

红外伪装与隐身纺织材料的研究进展

楼 焕, 刘 茜

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

摘要: 随着现代化高精尖的新型武器装备在军事领域中的运用, 目标探测与监视系统迅速发展, 对于伪装材料的进一步深化研究具有重要意义。本文对伪装与隐身纺织材料的研究现状进行了梳理, 介绍了伪装隐身材料的应用机理, 重点关注了应用最广泛的红外伪装材料与纺织技术的结合, 概述了仿生伪装纺织材料的新研究, 对新型动态变化伪装纺织品进行了总结, 并对伪装纺织品的新型检测技术与制备技术进行了归纳。最后, 对未来伪装纺织材料的发展趋势做出了预测分析。

关键词: 伪装; 纺织材料; 红外; 仿生; 功能材料

中图分类号: TS106

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2024)04-0384-08

Research Progress of Infrared Camouflage and Stealth Textile Materials

LOU Huan, LIU Qian

(Fashion College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the application of modern sophisticated weapons and equipment in the military field, target detection and surveillance systems have developed rapidly, which is of great significance for the further study of camouflage materials. This paper discusses the research status of camouflage and stealth textile materials, introduces their application mechanism, focuses on the combination of the most widely used infrared camouflage materials and textile technology, summarizes new research on bionic camouflage textile materials, summarizes new dynamic-change camouflage textiles, and summarizes new detection and preparation technologies for camouflage textiles. Finally, the future development trends of camouflage textile materials are predicted and analyzed.

Key words: camouflage, textile materials, infrared, bionics, functional materials

0 引言

随着科学技术的更新迭代及其在军事领域中越来越广泛的应用, 现代化军事部队已不断朝着高新技术发展。在军事战场中, 伪装与隐身技术作为一种高新技术的反侦察手段, 充当着现代战争中的重要组成部分, 有效提高了军队在作战过程中的生存能力。伪装即隐蔽自身目标, 使用一些隐真示假的技术手段, 通过迷惑对方, 使己方在一定距离范围内不被发现或难以辨认。而隐身作为一种伪装的延展, 通过变更自身及武器装备的信息特征, 使对方的侦察系统不易察觉。两者综合性强, 包括计算机、光、电、热、仿生、植物、材料、数学、化学等学科^[1], 涉及到的领域广阔。伪装的实现主要依靠减小自身目标和目标所处环

境在热红外、光学、微波波段的电磁波散射及辐射特性的差异, 以此隐蔽或降低目标的可探测性^[2-4], 这便是“隐真”。从“示假”的角度进行考虑, 则是扩大或模仿目标和环境间的这些差异, 通过假目标引诱对方。目前, 纺织品因其轻质、柔性的特性, 通过伪装网、装饰和服装等形式, 已被广泛用作伪装媒介模仿自然及人工背景^[5]。进一步研究伪装与隐身纺织材料对于军事发展具有重要意义。

1 红外伪装与隐身纺织材料的研究进展

目前, 伪装与隐身纺织材料主要通过是在织物上涂覆具有防红外侦视功能的涂料来实现。将功能性材料加入到红外伪装涂料的配制中, 可以开发具有特殊功能的伪装纺织基材。近年来, 通过研究部分动植物对

收稿日期: 2023-01-25; 修订日期: 2023-05-27。

作者简介: 楼焕 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事功能性纺织品的研究。

通信作者: 刘茜 (1978-), 女, 副教授, 博士。主要从事功能性纺织材料的研究开发。E-mail: liuqianfangzhi@126.com。

基金项目: 上海市重点课程建设项目 (s202309002)。

环境的自适应伪装本领, 仿生伪装纺织材料已经具有大量的研究。面对智能纺织品的日益兴起, 能根据环境变化而主动进行调节的动态伪装纺织品也在不断发展。

1.1 红外伪装

红外伪装是通过吸热、散热或隔热等一定控温方式, 应用红外低发射率材料来减弱或消除自身目标与背景环境的反射与辐射能量差异, 将自身的红外目标融合于背景中, 降低目标的辨识度, 达到混淆探测的效果^[6-7]。理论上, 任何物体在高于绝对零度时都会发出红外辐射而被红外探测设备检测到。为避免红外探测和跟踪, 有效的隐身方法通常有降低红外发射物体的表面温度或使用红外屏蔽材料两种, 即利用隔热材料包裹物体以防止热量扩散到物体表面, 或在物体表面涂上一层能屏蔽红外信号的材料来降低所发射的红外辐射强度^[8-9]。

迷彩伪装是伪装技术应用的一大途径, 根据迷彩图案的设计原理, 使用迷彩涂料对织物进行涂覆加工, 在织物表面形成与各种背景环境相匹配的系列多彩色斑。为了达到更好的反侦察效果, 通常在涂料中加入具有防红外侦察等功能材料, 使其与周围环境的反射光谱基本一致。随着现代红外探测技术的迅速发展, 对于伪装涂料在防侦功能上的提升也愈发迫切。聚磺酰胺织物具有良好的耐热阻燃性能, 并具有较高的机械强度, 适合用作迷彩服装材料, 但由于其分子间存在强相互作用力, 织物难以印花或达到理想的色深、色牢度要求。CAO H. M.等^[10]使用分散染料在聚磺酰胺织物上进行迷彩印花, 如图1所示, 其反射率与树叶相近, 在丛林中可起到良好的隐蔽和伪装效果。通过改变染色载体, 得出优化后的印花工艺: 环保载体 Levegal C45 的浓度为3%~4%, 焙烘温度195℃~200℃、焙烘时间50~70 s。



图1 聚磺酰胺印花织物^[10]

Fig.1 Polysulfonamide printed fabric^[10]

面对荒漠、丛林和雪地等不同作战环境的伪装, 人们已经进行了不同的探索。徐共荣等^[11]利用铜粉作为功能填料, 以黄色和绿色作为主色调制备了低发射率隐身涂料以模拟荒漠与丛林背景, 通过在涤棉混纺织物上平网印花, 探讨了颜料的种类、铜粉的浓度

及直径对热红外伪装性能的影响。结果表明, 选用氧化铁黄 313 和氧化铁绿 5605 作为填充颜料, 将700目的铜粉加入涂料且铜粉质量分数占涂料的10%时可以明显降低织物表面红外发射率, 使织物与背景环境发射率相匹配, 兼具可见光隐身、近红外隐身及热红外隐身的功能。而针对雪地伪装材料的匮乏, 李月荣等^[12]使用一种对紫外线有高反射、强吸收能力的纳米 SiO₂ 白色涂料, 通过印花技术设计开发了一款服用性能佳的功能性涤纶织物。在300~400 nm波段内, 含10%质量分数纳米 SiO₂ 的颜料色浆印制于涤纶织物后, 在紫外反射上可高达90%, 紫外透过率在5%以下, 且紫外线防护系数 (ultraviolet protection factor, UPF) 高于300, 其不但具有良好的雪地伪装性能, 而且还有优异的紫外线防护功能, 为雪地单兵作战的伪装防护开拓新思路。此外, 李月荣等^[13]探讨了纳米 SiO₂ 与 MgO 粒子在单独或复合作为印花涂料时对伪装效果的影响, 发现当这两种涂料按2:1的质量比进行复合且用量占12%时, 织物的反射率可以高于80%, 其雪地伪装效果比单独使用涂料时更佳, 两种材料在单独使用时的不足之处得到改善。为提高适用性, 唐继海等^[14]混配红外低发射率颜料和近红外高反射颜料, 制备了适用于多波段伪装的水性印花涂料, 并使用圆网印花工艺将其印染于涤棉混纺织物。该多波段伪装涂料拓宽了伪装织物的应用场景, 织物兼具可见光、近红外和热红外隐身功能, 可以高效助力军事伪装, 为作战提供便利。

目前, 基于纺织品轻量化和柔性特点的高效红外隐身材料的研究已有不少报道。XU R.等^[15]将具有夹层结构的碳纳米管掺杂气凝胶 (CNTAs) 热压在聚酰亚胺 (PI) 织物上, 并在其外层涂覆了红外低发射率材料 Al-doped ZnO (ZAO), 如图2所示。由此所得的复合材料表面发射率小于0.5, 中间气凝胶层的热导率低至0.013 W/(m·K), 体现出优异的红外隐身、阻燃及隔热性能, 在红外伪装服装和高温下工作人员的隔热防护等领域具有良好的应用前景。JEONG S. M.等^[16]则是制备了一种聚氨酯-氧化锡锑 (PU-ATO) 复合纤维。其先由溶胶-凝胶法制备 ATO 溶胶, 对其老化时间和 ATO 浓度进行优化后, 将该溶胶与 PU 溶液混合, 利用湿法纺丝技术从混合悬浮液中制备得到复合纤维, 并通过对 PU-ATO 复合纤维表面进行化学改性使其具有疏水性, 解决了纤维暴露于大气水体时红外和热辐射屏蔽功能失真的问题。该纤维具有适当的机械强度, 可以织制成织物进行应用, 如图3所示, 当手指套上 PU-ATO 复合纤维织物时, 被织物覆盖的部分在红外摄像机下完全“隐身”, 好似被“切

断”，表现出优异的红外和热辐射屏蔽功能。

人体的红外辐射集中在 $8\sim 16\mu\text{m}$ 波段，为了实现红外屏蔽，还可以通过引入红外反射率高的金属膜来提高该段波长的反射率。JIAL. L.等^[17]利用磁控溅射技术将纳米铜薄膜均匀沉积于芳纶织物上，制备了一种具有增强红外屏蔽功能的特殊金属化服装，如图

4所示。结果表明，随着溅射次数的增加，沉积层的红外反射率随铜薄膜厚度的增加而逐渐增大。当铜溅射时间为10 min时，红外反射率高于90%。沉积层芳纶织物具有耐高温、强度高的优异性能，在涂膜后其拉伸应变和导电性均也有所改善，为未来军用功能性伪装服装的发展提供了参考。

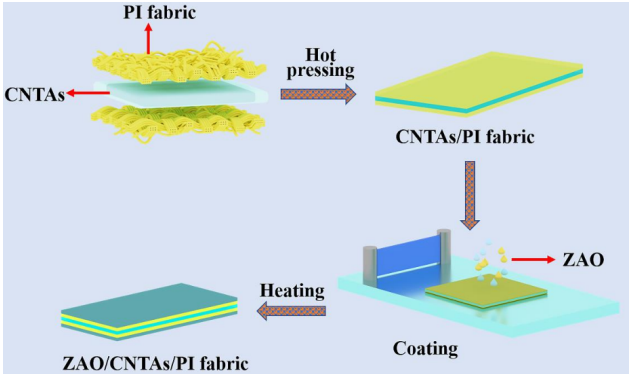


图2 ZAO/CNTAs/PI 夹层织物的制备过程^[15]

Fig.2 Preparation process of ZAO/CNTAs/PI sandwich fabric ^[15]

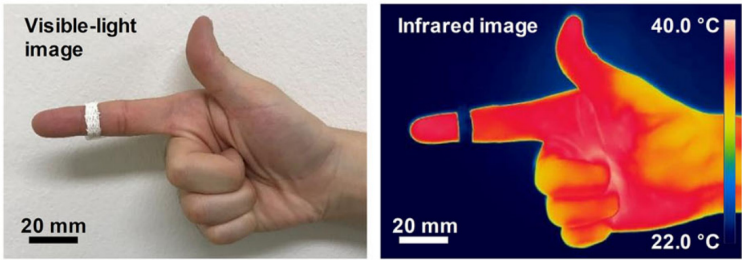


图3 PU-ATO 纺织品的照片（左）及热像图（右）^[16]

Fig.3 Photo(left) and infrared thermography(right) of PU-ATO textiles ^[16]

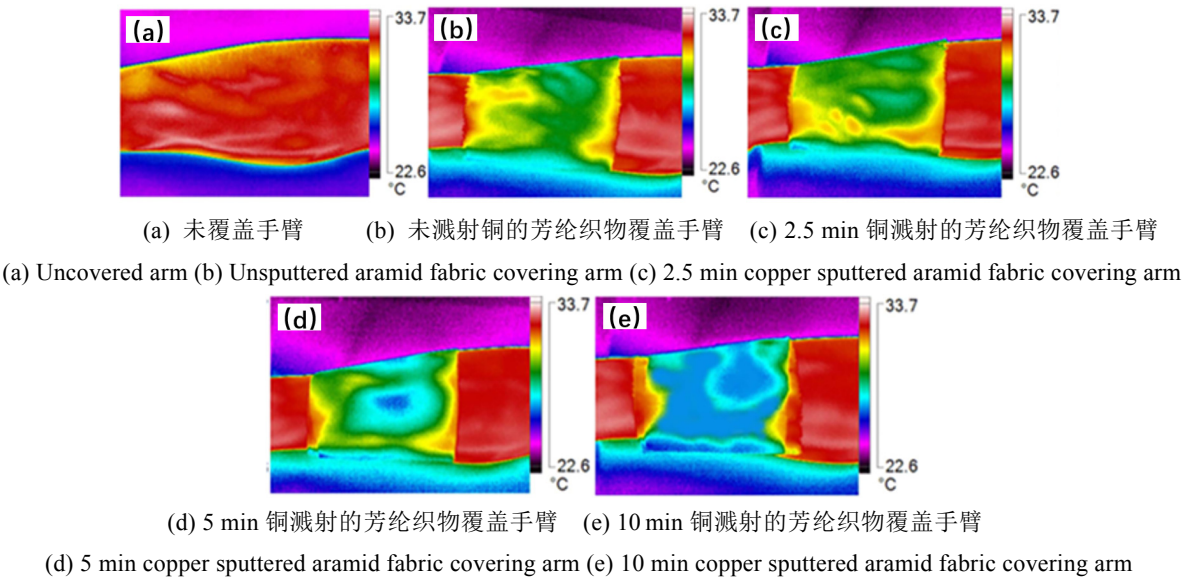


图4 人体手臂红外热像图^[17]

Fig.4 Infrared thermal image of human arm^[17]

1.2 仿生伪装

近年来,通过模仿自然界中动植物固有的伪装机

物特殊的皮肤组织结构为新型伪装装置的设计提供了灵感^[18-20]，尤其是部分头足类动物可以通过选择性收缩肌肉来可逆激活体内色素而实现变色，借鉴这

一特征, WANG Q. M.等^[21]将螺吡喃材料与 Sylgard 184 硅橡胶共价耦合, 制备了一种可通过拉伸变形而变色的弹性体薄膜, 如图 5 所示, 经单向拉伸, 螺吡喃的分子构型发生变化, 这一弹性体薄膜可从淡黄色变为深蓝色。将其与电极、缓冲弹性体、保护绝缘体和金属箔组成多层复合结构, 可根据需要通过控制电场电压而触发变色和荧光, 达到可逆的电-机械-化学一体化响应, 对于柔性伪装带来新的思路。得益于身体毛发的中空结构, 北极熊等生活在极寒环境中的动物具有惊人的保暖能力。通过模拟北极熊的毛发, CUI Y.等^[22]采用冷冻纺丝技术, 制造了连续且可大规模生产的多孔结构仿生纤维。如图 6 所示, 当兔子身着由该种仿生多孔纤维织制成的织物时, 在不同背景

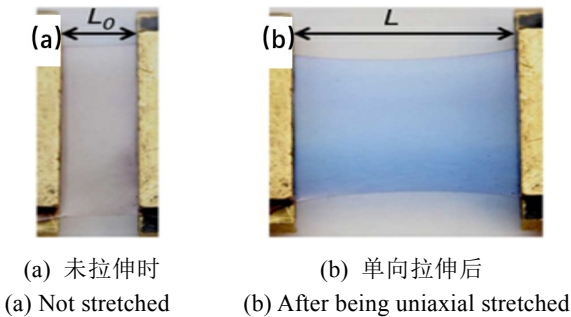


图 5 弹性体薄膜的拉伸变色^[21]

Fig.5 Stretch discoloration of elastic thin films^[21]

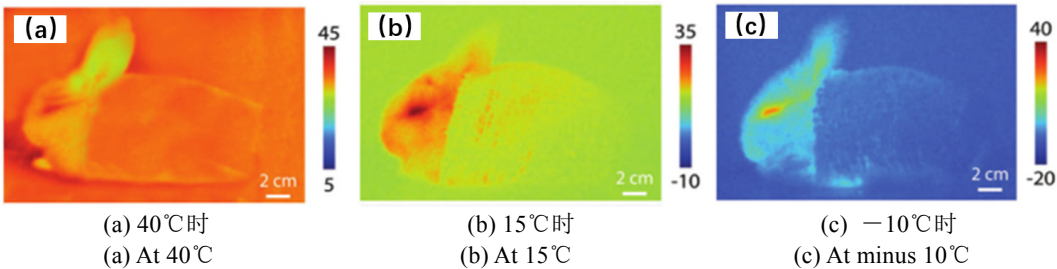


图 6 不同温度下多孔仿生织物的红外热像图^[22]

Fig.6 Infrared thermography of porous biomimetic fabrics at different temperatures^[22]

蒋晓军等^[24]则利用植物叶片结构特征, 设计了具有超吸水性控温伪装功能的多层复合结构绿色织物, 如图 8 所示。该复合织物由亲水处理后的高强度涤纶基布制备成的支撑网眼布拟作叶脉, 由丙烯酸盐超吸水材料聚合于纤维表面形成的超吸水材料层拟作叶肉, 再由透水透气的功能膜保护层拟作叶片上下表层。该织物表面还由基于减色法配色原理与绿色植被光谱反射特征制备成的绿色水性伪装色浆作为伪装涂层。由此制成的伪装植被样网与真正的植被具有相似的红外辐射特性, 且可调控材料的吸水与保水, 对于模拟植被而进行伪装提供了又一途径。

1.3 动态伪装

随着智能纺织品的开发与广泛应用, 能够充分响应外部刺激而主动做出相应调控的智能伪装纺织品

温度下都不会被红外摄像机观察到, 体现了其优越的隔热保温性能。此外, 由该种纤维制成的纺织品具有优良的透气性和耐磨性, 且由于其柔软和多孔的性质而穿着舒适, 对于研制军事隐身伪装材料和新型隔热作战服具有重要意义。

爬行类动物变色龙是自然界中具有非凡变色本领的典型代表, 其皮肤层内各种色素细胞随环境变化而主动调控变色的机理一直吸引着人们对变色伪装的探索。李欢欢等^[23]利用微流控技术模拟变色龙皮肤, 利用软刻蚀技术, 制作了随环境变化而自我调节的变色伪装薄膜。其原理是, 先通过深度学习算法对含有目标的背景环境进行图像补全, 再根据变色龙皮肤上的微流道结构分割薄膜的色彩图像, 用图像数据处理所获取环境背景图像的色彩信息, 进行颜色识别与分类后, 经由控制器将色彩信号转化为变色信号, 驱使相应有色液体进入薄膜微流道内, 从而驱动伪装薄膜发生颜色变化。如图 7 所示, 在不同背景下, 薄膜伪装后的物体表面轮廓完整度降低, 与背景环境相融性较高, 可以实现高效的动态隐身及伪装。该薄膜的自适应伪装为军用设备与服饰奠定了基础, 通过多样化设计薄膜微流道的尺寸与形状, 其能满足更多不同的使用需求, 从而扩大适用领域。

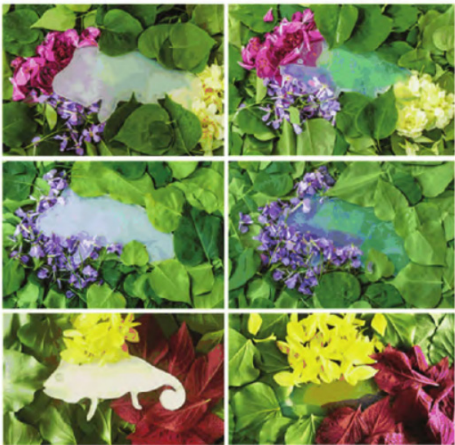


图 7 变色龙皮肤伪装前 (左) 后 (右) 对比^[23]

Fig.7 Comparison of chameleon skin before (left) and after (right) camouflage^[23]

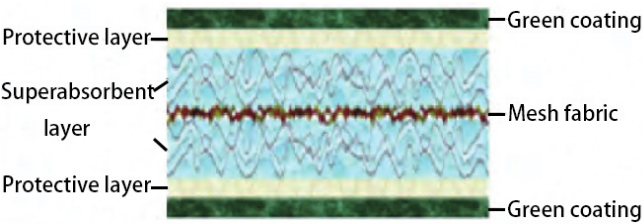


图 8 超吸水性控温伪装织物的结构^[24]

Fig.8 Structure of superabsorbent temperature controlled uflage fabric ^[24]

也在不断发展,目前研究较多的有热敏变色和电致变色伪装织物。XU R.等^[25]使用相变材料石蜡作为微胶囊的芯材,使用脲醛树脂作为壁材,通过原位聚合法制备了相变微胶囊,并将其制成涂料涂覆于织物上得到了红外伪装织物。当一侧织物受热时,织物上的相变微胶囊会吸收热量致使芯材石蜡发生相变,而另一侧织物温度仍较低,此时热量不易传递到外界,所以红外发射率降低,达到了红外伪装的效果。该织物具有显著的调温能力,可以降低温度 5℃~10℃,能有效降低红外热辐射,为红外伪装织物的工业化制备提供依据。Viková M.等^[26]使用具有较高耐光牢度的热敏变色微胶囊油墨,根据捷克林地和沙漠作战服中运用的颜色,通过不同油墨的颜色组合,设计了一种随环境转变而自动变色的伪装服。如图 9 所示,在达到油墨变色转变温度时,作战服呈现适于沙漠环境伪装的色系,而在低于转变温度时,服装又转变为适于林地伪装的色系。这项研究展示了纺织品动态图案的设计可能性,实现了一种作战服应用于不同环境的伪装。

可穿戴电致变色织物发展多年,却由于装置结构与电极材料的复杂性而降低了其实用性。从多色电致变色聚合物和高性能有机薄膜晶体管中共轭聚合物分支基团的研究设计中得到启发,YU H. T.等^[27]基于新型侧链工程,通过改变不同空间结构(短、直和支

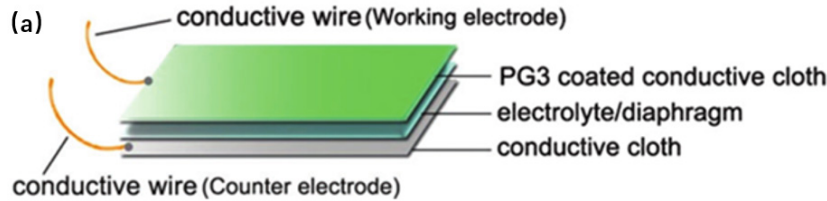
链)的烷氧基侧链来调整有机共轭材料,改变其电致变色性能,并使用喷涂方法制备了电致变色织物器件。如图 10(a)所示为该研究使用的装置结构,图 10(b)为字母在施加-1.5 V 的电势时,于中性状态下呈现植物绿色,在施加+1.5 V 的电势时,于氧化状态下呈现土壤棕色,其红外吸收能力强,具有超疏水性与强稳定性,加之其可逆切换变色性能,十分适用于丛林与沙漠环境转换时的自适应伪装。另一项研究中,YU H. T.等^[28]使用半导体材料 ITO 薄膜作为电极构建横向配置的电极结构,利用其高导电率、优异的成膜能力和良好的柔韧性、粘附性、化学稳定性,通过全溶液工艺,将电致变色聚合物和固体电解质层依次添加到 ITO 薄膜和织物表面,制备了一种电致变色伪装织物。如图 11 所示,每个 ITO 薄膜涂上了不同的电致变色材料并用作工作电极,同时作为彼此的计数电极和参考电极。在对两个 ITO 薄膜施加 3 V 电压时,织物颜色在植物绿色和土壤棕色之间变换,具有动态伪装功能。由于电极是单层薄膜结构,电致变色织物整体轻而薄,具有优异的灵活性,进一步扩大了实用性。



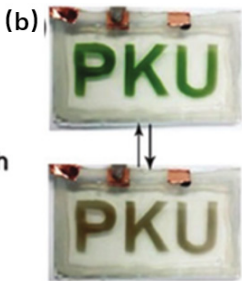
(a) 对于沙漠伪装 (b)对于林地伪装
(a) For desert camouflage (b) For forest camouflage

图 9 热敏变色伪装服的动态变化^[26]

Fig.9 Dynamic changes in thermochromic camouflage clothing^[26]



(a) 装置截面图
(a) Section diagram of the device



(b) 变色效果图
(b) Diagram of color change effect

图 10 电致变色织物^[10]

Fig.10 Electrochromic fabric^[10]

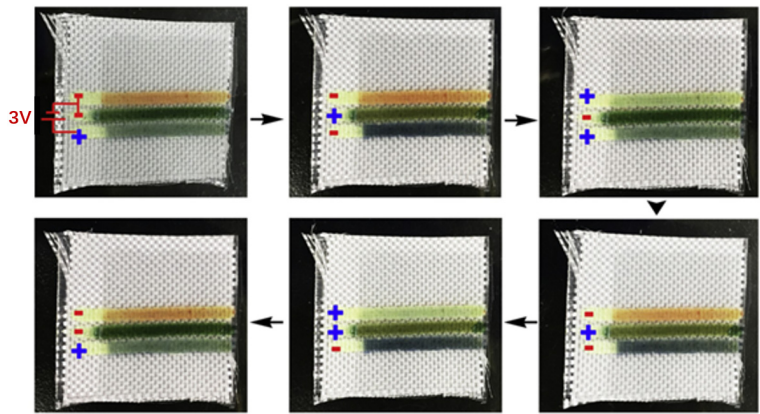


图 11 3 V 电压下 ITO 电致变色织物的不同变色状态^[28]

Fig.11 Different color change states of ITO electrochromic fabrics with an 3 V applied potential ^[28]

1.4 技术创新

1.4.1 建模与测算

在军事上应用的伪装织物,通常是将具有组合反射光谱特征的复杂迷彩图案印染于织物上。RAMSEY S.等^[29]利用扩散反射率理论,提出了一种在可见光波长范围内伪装图案反射率的建模方法和原型模拟,可以有效模拟现实野外环境下伪装织物的图案反射率,对其生存能力进行定量评估。该建模方式还能进一步扩展到模拟影响伪装目标探测的各种因素,为适应复杂多变的环境创造条件。陈克清^[30]利用高光谱遥感成像技术,从空间、时间和光谱三维度来获取更多地物信息,研究了迷彩伪装服与背景地表地物的光谱曲线,建立了相应的迷彩服高光谱数据库,为光谱曲线的匹配与识别带来便利,可推演对应像素目标的组成成分,实现高效目标探测。徐军等^[31]基于织物交织结构及非导热体特性,提出了一种结合红外热像仪与热板仪对织物的红外发射率进行测量的方法,将织物贴在热板仪上,利用热学方程求解织物表面真实温度,再由此测算织物发射率。通过对不同成分、组织和颜色的织物表面发射率进行测试,得出织物表面粗糙的比光滑的发射率高,且发射率受颜色影响,该法可以解决织物表面温度难于精准计算的问题,适用于中厚型织物的红外发射率测试。

1.4.2 结构与组织

ZHAO Z. Y.等^[32]使用涤纶和涂层处理后的 PE 扁

丝,采用不同底组织构造了链式和网状两种三维经编伪装织物(如图 12 所示),研究了不同底组织和不同高度 PE 扁丝对三维经编织物吸波性能的影响。研究表明,底组织为网状的三维经编织物具有更多空隙、结构稳定,有助于雷达波的损耗,吸波性能力更强。而 PE 扁丝高度的增加,也有助于三维经编伪装织物的吸波性能的提高。与其他结构相比,三维结构经编织物制造过程简便,除了具有优越的力学性能和抗脱散性能,最重要的是具有优异的吸波性能。该研究弥补了三维经编结构伪装织物的空缺,为新型伪装面料的开发开拓了新道路。

1.4.3 色彩匹配

伪装纺织品的印花配色对象多数是显示器上的设计图纸,根据目标环境通过计算机辅助系统进行设计,在计算机显示器之间进行传输、上色。为了提高伪装印花的色彩再现精度,WANG Y. W.等^[33]将印刷领域中运用的色彩管理引入了纺织品印花中,提出了一种新的色彩匹配方法——显示器-纸-织物,由喷墨打印机颜色管理后打印出的纸卡颜色匹配打印浆料。区别于显示器-织物,即由显示器进行颜色校正后进行匹配的配色方法,该方法是将显示器的颜色先转移到纸卡上,再转移到织物上,利用纸卡上的油墨和织物上的染料相似的减色法显色原理,实现纸张与织物之间的颜色一致性优于显示器与织物之间的颜色一致性,提高了伪装纺织品印染的色彩精度。

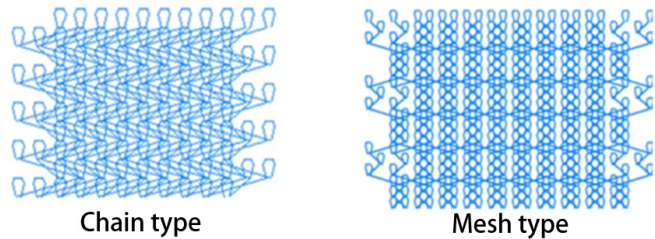


图 12 三维经编织物的底组织^[32]

Fig.12 The bottom structure of three-dimensional warp knitted fabric^[32]

2 结论

随着现代化探测与监视设备的进一步发展,单一的伪装与隐身纺织材料已经不能满足现实需求,需要不断创新。综上所述,目前,通过在伪装涂料中引入不同的功能性材料,模拟自然界中动植物环境自适应的伪装本领,结合能响应外界环境变化而自行做出调节的智能材料,以及更新识别与测算技术、设计织物新型结构和提高印花色彩精度,伪装与隐身纺织材料已经有了大量新的进展。在未来,伪装纺织品将继续朝着柔性舒适可穿戴的轻量化、随环境变化而自适应性调节的智能化、多场景兼容化发展,在各项伪装纺织材料的检测技术与设计制备上,也将朝着精细化、精准化不断创新改进。

参考文献:

- [1] 马世欣, 刘春桐, 李洪才, 等. 基于高光谱图像探测与感知的伪装效果评估方法[J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1485-1494.
MA S X, LIU C T, LI H C, et al. Camouflage effect evaluation based on hyperspectral image detection and visual perception[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1485-1494.
- [2] 郑万里, 杨萍, 闫少强, 等. 军事伪装技术研究现状及发展趋势分析[J]. 现代防御技术, 2022, 50(1): 81-86.
ZHENG W L, YANG P, YAN S Q, et al. Analysis on the research status and development trend of military camouflage technology[J]. *Modern Defence Technology*, 2022, 50(1): 81-86.
- [3] 李广德, 刘东青, 王义, 等. 热红外伪装技术的研究现状与进展[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 495-503.
LI G D, LIU D Q, WANG Y, et al. Research status and progress of the thermal infrared camouflage technology[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(6): 495-503.
- [4] 胡杰, 路远, 候典心, 等. 红外伪装技术研究进展[J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 803-808.
HU J, LU Y, HOU D X, et al. Research progress of infrared camouflage technology[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(7): 803-808.
- [5] Rubežienė V, Padleckienė I, Baltušnikaitė J, et al. Evaluation of camouflage effectiveness of printed fabrics in visible and near infrared radiation spectral ranges[J]. *Mater Sci-Medzg*, 2008, 14(4): 361-365.
- [6] 戴全辉. 巡航导弹武器系统伪装生存与隐身突防研究[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 41-46.
DAI Q H. Research on camouflage survival and stealth penetration on cruise missile weapon system[J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(4): 41-46.
- [7] 郝立才, 肖红, 刘卫. 织物热红外伪装性能测试评价技术现状[J]. 红外技术, 2013, 35(8): 512-517.
HAO L C, XIAO H, LIU W. Review on evaluating methods of thermal infrared camouflage performance of textiles[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 512-517.
- [8] QU Y, LI Q, CAI L, et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 1-10.
- [9] SALIHOGLU O, UZLU H B, YAKAR O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4541-4548.
- [10] CAO H M, YANG J F. The process of camouflage painting for polysulfonamide fabric with disperse dyes[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 3569(1048): 313-317.
- [11] 徐共荣, 俞萧, 周岚, 等. 低发射率涂料的研制及其在涤/棉混纺织物热红外伪装中的应用[J]. 丝绸, 2014, 51(2): 1-5.
XU G R, YU X, ZHOU L, et al. Preparation of low-emissivity coating and its application in thermal infrared camouflage of polyester/cotton blended fabrics[J]. *Journal of Silk*, 2014, 51(2): 1-5.
- [12] 李月荣, 周岚, 冯新星, 等. 纳米二氧化硅涂料印花雪地伪装织物的制备及其性能表征[J]. 纺织学报, 2015, 36(6): 77-83.
LI Y R, ZHOU L, FENG X X, et al. Preparation and performance characterization of nano-SiO₂ printed fabric with snow camouflage protective properties[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(6): 77-83.
- [13] 李月荣, 周岚, 冯新星, 等. 纳米SiO₂/MgO印花颜料对织物雪地伪装性能的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2015, 33(5): 291-295.
LI Y R, ZHOU L, FENG X X, et al. The influence of nano-SiO₂ and MgO pigment on camouflage performance of printed fabrics in snowfield[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University(Natural Sciences)*, 2015, 33(5): 291-295.
- [14] 唐继海, 郑红川, 杨骥, 等. 织物用水性多波段伪装印花涂料的研究与应用[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 161-166.
TANG J H, ZHENG H C, YANG Q, et al. Research and application of waterborne multichannel camouflage printing coating for fabrics[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(6): 161-166.
- [15] XU R, WANG W, YU D. A novel multilayer sandwich fabric-based composite material for infrared stealth and super thermal insulation protection[J]. *Composite Structures*, 2019, 212: 58-65.
- [16] JEONG S M, AHN J, CHOI Y K, et al. Development of a wearable infrared shield based on a polyurethane-antimony tin oxide composite fiber[J]. *NPG Asia Materials*, 2020, 12(1): 1-13.
- [17] JIA L L, FU B H, LU M L, et al. High-performance aramid fabric in infrared shielding by magnetron sputtering method[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(5): 056401.
- [18] PHAN L, ORDINARIO D D, KARSHALEY E, et al. Infrared invisibility stickers inspired by cephalopods[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(25): 6493-6498.
- [19] PHAN L, WALKUP IV W G, ORDINARIO D D, et al. Reconfigurable

infrared camouflage coatings from a cephalopod protein[J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(39): 5621-5625.

[20] ROSSITER J, YAP B, CONN A. Biomimetic chromatophores for camouflage and soft active surfaces[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, **7**(3): 036009.

[21] WANG Q M, GOSSWEILER G R, CRAIG STEPHEN L, et al. Cephalopod-inspired design of electro-mechano-chemically responsive elastomers for on-demand fluorescent patterning[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**(1): 4899.

[22] CUI Y, GONG H, WANG Y, et al. A thermally insulating textile inspired by polar bear hair[J]. *Advanced Materials*, 2018, **30**(14): 1706807.

[23] 李欢欢, 李鲁佳, 李国昕, 等. 微流控变色系统的伪装特性及图像补全方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, **54**(7): 83-88.

LI H H, LI L J, LI G X, et al. Research on camouflage properties and image completion methods of microfluidic color-changing systems[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, **54**(7): 83-88.

[24] 蒋晓军, 王华林, 凌军, 等. 超吸水性控温绿色伪装织物的制备与性能研究[J]. *兵工学报*, 2017, **38**(2): 345-350.

JIANG X J, WANG H L, LING J, et al. Preparation and performance research of super absorbent and temperature control green camouflage fabric[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, **38**(2): 345-350.

[25] XU R, XIA X, WANG W, et al. Infrared camouflage fabric prepared by paraffin phase change microcapsule with good thermal insulating properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, **591**: 124519.

[26] Viková M, Pechová M. Study of adaptive thermochromic camouflage for combat uniform[J]. *Textile Research Journal*, 2020, **90**(17-18): 2070-2084.

[27] YU H T, SHAO S, YAN L J, et al. Side-chain engineering of green color electrochromic polymer materials: toward adaptive camouflage application[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(12): 2269-2273.

[28] YU H T, QI M W, WANG J N, et al. A feasible strategy for the fabrication of camouflage electrochromic fabric and unconventional devices[J]. *Electrochemistry Communications*, 2019, **102**: 31-36.

[29] RAMSEY S, MAYO T, HOWELLS C A, et al. Modeling apparent camouflage-pattern color using segment-weighted spectra[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2019, **33**(5): 541-556.

[30] 陈克清. 迷彩伪装服的高光谱特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.

CHEN K Q. Research on Hyperspectral Characteristic of Camouflage clothing[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.

[31] 徐军, 陈益松, 甄慧英, 等. 基于红外热像技术的织物红外发射率测量方法[J]. *纺织学报*, 2009, **30**(9): 41-44.

XU J, CHEN Y S, ZHEN H Y, et al. Fabric IR emissivity as measured by IR thermal-imaging technology[J]. *Journal of Textile Research*, 2009, **30**(9): 41-44.

[32] ZHAO Z Y, MA P B, LIN H T, et al. Radar-absorbing performances of camouflage fabrics with 3D warp-knitted structures[J]. *Fibers and Polymers*, 2020, **21**(3): 532-537.

[33] WANG Y W, YI Q Z, DING Y, et al. A comparative study of camouflage printing color matching based on monitor and paper card[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, **22**(4): 1009-1015.