

智能纺织品分类与评价方法研究

刘晖,陈国强,吕凯敏

(深圳市计量质量检测研究院,广东 深圳 518000)

摘要:为进一步了解智能纺织品,首先阐述智能调温纺织品、形状记忆纺织品、智能变色纺织品、智能可呼吸纺织品等被动智能纺织品以及以电子智能纺织品为代表的主动智能纺织品的发展现状。其次,介绍目前各类智能纺织品的性能评价方法和相关测试标准。最后,指出目前智能纺织品存在的问题,并提出未来发展方向,为推动智能纺织品标准化评价体系的建立与完善提供参考。

关键词:智能纺织品;分类;性能评价;测试标准

中图分类号:TS 106

文献标志码:B

文章编号:1000-4033(2021)10-0063-05

Classification and Evaluation Method of Smart Textiles

Liu Hui, Chen Guoqiang, Lv Kaimin

(Shenzhen Academy of Metrology and Quality Inspection, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract:In order to further understand smart textiles, firstly, the development status of passive smart textiles such as smart thermo-regulation textiles, shape memory textiles, smart color-changing textiles, and smart breathable textiles, as well as active smart textiles represented by electronic smart textiles, are explained. Secondly, The current performance evaluation methods and related test standards of various smart textiles are introduced. Finally, it points out the current problems and proposes the future development direction of smart textiles, which provides a reference for promoting the establishment and improvement of the smart textile standardization evaluation system.

Key words:Smart Textile; Classification; Evaluation Method; Standard

随着各学科知识的不断融合,不同功能的智能纺织品不断被研发出来。2019年3月,我国纺织品标准化技术委员智能纺织品工作组成立,同年,ASTM发布ASTM D8248—19《智能纺织品标准术语》,智能纺织品标准的建立已经启动,这对智能纺织品的开发与应用具有重要意义,但还缺乏完善的智能纺织品评价体系。

本文通过总结智能纺织品的研究现状,分析目前关于智能纺织品的性能评价方法和相关测试标

准,总结智能纺织品现存问题,并提出未来发展方向。

1 智能纺织品定义与分类

在ASTM D8248—19中,智能纺织品被定义为具有一种或多种因刺激(如机械、热、化学、电气、磁性或其他来源的刺激)而变化特性的纤维、纱线、织物或最终产品。作为可以模拟生命系统,能够感知和响应环境变化,并保留纺织品固有风格和技术特征的一类新型纺织品,智能纺织品具有广阔的发展前景^[1]。

智能纺织品根据对环境变化感知和响应的能动性划分为两类。第一类为被动智能纺织品,具有被环境刺激后改变其性能的能力,如智能型温控纺织品、形状记忆纺织品、变色纺织品等;第二类为主动智能纺织品,装有传感器和驱动器,能够将内部参数转换为传递信息,能够感知来自环境的不同信号,从而决定如何对外部信号做出反应,如电子智能纺织品^[2-3]。

1.1 智能温控纺织品

智能温控纺织品可以根据人

作者简介:刘晖(1979—),男,高级工程师,硕士。主要从事电子智能方面的工作。

体与环境的变化智能调节纺织品的温度,维持人体的热舒适性。相变材料是实现智能温控较常用的方法,但存在有腐蚀性、易相变分离和易燃等问题,可通过将相变材料利用微胶囊技术进行包裹而有效解决^[4]。Sarier et al^[5]利用混合的聚乙二醇和聚丙烯腈得到相变材料,潜热值达到了 126 J/g。李守鹏等^[6]采用紫外光原位聚合法制得的相变材料具有很好的热稳定性和降温性能。Li et al^[7]将由正十八烷微胶囊相变材料制备成的大胶囊缝合到服装上,该服装可快速传递人体热量,从而维持人体的热舒适性。

1.2 形状记忆纺织品

形状记忆纺织品是将具备形状记忆功能的材料引入到纺织品中,在任意变形后能够恢复原态的一类纺织品。形状记忆纺织品的作用原理基于形状记忆纤维,主要可分为形状记忆合金、形状记忆聚合物和经整理剂加工的形状记忆功能纤维^[8]。

Wang et al^[9]设计了 4 种不同变形高度以及 5 种不同排列方式的形状记忆合金弹簧温度响应防护织物,通过随环境变化的智能气隙来改善服装的保温性能。金关秀等^[10]制备的熔融纺聚氨酯形状记忆纤维、棉织物不仅具有较高的形状回复率,而且具备较好的穿着舒适性。邹毓等^[11]研制的 MS@GMA-环氧自修复形状记忆复合材料在 8 次循环测试后能够较好地保持形状回复率。

1.3 智能变色纺织品

人们参考变色龙变色的特点研发出可逆变色纺织品。可逆变色材料根据变色原理分为光敏变色、温敏变色、电致变色以及热致变色等,其中光敏变色和温敏变色的研

究相对较多。光敏变色纺织品能够在光源刺激下改变自身颜色,并在撤去光源后可逆地恢复到原本的颜色。温敏变色纺织品能够根据周围温度的变化改变自身颜色,其变色原理主要有 pH 值变化机制和电子得失机制两种^[12]。

籍晓倩^[13]采用在棉织物上印花的方式实现光诱导热变色,并在织物反面利用石墨烯浆料制备电热变色纺织品,织物具有良好的变色性能。Yang et al^[14]在纯棉纱线包覆的碳纳米管、棉复合纱线上涂覆热变色油墨,制备了电致变色纱线,该变色纱线具有良好的重复性和可逆的变色效果。毛秦岑^[15]将 PMA 与 TiO₂ 复合变色材料利用湿法纺丝技术制备成变色聚氨酯纤维,其变色效果随复合材料的增加而增加。

1.4 智能可呼吸纺织品

智能型可呼吸纺织品能够感知外界温度变化,并且在转变温度附近其透湿性会产生明显变化。当温度低于软链段的相转变温度时,此时聚合物处于玻璃态或结晶态,软链段的微布朗运动被限制,增加了对小分子物质的阻碍,从而保证低温状态时的低透湿性;当温度高于相转变温度时,软链段的微布朗运动加剧,使得水汽分子在大分子之间透过,透湿性能改善^[16]。形状记忆聚氨酯因具有软、硬链段交替结构和无孔结构,使其在纺织品中可改善热舒适性。纪凤龙等^[17]采用聚丙二醇制备了玻璃化转变温度(T_g)接近 25 ℃的水性形状记忆聚氨酯,当温度超过 T_g 时,水蒸气的透过量明显提高。

1.5 电子智能纺织品

电子智能纺织品是在纺织品中加入柔性微电子元件,可对周围环境和人体体征等数据进行监测,

从而做出动态调节的智能纺织品。例如,电加热纺织品是在纺织品中加入导电纤维和温度传感器,根据人体和环境之间的实时变化从而控制纺织品的温度,改善人体舒适性^[18]。

Rantanen et al^[19]开发了一套能够为用户提供通讯、定位、导航功能的智能电加热服,该服装可智能地决定是否发送紧急信息以及开启加热功能,这套服装的功能已经在北极环境中进行了测试,可维持半个小时的有效加热时间。彭勇等^[20]制备了可实时监控用户生理特征的智能体征监测服,可有效提高带电工作人员的安全管控。吴施颖等^[21]制备了一款智能电热马甲,通过微电脑数字温控器全程自动化感应加热,从而达到舒适又保暖的功效,但其温控装置的温度设定依据并没有明确说明。

2 智能纺织品的性能评价方法

2.1 智能调温纺织品的性能评价

智能调温纺织品的评价中温度调节性能的检测非常重要,但如今还没有统一的检测标准,依旧以保温性能和传热性能为检测指标。目前常用的检测方法有热分析法、热平板法、暖体假人法和人体穿着试验法等。

2.1.1 热分析法

差示扫描量热法(DSC)是控制温度在一定的范围内,通过比较待测物和参照物的功率差和设定温度的关系,从而得出相变材料的相变焓、相变温度、储热性能等参数。该方法操作简单,可得出相变材料的基本性能,但测试温度与实际使用温度之间的不同会使测量结果存在一定差异。张国兵等^[22]利用差示扫描量热法研究发现随着 PA6 与 PEG 共混材料中 PEG 比例的升高,相变纳米纤维的熔融温度和熔

融焐值逐渐增大。

2.1.2 热平板法

热平板法可模拟稳态条件下人体穿着服装时的热量传递,通过分析维持环境温度时所需的热流量进行评价。李群华等^[23]利用热平板仪检测相变纳米复合织物的保温性能,发现其保温时间比普通织物长 40%。此方法只能模拟稳态条件下的热量传递,对于瞬时非稳态条件下的热量传递难以检测,与真实穿着情况存在一定的差异。朱雯等^[24]通过相变涂层处理制备的织物,其导热系数比未经处理的织物平均增加了 53%,织物的传热性能明显提高。

2.1.3 暖体假人法

利用暖体假人恒功率模式可模拟不同运动状态下的真人穿着情况。通过对比穿着相变调温服和普通服装时假人表面温度的差异进行表征。赵蒙蒙^[25]通过暖体假人法研究发现,穿着调温服装的假人表面温度明显低于穿着普通服装时的表面温度,表明调温服装具有良好的调温性能。该方法虽然可以模拟人体的新陈代谢量,但对人体的自调节能力等无法模拟,因此与真实穿着情况还存在一定差异。Gao et al^[26]发现相变材料与暖体假人之间的温度差越大,假人躯干的散热率越高。

2.1.4 人体穿着试验

人体穿着试验是在人工气候室通过测量人体穿着相变调温纺织品的皮肤温度、心率等生理指标以及主观感受,综合评价相变调温纺织品的调温性能。Safavi et al^[27]测试静止与行走两种状态下受试者的皮肤温度变化,发现相变防护服的散热调节能力显著。真人试穿试验存在一定的主观性,可重复性较差,且对于极端检测环境下的受

试者存在一定的生命威胁。

2.2 形状记忆纺织品的性能评价

目前并没有针对形状记忆纺织品的检测标准,对其进行性能评价大多从形状保持和折皱回复两方面着手,相关标准可分为主观和客观两类,具体的测试指标和标准见表 1。然而忽略了温度的影响,无法客观评价纺织品的易塑形性和状态改变的必要条件。国内在 2021 年发布了《纺织品 形状记忆性能检测和评价(征求意见稿)》,针对力致形状记忆纺织品以塑性角度和折痕回复率来进行塑性能力和回复能力的表征。付笑笑等^[28]设计了一种可动态模拟形状记忆织物弯曲变形和回复过程的测试装置,以弯曲回复力为指标进行评价,与 KES 系统中的弯曲刚度试验进行相关性分析,表明该测试方法的有效性。张小琪^[29]将织物褶皱的主观评价和折皱回复角法的客观评价相结合,明确形状记忆性能评价参数。

2.3 变色纺织品的性能评价

对变色纺织品的性能评价较常用的方法是目测法,但存在较大的主观性和随机误差性。对光敏变色纺织品的定性测试方法有光谱吸收回复曲线法和分光测试法。相关标准为 T/CNTAC 45—2020《纺织品 热敏变色性能的检测和评

价》。

2.3.1 光谱吸收回复曲线法

在紫外-可见光光谱测试中,记录照射不同时间时的光谱,得到 UV-Vis 吸收曲线,然后记录不同时间在白炽灯照射下的光谱,得到 UV-Vis 光谱回复曲线。从吸收回复光谱曲线中可获得材料的变色点和变色时间及变色可逆性等评价指标。于明昕等^[30]通过测试发现,测试的两种金属双硫脲在经过光照后,最大吸收峰波长均后移,并且最大吸收峰与所处的介质无关。

2.3.2 分光测试法

利用分光测试仪测试织物变色前后的色差和 K/S 值可说明变色能力的强弱以及变色效果,具有测色精度高、易操作等特点。同时,还需测量材料的变色温度、变色时间、变色灵敏度、变色效果稳定性等指标,综合评价其变色效果。赵博研等^[31]通过模拟太阳光照,利用手持分光测试仪与肉眼结合的方式测量织物的变色和回复色差,可以很好地观察变色性能。

2.4 智能可呼吸纺织品的性能评价

温敏透湿性是智能可呼吸纺织品的主要检测性能指标,相关的检测标准见表 2。李淑华等^[32]利用吸湿法测试热敏性薄膜的透湿性

表 1 形状记忆纺织品形状保持和折皱回复性检测标准

评价方法	测试指标	国外标准	国内标准
主观评价	外观平整度	AATCC TM124—2018《家用洗涤后织物外观的平滑度的试验方法》、ISO 7768—2009《纺织品清洗后织物外观的平滑度评定的试验方法》	GB/T 13769—2009《纺织品 评定织物经洗涤后外观平整度的试验方法》
	褶裥保持性	AATCC TM88C—2018《家用洗涤后织物褶裥保持性的试验方法》、ISO 7769—2009《纺织品 织物清洗后褶裥外观评定的试验方法》	GB/T 13770—2009《纺织品 评定织物经洗涤后褶裥外观的试验方法》
客观评价	折皱回复角	AATCC 66—2017《机织物的折痕回复性 回复角法》、JISL 1061—2004《机织物及针织物局部拱胀的试验方法》方法 B	GB/T 3819—1997《纺织品 织物折痕回复性的测定 回复角法》

能,发现随着温度的升高,透湿性能增加较快。Lv et al^[33]利用 PU-PNIPAAM 制备了半互穿网络聚合物,研究发现,随着温度的升高,聚合物透湿量可由 2 000 g/(m²·d)增大到 3 500 g/(m²·d)。

2.5 电子智能纺织品的性能评价

电子智能纺织品大多是将传感器、分析器、控制器、电池等部件通过柔性电路进行连接,再与服装进行结合后直接穿戴在人体上,因此对其进行性能评价可从 3 个方面入手:一是服用性能,包括织物和电子元件的物理性能、安全性能和舒适性能等,如织物的拉伸断裂性能、电子元件的耐水洗性能等;二是电子元件的电气、电子性能,包括电子元件的可靠性、安全性和电磁兼容性等;三是电子智能纺织品的智能性评价。

以目前发展较为成熟的智能监护纺织品和电加热纺织品为例,对其智能性进行评价需对监测信号的准确性和智能控温性能进行检测。

a. 监测信号的可靠性评价

电子智能纺织品的信号监测功能是其实现智能化的基础,因此需对其可靠性进行评价,可从监测数据的准确性、同步性和稳定性进行综合评价,测试方法有比较法、测量法和观察法。吴杰^[34]构建了一个智能监护服系统并对该监护系统的可靠性进行分析,利用比较法验证了监测信号的准确性,利用测量法验证了信号的同步性,利用观察法验证了信号的稳定性。

b. 智能温控性能评价

对于电加热服的智能温控性能评价主要是对加热元件的电热性能、服装的热防护性能和舒适性进行测试。张妍^[35]利用红外热像仪测试织物的表面温度和发热均

表 2 智能可呼吸纺织品透湿性的检测标准

测试方法	国外标准	国内标准
吸湿法	ASTM E96/E96M—2016《材料水汽输送的标准试验方法》、JIS L 1099—2012《织物的水蒸气渗透率的试验方法》	GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 1 部分:吸湿法》
蒸发法	ASTM E96/E96M—2016、BS 7209:1990《水汽渗透衣料织物规范》、JIS L 1099—2012《织物的水蒸气渗透率的试验方法》	GB/T 12704.2—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 2 部分:蒸发法》
模拟法	ISO 11092—2014《纺织品 生理舒适性 稳态条件下耐热和耐水蒸气性能的测试(防护热板排汗试验)》、ASTM F1868—2014《采用蒸发热板测定服装材料耐热和耐蒸发的标准试验》	GB/T 11048—2008《纺织品 生理舒适性 稳态条件下热阻和湿阻的测定(蒸发热板法)》

匀性,发现电阻越稳定,加热元件的热稳定性越好。Park et al^[36]利用暖体假人模拟人体在不同环境下加热部位对加热效果的影响。

3 智能纺织品亟待解决的问题

智能纺织品是多领域的整合,目前智能纺织品仍处于初期发展阶段,基于对其现状的研究,智能纺织品还存在如安全舒适性、多功能集成与标准评价体系的问题。

3.1 安全舒适性

智能纺织品在实现其智能化的同时也带来了新的问题,如产生了电磁辐射、漏电、信息泄露等安全问题,同时对服装的舒适性也产生了影响。为解决这些问题,需对现有的智能材料和电子元件进行改进,在保证用户安全的同时,改善穿着舒适性。其次,需结合人体功效学,考虑电子元件与服装的结合部位与方式,减小人体穿戴不便造成的不舒适感。

3.2 多功能集成

目前的智能纺织品大多数功能单一,无法满足用户的综合需求,如在北极等寒冷环境下,用户需穿着可提供额外供暖的加热服装,同时还需要有定位、监护和能量储存等功能。随着相关技术的进一步发展,智能纺织品应整合多学科技术,依据用户需求整合制备多

功能的智能纺织品。

3.3 标准评价体系

目前缺乏智能纺织品的生产检测评价体系,市场上的智能纺织品参差不齐,缺少相应的监管。可从服用性、安全性和智能性等方面建立综合评价体系,推动智能纺织品相关标准的制定和完善。

4 结束语

目前,对智能纺织品还需进一步研究,现有评价方法虽然基本反映了智能纺织品的特性,但还缺乏规范的测试方法和标准。本文首先阐述了 5 类智能纺织品的研究现状,然后总结了智能纺织品现有的测试方法和相关标准,最后提出智能纺织品亟待解决的问题。目前关于智能纺织品的研究多集中在智能材料的制备和电子元件与纺织品的结合方面,仍存在许多内容有待探索,对于智能纺织品性能评测技术的研究还需加强。此外,我国需要加快建立和完善关于智能纺织品的标准,推动智能纺织品的规范化和发展。

参考文献

- [1]程光伟,庞淑婷,刘颖.浅谈智能纺织品标准化进展[J].中国质量与标准导报,2021(2):40-43.
- [2]熊莹,陶肖明.智能传感纺织品研究进展[J].针织工业,2019(7):8-12.

- [3] FANG Y, CHEN G, BICK M, **et al.** Smart textiles for personalized thermo-regulation[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(17): 9357-9374.
- [4] 弋梦梦, 廖喜林, 耿长军, 等. 智能温控纺织品研究进展及应用[J]. 天津纺织科技, 2018(3): 77-79.
- [5] SARIER N, ARAT R, MENCELOGLU Y, **et al.** Production of PEG grafted PAN copolymers and their electro-spun nanowebs as novel thermal energy storage materials[J]. Clinical Medicine & Research, 2016, 643(1): 83-93.
- [6] 李守鹏, 张国庆, 刘国金, 等. 紫外光引发甲基丙烯酸甲酯-丙烯酸丁酯共聚制备相变调温织物及其性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(1): 109-114.
- [7] LI W, ZHANG G X X, WANG X C, **et al.** Fabrication and morphological characterization of micro-encapsulated phase change materials (Micro-PCMs) and macro-capsules containing Micro-PCMs for thermal energy storage[J]. Energy, 2012, 38(1): 249-254.
- [8] 黄梅花, 楚久英. 智能纤维在纺织领域的应用及发展前景[J]. 天津纺织科技, 2018(6): 43-46.
- [9] WANG L, LU Y, HE J. On the effectiveness of temperature-responsive protective fabric incorporated with shape memory alloy (SMA) under radiant heat exposure[J]. Clothing and Textiles Research Journal, 2020, 38(3): 212-224.
- [10] 金关秀, 祝良荣, 郭万友, 等. 熔融纺聚氨酯形状记忆纤维/棉机织物的染整[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(7): 37-39.
- [11] 邹毓, 邓明秀, 张发爱. 介孔材料 SBA-15 为修复剂载体的环氧树脂自修复形状记忆复合材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(6): 79-84, 93.
- [12] 陈安, 刘茜. 调温变色织物的研发现状[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(7): 6-10.
- [13] 籍晓倩. 光诱导热变色聚氨酯制备及性能[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [14] YANG M, PAN J, LUO L, **et al.** CNT/cotton composite yarn for electro-thermochromic textiles[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8): 1-8.
- [15] 毛秦岑. 光/温致变色纤维的制备及其性能研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2020.
- [16] 丁子寒, 初曦, 邹婷婷, 等. 防水透湿织物的研究进展[J]. 服装学报, 2019, 4(5): 383-387, 419.
- [17] 纪凤龙, 郑光洪, 胡金莲, 等. 室温开关的温敏透湿织物涂层胶的制备与性能研究[J]. 染整技术, 2018, 40(1): 17-21.
- [18] 张麟丽, 胡雪峰, 刘岩, 等. 智能纺织品的发展趋势与应用展望[J]. 纺织导报, 2020(8): 69-77.
- [19] RANTANEN J, IMPIO J, KARIN-SALO T, **et al.** Smart clothing prototype for the arctic environment[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2002, 6(1): 3-16.
- [20] 彭勇, 雷兴列, 方玉群, 等. 特高压带电作业用智能体征监测服系统的研制[J]. 电工电气, 2020(1): 24-28.
- [21] 吴施颖, 潘嘉韵, 邹攀, 等. 冷环境下的智能电热马甲的开发与评价[J]. 科技经济导刊, 2017(6): 113.
- [22] 张国兵, 王曙东, 何远方, 等. 聚酰胺 6/聚乙二醇相变调温纳米纤维的结构与性能[J]. 纺织学报, 2014, 35(7): 30-35.
- [23] 李群华, 丁盛. 相变纳米纤维/织物复合材料制备与保温性分析[J]. 上海纺织科技, 2015, 43(4): 21-23.
- [24] 朱雯, 苏云, 陈若颖, 等. 相变微胶囊涂层织物在热防护服中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 180-185.
- [25] 赵蒙蒙. 可调温织物与服装吸热效应评价研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [26] GAO C, KUKLANE K, HOLMER I. Thermoregulatory manikins are desirable for evaluations of intelligent clothing and smart textiles[C]//Proceedings of the 8th International Meeting for Manikins and Modeling (813M). Victoria; 8th International Meeting for Manikins and Modeling, 2010: 1-5.
- [27] SAFAVI A, LATIFI M, TEHRAN M A, **et al.** Experimental study of thermo-regulating property of clothing systems contained different melting point microencapsulated PCM[J]. Journal of Textiles and Polymers, 2015, 3(1): 7-11.
- [28] 付笑笑, 姚宝国, 张德品. 形状记忆聚合织物弯曲回复力测试装置及试验[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(4): 59-62.
- [29] 张小琪. 形状记忆纺织品和遮热纺织品检测方法的研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [30] 于明昕, 周啸. 金属双硫脲在聚合物介质中的光致变色行为[J]. 功能材料, 2001, 32(2): 203-205.
- [31] 赵博研, 赵玉珠. 光致变色纺织品的检测方法[J]. 纺织学报, 2019, 40(8): 124-129.
- [32] 李淑华, 黄雪红. 热敏性聚氨酯防水透湿薄膜的制备及复合户外面料性能探讨[J]. 印染助剂, 2019, 36(2): 57-60.
- [33] LV H, XUE Y, CAI Z, **et al.** Microporous membrane with temperature-sensitive breathability based on PU/PNI-PAAM semi-IPN[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(1): 2-8.
- [34] 吴杰. 智能监护服设计与可靠性评价[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [35] 张妍. 电加热服装的服用性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [36] PARK H, HWANG S, LEE Y, **et al.** Impact of electrical heating on effective thermal insulation of a multi-layered winter clothing system for optimal heating efficiency[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2016(28): 1-18.

收稿日期 2021年1月10日