

DOI: 10.19333/j.mfkj.2018060040304

导电纱线在针织柔性应变传感器上的应用进展

王晓雷 繆旭红 李煜天 RAJI Rafiu King
(江南大学 教育部针织技术工程研究中心 江苏 无锡 214122)

摘要:为了更好地将导电纱线应用于智能纺织品,综述了近年来导电纱线的制备及在针织柔性传感器领域的最新应用进展,分析了带有柔性应变传感系统的针织物实现商业化的可行性。介绍了导电纤维的导电性能,生产厂家;结合针织用纱的具体要求和柔性传感器的必要属性,对目前用于针织柔性传感器导电纱线的适用性进行了排序;就目前由导电纱线制备的针织柔性传感系统实现商业化提出关键性问题,并针对导电纱线存在的具体问题提出解决建议。文章对导电纱线在智能纺织品上大规模应用的发展趋势做出了综合预测。

关键词: 导电纱线; 针织; 柔性传感器; 智能纺织品

中图分类号: TS 182.6 文献标志码: A

Progress in application of conductive yarns to knitted flexible strain sensors

WANG Xiaolei, MIAO Xuhong, LI Yutian, RAJI Rafiu King
(Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education,
Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to better apply conductive yarns to smart textiles, the preparation of various conductive yarns in recent years and the latest developments in the field of knitted flexible sensors were reviewed. The feasibility of commercialization of knitted fabrics with flexible strain sensors was analyzed. Firstly, the conductive properties and manufacturers of the conductive yarns were introduced in the paper. Then, according to the requirements of knitted yarns and the necessary properties of flexible sensors, the applicability of the conductive yarns for knitting flexible sensors was ranked. Thirdly, the key issues for the overall commercialization of knitted flexible sensing systems currently made of conductive yarns are proposed, and better development directions for some specific problems of conductive yarns are pointed out. Finally, a comprehensive forecast of the development trend of large-scale application of conductive yarns on smart textiles is made.

Keywords: conductive yarns; knitting; flexible sensors; smart textiles

人们对纺织品的新需求催生了智能织物,智能纺织品具有的便捷、高效与特殊的新功能,使得生活简单化、理想化与智能化^[1-2]。采用导电纱线织制而成的织物,可以获得良好应变传感性能,是柔性传感器的主要制备方式之一,其中压力传感器以机织

物为主,拉伸应变传感器以针织物为主。相较于普通传感器,柔性传感器主要体现在柔性,即可弯曲与可折叠。针织物因其特殊的结构表现出柔软舒适、弹性贴身、灵活及便于衬入导电传感材料的特点,将其用作智能柔性传感器的研究载体,可同时在线检测使用者的多项生理特征指标。针织导电织物的电阻传感主要依靠导电纱线之间的接触电阻在受力变形时产生变化来实现^[3]。本文根据针织编织对导电纱线的要求,结合柔性应变传感器的必要属性,从有机和无机导电纱 2 个方面^[4],分析近年来各种导电纱线应用于针织柔性传感系统的可行性,阐述了针织柔性应变传感器导电纱线的最新研究进展,并对针织柔性应变传感器的总体商业化趋势做出预

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家轻工技术与工程一流学科自主课题资助(2018-28);江苏省产学研联合创新资金:前瞻性联合研究项目(BY2016022-34)

第一作者简介: 王晓雷,硕士生,主要研究方向为针织智能纺织品。通信作者: 繆旭红,教授, E-mail: miaoxuhong@163.com。

测,为导电纱线的研发以及在智能服装上的应用推广提供一定的思路。

1 导电纤维

目前,导电纱线生产方法有 2 种:一种是将具有导电能力的纤维直接纺成纱线^[5],另一种是将普通的不导电的纱线进行特殊处理,使其获得一定的导

电性能。导电纱线一般通过织造、刺绣、气刷喷涂等工艺将传感器与织物进行整合,形成针织物传感器部分,整个针织柔性传感系统由针织物传感器和外接的其他电学处理系统组成。

导电纤维是导电纱线的重要组成原料,导电纤维最重要的性能为导电性,导电纤维的电阻率和主要生产厂家的见表 1^[6-9]。

表 1 导电纤维的导电性和生产厂家

导电纤维种类	导电性(电阻率)	主要生产厂家的产品
金属导电纤维	接近纯金属($10^{-5} \sim 10^{-4} \Omega/\text{cm}$)	美国 BrunsWick: 不锈钢纤维 Brunsmet
碳系导电纤维	介于非金属和金属之间($10^{-4} \sim 10^{-3} \Omega/\text{cm}$)	美国 Dupont: 含碳黑的聚乙烯为芯; 锦纶 66 为鞘的导电复合纤维; 锦纶 BCF
导电高分子	持久,加碘聚乙炔可达室温下铜的水平($10^{-4} \Omega/\text{cm}$)	美国宾夕法尼亚大学: 导电聚乙炔; 英国 Durham 大学: 导电聚苯胺纤维
涂覆导电物质	良好,差于导电聚合物纤维,应用较广的包括碳黑涂敷型($10^3 \Omega/\text{cm}$); 化学电镀($10^{-4} \Omega/\text{cm}$); 缝隙式机械涂覆($10^{-3} \sim 10^{-2} \Omega/\text{cm}$)	美国 R V Gregory: 聚苯胺沉积纤维表面,并能有效渗入纤维内部; 日本帝人、德国 BASF: 炭黑型; 美国 Milliken: 气相沉积或溶液聚合,吡咯涂层,制成织物传感器; Rohm and Hass 公司: 化学镀层,锦纶表面镀银 X-Static; 东洋纺: 低温融态,金属皮层导电纤维; Statex 公司: Ex-Stat 非电解镀银
有机导电纤维		美国 Dupont: 含碳黑的聚乙烯为芯,锦纶 66 为鞘的锦纶 BCF 碳黑导电芯; 日本孟山都: 并列型 Utron; 钟纺公司: Belltron 锦纶; 尤尼吉卡: Megana III 导电纤维; 可乐丽: Kuracarbo; 东洋纺织: KE-9 导电纤维; 押田正博等: 含 CuI_2 的聚乙烯为芯,聚酯为鞘,制得导电涤纶; Rhone-poulence: CuS 导电层的 Rhodiastat 导电纤维; 帝人: 表面含 CuI_2 的 T-25
复合纺丝	较好,导电性与湿度几乎无关; 碳黑复合($10 \sim 10^2 \Omega/\text{cm}$); 金属化合物复合($10^3 \sim 10^4 \Omega/\text{cm}$)	

2 针织传感器用导电纱线

2.1 对导电纱线的要求

导电纱线用于针织柔性应变传感器,须从针织用纱要求和柔性传感器必要属性 2 方面进行考虑。为了保证针织过程的顺利进行以及产品的质量,针织用纱需具备:一定的强度和延伸性;捻度均匀且偏低;细度均匀,纱疵少;抗弯刚度低,柔软性好;表面光滑,摩擦因数小。

柔性应变传感器必要属性包括:弹性较好,可延伸以覆盖三维立体表面;可靠,具有一定的灵敏度和线性度,保证受到压力或拉伸力时,可以提供精准的测量。灵敏度和线性度主要体现在:当织物受到拉伸或压缩的较小应力时,产生较大的应变,并且纤维拉伸的应力/应变—电阻变化曲线中,存在至少一段较为稳定的线性变化区域,可以为传感器提供理论基础^[10-11]。稳定性是指经过反复使用或在恶劣的环境中,传感器依旧正常平稳运行,一般可通过导电纱线材料性能的机械疲劳程度和表面化学对电阻率的影响程度来评估在使用条件下柔性传感器的耐久性^[12];同时还需考虑价格,不能过多地影响产品整体售价。

2.2 金属导电纱线

金属导电纤维导电性能最优异,但是金属纤维

抱合困难^[13],易造成捻度不均匀,较难成圈或成圈歪斜。金属导电纤维最大的问题在于其力学性能:脆性较大,在弯纱成圈时,尤其在高速机器上编织时,由于脆性大易发生断裂,导致无法继续进行编织,织造性能较差。作为传感器,使用较多的有不锈钢纤维,铜纤维,其中比较成熟的为不锈钢纤维,已在工业生产中应用,由不锈钢纤维织成的织物电阻随温度的升高而降低,具有很好的纺织应用性能^[14]。从灵敏度和线性度 2 方面考虑,可以将金属纤维用于针织柔性传感器。

金属导电纤维传感器的稳定性不理想,在编织形成织物以后,铜纤维和不锈钢纤维织物随着洗涤次数的增加,线圈失去规则,变形较大,脆性的特性使得部分区域的导电丝出现断裂^[15],破坏串并联的等效电阻,对针织柔性传感器整体的导电性能影响较大,在进行设计与实验时应考虑形变和纱线断裂 2 种情况。

2.3 碳系导电纱线

碳系导电纤维导电性能略逊于金属纤维,碳系导电纱线的力学性能主要体现在:抗弯刚度高,柔软性差,较难弯纱成圈,或弯纱成圈后线圈易变形,不利于针织物的编织;缺乏韧性,即无法承受外力的冲击,编织过程中会受到各种外力,每根纱线在其所承受外力达到波峰值时,可能发生断纱现象,韧性越

低,断纱的几率也越大,织成的针织物外观风格越受影响,而且会显著降低织造效率;碳纤维模量高,织物表现硬挺,因为针织物一般贴身穿着,织物要柔软,这样人体才会感觉舒适,故舒适性欠佳。

作为柔性传感器,碳系导电纤维的高模量造成灵敏度较低,但其化学稳定性较好,不易氧化,环境适应性好^[7-8]。碳系导电纤维没有蠕变现象,织物不会因为随着实际的穿着时间的延长,发生缩水或者形变增加,尺寸稳定,因此碳系导电纱线能够较好满足传感器的稳定性^[16]。综合这 3 方面考虑,一般不将其用于应变传感器。

2.4 有机导电纱线

短切纤维混纺纱、有机-无机混纺纱线的导电物质呈非连续相;包覆纱和包芯纱的特殊结构使得织物在拉伸或压缩变形以后,线圈参数发生改变时,应变传感器应力/应变-电阻曲线的线性度较差,因此一般不将这些纱线用于柔性传感器。

有机导电纱线较无机导电纱线织造性能更佳,细分为导电高分子聚合物、涂覆导电物质、有机纤维为基材的复合型 3 类^[14]。其中利用导电高分子直接纺丝的工艺复杂,生产困难,另外高分子的部分单体有毒,成本高昂,性价比极低,因此已经较少使用^[17-18]。目前,应用较广且生产效率较高的是后 2 类^[19]。涂覆型导电纤维一般采用合成纤维作为基材,在纤维表面进行金属或碳涂层^[20],表面导电物质在多次使用和摩擦后易脱落,洗涤过程也可能导致导电纤维移位和摩擦,造成相邻导电纤维之间的短路,降低导电性能。金属涂层最大问题在于稳定性^[21-23]:常用的涂银导电纱线嵌入普通针织毛织物中,温度升高时,导电针织物的电阻显著降低,导电性能改变,这主要有 2 方面的原因:涂银导电纱线的电阻随温度升高而降低,重叠的导电纱线的物理接触由于加热而延伸,导致接触电阻降低^[24]。在未来的工业应用中,应该考虑温度对嵌入导电纱线的针织物电阻率的影响;另外与空气中的氧气发生反应,纤维表面泛黄发黑等^[25]。特殊的金属,如镀银导电纤维表面的金属银还会与空气或汗液中的硫化物进行反应。在导电聚合物对纤维进行涂层中,聚苯胺和聚吡咯是最常见的。导电聚合物涂层具有优异的黏着力和耐腐蚀性^[26],即拥有更好的稳定性。复合型有机导电纱线综合性能优良,值得关注的是金属复合导电纱线,如不锈钢、铜、银可用于制作复合型导电纱线,但是导电成分呈非连续相^[27-29],无法实现传感器电阻的线性变化,因此,无法应用于柔性传感器。

综合对比编织针织物时的难易程度以及与传感

器属性的符合程度,可以看出有机导电纱线整体好于无机导电纱线。根据针织传感器制备的适用性,对上述的各类导电纱线排序为:涂覆型>金属类>复合纺丝>碳系>导电聚合物。

3 针织传感器用导电纱线发展趋势

针织柔性传感器可通过感知织物的压力、拉伸或弯曲角度的改变,来监测导电部位的电阻或电容的变化^[30]。这种响应是可重复的,导电纱线可以成为制备轻便耐用柔性传感器技术的新平台。

3.1 针织传感器商业化的关键性问题

导电纱线制备柔性传感器的研究已在全球范围内开展,涉及纺织、医学、健身和运动、建筑、航天等诸多领域^[31]。若要进一步提高市场份额,须不断提高研究水平,掌握针织柔性传感器在未来商业市场需求中的主要发展趋势。一方面,稳定性普遍较差,尤其是目前应用较为广泛的涂覆型导电纱线,在智能织物中应用,使用数次后,传感器的性能便迅速下降,甚至消失,这会降低产品的寿命,致使产品的使用周期过短。另一方面,产品实现市场化的先决条件是具有一定的性价比,平衡需求与价格的关系,目前的价格普遍偏高,呈现出国内导电纱线售价高于国外,原料投入成本高于普通纱线,生产技术难度高于常规织物的现象,最终智能织物市场价较高,消费者难以接受,致使商品性价比低。因此,应以提高稳定性为基础,同时,力求降低生产成本,增加产品的性价比,为市场普及建立良好的基础,显然,这已成为了柔性传感器市场发展的总体趋势。

3.2 导电纱线的发展方向

目前,各类导电纱线在制备商业化柔性传感器方面均存在一定的问题,但未来的商业化应用是令人期待的。

金属导电纤维适用于对导电性能要求较高的领域,可以通过减小纱线的直径来改善其脆性,当细度达到一定级别时,纤维的韧性增加,可以满足针织用纱要求,这需要较为昂贵的成本,性价比较低,若想实现工业化普及,需要研究减小其直径的新方法,以提高性价比。

碳纤维可应用于纤维状设备^[32],适用于温度变化大的环境^[7],但须克服纤维低韧性和不良拉伸性,可以通过在纤维挤出和凝结过程中进行原位加捻,多重氧化石墨烯纤维来制备氧化石墨烯的超韧纱线,然后进行化学还原和干燥,这样处理以后碳纤维不但具有韧性和可拉伸性,而且电阻非常稳定^[33],但工艺较为繁杂,工业应用应简化其工艺流程。

导电高分子材料,主要是发展结构型导电聚合物。聚苯胺在导电态是不能熔融的,目前正在研究聚苯胺塑化后熔融纺丝的方法,用于纺织品较少^[34]。

涂覆型导电纱线发展前景较佳^[35],目前有涂清漆的处理方法,未来主要需要在温度处理和有效隔绝空气方面进行探索,以解决稳定性问题。

4 结束语

导电纤维和导电纱线承担了针织柔性传感器的重要角色,导电纱线在智能服装的广泛应用,是高端纺织业发展的方向。随着科研水平的持续提升,纺织导电纱线会迈向一个新的纪元。

参考文献:

- [1] NEVES AI, BOINTON TH, MELO LV, et al. Transparent conductive graphene textile fibers [J]. *Sci Rep*, 2015(5): 9866.
- [2] 万震, 李克让, 谢均. 新型智能纤维及其纺织品的研究进展 [J]. *印染*, 2012(12): 43-45.
- [3] 张团慧, 范萌琦, 王晋, 等. 导电材料的分类及其研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2016, 44(10): 22-23.
- [4] 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(8): 1-3.
- [5] 王显方. 有机导电纤维混纺纱开发实践 [J]. *合成材料老化与应用*, 2017, 46(6): 100-102.
- [6] 伏广伟, 贺显伟, 陈颖. 导电纤维与纺织品及其抗静电性能测试 [J]. *纺织导报*, 2007(6): 112-114.
- [7] 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.
- [8] 施楣梧. 纺织品用抗静电纤维、导电纤维的回顾和展望 [J]. *毛纺科技*, 2000, 28(6): 5-9.
- [9] 李杰, 史贤宁, 吴鹏飞, 等. 碳黑型复合导电纤维的发展 [J]. *非织造布*, 2008, 16(3): 34-38.
- [10] GRANT E, LIVINGSTON F, CRAVER M, et al. Characterizing conductive yarns for pressure sensors applications [C]// 2015 IEEE SENSORS. Busan South Korea: IEEE, 2016: 108-111.
- [11] 韩潇, 龙海如. 针织物柔性传感器的传感性能探讨 [J]. *纺织科技进展*, 2014(6): 12-14.
- [12] HANS de Vries, KUNIGUNDE H. Cherenack. Endurance behavior of conductive yarns [J]. *Microelectronics and Reliability*, 2014, 54(1): 327-330.
- [13] 郑少明, 赖祥辉, 林本术. 导电纤维的发展与应用 [J]. *中国纤检*, 2016(9): 143-144.
- [14] 张易, 刘荣清, 徐佐良. 导电纤维的性能、纺纱和产品开发 [J]. *上海纺织科技*, 2009(6): 20-21.
- [15] 蔡倩文. 基于导电纤维针织物的柔性传感器呼吸监测研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- [16] 周焯, 张莲莲, 周金香, 等. 导电纤维制备现状及其产业发展中面临的问题 [J]. *上海纺织科技*, 2016(5): 1-4.
- [17] JAVAD Foroughi, GEOFFREY M Spinks, GORDON GWallace. *Conducting Polymer Fibers* [M]. Singapore: Springer, 2015: 31.
- [18] 江家清. 高分子导电材料的新进展 [J]. *材料导报*, 1992(6): 54-58.
- [19] 葛明桥. 有机/无机复合法制备导电纤维及织物的研究 [C]//“润力杯”全国织造科技创新学术研讨会暨2013织造年会论文集. 北京: 中国纺织工程学会, 2013: 37-40.
- [20] 宫玉梅, 李轶文, 赵娜, 等. 多层结构镀银聚酯导电纤维的制备 [J]. *大连工业大学学报*, 2016(5): 353-356.
- [21] ALAGIRUSAMY Ramasamy, EICHHOFF Julian, GRIES Thomas, et al. Coating of conductive yarns for electro-textile applications [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2013, 104(3): 270-277.
- [22] 黄雅婷. 导电纱线在功能性纺织品中的应用: 三 [J]. *印染*, 2016(10): 53-54.
- [23] MUTSUMI Kimura. *Conductive Polymer Fibers for Sensor Devices* [M]. Singapore: Springer, 2015: 63-65.
- [24] DING JTF, TAO X, AU WM, et al. Temperature effect on the conductivity of knitted fabrics embedded with conducting yarns [J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(17): 1849-1857.
- [25] 王云燕. 智能服装柔性传感器的结构设计及性能研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [26] 黄雅婷. 导电纱线在功能性纺织品中的应用: 二 [J]. *印染*, 2016(9): 54-55.
- [27] 王鹏, 张瑜, 陈彦模. 复合型导电纤维的制备及其开发现状 [J]. *合成纤维*, 2004(S1): 18-20.
- [28] 肖远淑, 张晓超. 有机导电纤维复合纱的织物性能研究 [J]. *江苏丝绸*, 2012, 41(6): 37-39.
- [29] 黄雅婷. 导电纱线在功能性纺织品中的应用: 一 [J]. *印染*, 2016(8): 54-55.
- [30] KIMURA M. *Conductive Polymer Fibers for Sensor Devices* [M]. Singapore: Springer, 2015: 1-15.
- [31] TAKAMATSU S, IMAI T, YAMASHITA T, et al. Flexible fabric keyboard with conductive polymer-coated fibers [C]//IEEE Sensors Conference 2011. Busan South Korea: IEEE, 2011: 60-65.
- [32] PENG Huisheng. *Fiber-shaped Energy Harvesting and Storage Devices* [M]. Berlin: Springer, 2015: 7-38.
- [33] XIANG X, YANG Z, DI J, et al. In situ twisting for stabilizing and toughening conductive graphene yarns [J]. *Nanoscale*, 2017, 32(9): 11523-11527.
- [34] LIU Ying, PENG Xianghong, YE Hong, et al. Fabrication and properties of conductive chitosan/polypyrrole composite fibers [J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2015, 54(4): 411-415.
- [35] 金欣. 熔融共混和溶解: 涂覆型导电纤维研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2006.