\#$ 和 $6^\#$ 大,明显的露芯现象是由包缠工艺中气圈的大幅变化引起复合点的上下波动造成的,这种纱线在织造过程中易导致不锈钢丝的勾丝;复合纱 $5^\#$ 和 $6^\#$ 的复合效果较好,其中复合纱 $6^\#$ 的芯纱平直,外包纱连续均匀缠绕在芯纱外面,纱线条干均匀度相对其他复合纱来说最好。

2.2 复合纱的力学性能分析

在织造过程中,纱线与纱线、机械部件会接触摩擦和弯曲,为了保证顺利地织造减少断头,复合纱需要有良好的力学性能。不锈钢丝/桑蚕丝复合纱和原料的力学性能测试结果如表 2、表 3 所示。

表2 复合纱原料强伸性

Tab.2 Strength and elongation of composite yarn's raw materials

原料名称	线密度/ dtex	断裂强度/ (cN · dtex ⁻¹)	断裂伸长率/ %
0.021 mm 不锈钢丝	25.6	0.54	19.4
0.035 mm 不锈钢丝	78.8	0.36	22.4
44.4 dtex 桑蚕丝	44.4	3.76	19.6
88.9 dtex 桑蚕丝	88.9	4.19	20.9
130.0 dtex 桑蚕丝	130.0	3.69	19.0
177.8 dtex 桑蚕丝	177.8	3.59	16.9

表3 复合纱的强伸性

Tab.3 Strength and elongation of composite yarn

试样编号	断裂强度/(cN · dtex ⁻¹)	断裂伸长率/%
1#	2.2	12.1
2#	2.0	14.5
3#	1.6	17.1
4#	1.5	15.3
5#	2.4	12.2
6#	1.8	14.6
7#	1.5	17.6
8#	1.2	13.7

由表2和表3可知,当芯纱不锈钢丝的线密度相同时,复合纱的断裂强度与外包纱桑蚕丝的线密度呈负相关关系,外包纱线密度越大,复合纱断裂强度越小。不锈钢丝的断裂强力随着线密度的增大而增大,但是当芯纱线密度相同时,复合纱线密度的增幅速度比断裂强力快,故断裂强度反而降低。对比复合纱断裂强度与桑蚕丝的断裂强度,可发现复合纱的断裂强度较小,这是因为复合纱包缠工艺中的加捻会使纱线中纤维倾斜程度加大,承受轴向上的拉力有效分力降低导致强力下降。

当桑蚕丝线密度小于130.0 dtex时,复合纱断裂伸长率随着外包纱线密度的增加而增加,此时再增加外包纱线密度,断裂伸长率减小,且不锈钢丝为0.035 mm时复合纱的下降幅度较0.021 mm大。纱线的捻系数是衡量不同粗细纱线的加捻程度,捻系数与图3中捻回角的正切值($\tan\beta$)成正比^[13]。而当外包纱线密度为177.8 dtex时,由图1可知纱线的捻回角增大,即复合纱的捻系数较大,纱线中纤维的倾斜程度和伸长变形较大,且条干均匀度较差,纱线中纤维断裂伸长率减小。

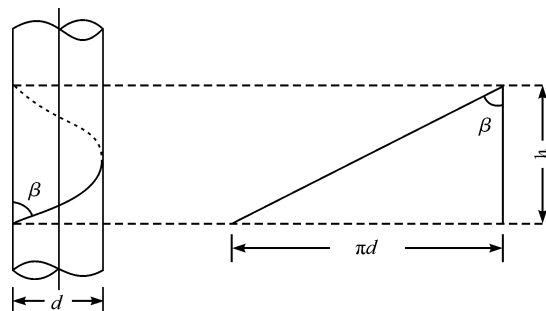


图3 纱线捻系数

Fig.3 Yarn twist factor

2.3 复合纱摩擦性能分析

纱线表面粗糙程度在一定程度上决定织物交织阻力的大小,从而影响织物风格手感,当交织阻力越大时手感越硬。为了提高可穿戴柔性传感器的使用性能,传感器需要具有柔软性和高舒适性的特点。不锈钢丝/桑蚕丝复合导电纱的摩擦系数测试结果,如图4所示。

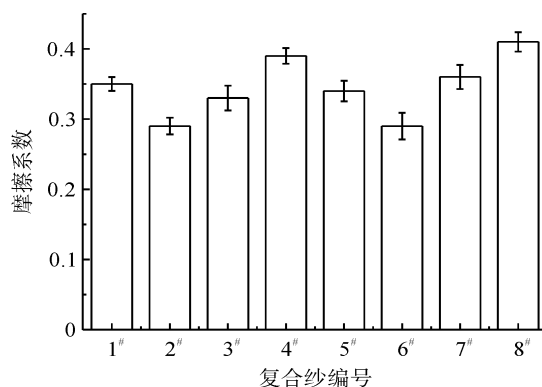


图4 复合导电纱表面摩擦系数

Fig.4 Friction coefficient on the surface of composite conductive yarn

由图4可知,复合纱6#纱线表面摩擦系数最小,结合复合纱的微观形态结构可知该复合纱的桑蚕丝均匀包缠复合在芯纱外面,纱线条干均匀度较好,故复合纱的摩擦系数最小,由该纱线织成的织物手感最柔软。当外包纱线密度为130.0、177.8 dtex时,后者的屈曲波高较前者大,后者的纱线条干程度最差,表面摩擦系数也最大。

2.4 复合纱的导电性能分析

为探究复合纱在拉伸变形条件下的电信号响应灵敏性,本文记录了复合纱拉伸至10%时的11个电阻值,复合纱的导电灵敏度与线密度、伸长率的关系,如图5所示。

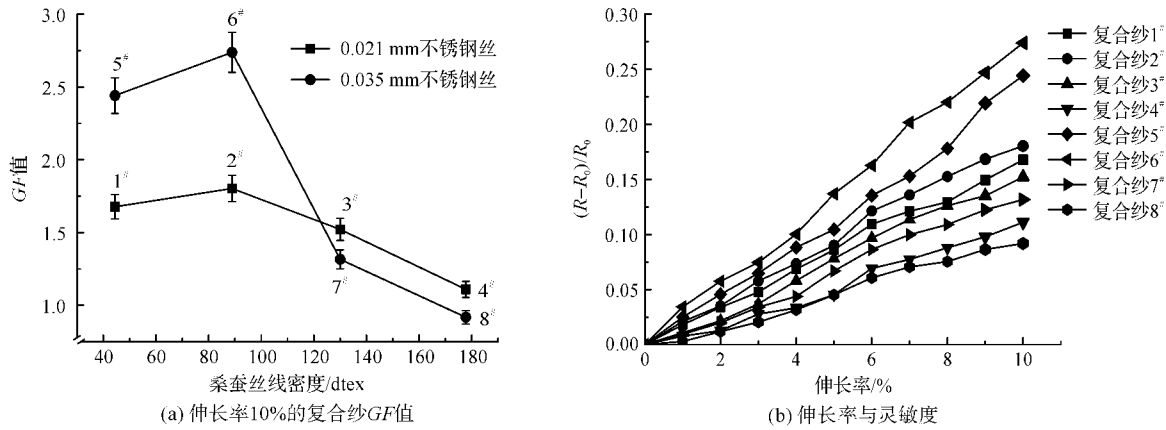


图 5 复合纱的导电性

Fig. 5 Conductivity of composite yarn

由图 5 (a) 可以看出,所有复合纱伸长率为 10% 时的灵敏度 GF 值大小排序为: $8^\# < 4^\# < 7^\# < 3^\# < 1^\# < 2^\# < 5^\# < 6^\#$ 。在外包纱桑蚕丝线密度相同情况下,复合纱的灵敏度 GF 值随外包纱线密度的增大呈先增加后减小的趋势,其中复合纱 5# 的灵敏度系数比复合纱 1# 高 0.76,复合纱 6# 的灵敏度系数比复合纱 2# 高 0.93,而复合纱 3# 和 7#、4# 和 8# 的灵敏度系数相差较小。根据灵敏度系数的公式可知,图 5 (b) 中的斜率即代表灵敏度系数,从中也可以发现相同的灵敏度排序规律。因此通过分析可以发现灵敏度系数跟纱线的包覆结构有关,复合纱的包覆结构越好,灵敏度系数越高,灵敏性特征越显著;反之当复合纱的包覆效果较差时,则灵敏性特征越不明显。在所有试样中,复合纱 5# 和 6# 的包覆效果最好,不锈钢丝芯纱较为平直,当复合纱受到拉伸时产生的电响应最为明显。而复合纱 4# 和 8# 的屈曲波高最大,不锈钢丝在复合纱包覆结构中扭曲程度较严重,当纱线受到拉伸时,不锈钢丝芯纱先改变不锈钢丝在复合纱中倾斜状态,因此产生的电响应较不明显。

3 结论

复合纱的芯纱和外包纱分别采用直径为 0.035 mm 的不锈钢丝、线密度为 44.4 dtex 和 88.9 dtex 的桑蚕丝时,复合纱成形质量较好,芯纱平直不倾斜,外包纱均匀缠绕在芯纱外侧。当芯纱的线密度相同时,复合纱断裂强度与外包纱的线密度有关,外包纱的线密度越大,复合纱的断裂强度越小,断裂伸长率则受到复合纱的外包纱线密度和条干均匀度的综合影响;桑蚕丝线密度为 177.8 dtex 的复合纱条干不均匀,纱线的表面摩擦系数越大,纱线条干均匀度越

好,表面摩擦系数越小;复合纱的复合结构越好,它的导电性能更优,复合结构不理想的芯纱在纱线中呈倾斜状态,灵敏性则较差。

根据复合纱形貌结构、强伸度、摩擦性能和导电特性结果可知,由芯纱为 0.035 mm 的不锈钢丝、线密度为 88.9 dtex 的桑蚕丝包覆得到的复合纱综合性能较好,更适合作为柔性传感器的导电纱。

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.
TIAN Miao, LI Jun. Design mode and development tendency of smart clothing [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(2): 109-115.
- [2]杨莹莹. 金属丝/桑蚕丝织物的制备及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
YANG Yingying. Study on the Preparation and Properties of Metal/Silk Fabric [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018.
- [3]沈雷,李仪,薛哲彬. 智能服装现状研究及发展趋势[J]. 丝绸, 2017, 54(7): 38-45.
SHEN Lei, LI Yi, XUE Zhebin. Current situation and development trend of intelligent garment [J]. Journal of Silk, 2017, 54(7): 38-45.
- [4]刘敏. 智能型柔性传感器的导电性与响应性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2009.
LIU Min. Investigation of Conductivity and Response Properties of Intelligent Sensing Fabrics [D]. Shanghai: Donghua University, 2009.
- [5]马艳丽,刘茜,刘玮. 用于智能纺织品的柔性传感器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(4): 1-3.
MA Yanli, LIU Qian, LIU Wei. Research progress of flexible sensor for smart textiles [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(4): 1-3.

- [6]李瑶,陈婷婷,杨旭东. 纺织用导电纤维及其应用[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(4): 32-35.
LI Yao, CHEN Tingting, YANG Xudong. Conductive fibers for textile and its applications [J]. Technical Textiles, 2010, 28(4): 32-35.
- [7]RITA P, GIANNICOLA L, NICOLA T. A wearable health care system based on knitted integrated sensors [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Bio-medicine A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2005, 9(3): 337-344.
- [8]CATRYSSE M, PUERS R, HERTLEER C. Towards the integration of textile sensors in a wireless monitoring suit [J]. Sensors and Actuators, 2004(114): 302-311.
- [9]郭秋晨. 集成不同导电材料针织柔性传感器的智能无缝服装的研发[D]. 上海: 东华大学, 2017.
GUO Qiuchen. Research and Development on Smart Seamless Garment Based on Knitted Flexible Sensors with Different Types of Conductive Yarns [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [10]胡雅琪, 郭荣辉. 导电纤维的研究进展[J]. 纺织科技进展, 2017(9): 1-5.
HU Yaqi, GUO Ronghui. Research progress of conductive fiber [J]. Progress in Textile Science & Technology, 2017(9): 1-5.
- [11]金永良. 金属纤维的性能特点及其产品开发[J]. 棉纺织技术, 2003, 31(5): 28-31.
JIN Yongliang. Property characteristics of metal fiber and its production development [J]. Cotton Textile Technology, 2003, 31(5): 28-31.
- [12]魏贺, 蒋金华, 陈南梁. 经编过程中金属丝耐摩擦性能的研究[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(4): 18-21.
WEI He, JIANG Jinhua, CHEN Nanliang. Study on abrasability of stainless wire yarn during warp knitting process [J]. Technical Textiles, 2012, 30(4): 18-21.
- [13]刘妍, 刘士广, 姜华强. 细纱捻系数与纱线强力的相关性分析[J]. 棉纺织技术, 2008, 36(8): 15-18.
LIU Yan, LIU Shiguang, JIANG Huaqiang. Relativity analyses of yarn twist factor and yarn strength [J]. Cotton Textile Technology, 2008, 36(8): 15-18.