

# 导电织物的制备及应用研究进展

蔡东荣,周 菁,段盼盼,张艳艳,付飞亚,刘向东

(浙江理工大学材料与纺织学院,杭州 310018)

**摘 要:** 导电织物是各种可穿戴电子设备的基础材料,除需具备良好的导电性能外,还要求具有良好的柔韧性、对弯曲伸展等大幅度变形持久稳定以及透气吸水等符合服装穿着需要的特点。近年来,导电织物的相关研究层出不穷,综合性能已经接近实用要求。文章首先对近五年的导电织物相关研究进行总结,根据导电填料种类,将导电织物归纳为聚合物基导电织物、金属基导电织物和碳基导电织物三类,并依此展开论述,指出导电织物研究中亟待解决的问题,主要包括提高导电织物的导电性、耐久性以及不破坏织物原有的特性等,最后对导电织物的应用进行了介绍,并对其前景进行展望。

**关键词:** 导电织物;可穿戴设备;聚合物基;金属基;碳基

**中图分类号:** TS116

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2018)11-0651-08

## 0 引 言

近几年,可穿戴电子设备的出现扩大了纺织品的应用范围。具有导电性的纺织面料引起了广泛关注,并在医用<sup>[1]</sup>、电磁屏蔽<sup>[2]</sup>、传感器<sup>[3]</sup>等领域得到应用。目前,导电织物已经成为学术研究的一个热点<sup>[4-5]</sup>。与纸张、塑料等材料相比,纺织面料具有更好的灵活性、透气性和耐磨性,可以进行弯曲、扭转、摩擦等力学运动,能够满足日常生活中人体运动的要求。在纺织面料的基础上发展的导电织物更适合可穿戴设备的开发,它可以广泛应用于多种领域。导电织物的制备技术含量高、潜在市场巨大,在纺织业中具有重要地位。但是,导电织物需要在不过多损坏织物的可伸展性和弯曲性的前提下获得满意的导电性,这对于导电织物的制备技术而言,是一较大挑战。近年来,导电织物的相关研究层出不穷,制备技术不断优化,综合性能已经接近实用要求<sup>[6-9]</sup>。在不久的将来,制备兼具导电性能和穿着舒适性能的导电织物必将在柔性可穿戴设备领域占有重要位置,导电织物制备技术的研发对于纺织业具有重要

的战略价值。

本文阐述了基于不同导电填料的导电织物的相关研究,首先将导电织物归纳为聚合物基导电织物、金属基导电织物和碳基导电织物三类,并就这三类导电织物的性能展开论述,其次对导电织物的应用进行了举例,最后对其前景进行了展望。

## 1 导电织物的分类和性能

导电织物作为一种新兴的纺织品在许多领域获得应用。随着导电材料的发展,导电织物的种类不断增多,而且性能也不断地提高,根据其增加的导电性组分,导电织物可以归纳为聚合物基导电织物、金属基导电织物和碳基导电织物三类。

### 1.1 聚合物基导电织物

自从白川英树发现导电聚合物以来,导电高分子材料快速发展起来。导电聚合物是由具有共轭 $\pi$ 键的聚合物经过化学或电化学掺杂形成。导电聚合物除了具有高分子聚合物一般的结构特点外,还含有一价的对阴离子(P型掺杂)或对阳离子(N型掺杂)。根据不同的掺杂效果,导电高分子的电导率可

以在一定的范围内调控,其电导率可以在绝缘体、半导体、金属态较宽的范围里变化,这是目前其他材料无法比拟的,因此导电聚合物在许多领域具有很大的应用潜力。天然导电聚合物(ICPS),如聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)、聚噻吩(Pth)等都是应用比较广泛的导电聚合物。由于耐氧性能和加工性能的提高,这种材料变得更加实用。导电聚合物因其独

特的电学、光学和力学性能,在导电织物领域的研究日益增多。表1列出了一些导电聚合物的导电性能和稳定性<sup>[10]</sup>,考虑到导电聚合物与织物的粘合性、导电性和可加工性等因素,在纺织品加工领域,聚苯胺、聚吡咯和聚(3,4-乙撑二氧噻吩)是目前研究最多的导电聚合物,因此本文主要介绍这三种导电聚合物用于导电织物的制备,其结构式如图1<sup>[11]</sup>。

表1 不同导电聚合物电导率和稳定性

性能	聚合物					
	聚乙炔	聚吡咯	聚噻吩	聚苯撑	聚(3,4-乙撑二氧噻吩)	聚苯胺
电导率/(S·cm <sup>-1</sup> )	10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10
稳定性	差	好	好	差	好	好

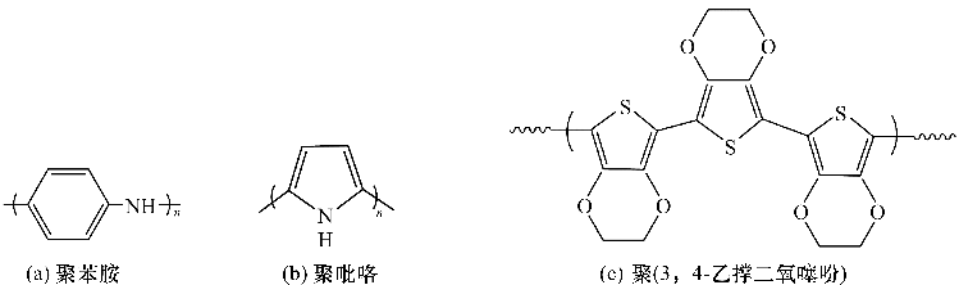


图1 三种导电聚合物的结构式

在所有导电聚合物当中,聚苯胺制备条件简单、化学稳定性相对较好、绿色无污染、电导率理想,在储能、电磁屏蔽等领域应用得到了深入的研究<sup>[12]</sup>。作为一种新兴的有机材料,聚苯胺在纺织品领域同样引起了研究者的兴趣<sup>[13]</sup>,为导电织物的制备率先开启了帷幕。国内外有许多学者利用聚苯胺制备导电性能良好的织物,这种织物在电磁屏蔽、静电防护等领域具有广泛的应用。目前,比较常用的制备方法有两种:一种是涂层法,将聚苯胺分散到有机高分子中做成涂层后再涂覆到织物表面;另一种是通过原位聚合法在织物表面直接生成聚苯胺,再利用不同的掺杂方式使聚苯胺均匀附在织物表面<sup>[14]</sup>。刘元军等<sup>[15]</sup>以锦纶织物为基底,苯胺为单体,采用原位聚合法制备导电织物。在他们的实验中对氧化剂浓度、种类等进行探讨,开发出了兼备导电性和吸波作用的复合材料。这种材料在吸波材料方面具有很好的应用前景。原位聚合法工艺简单,对织物的服用性能破坏很小,但是导电性能低,并且疲劳性能不好。Alamer<sup>[16]</sup>用聚苯胺滴注法制备导电棉织物,在其中加入一种极性溶剂(二甲基亚砷),以提高其电导率;他采用传统的“浸干法”,将聚苯胺包覆在棉织物纤维表面。滴注法可以通过控制掺杂剂的浓度来调节导电织物的导电性能,得到导电性较好的织物。Tissera等<sup>[17]</sup>采用一种简单的非均相聚合方法,将

平均纤维直径为40~75 nm的聚苯胺(PANI)纳米纤维接枝到棉织物上,得到的织物电导率可以达到2.6 S/cm。聚苯胺有电导率可调、成本低、环境稳定性好、制备简易等优点,随着研究的不断深入,将聚苯胺整合到织物上,已经在防电磁辐射、防静电等方面具有广泛应用<sup>[18]</sup>。

导电高分子聚吡咯(PPy)以其良好的导电性、易合成性、生物相容性和环境稳定性,在导电复合材料中具有广泛应用。以织物为基底、PPy为填料的导电织物在电容器、电磁屏蔽方面具有很好的应用前景<sup>[19]</sup>。通过PPy制备导电织物主要有三种工艺,包括原位聚合、气相沉积法或电化学法。原位聚合是将织物浸泡到单体溶液一定时间,再添加氧化剂、掺杂剂。这种方法需要控制许多实验中的参数,比如浓度、反应温度、时间等。相比其他方法,这种方法操作简单,而且成本低,还可以进行大规模的操作,是目前比较主流的方法。武翔等<sup>[20]</sup>以吡咯为单体,对甲苯磺酸为掺杂剂,另外过硫酸铵为氧化剂,将织物浸泡到反应液中,制备得到了聚吡咯涂层导电织物,这种原位聚合法简单易行。对织物表面的聚吡咯进行了形态分析,另外测试了样品的力学性能,结果表明:样品导电性能良好,并且导电填料分布均匀;合成的聚吡咯也会渗透到织物内部,对导电性有一定的提高,同时又不会对织物力学性能造成

破坏;虽然聚吡咯对织物的一些特性没有很大的影响,但是在拉伸、弯曲等机械行为过程中涂层容易出现裂缝等情况,造成导电性的下降。董猛等<sup>[21]</sup>采用原位氧化聚合和磁控溅射技术,以涤纶织物为基底,制备了聚吡咯/Ag 导电涤纶织物。他们通过改变参数,总结出了最佳的单体、氧化剂之间的配比,并且制得的导电织物不破坏原来织物的一些柔软、透气等特性。Hao 等<sup>[22]</sup>通过在针织纤维素织物上原位聚合吡咯,得到具有良好导电性的聚吡咯(PPy)涂层针织物。他的实验流程如图2,经过原位聚合得到的导电织物,在织物表面可以形成导电涂层,根据导电涂层对机械的敏感性,可以应用于传感器领域。以聚吡咯为原料来制备导电织物具有很好的适用性,但是由于聚吡咯与织物的粘牢度较差,因此提高其耐用性是接下去的重点方向。

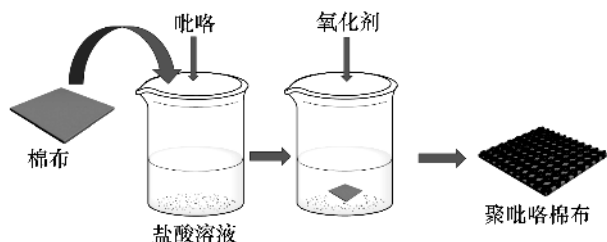


图2 PPy 涂层织物的制备流程示意

德国拜耳公司1988年首先合成出了聚噻吩的衍生物聚(3,4-乙撑二氧噻吩)(PEDOT),由于PEDOT在杂环的3和4位置上有一个二氧烷基桥联基团,可以降低能隙,因此其表现出优异的化学稳定性。与其他聚合物相比,PEDOT不仅电导率高,而且还有很好的热稳定性和化学稳定性等优点,因此已经成为新的研究热点之一。以PEDOT为填料的导电织物在电磁屏蔽、电致变色、超级电容器等都有很好的应用潜力<sup>[23-24]</sup>。管应凯等<sup>[25]</sup>采用原位聚合氧化法制备聚3,4-乙撑二氧噻吩/尼龙复合导电织物,以尼龙为基底,通过原位聚合法,制备的导电织物的导电层与基底之间粘附力强,不易脱落;但是得到的导电织物热稳定性有所下降,并且织物的机械性能有一定的下降,比如断裂强度和撕破强度都有所降低。PEDOT本身为不溶性聚合物,因而限制了其应用,随后,采用一种水溶性的高分子电解质聚苯乙烯磺酸(PSS)掺杂解决了PEDOT的加工问题。PEDOT:PSS悬浮液具有较高的导电性、电化学活性、环境稳定性和良好的加工性能,因此被广泛用于导电织物的制备。李昕等<sup>[26]</sup>在聚乙烯醇(PVA)织物表面通过原位聚合法覆盖上了致密的PEDOT:PSS导电层。这种PEDOT:PSS/PVA导

电织物的导电性很高,电导率达到360 S/cm;另外这种导电织物还具有电磁波吸收功能,可以应用于吸波材料。Choi等<sup>[27]</sup>利用浸泡法(图3),并用硫酸对PEDOT:PSS进行掺杂,在纱线上附上一层PEDOT:PSS导电层,电导率达到11.1 S/cm;对样品进行拉伸和耐洗测试,结果表明拉伸、清洗后的导电纱线仍然具有很好的导电性。通过浸泡方法,可以得到导电性良好的导电织物,并且具有很好的稳定性,在进行拉伸、弯曲、洗涤等机械行为后,导电性不会大幅度的下降,在实际生产中是较好的选择。PEDOT涂层织物具有许多优点,比如操作工艺简单、具有产业化的潜力、导电率高等,其仍然是当前研究热点之一。

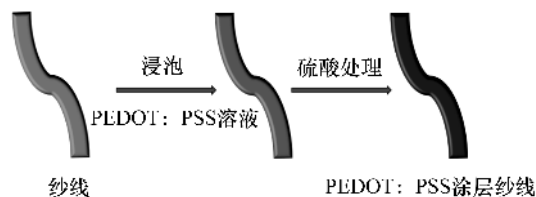


图3 导电PEDOT:PSS涂层纱线的制备过程

导电聚合物基导电织物具有良好的导电性,一些新型的研究成果甚至可以用来取代常用的金属。目前主要遇到的问题在于沉积在织物表面的导电聚合物分布不均匀,导致导电性的不稳定。此外,导电聚合物在织物表面的粘合度也是在实际使用中所遇到的问题,粘合度差会造成导电性随着时间的延长而下降。因此,为提高聚合物基导电织物的导电性和耐用性,需要选择合适的方法,比如超声波、等离子体等方法对织物进行预处理。

## 1.2 金属基导电织物

金属材料因其高导电性而被认为是导电织物填料的较好选择。金属基导电织物结合织物和金属的一些特性,在抗菌、紫外防护、形状记忆织物、储能等方面具有很广阔的应用前景<sup>[27]</sup>。目前其制备方法也多种多样。真空沉积技术是金属沉积技术中应用最广泛的技术之一,也是微加工过程中最常用的技术之一。溅射纳米材料方法可以直接在纤维的表面形成一层薄薄的金属层。然而,真空沉积和溅射技术有着巨大的缺点,如仪器昂贵、操作复杂、不易批量处理等。此外,这两种方法也不适用于在多孔纤维等复杂结构上沉积金属。

金属颗粒沉积在织物表面可能造成织物的柔性、舒适度下降。因此,金属基导电织物要求对织物的柔韧性和舒适度不能造成很大的破坏,所以传统的刺绣金属纤维的方法已经不适用于现在的使用要



求。Wu 等<sup>[29]</sup>通过共形涂覆法,在织物纤维表面包覆金颗粒,得到耐久性的导电织物。该方法对织物的空隙结构基本没有破坏;制得的导电织物仍然具有很好的拉伸性能,并且在拉伸过程中导电性能保持一定的稳定性;在洗涤、弯曲等情况下,制得的织物仍然具有稳定的导电性。韦肖等<sup>[30]</sup>对纤维进行镀银,对织物的导电性和防辐射性能进行了研究,结果表明镀银量越多,导电性能越好,防辐射性能也越好。Huang 等<sup>[31]</sup>通过均匀地覆盖锌(作为阳极)和氢氧化镍纳米片(作为阴极)来制造可充电的纱线电池。该实验中制得的纱线电池具有内在的安全性和较高的能量密度,是一种很有前途的新型动力源。但是由于该实验操作条件要求高,比较适合用于实验室的研究。Qin 等<sup>[32]</sup>在织物表面化学镀纳米银,制备了一种新型的导电织物,可以作为心电图采集设备的电极,用于对心电图信号进行采集。

金属基导电织物的制备主要通过对织物表面进行预处理,然后在织物表面进行一系列化学反应固定上一层金属颗粒,从而制备导电织物。虽然使用金属颗粒制备的导电织物具有良好的导电性,但金属颗粒填充在织物空隙结构中可能会影响纺织品的柔韧性,并且由于金属颗粒的刚性和脆性,导致织物在编织和反复弯曲时金属颗粒容易掉落而造成导电性下降。因此在研究耐久受用的金属基导电织物方面还需要深入研究。

### 1.3 碳基导电织物

碳基材料(碳纳米管、石墨烯)具有高机械强度、质轻、环境稳定性和优异的导热和导电性能。这些优点使得碳基材料成为导电纺织品的重要候选材料,在制备导电织物的研究中具有广泛的应用。

碳纳米管(CNTs)具有高比表面积、低电阻、低质量密度和高稳定性等特性,在导电织物的制备中具有一定的潜力。虽然纯 CNTs 纱线表现出良好的导电性和高强度,但其抗弯曲和耐磨性弱,这限制了它们在纺织品中的应用。然而,CNTs 可以通过一种简单且成本低廉的浸渍干燥方法涂覆在各种纤维上,如纤维素或涤纶纱线。但是用这种方法制备导电纤维并没有良好的耐久性,因为 CNTs 主要吸附在织物的表面,导电织物经多次重复弯曲后,CNTs 容易脱落。周洲等<sup>[33]</sup>利用浸渍的方法,得到 CNTs 涤纶复合织物,并测试得到涤纶织物导电能力。结果表明:CNTs 的引入可以提高织物的导电性。浸渍工艺操作简单,成本低,在实验室就可以大批量生产,虽然得到的样品导电性不高,但是抗静电

性能有很大的改善。但是这种产品也存在一些缺点,比如织物的 CNTs 层容易脱落、织物原有的舒适度下降等。Yang 等<sup>[34]</sup>利用环锭纺技术制备 CNTs/棉复合纱线,赋予纱线良好的导电能力。在他们的实验中先将棉纱浸泡 CNTs 溶液后烘干,然后采用环锭纺将 CNTs 棉粗纱纺成纱线,操作步骤如图 4 所示。结果表明 CNTs 可以均匀的分布在纱线表面,在拉伸条件下导电性仍然具有一定的稳定性。在实际生产中环锭纺技术简便高效,并且制得的导电织物具有很好的耐洗性和耐磨损等优点,是一种制备 CNTs 基导电织物的良好选择。Du 等<sup>[35]</sup>在超声条件下在无纺布上连接上 CNTs,制备出耐水洗的导电织物。当一片无纺布在 CNTs 溶液中受到超声作用时,无纺布可以被局部软化,从而使 CNTs 焊接在纤维表面,从而得到导电织物。他的实验中制备的导电织物具有很好的耐洗性,即使在水中剧烈洗涤 40 小时后,CNTs 仍然吸附在纤维表面上;虽然织物的导电性略有下降,但这只是纤维的损伤而不是 CNTs 的脱落造成的。

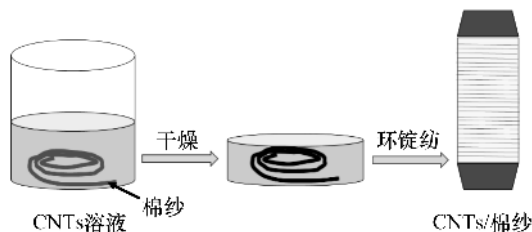


图4 CNTs/棉纱的制备工艺

CNTs 由于具有大的纵横比、极高的强度和优异的导电性能,在导电织物的制备领域中,已经成为可以代替金属材料的选择之一。虽然基于 CNTs 的导电织物引起了人们极大的关注,但是 CNTs 原料贵,在织物表面覆盖均匀连续的 CNTs 层,多是通过物理吸附在织物表面,因此容易脱落。目前这些问题还是制约着 CNTs 涂层织物的应用。因此,利用 CNTs 制备导电织物的过程中,将 CNTs 与织物紧密结合、优化工艺、节约成本和提高效率是目前最需要解决的问题。

近年来,由于氧化石墨烯(GO)和还原氧化石墨烯(rGO)具有较高的导电性能,已经成为导电织物的添加填料之一。在制备环保的可穿戴导电纺织品领域中,显示出巨大的应用潜力。迟淑丽等<sup>[36]</sup>将纤维素溶解,然后将 GO 混入融好的纤维素溶液中,制得 GO/纤维素复合纤维,并且对 GO 的量对复合纤维的导电性的影响进行了分析。结果表明:随着 GO 量的增加,导电性也不断增加。Karim 等<sup>[37]</sup>设

计了一种简单、高效的方法,通过化学还原 GO 得到稳定的 rGO 分散剂,然后利用压轧烘干,将其负载到织物表面。该实验制得的 rGO 涂层织物具有可耐水洗性、柔韧性和可弯曲性,织物的拉伸强度和应变率均有显著提高。通过压轧烘干的工艺可以使得导电填料之间的接触更加紧密,从而提高导电性。Cataldi 等<sup>[38]</sup>通过将织物浸渍到 GO 和热塑性聚氨酯分散液中,制备出的导电织物在对折、拉伸、水洗后导电性能仍然具有一定的稳定性。该织物还具有自愈能力,经过高温热压之后,织物表面形成的裂缝可以愈合,使导电性能恢复到原来的水平。Vinisha 等<sup>[39]</sup>采用等离子体预处理技术,提高了织物表面的粗糙度和氧官能团,从而提高了 GO 和织物间的附着力,这一创新技术为导电织物制备提供了很好的方法。

GO 和 rGO 是很有前途的二维材料,虽然以其为填料的导电织物导电性不高,但是具有很好的柔软性和应变敏感性,可以很好的用于可穿戴设备。但织物与填料之间的附着力差,在使用过程中会出现断裂、脱落等情况。所以需要选择合适的粘结剂,比如牛血清白蛋白,用来更好的固定石墨烯基填料。

## 2 导电织物的应用

### 2.1 心电图监测

随着生活水平的提高,对医疗应用设施要求越来越高,如护理管理、监测和诊断、外科治疗、电疗等<sup>[40]</sup>。将导电织物用于心电图监测(ECG)是最近的研究热点之一。ECG 是记录心脏电活动的一种简单、无创的检查方法。比如 Textronics 公司生产了一种运动文胸,将镀银的尼龙与棉覆盖的莱卡布结合在一起,这款文胸包含特定区域的集成针织传感器,通过身体与织物的压力可以检测心率。由于这是动态的检测,在检测心血管疾病和血压的方面具有重要意义。Zhang 等<sup>[41]</sup>将导电织物用于可穿戴心电图设备的电极,用于随时采集心电图信号,可以提醒他人注意心脏病发作的风险。这种导电织物心电图监测系统在任何时间和地点都是可用的,可以尽早准确地发现和诊断致命性心律失常,对于有心脏问题的人来说是非常重要的。

### 2.2 电阻式加热织物

电阻式加热织物是一种新兴的智能纺织品,主要致力于人体的保暖和热疗。在这种系统中,电压连到导电织物上,当电流通过织物时,就会产生热量供给人体的需求。电驱动电阻式加热织物具有加工

工艺简单、操作可控、功率转换效率高等特点,非常适合达到预期的目的。人体中膝盖、背部等部位都需要保暖,使用这种加热织物可以有效防止风湿的形成。考虑到实际应用的情况,加热织物应该提供足够的透气能力,防止皮肤上的汗水积聚。另外,加热织物应该可以经受的住人体的一些机械行为,比如弯曲、扭转等。Li<sup>[42]</sup>等利用 CNT 修饰织物,得到的织物具有良好的柔性、可拉伸性和透气性,并且可以在各种形变下稳定地工作。在不同的条件下,织物升温范围可以在 28 °C 到 68 °C 之间调节。

### 2.3 电磁屏蔽

导电织物由于其导电性能、电磁干扰屏蔽效能、静电消散性、透气性和重量轻等优点,在工业领域得到了广泛的应用,其中电磁屏蔽是最为成熟的技术。电磁屏蔽是利用导电材料制成的屏障来限制电磁波进入某一空间的过程,是保护电子电气设备以及人体免受电磁辐射的一种非常有效的方法<sup>[43-44]</sup>。因此导电织物通常可用于防护工作服、家用纺织品,以及汽车、建筑和航海领域。比如常用的室内屏蔽系统采用的是一种尼龙 66 非织造布,在特殊工艺下涂上导电铜,该材料具有柔软、轻巧和透气的特点,并且在 4 MHz 至 1 GHz 的频率范围内,屏蔽效率可达 40~80 dB。导电织物技术日趋成熟,在电磁屏蔽领域的应用也不断深入,在保护人体免受电磁辐射、防止电磁波泄漏等方面将会有越来越重要的作用。

### 2.4 传感器

基于导电织物的应变传感器的响应机理是:当织物几何结构发生变化时,导电填料的接触点发生变化,因而电阻随应变的变化而变化。由于织物具有高强度,良好的抗撕裂性,良好的柔韧性等优点,因此可以在较大的形变范围内正常工作。目前有许多研究将导电织物应用于传感器。在研究应变传感器织物中必须考虑几个关键因素,比如传感响应必须容易测量、传感器必须具有较高的敏感性和较大的测量范围等。Seyedin 等<sup>[45]</sup>先将 PEDOT:PSS 与聚氨酯进行湿法纺丝,再将得到的纤维编织到织物结构中,制得低电阻、高灵敏度、高稳定性和传感范围大的应变传感器。该传感器适用于二维控制装置和面应变检测。

### 2.5 其它应用

导电织物不仅具有织物原有的特性,还新增了导电填料的性能,比如电致变色等。电致变色织物在外加电场的作用下,其外观上可表现出颜色可逆

变化,因此在智能服装、柔性电致变色器等方面都是研究的热点。常龙威等<sup>[46]</sup>研究与开发了聚苯胺电致变色织物,可对织物的外观颜色进行调节。另外在一些智能设备领域如柔性电子键盘、柔性显示器、柔性电池等,导电织物的应用也在不断的扩展,扮演越来越重要的角色<sup>[47]</sup>。

### 3 结 语

由于织物的独特特点,如质轻、灵活性、耐磨性以及固有的保暖和舒适的特性,使其成为制备柔性设备的理想载体。导电织物是新一代的智能纺织品,在医疗、储能、电磁屏蔽和传感器等方面展现出巨大的潜力,因此研发低成本、综合性能良好的导电织物是必然的发展趋势。根据不同的导电填料,导电织物可以分为聚合物基导电织物、金属基导电织物和碳基导电织物。导电织物应该具有质轻、柔软、舒适等特点,并且具有良好的导电性。目前需要解决的问题是导电填料在织物表面分布的不均匀、导电性能的耐久性差等缺点。因此需要不断改进方法和工艺,利用超声波、等离子体等处理方法对织物进行预处理,可以有效地提高导电填料和织物间的牢度,从而提高导电填料在织物上的均匀性。

研究和开发导电织物具有重要的学术和应用价值,随着科学技术的发展,导电织物将在更多的不同领域扮演越来越重要的地位。

### 参考文献:

- [1] Chen S, Liu S, Wang P, et al. Highly stretchable fiber-shaped e-textiles for strain/pressure sensing, full-range human motions detection, health monitoring, and 2D force mapping[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(4): 2995-3005.
- [2] Maity S, Chatterjee A. Conductive polymer-based electro-conductive textile composites for electromagnetic interference shielding: A review[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, 47(8): 2228-2252.
- [3] Ko J, Jee S, Lee J H, et al. High durability conductive textile using MWCNT for motion sensing[J]. *Sensors and Actuators a-Physical*, 2018, 274(5): 50-56.
- [4] Zhang N, Chen J, Huang Y, et al. A wearable all-solid photovoltaic textile[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(2): 263-269.
- [5] Kim M, Kim H, Park J, et al. Real-time sitting posture correction system based on highly durable and washable electronic textile pressure sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 269(1): 394-400.
- [6] Wu H, Huang Y, Xu F, et al. Energy harvesters for wearable and stretchable electronics: From flexibility to stretchability[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(45): 9881-9919.
- [7] Zeng W, Shu L, Li Q, et al. Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(31): 5310-5336.
- [8] Gong S, Cheng W. Toward soft skin-like wearable and implantable energy devices [J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(23): 1700648-1700680.
- [9] Lee Y H, Kim J S, Noh J, et al. Wearable textile battery rechargeable by solar energy[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(11): 5753-5761.
- [10] 白林翠, 沈勇, 张惠芳, 等. 本征型导电高聚物织物的研究与应用[J]. *上海纺织科技*, 2011, 39(8): 1-5.
- [11] Ghahremani Honarvar M, Latifi M. Overview of wearable electronics and smart textiles[J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2016, 108(4): 631-652.
- [12] Hansora D P, Shimpi N G, Mishra S. Performance of hybrid nanostructured conductive cotton materials as wearable devices: An overview of materials, fabrication, properties and applications [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(130): 107716-107770.
- [13] Oliveira C R S D, Batistella M A, Souza A A U D, et al. Development of flexible sensors using knit fabrics with conductive polyaniline coating and graphite electrodes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(18): 44785-44794.
- [14] 赵晓明, 孙嘉瑞. 导电聚苯胺的研究进展及其在纺织领域的应用[J]. *纺织科学与工程学报*, 2018, 35(1): 153-158.
- [15] 刘元军, 武翔, 钱学浩. 氧化剂种类和浓度对聚苯胺/锦纶复合材料吸波性能的影响[J]. *纺织科学与工程学报*, 2018, 35(1): 56-60.
- [16] Alamer F A. Structural and electrical properties of conductive cotton fabrics coated with the composite polyaniline/carbon black[J]. *Cellulose*, 2018, 25(3): 2075-2082.
- [17] Tissera N D, Wijesena R N, Rathnayake S, et al. Heterogeneous in situ polymerization of polyaniline (PANI) nanofibers on cotton textiles: Improved electrical conductivity, electrical switching, and tuning properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 186(4): 35-44.
- [18] Grancarić A M, Jerković I, Koncar V, et al. Conductive



- polymers for smart textile applications[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, 48(3): 612-642.
- [19] Yang Q Q, Gao L F, Zhu Z Y, et al. Confinement effect of natural hollow fibers enhances flexible supercapacitor electrode performance[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 260(1): 204-211.
- [20] 武翔, 刘元军, 赵晓明, 等. 聚吡咯涂层尼龙导电织物的性能研究[J]. *成都纺织高等专科学校学报*, 2017, 34(4): 18-21.
- [21] 董猛, 田俊莹. 聚吡咯/银导电涤纶织物的开发[J]. *印染*, 2015, 22(1): 1-4.
- [22] Hao D, Xu B, Cai Z. Polypyrrole coated knitted fabric for robust wearable sensor and heater[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(11): 9218-9226.
- [23] Kumar N, Ginting R T, Kang J-W. Flexible, large-area, all-solid-state supercapacitors using spray deposited PEDOT: PSS/reduced-graphene oxide[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 270(2): 37-47.
- [24] Tadesse M G, Dumitrescu D, Loghin C, et al. 3D printing of NinjaFlex filament onto PEDOT: PSS-coated textile fabrics for electroluminescence applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(3): 2082-2092.
- [25] 管应凯, 王魁, 马吉宏, 等. PEDOT/尼龙复合织物的化学氧化聚合法制备[J]. *印染*, 2015, 19(3): 10-14.
- [26] 李昕, 许英涛, 郑一平, 等. 原位聚合制备 PEDOT/PSS/PVA 电磁波吸收功能复合导电织物[J]. *高分子学报*, 2017, 5(4): 661-668.
- [27] Choi C M, Kwon S N, Na S I. Conductive PEDOT: PSS-coated poly-paraphenylene terephthalamide thread for highly durable electronic textiles [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017, 50(3): 155-161.
- [28] Ali A, Baheti V, Militky J, et al. Comparative performance of copper and silver coated stretchable fabrics[J]. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(3): 607-619.
- [29] Wu Y Y, Michael S S, Chen Y T, et al. Solution deposition of conformal gold coatings on knitted fabric for E-textiles and electroluminescent clothing [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(3): 1700292-1700301.
- [30] 韦肖, 柳岩, 陈嘉毅. 镀银导电织物的防辐射性能研究[J]. *上海纺织科技*, 2016, 44(9): 30-31.
- [31] Huang Y, Ip W S, Lau Y Y, et al. Weavable, conductive yarn-based NiCo/Zn textile battery with high energy density and rate capability[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 8953-8961.
- [32] Qin H, Li J, He B, et al. Novel wearable electrodes based on conductive chitosan fabrics and their application in smart garments[J]. *Materials (Basel)*, 2018, 11(3): 370-379.
- [33] 周洲, 许夏昕, 杨树. 碳纳米管/涤纶复合织物的电学性能研究[J]. *纺织科技进展*, 2016, 15(10): 1-4.
- [34] Yang M, Fu C, Xia Z, et al. Conductive and durable CNT-cotton ring spun yarns [J]. *Cellulose*, 2018, 25(7): 4239-4249.
- [35] Du D, Tang Z, Ouyang J. Highly washable e-textile prepared by ultrasonic nanosoldering of carbon nanotubes onto polymer fibers[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(4): 883-889.
- [36] 迟淑丽, 田明伟, 曲丽君. 石墨烯纤维素复合纤维制备及导电导热性能研究[J]. *成都纺织高等专科学校学报*, 2017, 34(2): 22-25.
- [37] Karim N, Afroj S, Tan S, et al. Scalable production of graphene-based wearable E-textiles [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(12): 12266-12275.
- [38] Cataldi P, Ceseracciu L, Athanassiou A, et al. Healable cotton-graphene nanocomposite conductor for wearable electronics [J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2017, 9(16): 13825-13830.
- [39] Vinisha Rani K, Sarma B, Sarma A. Plasma treatment on cotton fabrics to enhance the adhesion of reduced graphene oxide for electro-conductive properties [J]. *Diamond and Related Materials*, 2018, 84(4): 77-85.
- [40] Mottaghitalab V, Haghi A K, Haghdoust F. Comfortable textile-based electrode for wearable electrocardiogram [J]. *Sensor Review*, 2015, 35(1): 20-29.
- [41] Zhang M, Wang C, Liang X, et al. Weft-knitted fabric for a highly stretchable and low-voltage wearable heater [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2017, 3(9): 1700193-1700199.
- [42] Li Y, Zhang Z, Li X, et al. A smart, stretchable resistive heater textile [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(1): 41-46.
- [43] Tian M, Du M, Qu L, et al. Electromagnetic interference shielding cotton fabrics with high electrical conductivity and electrical heating behavior via layer-by-layer self-assembly route[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(68): 42641-42652.
- [44] Wang C, Xiang C, Tan L, et al. Preparation of silver/reduced graphene oxide coated polyester fabric for electromagnetic interference shielding[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(64): 40452-40461.
- [45] 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.
- [46] 常龙威,周炳海. 聚苯胺电致变色织物的研究与开发 [J]. 机械制造, 2015, 53(6):22-25.
- [47] Weng W, Chen P, He S, et al. Smart electronic textiles [J]. Angewandte Chemie, 2016, 55(21):6140-6169.

## Research progress on preparation and application of conductive fabrics

CAI Dongrong, ZHOU Jing, DUAN Panpan, ZHANG Yanyan, FU Feiya, LIU Xiangdong

(College of Materials and Textile, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The conductive fabrics are the basic material for the wearable devices. In addition to excellent conductivity, it's still necessary to possess the merits of flexibility, and stability for large amplitude deformation such as bending, breathability and water absorbability which meet the needs of clothing wearing. In recent years, the related researches on conductive fabrics have been developing quickly, and its comprehensive performance has been close to practical application requirements. In this article, the researches on conductive fabrics in recent 5 years were summarized. According to different types of conductive fillers, conductive fabrics can be classified into polymer-based conductive fabric, metal-based conductive fabric and carbon-based conductive fabric. These three types of conductive fabrics were mainly introduced and the problems in the research were pointed out such as improving conductivity and durability of conductive fabrics, and maintaining fabric properties. Finally, the application of conductive fabrics was introduced, and the application prospects of conductive fabrics were anticipated.

**Key words:** conductive fabrics; wearable devices; polymer-based; metal-based; carbon-based

(责任编辑:唐志荣)