

# 不同湿态下不锈钢/涤纶针织物的导电性能

陈晴<sup>1</sup>, 张鑫<sup>2</sup>, 罗虹富<sup>2</sup>, 陈杰<sup>2</sup>, 舒琳<sup>3</sup>

(1. 东华大学 上海国际时尚科创中心, 上海 200051; 2. 江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122; 3. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**采用不锈钢与涤纶混纺的导电纱线编织成1+1罗纹织物,通过测试其干态、湿态下的电阻分析其导电性能。实验结果表明:当织物宽度为2 cm时,随着织物长度从2 cm增加到4,6,8 cm,织物横向电阻从0.25 MΩ增大到0.89,1.64,2.11 MΩ,分别增加了256%,84.2%,28.6%;纵向电阻从22.57 MΩ增大到40.81,71.24,100.75 MΩ,分别增加了80.82%,74.56%,41.7%。对于同一块织物,随着含水率增加到20%,30%,40%,各不同面积织物的横、纵向电阻均呈减小趋势。通过多角度比较不同湿态下不锈钢纤维的电阻,发现织物干态时的电阻与织物尺寸和组织结构相关,织物湿态时电阻主要与织物的含水量和织物的尺寸相关,为开发相关感应出汗量的智能纺织品提供依据。

**关键词:** 不锈钢纤维;干态;湿态;电阻;导电性能

**中图分类号:** TS 156 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2019)03-0207-05

## Electrical Conductivity of Stainless Steel Fibers Under Different Wet Conditions

CHEN Qing<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, LUO Hongfu<sup>2</sup>, CHEN Jie<sup>2</sup>, SHU Lin<sup>3</sup>

(1. Shanghai International Fashion Innovation Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. School of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The 1+1 ribbed fabric was knitted with the conductive yarn blended with stainless steel fibers and polyester fibers. The conductive properties of the fabric were analyzed by testing its resistance in dry and wet states. The results show that when the width of the fabric is 2 cm, the transverse resistance of the fabric increases from 0.25 MΩ to 0.89, 1.64, 2.11 MΩ with the increase of the fabric width from 2 cm to 4, 6, 8 cm, respectively, corresponding to the increase ratios of 256%, 84.2% and 28.6%. The longitudinal resistance increases from 22.57 MΩ to 40.81, 71.24, 100.75 MΩ, respectively, corresponding to the increase ratios of 80.82%, 74.56% and 41.7%. For the same fabric, the transverse resistance and longitudinal resistance of the fabric with different areas show a decrease trend with the increase of moisture content to 20%, 30% and 40%. By comparing the resistance values of stainless steel fibers in different wet states from different angles, it is found that the resistance in dry state is related to the fabric size and structure, and the resistance in wet state is mainly related to the moisture content and size of fabrics. This study can provide the basis for studying smart textile of sensing sweats.

**Key words:** stainless steel fiber, dry state, wet state, resistance, electrical conductivity

随着科技的发展和智能化的普及,导电纤维作为智能纤维的典型代表之一,引起国内外材料界的

广泛关注,对其及其织物的研究也逐步深入。由于导电纤维独特的性能,其在传感器、服装等方面拥

收稿日期:2018-12-19; 修订日期:2019-02-20。

基金项目:东华大学青年教师科研启动基金资助项目。

作者简介:陈晴(1981—),女,副教授,博士。主要研究方向为针织物产品设计与开发。Email:12071107@qq.com

有较好的应用前景<sup>[1-2]</sup>。导电织物柔性传感器具有弹性模量低、应变大、可弯曲、可折叠、可水洗、舒适性较好等优点,因而受到广泛关注并逐渐代替传统智能服装中硬件传感器<sup>[3]</sup>。导电纤维在信息传感方面已成为21世纪智能材料中最理想的载体<sup>[4-5]</sup>。

导电纤维中的金属纤维具有良好的导电、传热和耐高温等性能,并且能够屏蔽电磁波,因此越来越广泛地应用于纺织工业和其他工业领域,不锈钢纤维就是具有代表性的金属纤维之一。不锈钢纤维的良好性能使其成为防护功能纤维和生物医学功能纤维等高科技纤维中用途最广泛的纤维之一<sup>[6]</sup>。

针织物具有与机织物不同的结构和性能,它在弹性及延伸性方面有着机织物难以比拟的优势,其中1+1罗纹组织弹性最好。目前关于织物拉伸引起电阻变化的研究,如东华大学建立内衣压力模型,依据针织面料在人体围度上的拉伸变形,分析了内衣对人体各部分的压力并测量压力变化过程中针织柔性传感器电阻的变化情况<sup>[7]</sup>;也有关于含水量引起电阻变化的研究,如东华大学研究织物的电阻随芯吸过程而改变的规律等<sup>[8]</sup>。

由于不锈钢纤维具有强度大、电阻率低的特点<sup>[9]</sup>,以其为原料的织物在拉伸中会造成显著的电阻变化,所以不锈钢导电织物主要用作各种织物传感器<sup>[10]</sup>,通过电阻变化传递不同的信号,从而达到提示或控制的功能。

文中从湿度对不锈钢针织物导电性能的影响入手,以不锈钢和涤纶混纺的1+1罗纹针织物为测试材料,通过对针织物干、湿态的电阻比较,探究其导电性能与湿度的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与仪器

**1.1.1 原料** 选用不锈钢和涤纶混纺导电纱线,涤纶质量分数为90%,不锈钢纱线质量分数为10%。纱支为30 tex的双股纱,纱线捻度为277捻/m。1+1罗纹针织物如图1所示;织物基本参数见表1。

**1.1.2 仪器** CMS7.2型针织横机,德国斯托尔(Stoll)公司制造;RIGOL DM3068型电阻测量仪器,苏州普源精电科技有限公司制造。

### 1.2 方法

1) 剪取横向×纵向分别为2 cm×2 cm, 2 cm×4 cm, 2 cm×6 cm, 2 cm×8 cm的4种织物,每种织物剪取3块。

2) 将大小、方向相同的织物分为一组,横向4

组,纵向4组,共8组,分别进行电阻测量;测量时织物平整铺放,使其处于不受张力的状态,以减少织物拉伸对实验结果的影响。

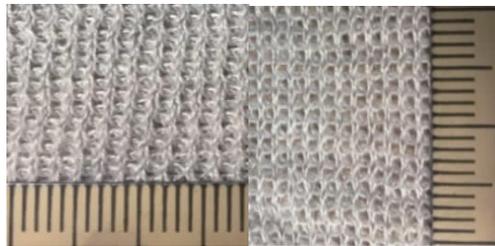


图1 1+1罗纹针织物

Fig.1 1+1 rib knitted fabric

表1 织物基本参数

Tab.1 Basic parameters of fabrics

织物组织	经密 (根/dm)	纬密 (根/dm)	厚度/mm	面密度/(g/m <sup>2</sup> )	体积密度/(g/m <sup>3</sup> )
1+1罗纹组织	58.00	72.00	0.89	307.55	345.56

3) 每组织物先测量其干态电阻,再在水中润湿且使其表面不凝水珠,测量其含水率分别为20%, 30%与40%时的湿态电阻。干、湿态各测3次,取平均值。

4) 测量点为距边缘0.5 cm的中点处,并保证每次夹持点相同,夹持点处保证金属纤维不裸露。

5) 所有组测完后,汇总数据,进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 织物干态电阻分析

罗纹织物干态电阻变化趋势如图2所示。由图2可以看出,相同面积的织物干态纵向电阻大于干态横向电阻,并且电阻相差大,究其原因:金属纤维主要分布在纱线内部,致使线圈间搭接相连时电阻变大。但是相同面积的不同样品之间电阻也有一定的误差。这是由于罗纹织物具有较好的拉伸性,而电阻受到了拉伸的影响。此外,由于仪器原因,实验过程中无法确保每次测试点位置完全相同,且不锈钢纤维在测试点的分布不均匀,织物采样的尺寸有偏差等,也会影响测试结果。

由实验数据可知,对于不同面积的织物,在织物宽度不变的情况下,随着长度的增加,织物的横向电阻和纵向电阻均呈增加趋势,这是由于导体电阻与导体长度成正比<sup>[11]</sup>,即关系式为

$$R = \rho L / S$$

式中: $\rho$  为导体的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ ); $L$  为导体的长度( $\text{cm}$ ); $S$  为导体的横截面积( $\text{cm}^2$ ); $R$  为所测纱线的电阻( $\Omega$ )。

程( $y_1, y_2$ )分别为

$$y_1 = -267.8x_1 + 138.64;$$

$$y_2 = -248.85x_2 + 133.59。$$

2 cm × 4 cm 织物的横、纵向电阻回归方程( $y_3, y_4$ )为

$$y_3 = -1466.1x_3 + 641.18;$$

$$y_4 = -373.25x_4 + 200.13。$$

2 cm × 6 cm 织物的横、纵向电阻回归方程( $y_5, y_6$ )为

$$y_5 = -10784x_5 + 4048.4;$$

$$y_6 = -5988.1x_6 + 2253.7。$$

2 cm × 8 cm 织物的横、纵向电阻回归方程( $y_7, y_8$ )为

$$y_7 = -7543.4x_7 + 2919.6;$$

$$y_8 = -8067.9x_8 + 3029.8。$$

由此可知,面积相同的织物随含水率增加电阻减小,这是由于水具有导电性能,当织物的含水率越大,润湿效果越好,表面的水分越多,织物的导电效果越好,所测量的电阻越小。

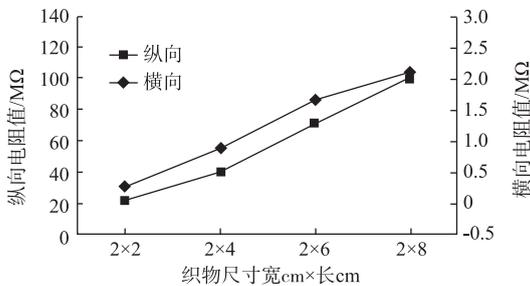


图2 织物干态电阻变化趋势

Fig.2 Changing trend of dry resistance of fabrics

## 2.2 织物湿态电阻分析

### 2.2.1 含水量对电阻的影响

织物含水率与电阻的关系如图3所示。

由图3中不同织物含水率分别为20%,30%,40%时的横、纵向电阻,推出其横、纵向回归方程。

其中:2 cm × 4 cm 织物的横、纵向电阻回归方

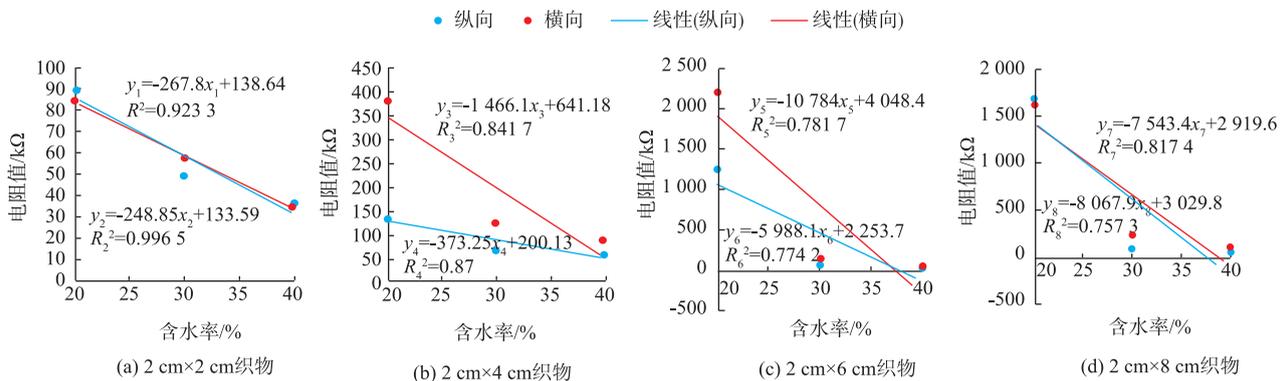


图3 不同织物含水率与电阻的关系

Fig.3 Relationship between moisture content and resistance of different fabrics

### 2.2.2 干、湿态织物横、纵向电阻比较

由图3(a)可知,2 cm × 2 cm 织物润湿后,20% 含水率时织物纵向电阻比横向大4.87 kΩ,30% 含水率时织物纵向电阻比横向大7.84 kΩ,40% 含水率时织物纵向电阻比横向大1.08 kΩ。浸湿后的2 cm × 2 cm 织物横、纵向织物电阻差与干态时的22 320 kΩ 相比较小。

由图3(b)可知,2 cm × 4cm 织物润湿后,20% 含水率时织物纵向电阻比横向大250.95 kΩ,30% 含水率时织物纵向电阻比横向大250.95 kΩ,40% 含水率时织物纵向电阻比横向大56.45 kΩ,40% 含水率时织物纵向电阻比横向大32.3 kΩ。浸湿后的2 cm × 4 cm 织物横、纵向织物电阻差与干态时的39 920 kΩ 相比十分小。

由图3(c)可知,2 cm × 6cm 织物润湿后,20% 含水率时织物纵向电阻比横向大952.93 kΩ,30% 含水率时织物纵向电阻比横向大71.45 kΩ,40% 含水率时织物纵向电阻比横向大18.79 kΩ。浸湿后的2 cm × 6 cm 织物横、纵向织物电阻差与干态时的69 600 kΩ 相比十分小。

由图3(d)可知,2 cm × 8cm 织物润湿后,20% 含水率时织物纵向电阻比横向大63.18 kΩ,30% 含水率时织物纵向电阻比横向大79.95 kΩ,40% 含水率时织物纵向电阻比横向大41.72 kΩ。浸湿后的2 cm × 8 cm 织物横、纵向织物电阻差值与干态时的98 640 kΩ 相比十分小。

由图2和图3对比可知,随着含水率的增加,织

物的横、纵向电阻均呈下降趋势,并且织物的横、纵向电阻趋于相近。这是由于在干态时织物的导电是通过纱线,只是横、纵向纱线连接的方式不同;而在湿态时,由于水分润湿纱线,因此纱线间的连接对于电阻的影响较小,主要受表面水分导电效果影响。同时,随着织物含水率的增加,织物表面的水分越来越多,致使湿态时织物横、纵向电阻差值变小,并随着含水率的增加,差值越来越小,且含水率在40%时,横、纵向电阻几乎相同。

**2.2.3 织物尺寸对电阻的影响** 含水率为20%,30%,40%时不同尺寸织物的电阻如图4所示。

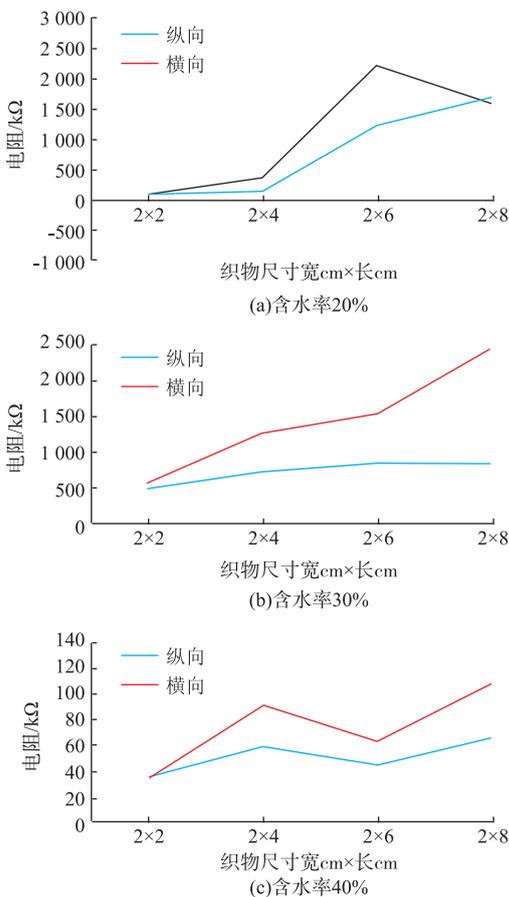


图4 织物尺寸与电阻的关系

Fig. 4 Correlation between fabric size and resistance

1)由图4(a)可知,织物在含水率为20%时,2 cm × 2 cm 织物电阻纵向大于横向,但相差较小,为4.87 kΩ;2 cm × 4 cm 和2 cm × 6 cm 织物电阻均横向大于纵向;2 cm × 8 cm 织物电阻纵向大于横向。由于织物含水率20%时相对含水较少,造成不同织物表面水分分布的均匀度并不完全相同,因此横、纵向电阻大小无明显规律。

此外,由图4(a)可知,在含水率均为20%时,织物纵向一定的情况下,织物宽度不变,随着长度的增加,织物的电阻呈增加趋势;对于织物横向而

言,在含水率均为20%的情况下,由于电阻与长度呈正相关,所以织物宽度不变时,随着织物长度的增加,电阻总体呈增加的趋势。然而2 cm × 8 cm 织物的横向电阻小于2 cm × 6 cm 织物的横向电阻,可能是由于在20%含水率的情况下,织物中纱线的润湿并不均匀,测量2 cm × 8 cm 织物时测试夹所夹位置可能为润湿较完全的纱线,因此导致其电阻较小。

2)由图4(b)可知,在织物含水率为30%的情况下,4种织物的横向电阻均大于纵向,且随着织物面积的增大,横、纵向电阻差越大,差值依次为7.84,56.45,71.45,162.77 kΩ。同时,随着织物面积的增大,横、纵向电阻均有增加的趋势。由此可知,在织物含水率相同,宽度不变的情况下,纵向电阻随着长度的增加而增大,这是由于电阻与长度成正比,长度增大,电阻增加。

3)由图4(c)可知,在含水率为40%的情况下,2 cm × 2 cm 织物的电阻纵向大于横向,差值为1.08 kΩ;2 cm × 4 cm,2 cm × 6 cm,2 cm × 8 cm 织物的电阻横向大于纵向,差值依次为32.3,18.79,41.72 kΩ,且总体趋势为:电阻随着织物面积的增大而增大。2 cm × 2 cm 纵向电阻与横向电阻极其相近,而其他面积织物的电阻横向大于纵向,这可能是因为2 cm × 2 cm 织物面积较小,40%的含水率几乎将织物浸湿,无论横向还是纵向,表面水分的导电效果远超出纱线导电效果,因此其横、纵向电阻相近。而其他织物由于面积较大,在40%含水率时,表面并非完全有水分覆盖,因此导电即有水的因素,也有纱线影响,从而使得横向电阻大于纵向电阻。

织物在含水率40%的情况下,宽度一定,随着长度增加,电阻总体趋势为增加。而2 cm × 4 cm 织物出现了异常,可能是实验过程中织物湿度发生了变化或者是所测位置有纱线断裂等原因导致。

### 3 结语

对罗纹织物进行了干态与湿态的电阻测试后发现:

1)在干态时,罗纹织物的电阻与纱线连接方式有关,织物纵向为线圈间搭接相连,横向为同一根纱线编织而成,由于搭接的情况会造成电流通过受阻,因此织物纵向电阻大于横向电阻。同时,由于电阻与长度成正比,因此对于宽度相同的织物,长度越长,织物的电阻越大。

2)在湿态时,分别对织物进行3种含水率的测

试,发现织物在润湿后不再是单一的纱线进行导电,同时有表面的水分导电,因此润湿后的电阻均大幅度小于干态时的电阻,且含水率越高,电阻越小,这表明了该纱线润湿度越大时,其电阻越小。同时,由于在湿态时电流不再是单一的纱线连接,添加了水的因素,织物由纵向电阻大于横向电阻变成横向电阻大于纵向电阻,且随着含水率增加,二者之间的差值减小。

### 参考文献:

- [1] KIMURA H, KOBAYASHI H, AWABATA K, et al. Development of an unobtrusive vital signs detection system using conductive fiber sensors [J]. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004 (1): 307-312.
- [2] 李雯,庄勤亮. 导电纤维及其智能纺织品的发展现状 [J]. 产业用纺织品, 2003, 21(8): 1-3.
- LI Wen, ZHUANG Qinliang. Development of electrically conductive fibers and its smart textiles [J]. Technical Textiles, 2003, 21(8): 1-3. (in Chinese)
- [3] 杨玲玲,张西正,胡家庆,等. 柔性可穿戴生理监测设备的研究与应用现状 [J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(5): 118-122, 128.
- YANG Lingling, ZHANG Xizheng, HU Jiaqing, et al. Research progress and application of wearable health monitoring items based on soft sensor technology [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(5): 118-122, 128. (in Chinese)
- [4] 张亮. 导电纤维的国内外研发现状及知识产权保护方向 [J]. 中国纤检, 2012(15): 28-31.
- ZHANG Liang. Domestic and overseas development status and the direction of intellectual property protection of the conductive fibers [J]. China Fiber Inspection, 2012(15): 28-31. (in Chinese)
- [5] XUE T, ZHANG B H, MENG J G, et al. Preparation and characterization of PANI/PET composite conduction fabric [J]. Journal of Donghua University, 2014, 31(3): 330-334.
- [6] 薛露云. 不锈钢导电针织物的结构与性能研究 [D]. 天津:天津工业大学, 2012.
- [7] 王金凤. 导电针织柔性传感器的电学性能及内衣压力测试研究 [D]. 上海:东华大学, 2013.
- [8] 陆慧娟. 织物芯吸性能的电学法测试的研究 [D]. 上海:东华大学, 2005.
- [9] 段亚峰,吴惠英,潘葵. 不锈钢纤维及其应用 [J]. 产业用纺织品, 2008(12): 1-7.
- DUAN Yafeng, WU Huiying, PAN Kui. Stainless steel fiber and its application [J]. Technical Textiles, 2008(12): 1-7. (in Chinese)
- [10] 李丽文. 不锈钢纤维导电针织物的性能和应用 [D]. 天津:天津工业大学, 2010.
- [11] 蔡倩文,王金凤,陈慰来. 纬编针织柔性传感器结构及导电性能研究 [J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 24-27.
- CAI Qianwen, WANG Jinfen, CHEN Weilai. Research on the structure and electrical properties of weft-knitted flexible sensors [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(6): 24-27. (in Chinese)

(责任编辑:卢杰)