

# 有机溶剂泄漏检测用传感织物及其检测电路的设计

徐 帅,王思晴,张一依,王慧玲,杨晓芳

(盐城工业职业技术学院,江苏 盐城 224005)

**摘 要:**设计一种可以检测不导电有机溶剂泄漏的传感织物,可以检测体积微小达一个液滴大小的泄漏。研究认为,溶液共混法制备的碳纳米管复合材料适合作为织物经纱;将其间隔织入织物,配合导电经纬纱导出信号,可以实现在较大面积上检测微小泄漏;配合多路选择开关构成的检测电路,可以实现在线泄漏检测。

**关键词:**智能纺织品;传感器;泄漏检测;有机溶剂检测

**中图分类号:**TS 102.6; TP 212.2

**文献标志码:**B

**文章编号:**1673-0356(2022)08-0022-03

近年来,随着电子信息技术、可穿戴技术的发展,智能纺织品日益受到重视。在已有研究中,各种各样的柔性传感器被织入织物,用来检测温度、应力、形变等物理量<sup>[1-3]</sup>,这其中用于检测物体性质的较少。此外,目前的研究对于智能纺织品在柔性、面积可延展方面的优势发挥不够,较少能实现如光纤那样的分布式检测。本文前期基于梭织物进行导电液体泄漏检测的相关研究,既发挥了纺织品柔性、面积大的优势,又实现了分布式检测<sup>[4-5]</sup>。然而,这款织物只能检测导电液体的泄漏,不能检测不导电有机溶剂的泄漏,这大大限制了其工业应用。工业常用有机溶剂包括丙酮、二氯甲烷、乙酸乙酯等,它们一方面对环境、人体有害,一方面由于不导电而不易被检测。传统上,面向有机溶剂的检测多采用气体传感器<sup>[6-7]</sup>,是一种等待液体溶剂挥发后再行检测的间接检测,检测时间较长,受环境风速、空间条件影响大,对于防止微量泄漏发生不利。一些场合如罐体、法兰等,要求一种大面积,并且可垫放、覆盖甚至于包裹的有机溶剂泄漏传感织物。这类场合要求传感织物在使用时,应能可靠检测体积微小达一个液滴(0.05 mL)大小的有机溶剂。对此,本文基于导电高分子复合材料,搭配对应的织物组织结构,提出一种有机溶剂泄漏检测用传感织物的设计方式。

## 1 有机溶剂敏感材料的工作原理

目前,受碳纳米管、石墨烯等材料的带动,导电高分子复合材料(CPCs)发展迅速。导电高分子材料暴

露在有机溶剂中时,其导电性能会发生明显变化,因此可作为面向有机溶剂的液体传感器材料。科学界对于CPCs这种电性能发生变化的解释主要归于逾渗理论。根据逾渗理论,当导电填料含量较低时,其随机孤立分布在高分子基体中,填料之间相互接触的机率很低,不能形成有效的导电网络,因此材料的电导率很小,几乎还是绝缘状态;随着导电填料含量的增加,填料间相互接触的机率有所提高,形成部分有效的导电网络,因此材料的电导率呈缓慢上升趋势;当填料含量达到某一临界值时,所有导电填料将相互搭接形成完善的导电网络,此时材料的电导率将发生突增;而当填料含量继续增加时,由于此时基体中的导电网络已经趋于稳定,因此材料的电导率不会再有明显的变化<sup>[8]</sup>。上述填料含量导致电导率突变的临界值被称为逾渗阈值。填料达到逾渗阈值的含量时,导电网络刚刚形成,结构十分不稳定,当高分子基体吸收有机溶剂时,发生分子层级的溶胀而导致材料内部导电网络的破坏,材料的电阻值呈上升趋势;当恢复到正常环境后,高分子基体因有机溶剂分子脱附而收缩,被破坏的导电网络回复至其初始状态,材料的电阻值下降至其初始值。根据材料的电阻值变化情况,可以检测有机溶剂的存在与否。

## 2 有机溶剂敏感材料的选择

从有机溶剂敏感材料的工作原理不难看出,影响CPCs导电能力的首要因素是导电填料的性质。碳纤维或碳纳米管本身导电性较好,又拥有较大的长径比,在加工过程中,它们会互相搭接或缠结,从而形成稳定的导电网络,因此采用此类填料的CPCs的电学性能更加稳定。影响CPCs导电能力的因素还有填料含量,导电填料在CPCs中的含量并不是越高越好;相

收稿日期:2022-03-20;修回日期:2022-03-28

基金项目:江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(202113752018Y);江苏青蓝工程优秀青年教师项目(2019003);2017年中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2017052)

第一作者:徐帅(1983—),男,副教授,硕士,主要研究方向为智能纺织品,E-mail:xushuai430@163.com。

反,导电填料含量过高时,反而有可能发生团聚,不利于导电填料的分散,影响导电性;此外还可能引发应力集中,削弱 CPCs 材料的机械性能,降低制得纤维或纱线的可织造性。此外,高分子基体对于 CPCs 导电性也有较大影响,高分子基体的分子量和模量越高,导电填料越容易均匀分散,整个材料体系也更容易获得低逾渗值。材料的加工方法对于 CPCs 的导电性也有较大影响,不同的加工方法和参数,可获得不同的导电网络。广泛使用的方法包括溶液混合法、熔融共混法、原位聚合法等,其中溶液混合法主要依靠溶剂对高分子基体的溶解作用,使导电填料在溶液中分散进行混合,分散效果较好,制得的复合材料电学性能也好<sup>[8]</sup>。

综上,选择碳纳米管作为填料,聚乳酸或聚氨酯作为基体,配合合适的填料含量,并采用溶液共混法制备的 CPCs 更适合作为有机溶剂敏感材料;将此类材料制成长纤维,可织造获得有机溶剂泄漏检测用传感织物。

### 3 织物组织结构设计

根据能可靠地检测体积微小达一个液滴(0.05 mL)大小的有机溶剂的目标,织物组织结构设计如图 1 所示。图 1 中,织物主体部分由不导电经纱 1 和不导电纬纱 4 按平纹交织而成。在整块织物上,有机溶剂敏感经纱 3 间隔分布并被织入织物,导电经纱 2 被设置在织物左侧并被织入织物。织制时,先织入不导电纬纱 4,在织制需要的长度后,织入导电纬纱 5,即获得有机溶剂泄漏传感织物。此外,图 1 中,为进一步增强电性连接的可靠性,可以将导电经纱 2 和导电纬纱 5 多根连续布置。

图 2 是有机溶剂泄漏传感织物的工作原理示意图。当有机溶剂 6 渗透到或滴落在织物上时,会引起所在位置处的有机溶剂敏感经纱的电阻变化,通过检测电路,即可检测到此变化,从而判断是否发生有机溶剂泄漏。具体过程是:电流  $I$  从测量电路出发,依次流过导电经纱 2、导电纬纱 5、有机溶剂敏感经纱 3,最后回到测量电路,测量电路检测哪一路电流变小,以此判断泄漏的发生。

显然,图 1、2 中,由于导电经纱 2 和导电纬纱 5 的存在,电信号的接入和引出都在织物下端完成,避免了重新布线。导电经纱 2 和导电纬纱 5 在此应起到良好的导电作用,并且其导电性不会因为接触到有机溶剂

发生较大的变化,此时镀有金属的化纤复丝或多股金属丝是较好的选择,典型如 8.3 tex/40 F 的镀银锦纶丝、53 tex/2 的不锈钢纱线等。另一方面,图 2 中,要可靠地检测到有机溶剂 6,相邻的有机溶剂敏感经纱 3 之间的间距应小于有机溶剂 6 在织物上扩散后的直径。试验发现,一滴溶剂滴落到织物上扩散后的直径可达 2 cm 以上,因此有机溶剂敏感经纱在织物上的间隔距离选为 1~1.5 cm。

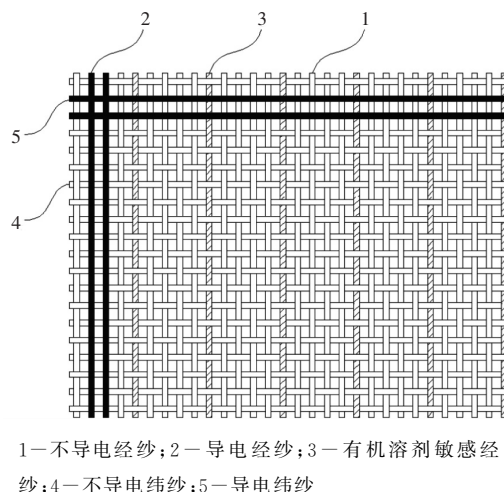


图 1 有机溶剂泄漏传感织物结构示意图

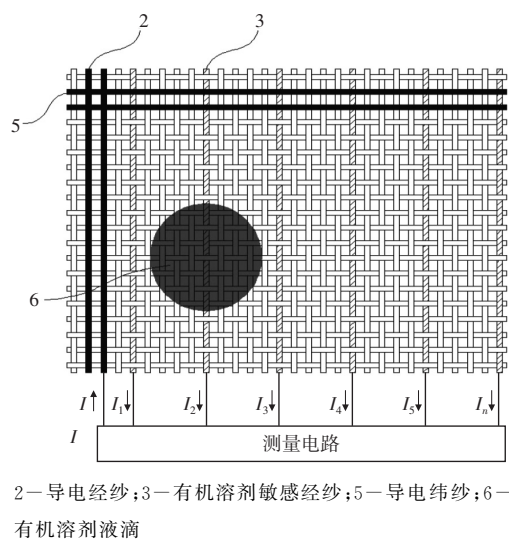


图 2 有机溶剂泄漏传感织物工作原理示意图

### 4 检测电路设计

在实际使用中,当大面积应用有机溶剂泄漏检测用传感织物时,需要检测较多数量的经纱的电阻变化情况,此时有必要设计专用检测电路,图 3 是一种典型的测量电路。图 3 中,虚线上方为有机溶剂泄漏传感织物的等效电路,虚线下方的方框内为测量电路。R1、

$R_2 \cdots R_n$  为每根或每组有机溶剂敏感经纱的等效电阻,依次导通开关  $S_1, S_2 \cdots S_n$ ,再读取  $R_0$  两端电压,通过电压的比较可判别哪一根有机溶剂敏感经纱电阻发生变化。开关  $S_1, S_2 \cdots S_n$  的依次导通可由多路选择开关实现,此类芯片属电子电路常用芯片,典型型号有八选一开关有 CD4051、74LS151 等型号<sup>[9]</sup>。图 3 中的毫伏表可以是带有 AD 转换功能的单片机或经专用 AD 芯片转换后接至单片机。单片机同时控制八选一开关挨个导通。对于多于 8 根的经纱,可选用多个八选一芯片组成阵列。

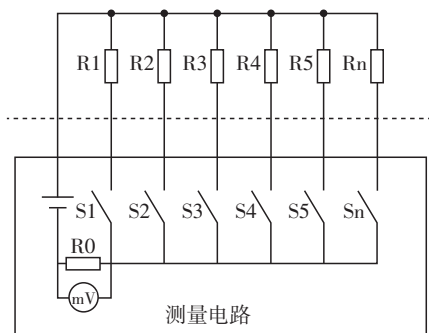


图 3 有机溶剂泄漏传感织物工作原理示意图

在检测精度方面,有机溶剂敏感经纱遇到有机溶剂后电阻值改变得越大,越容易被检测,并且检测可靠性也越高。目前,碳纳米管参杂的导电高分子复合材料及其制成的长丝对于有机溶剂有较高的敏感性,如碳纳米管参杂的聚乳酸导电高分子复合材料制成的多股长丝,遇到有机溶剂后电阻增大可达  $10 \sim 10^3$  倍。这样,在长度 1 m 的敏感经纱上,即使有 1 cm 的部位遭到有机溶剂浸湿,电阻改变将达  $10\% \sim 1\,000\%$ ,这种改变对于上述电路可以稳定检测到。

## 5 结束语

(1) 基于逾渗理论,考虑填料性质、含量、分散方法

等因素,认为溶液共混法制备的碳纳米管 CPCs 更适合作为有机溶剂敏感材料。

(2) 通过织物结构设计,将有机溶剂敏感经纱间隔织入织物,配合导电经纬纱导出信号,可以在较大面积上检测体积微小达一个液滴大小的有机溶剂。

(3) 采用多路选择开关构成检测电路,可以实现多跟经纱电阻变化的及时检测,并在此基础上实现在线泄漏检测。

当然,受制于 CPCs 材料导电性,织物长度目前还不能完全满足几米甚至于几十米的实际需要,下一步研究应集中在材料敏感特性的提高和织物结构的优化上。

## 参考文献:

- [1] 罗益锋. 智能纤维及智能纺织品的最新进展[J]. 纺织导报, 2019(7): 61-62.
- [2] 杨晨啸, 李鹏. 柔性智能纺织品与功能纤维的融合[J]. 纺织学报, 2018, 39(5): 160-169.
- [3] 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.
- [4] 徐帅. 水滴传感器织物设计与制作[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(10): 11-14.
- [5] 徐帅. 一种织物水滴传感器的开发要点[J]. 棉纺织技术, 2016, 44(7): 74-77.
- [6] 马须敬, 徐磊. 气体传感器的研究现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(5): 1-4, 12.
- [7] 韩卫济, 孙鹤, 徐光, 等. 气体传感器综述[J]. 计算机产品与流通, 2018(2): 277.
- [8] 刘虎. 柔性热塑性聚氨酯导电纳米复合材料的应激响应及其机理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [9] 廖源信, 郭振中, 陈松, 等. 多路模拟量检测转换模块的设计与实现[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2012, 11(3): 66-68.

## Design of Organic Solvent Leakage Detection Fabric and Its Measurement Circuit

XU Shuai, WANG Siqing, ZHANG Yiyi, WANG Huiling, YANG Xiaofang

(Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, China)

**Abstract:** A sensing fabric which could detect leaks of non-conductive organic solvents was designed to monitor leaks as small as the size of a droplet. It was considered that the carbon nanotube composites made by solution blending method were suitable as fabric warp yarns; By weaving them into the fabric at intervals, and cooperating with conductive warp and weft yarns to derive signals, it was possible to detect small leaks in a large area; With the measurement circuit composed of a multiplex selection switch, online leakage detection could be realized.

**Key words:** smart textile; sensor; leakage detection; organic solvent detection