

不锈钢/涤纶纤维导电针织物的传感灵敏度

李煜天¹, 缪旭红^{*2}

(1. 香港理工大学 纺织及制衣学系,香港;2. 江南大学 教育部针织技术工程研究中心,江苏 无锡 214122)

摘 要:选用不锈钢纤维与涤纶混合编织的导电针织物,测试纬平、1+1 罗纹和 2+2 罗纹组织针织物反复拉伸变化与导电灵敏度之间的关系,并分析针织物的导电灵敏度及传感性能。结果表明:在拉伸变化时,随着伸长率的增大不锈钢/涤纶针织物的导电灵敏度不断增大,纵向拉伸时电信号灵敏度优于横向拉伸时;加入氨纶的不锈钢/涤纶导电针织物,其导电灵敏度大于普通不锈钢/涤纶导电针织物的,3 组不锈钢/涤纶导电针织物中,纬平结构针织物的灵敏度高于 1+1 罗纹组织,2+2 罗纹组织灵敏度最差;同一种纬平组织下,导电针织物密度越大,电信号灵敏度越低;不同速率下,1+1 罗纹组织织物的电信号相对较稳定,优于 2+2 罗纹组织和纬平组织织物。

关键词: 不锈钢/涤纶纤维;导电针织物;应变;灵敏度

中图分类号:TS 186.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2016)05-0450-05

Investigation of Conductive Sensitivity of Fabric Knitted by Stainless Steel Fiber

LI Yutian¹, MIAO Xuhong^{*2}

(1. The Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract:To investigate the conductivity and sensitivity of fabric knitted by stainless steel fiber and polyester, the relationship between repeated tensile and conductive sensitivity were studied. Fabric structures employed in this research were weft plain, 1+1 rib weaves and 2+2 rib weaves. It was found that with increasing elongation, the conductive sensitivity of stainless steel knitted fabric decreased continuously. Electrical signal sensitivity of longitudinal tensile was better than transverse tensile. The conductive sensitivity of stainless steel/polyester knitted fabric blended with spandex was higher than the one without spandex. Weft knitted fabric has the best conductive sensitivity and 2+2 rib weaves tissue was the worst one among the three employed fabric structures. With the same kind of weft flat organization, the higher the conductive fabric density, the lower the electrical signal sensitivity. Under different elongation speed, the electrical signals of 1+1 rib fabric was relatively stable and was better than the 2+2 rib weaves and weft flat organization fabrics.

Key words:stainless steel fiber,conductive knitted fabric,strain,sensibility

随着智能装备的不断发展,可穿戴设备正在逐渐代替传统的硬件设备,柔性可穿戴织物传感器除具备基本功能之外,还具有可弯折、水洗、拉伸等特点,因此在智能装备上拥有得天独厚的优势。针织物因其特殊的结构特点,具有舒适、柔软性及弹力贴身等优良结构性能,越来越多地用于研发制备柔性传感器。目前,关于制备柔性传感器方面,王金

凤等^[1]主要利用镀银纤维制得导电针织物,并建立等效电阻的电阻六角模型,分析得出线密度较大的镀银纤维柔性传感器表现出较好的导电性;不锈钢微丝和铜丝的单丝导电性能良好。杨斌等^[2]同样利用不锈钢长丝制备了单针编链组织、纬平组织、1+1罗纹组织 3 种导电织物,并得出纬平组织和罗纹组织电阻响应灵敏度相对较好。然而实验中考

收稿日期:2016-06-28; 修订日期:2016-09-08。

作者简介:李煜天(1992—),男,硕士研究生。

* 通信作者:缪旭红(1971—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为纺织品开发、纺织品结构与性能。

Email:miaoxuhong@163.com

考虑其他影响因素不足,样本较少。为此,文中首先选择了不锈钢纤维作为柔性针织物导电丝,与涤纶进行混合编织,组成纬平、1+1 罗纹、2+2 罗纹 3 组不同结构的针织物(文中称之为普通不锈钢/涤纶导电针织物),并且每组中加入氨纶丝混合编织进行拉伸性能测试;通过控制针织物组织结构、材质、密度以及横向拉伸速率下的电阻变化反映传感灵敏度的变化趋势,为柔性织物传感器的制作提供参考。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

1.1.1 原料 直径为 35 μm 的 316L 型不锈钢纤维(断裂延伸率为 35%,电阻率为 $6.5 \times 10^2 \Omega \cdot \text{mm}$,线密度/孔数为 72.5 dtex/39 f,捻度为 120 捻/m),河北奥德源金属制品有限公司生产;普通涤纶(线密度/孔数为 80 dtex/36 f),浙江桐昆化纤集团有限公司生产;氨纶长丝(线密度为 45 dtex),江苏双良氨纶有限公司生产。

1.1.2 仪器 Stoll CMS 530 型电脑横机(针型为 3.5.2),德国斯托尔公司制造;HD026H-50 0 型多功能电子织物强力仪,南通宏大实验仪器有限公司制造;VC890D 数字万用表,胜利仪器有限公司制造。

1.2 方法

1.2.1 样布制备 根据实验设计的要求,利用不锈钢纤维与涤纶混合编织的导电针织物和氨纶长丝分别组合编织,设计出 6 组不同组织结构的织物作为导电针织物的基础样布。文中选用普通涤纶丝

与不锈钢纤维混合编织,以提高其织造性和适用性,加入氨纶丝可加大针织物伸缩回复性。

导电针织物样布结构如图 1 所示。每个样布尺寸为 20 cm × 10 cm,全部用不锈钢纤维与涤纶混合编织。每组样布编号为 1[#]~6[#],织物样布参数见表 1。

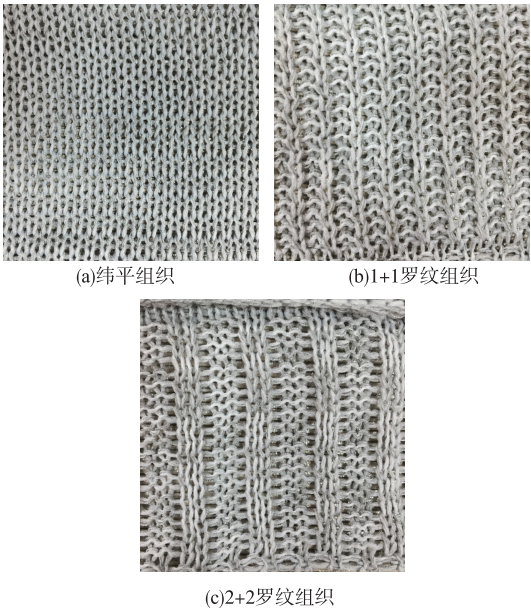


图 1 导电针织物样布的结构

Fig.1 Conductive fabric samples

1.2.2 样布测试 选用强力仪固定样布中间 5 cm,两端夹窄细铜片,并连接数字万用表,采用绝缘材料包裹其他部分,选取试样中间 5 cm 可避免边缘的卷曲对实验结果的影响,由于其余 5 cm 并不在测量范围内,不产生伸缩回复性,同样条件下,对实验本身影响不大。

表 1 纬编针织物样品参数表
Tab.1 Specification parameters of fabric

试 样	织物结构	其他部分	横密/(纵行/dm)	纵密/(横列/dm)	厚度/mm
1 [#]	纬平	涤纶	42	46	0.51
2 [#] -1	纬平	涤纶/氨纶	44	52	0.49
2 [#] -2			45	54	0.50
2 [#] -3			48	60	0.52
3 [#]	1+1 罗纹	涤纶	38	40	0.67
4 [#]	1+1 罗纹	涤纶/氨纶	40	44	0.65
5 [#]	2+2 罗纹	涤纶	36	42	0.83
6 [#]	2+2 罗纹	涤纶/氨纶	42	46	0.81

2 导电针织物传感性能指标

灵敏度是表征传感器静态特性的主要参数,因此导电织物传感性能可用灵敏度指标进行评价。

假定导电针织物为均匀导体,金属导体在应力作用下发生机械变形时,其电阻值将对应地发生变化,这种现象称为金属导体的电阻-应变效应。

电信号变化的灵敏度系数 K 可通过电阻变化

率($\Delta R/R$)和应变 $\varepsilon(\Delta L/L)$ 计算^[2]：

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}$$

式中： R 为材料拉伸后的电阻； R_0 为初始电阻； ε 为导电针织物的伸长率。 K 值越大则电信号灵敏度越大。同时，对于导电针织物而言，应变拉伸越大，电阻率变化越大^[3]。

3 导电针织物的拉伸测试

根据 FZ/T 70006—2004(针织物拉伸弹性回复率试验方法) 测试标准，用电子织物强力仪对导电针织物进行拉伸实验；并用数字万用表实时监测导电织物的电阻变化^[4]。

当原料相同、组织结构不同的基础样布在相同的工艺条件下织成导电织物后，保持实验室为恒温(25 ± 2)℃，恒湿在(60 ± 3)%。拉伸实验示意如图 2 所示。

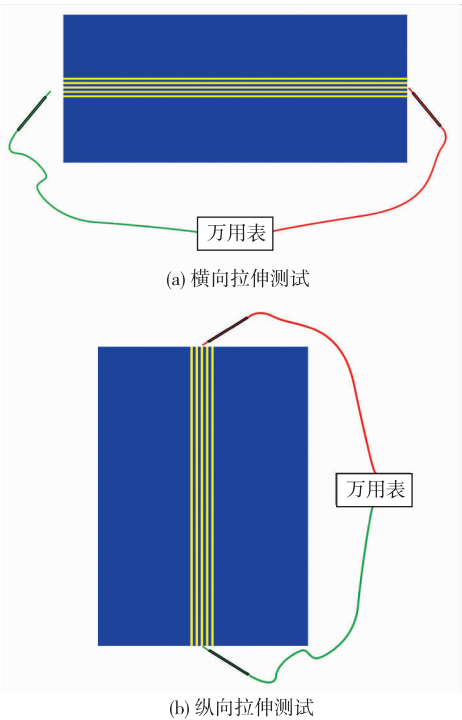


图 2 导电针织物拉伸实验

Fig. 2 Tensile test of conductive fabric

3.1 不同组织结构织物拉伸测试

应力拉伸时，强力仪对导电针织物加载 0.5 N，拉伸位移为 20 mm，拉伸速率为 100 mm/min，数字万用表每间隔 1 s 读取 10 个数，每组进行 20 次应力拉伸循环，每次实验在应变为 5% 时读取数据，直到样布拉伸至 35% 以后，测量导电织物电阻的最大值和最小值^[5]。

图 3 为不同结构导电针织物横向和纵向在应力拉伸时，灵敏度的变化情况。

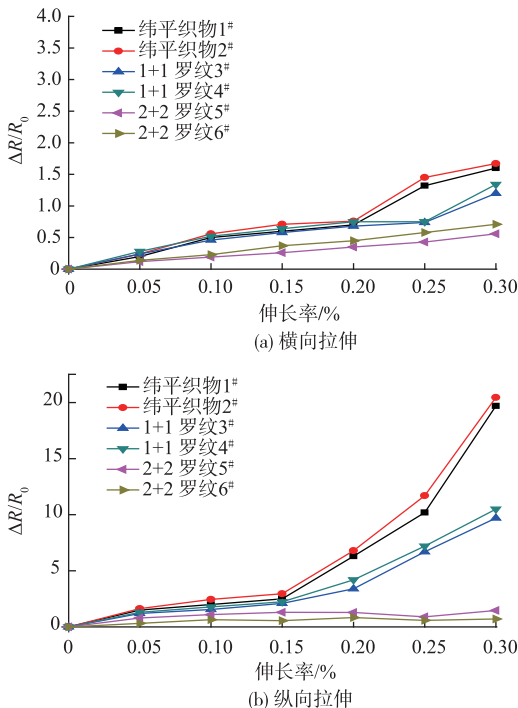


图 3 不同结构织物导电灵敏度与伸长率变化

Fig. 3 Relationship between conductive sensitivity and elongation of fabric with different structure

由图 3 可以看出，在横、纵向拉伸时，随着伸长率不断增大，织物导电灵敏度系数相应增大。比较图 3(a) 和图 3(b) 可以看出，横向拉伸变化时，电阻变化率最高数值约为 1.5；而纵向应力拉伸时，电阻变化率变化较大，最高峰值达到 20。因此，在纵向拉伸时，导电织物灵敏度高于同等条件下横向拉伸时。在织物受到纵向拉伸时，针织线圈和线圈间相互接触并发生位移变化，产生较小位移拉伸量，从而导致纱线的拉伸和灵敏度的显著变化；在横向应力拉伸时，导电织物更易伸长，并导致拉伸时变化延迟。因此，在纵向拉伸时电阻变化更大，相应地灵敏度系数也更大，表面织物灵敏性特征更显著。

由图 3 还可以看出，不同组织导电织物受应变拉伸影响，纬平针织物和 1+1 罗纹针织物拉伸时电阻的变化范围较大，即 K 较大，电信号变化的灵敏度较高。另外在拉伸时，线圈会相应地产生位移而伸长或是纱线本身伸长，从而使电阻值变小，所以纬平和 1+1 罗纹织物受拉后电阻的变化范围较大，灵敏度也较好。

图 3 同一组织中，加入氨纶的不锈钢/涤纶导电针织物电信号灵敏度优于普通不锈钢/涤纶纤维导电针织物，加入氨纶的导电织物伸缩回复性增强，使得线圈之间接触点减少，整个织物电阻变化量减小，电信号灵敏度提高。

3.2 不同密度下织物拉伸测试

选择 2[#]-1, 2[#]-2 和 2[#]-3 共 3 种加入氨纶的不同密度纬平导电针织物, 分别进行同样的拉伸测试, 共计 20 次拉伸测试, 每次实验在应变为 5% 时读取数据, 直到样布拉伸至 35%, 测得不同密度织物导电灵敏度与伸长率的变化如图 4 所示^[6]。

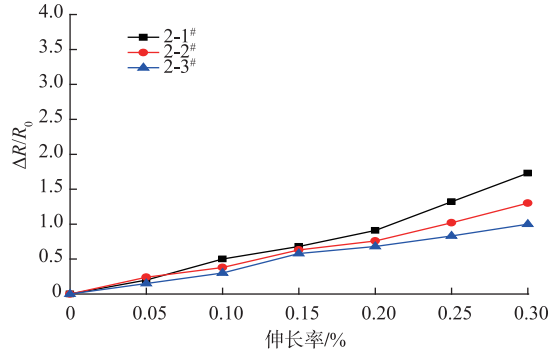


图 4 不同密度织物导电灵敏度与伸长率变化
Fig. 4 Relationship between conductive sensitivity and elongation of fabric with different density

由织物的组织结构分析可知, 密度越大, 织物拉伸时电信号灵敏度越小。导电织物通过线圈间相互接触进行传感, 在施加电压后, 绝大多数电流选择较小长度的纱线传导, 所以在拉伸过程中, 整个织物的电阻变化量是很小的, 即灵敏度变化弱。

3.3 不同速率下织物拉伸测试

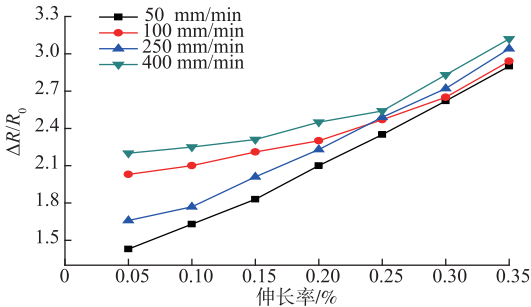
根据文献[7]的方法, 对 1[#], 3[#], 5[#]导电织物依次采用 50, 100, 250 和 400 mm/min 4 种速率进行拉伸实验。因横向拉伸时为服用性时通常受力方向, 故采用横向拉伸测试。文中将拉伸速率最大 400 mm/min 时的拉伸力定义为瞬间的拉伸力^[8], 测得不同速率下织物导电灵敏度变化如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 3 种组织的织物在不同的拉伸速率下均表现出相似的趋势, 拉伸速率越大, 电阻变化率越大。观察 1[#]纬平针织物在不同速率下的导电灵敏度变化趋势, 在速率达到 400 mm/min 时, 导电灵敏度变化量均大于其他 3 种速率下的织物, 在织物瞬间拉伸时, 电阻变化响应迟缓, 但电信号灵敏度呈较高趋势。由图 5 分析得出, 在相同织物下, 拉伸速率越大, 导电灵敏度越高。在 100 mm/min 和 400 mm/min 拉伸速率时, 灵敏度变化趋势相似^[9]。

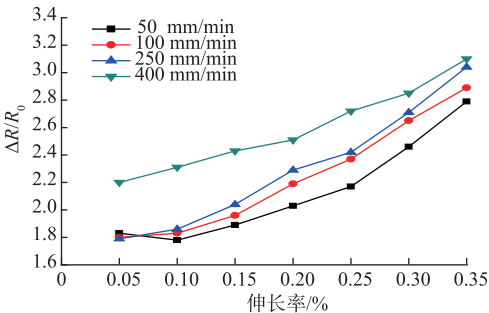
图 5(a) 和图 5(b) 为纬平织物和 1 + 1 罗纹织物不同速率下的电信号灵敏度变化。当速度为 400 mm/min 时, 电信号灵敏度最高; 在一定拉伸速率下, 伸长率相同时, 拉伸速率越快, 电信号灵敏度越大。通过灵敏度系数 K 可以计算出 1[#] 织物斜率最大和最小差值为 0.396, 而 3[#] 织物的斜率差值为

0.12, 变化差值相对 1[#] 织物要小, 说明速度对 1[#] 纬平织物的灵敏度变化影响较大, 而对 3[#] 1 + 1 罗纹织物的影响较小。

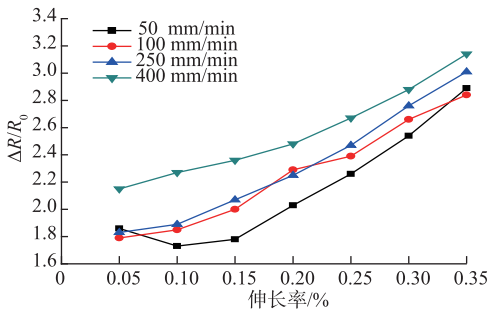
由图 5 可以看出, 3[#] 和 5[#] 的灵敏度变化趋势相似, 但 1 + 1 罗纹的斜率差值为 0.13, 2 + 2 罗纹试样的差值为 0.15。因此, 综合 6 种织物, 1 + 1 罗纹织物在不同速度下的导电灵敏度相对比较稳定。速度对导电针织物灵敏度变化的原因可能主要是因为结构的不同引起织物弹性回复率的不同^[10]。



(a) 1[#] 织物不同速率下织物导电灵敏度变化



(b) 3[#] 织物不同速率下织物导电灵敏度变化



(c) 5[#] 织物不同速率下织物导电灵敏度变化

图 5 不同速率下织物的导电灵敏度变化
Fig. 5 Relationship between conductive sensitivity and elongation of fabric with different density

4 结 语

通过测试 3 组不锈钢/涤纶导电针织物在应力拉伸时, 不同组织结构、速率以及密度下电阻的变化情况, 分析传感灵敏度的变化趋势, 并寻找影响导电针织物传感性能的主要因素, 并得出结论:

1) 3 组不锈钢/涤纶导电织物在拉伸力作用下

的信号灵敏度随着伸长率的增加而逐渐增大。3 组不锈钢/涤纶导电针织物中, 纬平结构针织物的灵敏度高于 1 + 1 罗纹织物, 2 + 2 罗纹组织灵敏度最差。结构较松的不锈钢/涤纶导电纬平组织或 1 + 1 罗纹组织织物, 具有良好的传感导电性能, 应用于柔性导电织物传感器中应具有比较好的优势。

2) 加入氨纶的不锈钢/涤纶导电针织物, 导电灵敏度比普通不锈钢/涤纶导电针织物变化大, 6 种试样中灵敏度最高的为 2[#]。加入氨纶的普通不锈钢/涤纶导电纬平针织物, 灵敏度最低的为 2 + 2 罗纹不锈钢/涤纶导电针织物。实验结果表明, 加入氨纶的不锈钢/涤纶导电针织物导电灵敏度优于普通不锈钢/涤纶导电针织物, 氨纶对提高导电织物传感灵敏度有一定影响。在相同加入氨纶的纬平组织结构下, 不锈钢/涤纶导电针织物密度越大, 传感灵敏度系数越小, 且密度较大的导电织物, 电信号灵敏度相对较低。

3) 速度对纬平针织物的灵敏度变化影响较大, 对 1 + 1 罗纹织物的影响最小, 且不同速度下拉伸时灵敏度相对稳定, 其次是 2 + 2 罗纹织物电阻变化介于两者之间。速度对导电针织物灵敏度变化的影响主要由于织物弹性回复性的不同引起的。在不同方向拉伸时, 纵向拉伸时 3 组不锈钢/涤纶导电针织物的表现均好于横向拉伸, 表面织物灵敏性特征也更显著。

4) 不锈钢/涤纶纤维导电性能好, 所编织的织物传感灵敏度优良, 但在编织过程中易出现挑洞、浮线等问题, 过细的不锈钢纤维也会影响织物传感灵敏度。实际设计时, 应综合考虑不锈钢纤维的编织性、穿着舒适性和传感性等, 选择合适的不锈钢纤维。

参考文献:

[1] 王金凤, 龙海如. 线圈转移对导电弹性针织柔性传感器的电-力学性能影响 [J]. 纺织学报, 2013, 34 (7): 62- 68.

WANG Jinfeng, LONG Hairu. Effect of loop transfer on electro-mechanical properties of conductive elastic wearable knitted sensors [J]. Journal of Textile Research, 2013, 34 (7): 62- 68. (in Chinese)

[2] 杨斌, 陶肖明, 俞建勇. 不锈钢纤维织物的电阻与应变关系 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (1): 96-99. YANG Bin, TAO Xiaoming, YU Jianyong. A study on the relation between resistance and strain based on stainless steel fabric [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35 (1): 96-99. (in Chinese)

[3] 刘焘, 邹奉元. 涂碳纤维导电针织物的结构设计及其传感性能 [J]. 纺织学报, 2014, 35 (9): 31-35, 46. LIU Tao, ZOU Fengyuan. Structural design and sensing performance of conductive knitted fabrics of carbon coated fibers [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35 (9): 31-35, 46. (in Chinese)

[4] 蔡倩文, 王金凤, 陈慰来. 纬编针织柔性传感器结构及其导电性能 [J]. 纺织学报, 2016, 37 (6): 48-53. CAI Qianwen, WANG Jinfeng, CHEN Weilai. Structures and electrical properties of weft-knitted flexible sensors [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37 (6): 48-53. (in Chinese)

[5] 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.

[6] 张辉. 本征导电纤维集合体的电-力学性能及其作为应变、压力传感器的性能分析 [D]. 上海: 东华大学, 2006.

[7] 刘焘. 涂碳纤维导电针织物的传感性能研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.

[8] 章梦洁. 导电纤维功能性针织物的性能研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.

[9] 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, 7. MA Yanli, LIU Qian, LIU Wei. Research progress of flexible sensor for smart textiles [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34 (4): 1-3, 7. (in Chinese)

[10] 杨敏. ABS/不锈钢纤维复合材料导电特性研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015. (责任编辑: 邢宝妹)