

基于人体工学开发的伪装防护服研究进展

张岩, 朱颖, 王金帅

(苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215123)

摘要:当前伪装技术难以满足现代化战争跨区域、多季节、全时段的伪装需求,同时士兵在没有充分舒适感的情况下也难以完全发挥战斗力。文中分类论述了当前国内外伪装防护面料的研究成果,讨论了当前伪装防护面料的不足,并基于人体工学理论分析当下的伪装防护服,总结了当前基于人体工学的防护服评价与测试相关方法及标准,以期促进伪装防护领域的研究与发展。

关键词: 人体工学; 伪装防护; 伪装防护服

中图分类号: TS 941.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2023)06-0486-09

Research Progress of Anti-Counterfeit Garments Based on Ergonomic Development

ZHANG Yan, ZHU Ying, WANG Jinshuai

(School of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: Current camouflage technology cannot meet the cross-region, multi-season and full-time camouflage needs of modern warfare, and it is difficult for soldiers to fully exert their combat effectiveness without sufficient comfort. In this paper, the current research results at home and abroad were discussed from the classification of anti-counterfeit garments fabrics, the shortcomings of the current anti-counterfeiting fabrics were analyzed, and the currently developed anti-counterfeit garments were analyzed based on the theory of ergonomics. The relevant methods and standards for the evaluation and testing of the current ergonomics-based protective garments were summarized, with the expectation of promoting the research and development of the anti-counterfeit garments field.

Key words: ergonomic development, anti-counterfeiting, anti-counterfeit garments

随着现代战争迈向信息化、智能化、无人化,及各类先进探测和制导技术(如热红外侦察术、高光谱遥感技术等)应用于战场,大大增加了士兵被探测和攻击的风险。此外在作战过程中,士兵还需要面临各种复杂多变的地形、环境、天气等。探测技术与伪装技术作为矛与盾相互发展、相互制约。传统的伪装技术虽然在一定程度上可以达到伪装效果,但是难以满足现代化战争跨区域、多季节、全时段的伪装需求^[1]。因此伪装技术的研究成为当前各国军事研究的热点。

士兵在没有充分舒适感的情况下难以完全发挥战斗力。服装的舒适度很大程度反映在穿着者的心理及生理上,因此伪装防护服除了满足伪装的需求外,还应从人体工学的角度出发,满足穿着者

心理舒适性以及感官舒适性^[2]。文中从伪装防护面料出发,综述了近年来伪装防护服的国内外研究进展,结合当前人体工学评价与测试的相关指标对伪装防护服进行分析,总结当前存在的问题。

1 伪装防护面料的分类

图1为当前伪装防护的类型。由图1可以看出,伪装防护可以从材料、面料和服装3个角度展开。例如,通过自适应变色技术的材料达到在可见光范围内的伪装效果;通过相变微胶囊控制材料表面温度降低红外辐射强度达到隐身效果;通过在纤维或织物表面涂覆一层低红外发射率的膜或涂层,达到红外隐身的目的。

收稿日期:2023-04-06; 修订日期:2023-09-29。

作者简介:张岩(1986—),男,教授,硕士生导师。主要研究方向为纺织结构复合材料的力学性能、新型纤维功能化及新型纱线开发。Email: yanzhang86@suda.edu.cn

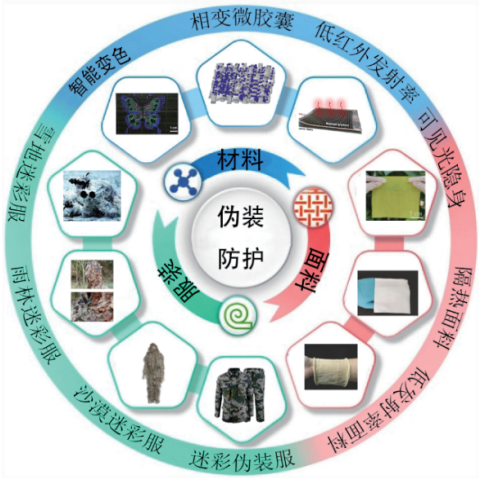


图1 伪装防护的材料、面料和服装

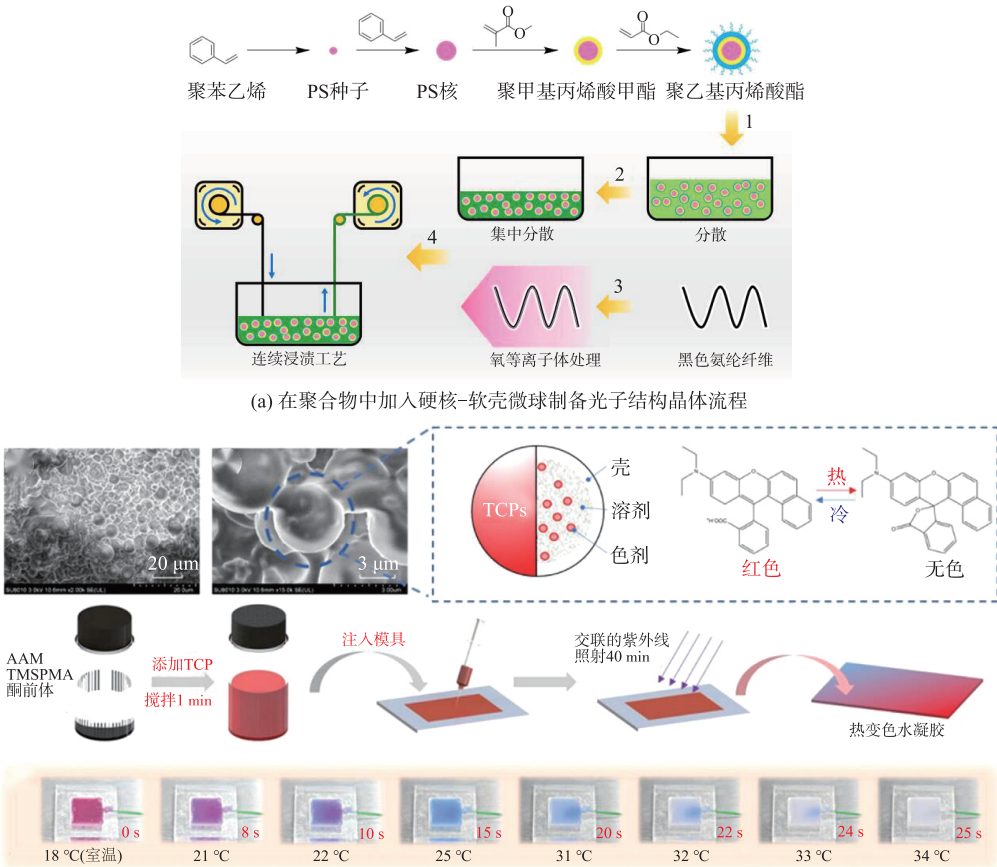
Fig.1 Anti-counterfeiting materials, fabrics and clothing

随着现代化战争中侦查技术的进步和发展,伪装服作为直接对抗侦查、监视的主体,在可见光、红外、雷达等各频段的伪装性能亦随之进步。按照对不同频率波段的隐身效果,可将伪装防护面料划分为可见光隐身、红外隐身、雷达隐身以及多波段兼容的隐身面料^[3]。

1.1 可见光波段隐身面料

可见光隐身需要面料的光反射尽可能与周围环境保持一致,减少目标与背景的可视对比度来达到隐身效果^[4]。以数字迷彩、涂色伪装为主的静态被动伪装难以适应不同环境下的伪装需求,因此亟须发展动态自适应变色伪装技术^[5]。

可见光隐身面料的制备如图2所示。ZHANG J等^[6]将硬核-软壳微球浸入聚合物纤维材料上,这些微球组装成光子晶体结构以显示颜色,从而纤维的颜色可以通过改变核-壳微粒的直径来轻松控制,如通过拉伸可实现纤维材料从红色到绿色再到蓝色的转变。采用该纤维制备的面料能够主动地改变颜色达到可见光波段的伪装效果[见图2(a)]。WU T H等^[7]研制了一种新型的温度响应性水凝胶,该水凝胶内嵌入了由颜色开发剂、淡色剂和溶剂制备的微胶囊。随着温度的变化,微胶囊中的溶剂达到相变温度,实现颜色的变化。该材料颜色变化响应快速,稳定性好。将其集成到智能服装表面,可达到快速适应周围环境且具有较强稳定性的伪装效果[见图2(b)]。



(b) 温度响应变色水凝胶的制备、表征及不同温度下表面颜色变化

图2 可见光隐身面料的制备

Fig.2 Schematic preparation of visible light stealth fabric

此外,变色彩已成为热门的研究方向,其主要是将光敏变色材料或热敏变色材料制成微胶囊,然后再通过印花或后整理技术与伪装服结合,具有很强的环境适应性^[8]。高燕^[9]选用硬脂酸丁酯作为芯材,以天然无毒壳聚糖为原材料,通过界面聚合反应,成功制备一种新型壳聚糖基聚氨酯壳可逆光致变色相变微胶囊(RP-PCMs),而后采用水溶性聚氨酯(WPU)作为介质,把 RP-PCMs 整理到棉织物。该光致变色棉织物/WPU/RP-PCMs 不仅表现出优异的光致变色性能,而且具备储能温度调节能力,在防伪装领域具有一定的应用潜力和参考价值。

1.2 红外隐身面料

温度大于绝对零度的物体,无时无刻不在向外

界辐射红外能量^[10]。红外热成像仪在接收到物体的红外辐射后,将其转换成人眼能够识别的图像信息。因此,当目标物体与周围环境所发射的红外辐射强度相近时,探测器无法区分目标与环境,便达到了红外隐身效果^[11]。目前人体防护服达到红外隐身的两个主要途径为控制防护服表面温度和控制防护服表面的红外辐射率。

1.2.1 控温红外隐身面料 控温面料通常具有低热导率,可隔绝物体散发的热量,从而达到红外隐身效果。此外还可利用相变材料对热量进行存储或释放,使被保护物体的表面温度与周围环境温度保持一致^[12]。控温红外隐身面料的制备流程如图 3^[13-16]所示。

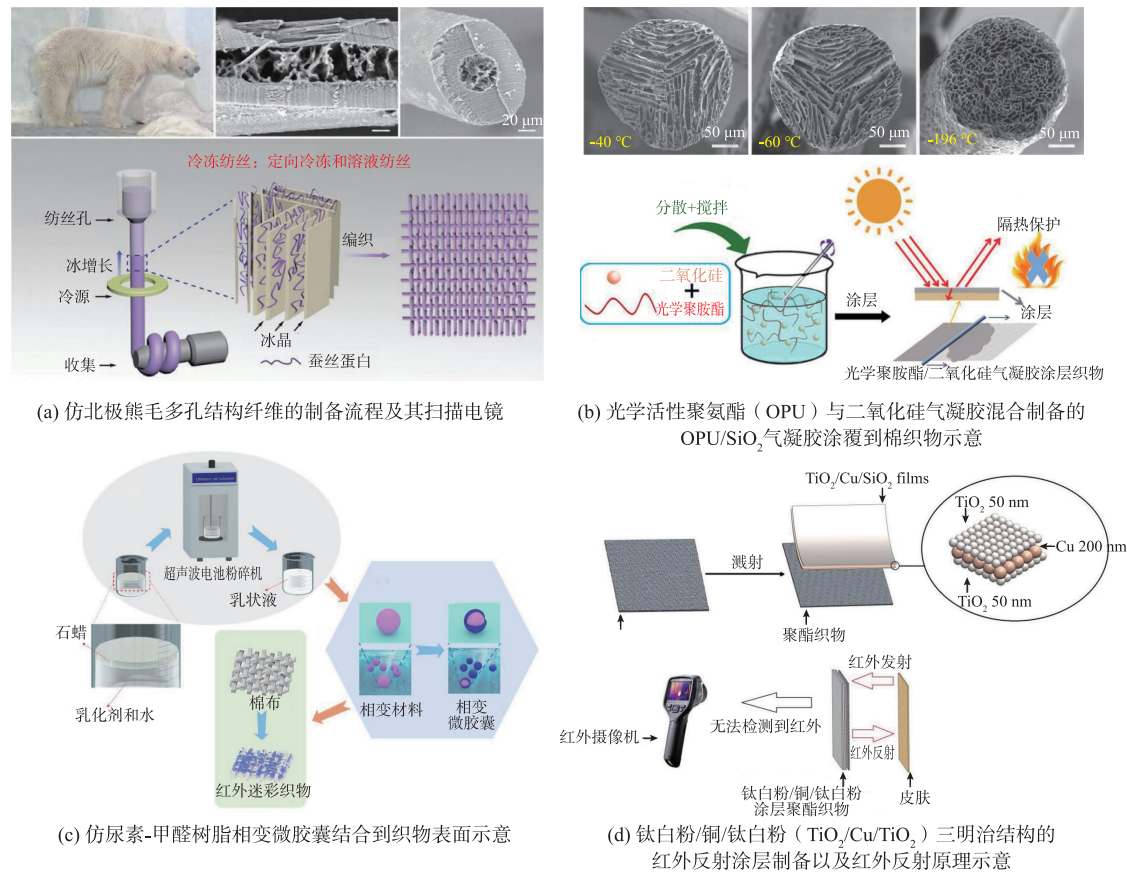


图 3 控温红外隐身面料的制备流程

Fig. 3 Preparation process flow of temperature-controlled infrared stealth fabric

CUI Y 等^[13]基于仿生原理,通过冷冻旋转法制备了一种类似于北极熊毛多孔结构的纤维。该纤维具备良好的保温隔热性能和红外反射性能,作为伪装防护面料应用时,覆盖在目标物体表面,可使温度与背景温度接近,从而达到伪装效果[见图 3 (a)]。LIN L 等^[14]开发了一种新型的热保护棉织物,通过将由光学活性聚氨酯(OPU)与二氧化硅气

凝胶混合制备的 OPU /SiO₂ 气凝胶涂层涂覆到棉纤维表面,形成一层热隔绝层。OPU 对可见光具有明显的阻挡和折射效果,SiO₂ 气凝胶具备高热稳定性,二者结合显著降低了织物的热传导系数,提高了织物的保温隔热性能,达到红外伪装效果[见图 3(b)]。

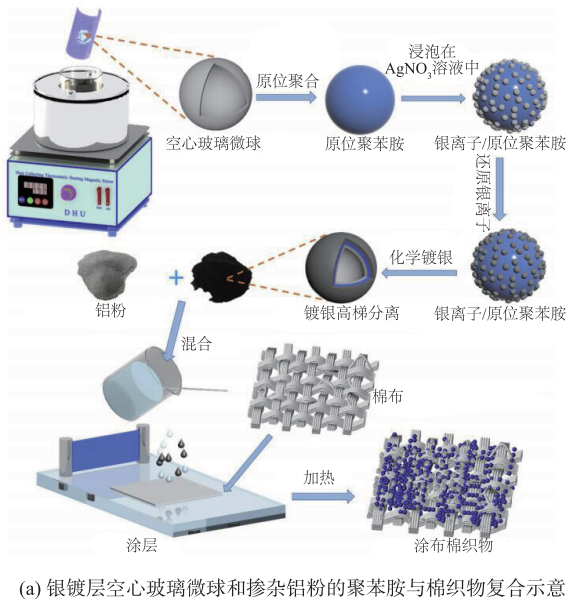
XU R 等^[15]通过尿素-甲醛树脂微胶囊的原位

聚合,将石蜡作为芯材,尿素-甲醛树脂作为壳材,并通过超声波细胞粉碎仪进行乳化制备相变微胶囊。涂敷在棉织物表面可以使棉织物表面温度降低 5 ~ 10 ℃,有效减弱红外辐射强度[见图 3(c)]。PENG L H 等^[16]通过磁控溅射的方法在涤纶织物表面制备了一种钛白粉/铜/钛白粉($\text{TiO}_2/\text{Cu}/\text{TiO}_2$)三明治结构的红外反射涂层,用于防护红外辐射,具有较高的红外反射率,可以反射大部分接触织物表面的热量,减少热量的积累,控制人体表面温度,减小被探测的概率,从而达到隐身的效果[见图 3(d)]。

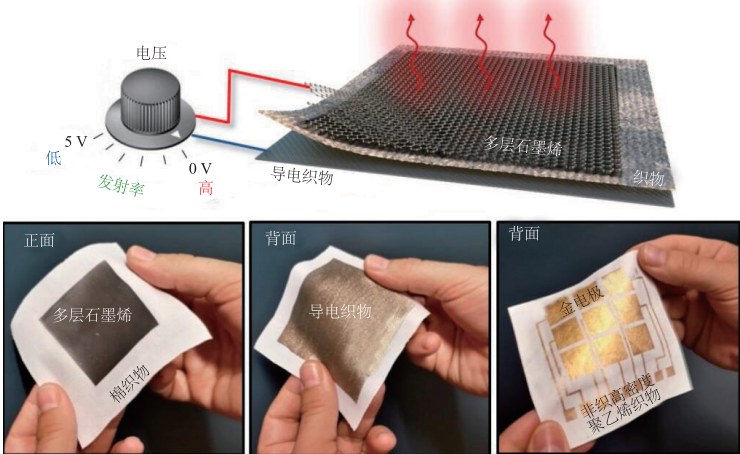
1.2.2 控制发射率红外隐身面料 控制服装面料红外发射率的研究主要围绕两个方向:①采用低发射率的涂层或染料;②选用低发射率的纤维加工织物。控制发射率红外隐身面料的制备流程如图 4 所示。

涂层法因操作简便,成本低,在红外隐身技术中得到广泛应用。XU R 等^[17]通过将银镀层空心玻璃微球和掺杂铝粉的聚苯胺以涂层复合的方法涂

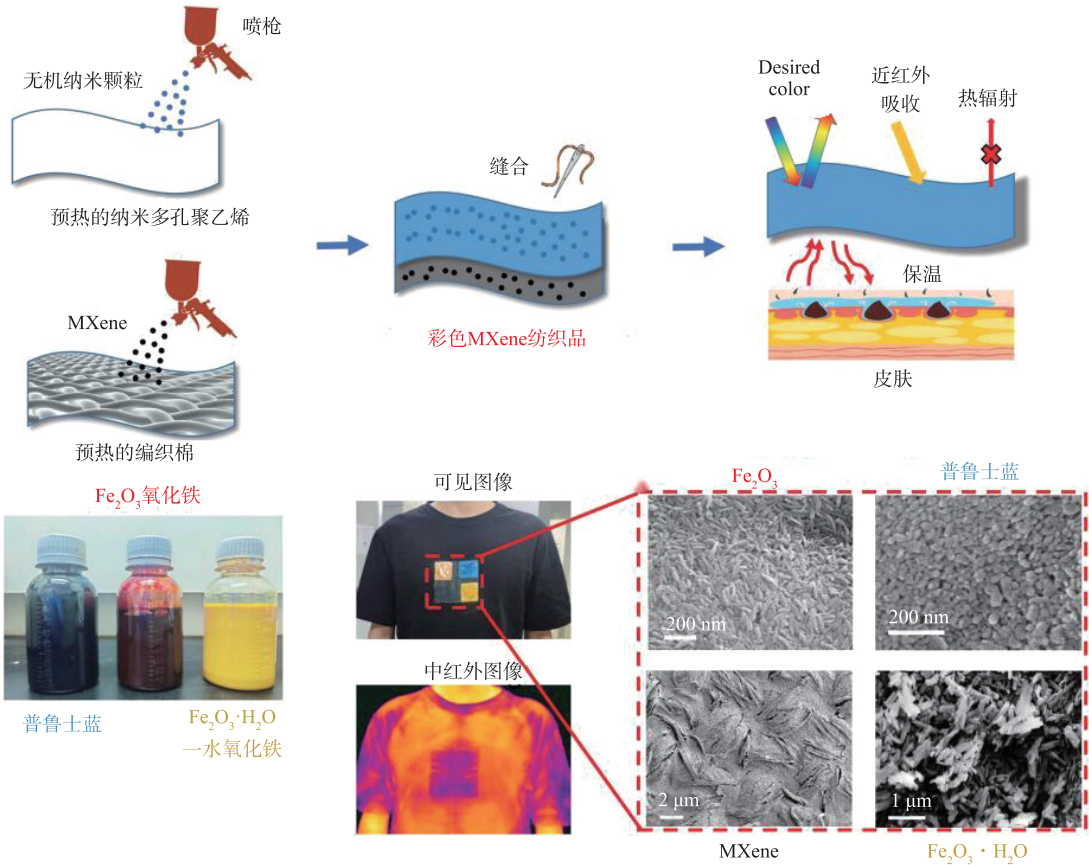
覆到棉织物表面,使材料的表面热辐射率降低,减少物体与周围环境的辐射差异[见图 4(a)]。ERGOKTAS M S 等^[18]利用石墨烯的电光调控性质,在织物表面压石墨烯层,并通过可逆的离子插层实现电光调制,开发了一种可控制红外和近红外波长反射率和发射率的自适应光学纺织品。该技术可以实现电光动态、快速和按需控制红外发射率,并能够与其他可穿戴技术(如传感器和集成电路)相集成[见图 4(b)]。卜铁伟等^[19]以涤纶织物为基布,采用红外高透过水性聚氨酯树脂与硅烷偶联剂(铝和银包铜粉)制备红外发射率梯度涂料,其红外发射率分别为 0.577,0.789 和 0.923,可用于红外隐身迷彩服。ZHU Y N^[20]研制了一种基于彩色织物的被动辐射加热纺织品。其在 MXene 修饰的棉纤维上涂覆红外透明的硅纳米颗粒,利用硅纳米颗粒在可见光波段的选择性反射、近红外波段的高吸收及中红外波段的低发射性能实现红外隐身[见图 4(c)]。



(a) 银镀层空心玻璃微球和掺杂铝粉的聚苯胺与棉织物复合示意



(b) 多层石墨烯与织物复合结构示意图以及实物



(c) 硅纳米颗粒与MXene与织物结合制备红外隐身材料流程及结构示意图

图 4 控发射率红外隐身面料的制备流程

Fig. 4 Preparation flow of the infrared stealth fabric with controlled emission rate

红外涂层虽然工艺简单、效率高,但会导致伪装的透气性下降,洗可穿性差,而红外伪装染料 的开发可以克服这一问题。张典典等^[21]通过分散染料直接印花的方法制备了可精确模拟常见绿色 植被可见光-近红外反射光谱特征的印花织物,该 织物达到了一级高光谱伪装要求,同时具有优异的 褪色牢度、沾色牢度、耐干摩擦色牢度、耐湿摩擦色 牢度。HOSSAIN M A^[22]利用天然植物染料在天然 纤维上制作出紫外-可见-近红外伪装纺织品,既保 证了较好的透气性和吸湿性,能够更好地调节皮肤 的湿度和温度,又可用于对抗森林作战背景的防御 保护。天然植物染料染色棉织物与标准黑白织物 (a-1)、纯色涂布棉织物(m,o)和叶纹印花棉织物 (n,p)的对比如图 5^[22]所示。

可控红外发射面料原理以及测试结果如图 6 所 示。LIU H D 等^[23]开发了一种基于水分辅助的纳 米多孔聚乙烯非织造布,利用水分含量对温度的敏 感性,可自适应地调节其热辐射率,实现红外透射 率从 0.8 到 0.27 的改变。此外可以通过干涉色滤镀 膜调节其可见光的颜色,实现可见光与红外的双重

隐身效果。廖雨田等^[24]开发了一种包含可见颜色 层、纳米多孔吸湿层、红外低发射率层的三明治结 构织物,实现了织物在可见光波段以及红外波段隐 身的效果。通过测试发现,该结构使得织物表面温 度在 24 ~ 64 ℃ 范围内变化,其红外发射率在 0.95 ~ 0.38 范围内自适应调节。



图 5 天然植物染料染色棉织物与标准黑白织物(a-1)、 纯色涂布棉织物(m,o)和叶纹印花棉织物(n,p) 的对比

Fig. 5 Comparison of natural vegetable dye dyed cotton fabrics with standard black and white fabrics (a-1), solid color coated cotton fabrics (m,o) and leaf printed cotton fabrics (n,p)

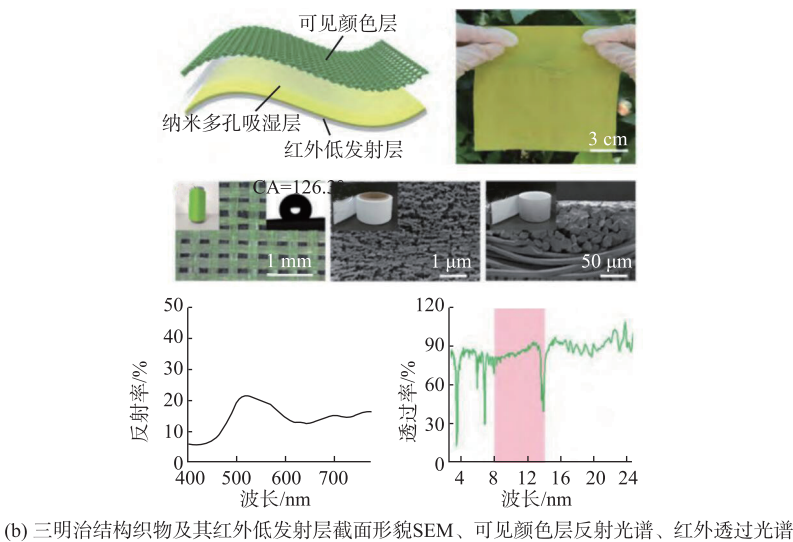
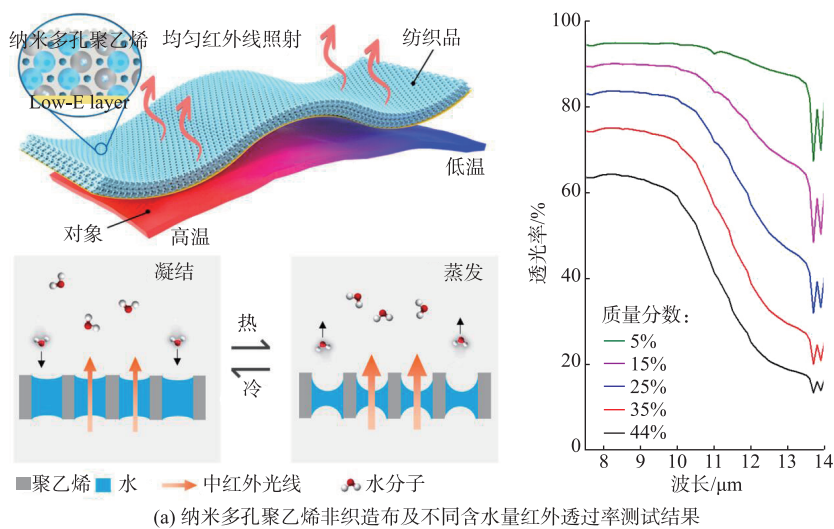


图 6 可控红外发射面料原理以及测试结果

Fig. 6 Principle of the controllable infrared emission fabric and the test results

2 人体工学在伪装防护服上的应用

人体工学在伪装防护服上的应用主要是为了提高穿着者的舒适度和灵活性,同时保证其功能性。生理舒适性需要考虑服装的热阻、吸湿性、透气性等性能;而感官舒适性是一个多维概念,无法通过单一物理属性来定义,需要考虑衣物的柔软度、舒适度、干爽感等因素^[25]。

对于可见光伪装服,主要依靠迷彩涂层实现。迷彩的常见类型大致可以分为保护迷彩、变形迷彩以及仿造迷彩 3 类^[26]。保护迷彩和变形迷彩属于比较传统的迷彩,而属于仿造迷彩的数码迷彩是通过传统迷彩进行升级改造后所生产出的一种新型特种装备,它在一定程度上满足了高科技侦察手段及作战需要。20 世纪 70 年代后期我军开始研制作训服,到目前有不少款型迷彩作训服在大阅兵、军演中频频出现,但未实际列装。87 式作训服为我

军第 1 代作训服,采用的是较为传统的迷彩,无法模糊人体整体轮廓和背景,容易被发现和察觉,而第 2 代的 07 式数码迷彩服采用不同颜色和图案斑块进行强烈对照,从而通过分隔人体形状实现伪装,且其有良好的抗紫外线性、耐候性能、防红外辐射功能及防水防油及穿着舒适等优点。目前,第 3 代的 21 式数码迷彩作训服采用锦棉混纺,抗拉伸性和抗耐磨性较好。锦棉混纺面料具有较高的强度和断裂拉伸力,且较为轻便,坚牢耐用、抗皱免烫,并且耐热性能较好,不怕霉菌与虫蛀,便于活动,这也是面料的一种选择趋势。87 式、07 式、21 式迷彩作训服如图 7 所示。

因为人体温度与背景温度之间有明显的差别,所以辐射的红外能量数值与周围环境差异明显,很容易被红外探测器检测到。因此,伪装服在完善服装款式结构以及防寒保暖、吸湿透气等舒适性方面还有很大的发展空间,伪装效果有待进一步提升。



图 7 87 式、07 式、21 式迷彩作训服

Fig. 7 Camouflage training uniforms of type 87, type 07 and type 21

佟攻等^[27]通过对服装结构、发热载体以及电池的充放电性能等进行研究,研发出以碳纤维作为发热载体、高分子锂电池作为能量源的背心式电加热服装。背心外形及安装方式如图 8^[27]所示。该加热服前身有 2 个挖袋,便于携带电池,该款式不仅方便贴身穿着,保暖效率高,且具有一定的美观性;考虑到人体的静态和动态尺寸,背心腋下两侧采用 5 cm 宽的罗纹布,便于调节松量,以适合不同体型的人穿着,实现最佳功能尺寸。通过部队试穿实验,对服装的保暖效果、舒适性及红外伪装效果进行测试,结果表明:加热背心对寒冷条件下人体的辅助保暖效果明显,且不会显著影响红外伪装效果。背心式电加热服发热部分柔软透气,具有良好的生理舒适性,能很好地满足官兵需求。

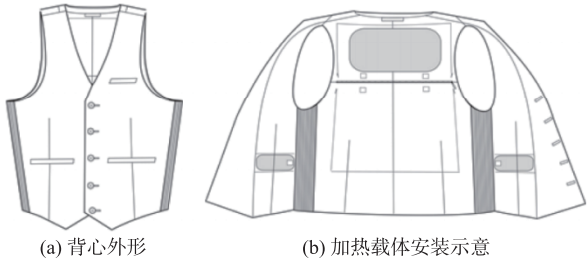


图 8 背心外形及安装示意

Fig. 8 Vest shape and installation schematic

任龙等^[28]开发的一款双区电热智能迷彩夹克,该夹克采用 3K 及 12K 的进口碳纤维,应用了 5 个发热模组元件,以及具备耐折、耐低温(−20 ℃)、电压稳定的 12 V 低压电源线,夹克内部采用利于传导、对流、辐射的金光绒织物,面料创新性地采用了

不利于传导、对流、辐射的迷彩针织面料/防水透气膜/摇粒绒复合面料。该夹克不仅具有良好的耐洗可穿性,同时具备良好的保暖、透气及防水性能,可用于冬季野外狩猎伪装保暖使用。

YIN X 等^[29]根据人体自身的散热能力,设计了一种有 4 层面料的服装,前 3 层为亲水层,最后 1 层为疏水层,以实现汗液快速吸收和蒸发。当人体出汗时,汗液会被前 3 层迅速吸收,且只在第 3 层和第 4 层的交界处蒸发,并且通过调节衣服结构参数(如层厚度和孔隙率),可以在给定的边界条件下达到满意的红外伪装效果。这种多层服装不仅可以限制人体散热的感性传热,促进汗液的蒸发,减小人体与环境之间的温差,使体温维持在相对稳定的水平,减少人体因汗液产生的不舒适感,保持人体干爽舒适,而且可以实现红外伪装的效果。

3 伪装防护服的评价

对伪装防护服的评价主要从其防护性需求和舒适性需求两方面进行。伪装防护服在不同环境条件下提供伪装和隐蔽,因此需要在电磁波谱的不同波长范围内提供伪装。对于可见波段伪装效果,评价标准分为两种:①计算目标伪装前后的光学发现概率和能见度,二者越低伪装效果越好;②利用 CIE1931 色度系统计算目标伪装后的色度指标,并和环境颜色进行对比,结果相差越小伪装效果越好。红外波段伪装效果的评价标准主要在于根据最小可分辨温度(M)求得的热红外探测距离 R 和热红外发现概率 P,公式如下:

$$\Delta T \cdot \tau(R) = M, \tag{1}$$

$$\mu = \frac{M}{1.5}, \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{\mu(k-1)}{x} = 0.391\mu, \tag{3}$$

$$P = \int_{-\infty}^{\Delta T} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{\frac{(1-\mu)}{2\sigma^2}} dt = \Phi\left(\frac{\Delta T - \mu}{\sigma}\right). \tag{4}$$

式中:ΔT 为目标与背景的真实辐射温差,单位为 K;τ 为单位厚度大气透射率,单位为 km^{−1};R 为热红外探测距离,单位为 km;μ 为对应探测概率的 50%;σ 为 MRTD 正态分布的差值;k 为概率换算系数;P 为热红外发现概率。

此外,GJB 7927—2012《伪装网通用要求》^[30]规定了伪装网的设计、制造、使用等方面的通用要求,这一标准也可作为红外伪装服的测试与评价提供一定的参考。

伪装防护服不仅要在防护性能上符合相关标准的要求,而且要符合人体工学的要求,人体工学

穿着舒适性评估技术是一种评估服装舒适性的方法,包括主观评估和客观评估、计算机数值模拟^[31-32]。主观评估是通过人体试穿来获得对舒适性的主观评价,其优点是可以获得用户的真实感受,缺点是结果容易受到主观因素的影响;客观评估是使用传感器等设备测量与舒适性相关的生理参数,其优点是结果准确可靠,缺点是不够直观,需要使用专业设备。在评估伪装服装的舒适性时,可以参考美国的 ASTM F1154—11^[33],该标准可以定性评估防护服装的舒适性、合适度、功能和完整性^[34]。综合使用主观评估和客观评估可以获得更全面的舒适性评估结果,但特殊工况下人体耐受能力不可预估,危险性较高,因此出现了出汗假人、数值假人等替代真人进行实验,以降低实验风险,虽然实验结果较稳定,但设备精度要求高且耗时,具有一定破坏性^[32]。计算机模拟人体与服装的相互作用已成为一种重要的研究手段,其相比主客观评价法具有更大的灵活度和自由度,如热生理模型在高温作业防护服、防寒服中的应用,这对伪装防护服装的舒适性评价具有一定的借鉴意义。

4 结 语

当前国内伪装防护产品面临着严峻的挑战,存在着相关理论创新、材料创新缺乏,穿着舒适性差等诸多问题。人体工学在伪装防护服装上的应用主要是为了提高穿着者的舒适度和便利性,同时保证纺织品的功能性。在设计伪装防护服时,不仅需要考虑穿戴者的人体静态、动态尺寸等因素,以确保纺织品的合体性和活动性,还需要考虑多维因素,如服装的吸湿性、透气性,衣物的柔软度、舒适度、干爽感等,从而实现良好的生理舒适性和感官舒适性,减少不必要的零部件设计,提高伪装防护服的实用性和人性化程度。

参考文献:

[1] 施楣梧. 单兵战场防护用纤维制品的发展现状与展望[J]. 棉纺织技术,2019,47(3): 76-79.
SHI Meiwu. Development status and prospects of fiber products for individual battlefield protection[J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47(3): 76-79. (in Chinese)
[2] PIMENTA C, PEREIRA C C, FANGUEIRO R. Textile pattern design in thermal vision—a study on human body camouflage[J]. Materials, 2021, 14(16): 4364.
[3] 赵喜求,张乃艳,李泳升,等. 自适应伪装材料在军用服饰产品的设计应用研究[J]. 包装工程,2021,42(10):

19-25.
ZHAO Xiqiu, ZHANG Naiyan, LI Yongsheng, et al. Design and application of adaptive camouflage materials in military clothing products[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(10): 19-25. (in Chinese)
[4] 杨丹,高伟洪,杨树,等. 可见光与红外隐身光子晶体材料研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2023,41(2): 323-329.
YANG Dan, GAO Weihong, YANG Shu, et al. Research progress of visible and infrared stealth materials based on photonic crystals[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(2): 323-329. (in Chinese)
[5] 吴昱,金青君,崔志峰,等. 仿生自主变色伪装材料的研究进展[J]. 中国表面工程,2020,33(3): 1-17.
WU Yu, JIN Qingjun, CUI Zhifeng, et al. Recent progress of bionic adaption camouflage materials[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 1-17. (in Chinese)
[6] ZHANG J, HE S S, LIU L M, et al. The continuous fabrication of mechanochromic fibers[J]. Journal of Materials Chemistry, 2016, 4(11): 2127-2133.
[7] WU T H, YIN T H, HU X C, et al. A thermochromic hydrogel for camouflage and soft display[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(9): 2000031.
[8] 杨晔,夏前军,钱坤,等. 单兵伪装服及其伪装方法的研究进展[J]. 纺织导报,2019(8): 57-60.
YANG Ye, XIA Qianjun, QIAN Kun, et al. Research progress on single soldier camouflage and its camouflage methods[J]. China Textile Leader, 2019(8): 57-60. (in Chinese)
[9] 高燕. 光致变色相变储能材料的制备、性能与应用研究[D]. 天津:天津工业大学,2022.
[10] 许毅辉,贾凌杰,贾贤补,等. 红外隐身防护材料研究进展[J]. 包装工程,2023,44(9): 137-146.
XU Yihui, JIA Lingjie, JIA Xianbu, et al. Research progress of infrared stealth protection materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(9): 137-146. (in Chinese)
[11] 王万安,张飞飞,景卓元,等. 红外隐身纺织品的研究现状与进展[J]. 印染,2022,48(12): 74-78.
WANG Wan'an, ZHANG Feifei, JING Zhuoyuan, et al. Research status and progress of infrared stealth textiles[J]. China Dyeing and Finishing, 2022, 48(12): 74-78. (in Chinese)
[12] 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 Xiaojun, WANG Hualin, LING Jun, et al. Preparation and performance research of super absorbent and temperature control green camouflage fabric[J]. Acta

- Armamentarii, 2017, 38(2):345-350. (in Chinese)
- [13] CUI Y, GONG H X, WANG Y J, et al. A thermally insulating textile inspired by polar bear hair [J]. *Advanced Materials* (Deerfield Beach, Fla), 2018, 30(14): e1706807.
- [14] LIN L, LI Z Y, MAO H Y, et al. Optically active polyurethane/silica aerogel coated cotton fabrics for thermal protection[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 681678.
- [15] XU R, XIA X M, 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.
- [16] PENG L H, JIANG S X, GUO R H, et al. IR protection property and color performance of $\text{TiO}_2/\text{Cu}/\text{TiO}_2$ coated polyester fabrics[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(19): 16188-16198.
- [17] XU R, WANG W, YU D. Preparation of silver-plated hollow glass microspheres and its application in infrared stealth coating fabrics[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 131: 1-10.
- [18] ERGOKTAS M S, BAKAN G, STEINER P, et al. Graphene-enabled adaptive infrared textiles [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(7): 5346-5352.
- [19] 卜铁伟, 吴玉茵, 王真. 可见光红外一体化伪装隐身涂层织物的制备[J]. *电镀与涂饰*, 2020, 39(16): 1137-1142.
- BU Tiewei, WU Yuyin, WANG Zhen. Preparation of coated fabrics for visible light and infrared integrated camouflage/stealth application [J]. *Electroplating and Finishing*, 2020, 39(16): 1137-1142. (in Chinese)
- [20] ZHU Y N, WANG W J, ZHOU Y W, et al. Colored woven cloth-based textile for passive radiative heating[J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300293.
- [21] 张典典, 李敏, 关玉, 等. 仿植被可见光-近红外反射光谱特征的分散染料印花织物制备及其性能[J]. *纺织学报*, 2023, 44(1): 142-148.
- ZHANG Diandian, LI Min, GUAN Yu, et al. Preparation and performance of disperse dye printed fabrics with characteristics of vegetation-like vis-NIR reflectance spectrum[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(1): 142-148. (in Chinese)
- [22] HOSSAIN M A. UV-visible-NIR camouflage textiles with natural plant based natural dyes on natural fibre against woodland combat background for defence protection[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 1-17.
- [23] LIU H D, WANG C Y, CHEN G R, et al. Moisture assisted photo-engineered textiles for visible and self-adaptive infrared dual camouflage[J]. *Nano Energy*, 2022, 93: 106855.
- [24] 廖雨田, 王晨逸, 毛铭冉, 等. 可见红外双波段智能伪装织物[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(5): 1304-1308.
- LIAO Yutian, WANG Chenyi, MAO Mingran, et al. Visible and infrared dual-band smart camouflage textiles [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(5): 1304-1308. (in Chinese)
- [25] BARTKOWIAK G, GRESZTA A. Determination of a comfort class for protective clothing based on ergonomic tests [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2019, 27(5): 100-109.
- [26] 蔺凤君. 迷彩图形在服装上的变化设计研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [27] 佟玫, 张雅丽, 唐世君. 边防部队电加热服的研制与功能评价[J]. *服装学报*, 2021, 6(5): 457-462, 470.
- TONG Mei, ZHANG Yali, TANG Shijun. Development and function evaluation of electric heating suit for frontier troops[J]. *Journal of Clothing Research*, 2021, 6(5): 457-462, 470. (in Chinese)
- [28] 任龙, 王彦宏, 罗品辉, 等. 双区电热智能保暖迷彩夹克的研究与开发项目[Z]. 嘉兴市云龙服饰科技有限公司, 2017.
- [29] YIN X, CHEN Q, PAN N. A more comprehensive transport model for multilayer-cloth for perspiration based infrared camouflage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 68(1/2): 10-19.
- [30] 中国人民解放军总装备部. 伪装网通用要求: GJB 7927—2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013.
- [31] TEYEME Y, MALENGIER B, TESFAYE T, et al. A review of contemporary techniques for measuring ergonomic wear comfort of protective and sport clothing [J]. *Autex Research Journal*, 2021, 21(1): 32-44.
- [32] 何佳臻, 李俊. 防护服工效性能评价方法研究进展[J]. *纺织学报*, 2014, 35(1): 158-164.
- HE Jiazhen, LI Jun. Advances in research of ergonomic evaluation for protective clothing [J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(1): 158-164. (in Chinese)
- [33] Standard practices for qualitatively evaluating the comfort, fit, function, and durability of protective ensembles and ensemble components: ASTM F1154—11[S/OL]. [2023-09-14]. <https://www.antpedia.com/standard/6230072.html>.
- [34] 谢丹, 潘姝雯, 戴宏钦, 等. 热生理模型在防护服热舒适性评价中的应用[J]. *毛纺科技*, 2023, 51(3): 95-102.
- XIE Dan, PAN Shuwen, DAI Hongqin, et al. Application of thermophysiological model in thermal comfort evaluation of protective clothing [J]. *Wool Textile Journal*, 2023, 51(3): 95-102. (in Chinese)