

自适应伪装材料在军用服饰产品的设计应用研究

赵喜求¹, 张乃艳¹, 李泳升², 许浩¹, 黄应千¹

(1.陆军工程大学, 徐州 221000; 2.北京理工大学, 北京 102488)

摘要:目的 总结和展望可见光波段自适应伪装材料和红外波段自适应伪装材料的发展趋势及应用现状, 为进一步研究和应用提供参考。方法 基于军用服饰对抗的不同波段, 总结归纳了光致变色材料、电致变色材料、热致变色材料、相变材料、电致变发射率材料、电致变温材料和光子晶体材料的发展现状。结果 自适应伪装材料在军用服饰上的应用形式多, 且相关产品在不断更新换代。结论 光学自适应伪装材料可适应不同场景不同要求下的变色需求, 电致变发射率材料等红外自适应伪装材料可以用于军用红外伪装中, 进一步完善可实现自适应红外隐身, 人工光子晶体材料作为自适应伪装材料也可用于军用产品, 目前已从多角度进行研发、实验, 具有很大的应用前景及发展潜力。

关键词: 自适应伪装材料; 军用服饰; 可见光波段; 红外波段

中图分类号: TB34; E951.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)10-0019-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.10.004

Design and Application of Adaptive Camouflage Materials in Military Clothing Products

ZHAO Xi-qi¹, ZHANG Nai-yan¹, LI Yong-sheng², XU Hao¹, HUANG Ying-qian¹

(1.Army Engineering University of PLA, Xuzhou 221000, China;

2.Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper is to summarize and prospect the development trend and application status of adaptive camouflage materials in the visible light band and infrared wave band, which provides references for further research and application. Based on the different wave bands that military clothing can effectively deal with, this paper summarizes the development status of photochromic materials, electrochromic materials, thermochromic materials, phase change materials, electrochromic-based variable emissivity materials, electrochromic temperature materials and photonic crystal materials. Adaptive camouflage materials are widely used in military clothing, and related products are constantly being updated. Optical adaptive camouflage materials can adapt to the discoloration needs of different scenes and different requirements. Infrared adaptive camouflage materials such as electrochromic-based variable emissivity materials can be used in military infrared camouflage, and adaptive infrared stealth can be realized after further improvements. As an adaptive camouflage material, artificial photonic crystal material is also used in military products. It is currently being researched and tested from multiple aspects, and has great application prospects and development potential.

KEY WORDS: adaptive camouflage materials; military clothing; visible light band; infrared band

伪装材料 (Camouflage Materials) 是用于调整军事工程和武器装备等目标的特征信号的一种功能材料, 使目标与背景的特征信号接近, 达到难以辨认出目标的目的。随着现代化战争中侦察监视技术^[1]的不

断进步和发展, 可见光^[2]、红外^[3]、雷达^[4]等频段的侦察监视战术技术性能也在不断要求着更高性能的伪装技术、伪装材料等, 军用服饰作为直观对抗侦察、监视的主体, 在各个频段的伪装性能亦应随之进步。

收稿日期: 2021-01-01

基金项目: 外军自适应伪装技术研究

作者简介: 赵喜求 (1980—), 男, 湖南人, 硕士, 陆军工程大学讲师, 主要研究方向为伪装材料。

通信作者: 许浩 (1994—), 男, 山东人, 硕士, 陆军工程大学讲师, 主要研究方向为伪装材料。

当前战争中,单一背景下的作战情况会逐渐减少,更多的是跨地域、多背景的联合作战,这对伪装材料、装备对环境的适应性提出了更高的要求。

自适应伪装材料^[5]是指在信息化战争条件下,分析研究周围地貌环境特征的一种材料,其目的是通过感知目标和周围背景的特征信息,集中搜索特征信息中的关键因素,并进行分析处理,使伪装装置的设计特征能够与周围的背景环境进行效果最佳的协调统一,且伪装目标的特征能随着背景特征的变化进行适时的自动调整,以提高武器装备的伪装效果。该材料使得目标通过自适应伪装能够自主智能调整自身的光电特征信号,令目标信号与环境背景特征达到高度匹配、协调。这是当前伪装材料的发展趋势,自适应伪装材料在军用服饰上有着良好的应用前景^[6]。

本文根据现有自适应伪装材料的发展及其在军用服饰产品上的应用前景,论述其伪装原理,并对最新的设计应用方法进行归纳总结。

1 可见光波段自适应伪装材料

通常,电磁辐射包括无线电波,微波、红外线、可见光、紫外线,以及X射线,其中可见光是电磁波中人眼可以感知的部分,频率一般在380~750 THz,波长在380~760 nm。由于人眼及可见光器材的感知特性,可见光波段的伪装重点是降低目标与背景之间的亮度和色度差别,主要是做到伪装材料与背景“同色”或“同谱同色”,从而达到自适应伪装的效果。目前,可见光波段的自适应伪装材料主要可分为光致变色材料^[7]、电致变色材料^[8]和热致变色材料^[9]等。

1.1 光致变色材料

光致变色材料的特征在于其光学性质在光的作用下能够可逆地发生改变,可逆过程可以在黑暗中、在热激发下或在光照下进行,即其通过对光的吸收峰值的明显变化,从而外显颜色的改变。一般可以将光致变色材料分为有机光致变色材料和无机光致变色材料^[10]。

在晶体无机材料中,光致变色行为通常与两种电子势阱之间的光可逆电荷转移有关。无机材料晶格之间能够发生电子转移,这就要求所采用的无机光致变色材料具有晶格缺陷,但也因此使得该材料易被氧化,并且与其他策略相比,其变色范围相对也更加狭窄,如掺有杂质的各种变价金属氧化物^[11]、卤化物^[12]和金属盐化合物^[13]等。

有机材料光致变色行为主要与质子转移、顺反式光学异构化、化学键断裂和环化反应等有机反应形式有关。与无机光致变色材料相比,该材料稳定性较好,并且通过分子构型变化,具有更好的可逆性,是目前光致变色材料发展的趋势。美国、日本、法国、俄罗斯、以色列等国在多种有机光致变色材料方面有较深

入的研究,如俘精酸酐^[14]、螺吡喃^[15]、偶氮化合物^[16]和二芳杂环基乙烯^[17]等。

1.2 电致变色材料

通过电化学反应以持久、稳定和可逆的方式改变颜色,这种现象称为电致变色。电致变色通过电化学反应来诱导氧化还原反应,从而造成透射率和反射率的可逆变化,外显颜色的改变。颜色变化通常介于透明状态和有色状态之间,或介于两种有色状态之间。主要的电致变色材料包括无机材料,如氧化钨等金属氧化物,以及有机聚合物材料,如聚苯胺等,对于有机聚合物,在应用中通常为薄膜形式,固定在伪装服装的表面。但是由于聚合物本身的特征,伪装服装在耐洗性能上存在着缺陷。

电致变色材料包括有机电致变色材料^[18]和无机电致变色材料^[19],这两种材料具有完全不同的发光原理。有机电致变色材料简单的发光过程是:首先从正极和负极注入空穴和电子并在有机层中传输,然后将电子注入到发光层复合形成激子,最后经过激子去激活而发光。无机电致变色材料的发光机理是:首先从金属电极侧绝缘层的一发光层界面能级放出电子,然后电子在发光层内高电场的作用下被加速形成过热电子,由这些过热电子激发发光中心发光。

1.3 热致变色材料

热致变色材料是通过温度变化使材料结晶的相和结构发生变化,从而达到改变颜色的效果的一类材料。热致变色材料通常是有机无色染料混合物,由成色剂、显色剂和溶剂组成。成色剂通常是环状酯,决定基色;显色剂是一种弱酸,会产生颜色变化并形成最终的颜色强度;而热致变色材料的颜色转变温度会受到溶剂的影响^[20]。

随着温度的变化,有机染料混合物的酸碱度发生变化,从而导致分子结构发生变化,外显颜色的改变。常用的热致变色有机材料主要有三芳甲烷类^[8-21]、萤烷类、螺吡喃类^[9-22]等。最近,以二氧化钒(VO_2)为代表的新型无机热致变色材料受到了广泛关注, VO_2 在相对较低的温度(68℃)下表现出可逆的由固—固半导体到金属的相变。该相变可以通过外部温度刺激来启动,启动后材料的电学和光学特性发生显著变化,从而导致材料颜色的改变。

然而,由于热致变色材料本身的缺陷,如颜色的变化比较单一、颜色的亮度只能控制在极窄的范围内以及引起材料变色的温度大多处于高温区,所以将热致变色材料与服装相结合极难达到预期变色效果,在当前研究背景下不适宜士兵穿着。将热致变色材料与服饰紧密结合起来还需要对材料进行进一步的发展革新。

1.4 生物伪装技术

从目前生物伪装技术的发展形态来看,按照伪装

方式的不同,未来战场生物伪装的方式大致可以分为隐身、拟态、干扰等。现代生物伪装技术是以生命科学为基础,利用生物体(包括生物活组织或细胞)的特性与功能,为军事领域提供服务的综合性技术体系。众所周知,伪装与侦察是一对矛盾。现代战争,军事侦察技术发展一日千里,所用波段几乎覆盖了整个电磁频谱,战场“透明”度越来越高。而生物技术在军事侦察活动中的运用,催生出“全谱伪装”。据报道,目前美、俄、英、法、日等国军队已将生物伪装技术广泛运用于飞行器、坦克、船艇等表面的反雷达伪装,收到了很好的伪装效果。据悉,最近美军研制生产的“仿变色龙”伪装衣就是用根据变色龙的变色机理,进行“全波谱变色效能”研究所开发出的一种变色蛋白质纤维制作的。用这种变色纤维做成的变色布料,可随环境的变化而自动变色。法国也正在研制一种生物伪装衣,不仅可以变换衣服色调以适应周围环境,而且能够屏蔽雷达和探测器的侦察。另外,受蝴蝶翅膀中有无数显色和不显色鳞片的启示,科学家已研制出一种特殊织物,可随地貌的变化而交替呈现出不同颜色,使敌方现代化侦察仪器难以发现。

2 红外波段自适应伪装材料

红外光,也称为红外线,是波长比可见光长的电磁辐射,人眼无法观测到。红外的范围从 760 nm(频率 430 THz)的可见光谱的红色边缘到 1 mm(300 GHz)。根据红外的波长范围可以将红外光分为近红外、中红外和远红外,其中中红外和远红外又被称为热红外。室温附近物体发出的黑体辐射几乎全部属于红外波长。作为电磁辐射的一种形式,红外光也会传播能量和动量,其特性与光子的特性相对应。

人体散发的红外辐射能量主要与自身表面的温度和自身红外能量发射率相关。当士兵进行特殊单兵作战任务时,士兵身体与环境散发的红外辐射差异会直接影响到士兵的隐藏效果,导致其极易被红外探测器探测到。因此在实际应用中,红外波段自适应伪装材料能够极大地增加士兵“隐身”的效果,当前红外伪装策略主要从两个方面出发,即控制伪装服表面温度和改变服装表面发射率^[23]。

2.1 近红外伪装方法

在近红外波段进行侦察主要通过图像增强器、弱光电视和红外摄影进行观察,由于没有颜色的分辨能力,此时伪装对象及设备应与环境背景的反射光谱匹配。因此,在该波段大多采用通过改变目标的红外辐射特性来进行伪装。

国内外在 20 世纪 70 年代以来就研究出通过采用低发射率的近红外波段伪装涂料涂抹或浸渍衣料来进行近红外波段的防伪。这种方法可以降低目标红外辐射的散发能力,使得自身与环境辐射协调统一。如

美国以黄褐色、褐色等类似于土地、沙漠颜色的色调作为主色调,暗绿色或者黑色等植物树木颜色作为涂料的辅助颜色,从而得到了四色的迷彩涂料,由于材料自身具有伪装色并且降低了红外辐射发射率,能够对紫外光、可见光以及近红外光具有较好的伪装效果。国内,研究人员也深入研究了近红外伪装材料。王顺奎通过优化粘合剂和金属颜料,配置了具有对近红外和热红外具有良好伪装效果的伪装涂料^[24]。郭利、徐国跃、李澄等人基于有机分子聚合物聚氨酯,改变目标表面反射光谱,使其与植物具有类似的光谱特点,从而实现近红外防伪^[25]。红外涂料具有操作方法简便等优点,但是涂料层包覆在衣料上,会造成服装的透气舒适度降低和洗护不便的问题,为了改善这一缺点,人们进一步发展了红外伪装染料。原 CIBA(汽巴)和 BASF(巴斯夫)公司分析纤维素衣料的特点,设计出具有很低红外辐射发射率的还原染料,既能够很好地浸染,又对近红外有着良好的伪装效果^[26]。徐园园通过将炭黑材料添加入还原染料,使其能够更有效地调节目标的反射率,达到更加优异的伪装效果^[27]。

2.2 热红外伪装方法

对于热红外波段,其探测手段主要为热视觉检测,采用低发射率伪装涂料来降低人和设备的热信号的研究具有重要的意义。金属颜料在红外波段具有良好的反射性能,有利于降低红外发射率。目前,以铝粉、铜粉为代表的片状金属伪装颜料已得到广泛研究。徐共荣、俞萧、周岚等人将低发射率的片状铜片引入到热红外隐身材料中,这种方法在热红外和可见光波段都能很好地伪装林地和荒漠的光谱特点^[28]。祝红良、李妍、何亮等人采用相同的策略,将片状铝粉引入到热红外隐身材料中,也达到了热红外伪装的要求^[29]。但是在引入金属颜料后,由于金属本身带有光泽,可能会增强雷达、激光和可见光的探测能力,因此对伪装服装的综合性能造成了影响。半导体是常温下导电性能介于导体与绝缘体之间的材料,伪装材料通过掺杂具有低发射率的半导体颜料,可以改变其发射率,近年来该材料作为多波段伪装材料得到了广泛的研究^[30]。然而其复杂的制备工艺和材料成本导致现阶段尚不能满足批量生产的需求。

磁控溅射隔热膜,又称磁控溅射金属膜,采用多层磁控溅射工艺制成,能够持久反射隔热。采用磁场控制的方式将金属离子均匀地溅射到光学级的 PET 基材上,沉积成金属镀膜层。由于粒子更细、结构更紧密,因此具有高隔热、低反射、永不褪色、使用寿命长等特点,非常适合作为红外伪装材料。然而,该工艺复杂、设备昂贵,因此材料售价较高,暂时无法实现大规模应用。

2.3 自适应红外伪装最新研究进展

温度辐射和红外辐射发射率是影响红外伪装的

两个重要因素。在实际自然环境中,由于人体温度与环境温度相差比较大,这给伪装带来了困难。寻找可随背景温度变化而改变自身温度或发射率的材料变得尤为重要。

2.3.1 相变材料

相变材料(PCM)是一种发生物理状态变化时,会吸收或释放大量的“潜热”,使自身温度保持在一个稳定水平的材料。相变材料可以分为有机、无机和复合相变材料,在我国,相变材料作为最佳绿色环保载体,已被列入国家级研发利用序列。

由于具有控温的特性,所以相变材料作为红外伪装材料,可以通过调控目标温度从而调节目标的红外热辐射强度。其中红外伪装涂料能够有效掩盖自身的红外辐射能量。由于士兵伪装潜伏过程会伴随着周围环境温度的变化,此时相变材料会吸收/释放热量,将自身温度与环境温度的差异降到最小,降低由温度差异所引起的红外辐射能量变化,提高士兵红外伪装能力^[31]。嵇海宁、刘东青、张朝阳等人通过利用二氧化钒半导体—金属的相变过程,调节红外发射率,提高伪装能力^[32]。此外,关于热红外伪装相变纺织品的研究相对较多,多采用相变材料填充到中空纤维中制成防伪服饰来提高红外伪装性能^[33]。

2.3.2 电致变发射率材料

电致变发射率材料是通过外界电场的作用,实现材料发射率可控的一种材料,对环境背景的变化有一定程度的适应能力,可以在外加电位作用下发生可逆、稳定变化。常见的电致变发射率材料有三氧化钨、聚苯胺,这两种材料不仅具有良好的变发射率性能,还具有可见光变色性能,因此作为自适应红外伪装材料吸引了国内外大量研究机构的关注。在该方向上,最具代表性的如美国 Eclipse Energy Systems 公司生产的基于 Li 的无机固态电致变发射率系统 Eclipse VEDTM,其能耗低至 0.1 mW/cm,最大发射率变化高达 0.9^[34-35]。

聚噻吩及其衍生物也是一类可用于电致变色的材料,具有变发射率快、结构可设计性强等特点,美国佛罗里达大学的 Schwendman I, Hwang J, Reynolds R 等人和加州大学的 Yablonovitch 基于聚噻吩及其衍生物聚 3, 4-乙撑二氧噻吩(PEDOT)制备了变发射率材料,实现了在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段范围发射率的调节^[36-37]。尽管该材料目前还存在合成复杂、制备昂贵等缺点,但其性能上的优势,使其成为潜在的红外自适应伪装材料。

此外,瑞典国家空间局(SNSB)也在研究新型可变发射率热控涂层技术,由 WO_3 作为主要电致变色层, ZrO_2 作为离子导体, $\text{NiV}_x\text{O}_y\text{H}_z$ 作为互补电致变色层。衬底是用钢锡氧化物覆盖的玻璃,前电极为 Al 栅。发现的最高发射率调制在 $\epsilon_{\text{low}} = 0.33$ 和 $\epsilon_{\text{high}} = 0.59$ 之间,与先前研究的可变发射率器件相比具有显

著优势,有望在自适应隐身领域展开应用^[38]。

2.3.3 智能温控复合材料

温控复合材料是一种新型智能材料^[39],通过温控元件实时改变材料表面的温度,可以使材料与环境的灰度值一致,从而避开红外探测系统,达到伪装的效果^[40-41]。北京航空航天大学的王宏鹏、王小群、王振清等人通过热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)双向温度控制系统,实现了铝合金表面温度 15~60℃ 范围内跟踪目标温度变化^[42]。张升康、陈重、冯来等人通过将 TEC 与光学伪装材料相结合,让智能隐身材料实时感知环境和目标物温度的变化并作出响应^[43]。韦第升、王小群、杜善义等人基于 TEC 的智能温控复合材料系统显示,能够对设定温度的变化作出快速响应^[44]。

此外,由于物体的热辐射与温度的四次方成正比,因此高温红外伪装尤为困难,如飞机喷管(~950 K)和海军军舰烟囱(~680 K)。ZHU Huan-zheng 等人通过将二氧化硅气凝胶与 Ge/ZnS 相结合,可以将材料表面温度从 873 K 控制降低到 410 K,可以用于在 8~14 μm 的红外隐身^[45]。

2.3.4 光子晶体材料

光子晶体是折射率或介电常数不同的两种物质在空间周期性分布而具有光子带隙的特殊材料^[46]。光在周期性结构中经过散射和多次干涉,形成光子禁带,频率处于禁带的光是被严格禁止传播的,会显现出明显的结构色。因此可以通过构成物质的筛选、外形和尺寸的设计、阵列方式的不同等制备出各种不同颜色^[47]。自然界中也大量存在着这种基于材料特殊结构折射出的布拉格衍射光,如蝴蝶和甲壳虫的翅膀、炫目多彩的蛋白石、具有“变色”秘密的变色龙^[48]。

自 1996 年 Thomas Krauss 制作出了世界上第一个二维光子晶体以来^[49],关于光子晶体学术论文的数量就开始呈现出几何级数上升的趋势,应用也涉及各个领域,从增加 LED 效率的反射涂层到激光腔中的反射镜;从光子晶体光纤到医疗诊断、药物输送、防伪^[50]以及生物传感器^[51-52]。光子晶体是由两种折射率不同的物质周期性排列形成的,产生的结构色是相干衍射造成的。因此可以通过改变两种材料胶体晶体折射率对比度、晶格间距实现颜色的变化。已有报道称有人已经将人工光子晶体材料作为自适应伪装材料用于军用产品^[53-54],比如利用带有扰动超表面的光子晶体伪装材料,通过纳米盘模仿物体的光学特性,将手枪伪装成一只不相关的猫^[55]。

3 结语

随着现代侦察和制导技术的不断发展,无论是武器装备还是军用产品,都面临着前所未有的被探测和攻击的威胁,传统的伪装技术面临着极大的考验,如

何降低材料的可探测性成为伪装技术的热点。近年来,世界各个军事大国已经着眼于自适应伪装材料的开发,并取得了显著的发展,如视觉领域的光、电、热致变色材料以及仿生材料。但是由于作战环境复杂,目前这些材料在军用服饰上的运用尚未达到预期。变红外辐射特性、控温伪装材料以及光子晶体材料等作为单兵伪装遮蔽也存在着技术瓶颈,如灵敏度差、响应时间长,以及在跨区域、多季节和全时段背景环境变化较大时无法满足实际使用需求。此外,还有雷达波吸收材料、电磁屏蔽材料以及多频段兼容材料等。人们应该从时域、频域和空域性能多角度入手,发展国防化学与伪装及电磁防护材料交互作用的科学、技术及工程应用,这对推动我国国防安全技术发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张龙, 田野, 李博骁. 应急快速抵近侦察监视技术发展现状与思考[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 10-15.
ZHANG Long, TIAN Ye, LI Bo-xiao. Development Status and Thinking of Emergency Fast Close-in Reconnaissance and Surveillance Techniques[J]. Ordnance Industry Automation 2020, 39(6): 10-15.
- [2] 陈瑜洲, 李原, 王庆林, 张卿, 张津源. 无人机可见光侦察载荷视景仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 910-917.
CHEN Yu-zhou, LI Yuan, WANG Qing-lin, et al. Visual Simulation Platform for Visible Light Reconnaissance Load of Unmanned Aerial Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 910-917.
- [3] HONG H, SHI J W, LIU Z, et al. A Real-time Critical Part Detection for the Blurred Image of Infrared Reconnaissance Balloon with Boundary Curvature Feature Analysis[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2020(2): 91-97.
- [4] 张扬, 黄卫东, 董长哲, 等. 海洋激光雷达探测卫星技术发展研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 28-39.
ZHANG Yang, HUANG Wei-dong, DONG Chang-zhe, et al. Research on the Development of the Detection Satellite Technology in Oceanographic Lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 28-39.
- [5] 李佩青, 田英, 曹嘉峰, 等. 自适应红外隐身技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(10): 5-8.
LI Pei-qing, TIAN Ying, CAO Jia-feng, et al. Research Progress of Adaptive Infrared Stealth Technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(10): 5-8.
- [6] 张淑红, 李宁军. 军用服饰: 中国, CN204653849U[P]. 2015-09-23.
ZHANG Shu-hong, LI Ning-jun. Military apparel: China, CN204653849U[P]. 2015-09-23.
- [7] WANG G, JIANG X F, HAN S D, et al. Tri(imidazole)-derivative Moiety: a New Category of Electron Acceptors for Designing Crystalline Hybrid Photochromic Materials[J]. Chemistry-A European Journal, 2020, 27(4): 202004411.
- [8] LI F W, YEN T C, LIOU G S. Synthesis of High-performance Electrochromic Material for Facile Fabrication of Truly Black Electrochromic Devices[J]. Electrochimica Acta, 2021, 367: 137474.
- [9] PATTEKAR A, RAMESH S P, WILLIAMS A, et al. Non-Contact Thermal Printing of Color Thermochromic Materials: United States, US10, 821, 761B1[P]. 2020-12-05.
- [10] 吉卓婷, 邓志峰, 李雷权, 等. 螺噁嗪类有机光致变色材料的研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(11): 73-75.
JI Zhuo-ting, DENG Zhi-feng, LI Lei-quan, et al. Research Progress of Spirooxazine Organic Photochromic Materials[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(11): 73-75.
- [11] WANG Meng-jing, KOSKI K J. Reversible Chemochromic MoO₃ Nanoribbons through Zerovalent Metal Intercalation[J]. ACS Nano, 2015, 9(3): 3226-3233.
- [12] SEILER V K, TUMANOV N, ROBEYNS K, et al. Merocyanines in a Halogen-bonded Network Involving Inorganic Building Blocks[J]. Crystal Growth & Design, 2020, 20(2): 608-16.
- [13] HAO Peng-fei, GUO Chun-yun, SHEN Jun-ju, et al. A Novel Photochromic Hybrid Containing Trinuclear [Cd₃Cl₁₂]6-Clusters and Protonated Tripyridyl-triazines[J]. Dalton Transactions, 2019, 48(44): 497-501.
- [14] YUAN Jian-yong, YUAN Yi-zhong, TIAN Xiao-hui, et al. Photoswitchable Boronic Acid Derived Salicylidenehydrazone Enabled by Photochromic Spirooxazine and Fulgide Moieties: Multiple Responses of Optical Absorption, Fluorescence Emission, and Quadratic Nonlinear Optics[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(49): 38-55.
- [15] ABDOLLAHI A, MOURAKI A, SHARIFIAN M H, et al. Photochromic Properties of Stimuli-responsive Cellulosic Papers Modified by Spiropyran-acrylic Copolymer in Reusable pH-sensors[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 200: 83-94.
- [16] MAHMOODI N O, RAHIMI S, PASANDIDEH N M. Microwave-assisted Synthesis and Photochromic Properties of New Azo-imidazoles[J]. Dyes and Pigments, 2017, 143: 87-92.
- [17] 钟少锋, 涂海洋. 有机光存储材料二芳乙烯化合物研究的发展[J]. 感光科学与光化学, 2003(3): 200-211.
ZHONG Shao-feng, XU Hai-yang. Development of Diarylethenes as Organic Light Storage Materials[J]. Photosensitive Science and Photochemistry, 2003(3): 200-211.
- [18] 田灿灿. 基于有机/无机复合电致变色材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
TIAN Can-can. Preparation and Properties of Organic/Inorganic Composite Electrochromic Materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.

- [19] 韦友秀, 陈牧, 刘伟明, 等. 电致变色技术研究进展和应用[J]. 航空材料学报, 2016, 016(3): 108-123.
WEI You-xiu, CHEN Mu, LIU Wei-ming, et al. Research Progress and Application of Electrochromic Technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 016(3): 108-123.
- [20] 任安民, 何琳. 潜艇可探测性估计与动态隐身管理[C]. 北京: 中国造船工程学会, 2013.
REN An-min, HE Lin. Submarine Detectability Estimation and Dynamic Stealth Management[C]. Beijing: Chinese society of Shipbuilding Engineering, 2013.
- [21] 张婉, 黄荣桓, 孟秋迪, 等. 温致变色涂料制备及变色性能研究[J]. 精细化工, 2015, 32(9): 1046-1050.
ZHANG Wan, HUANG Rong-huan, MENG Qiu-di. Study on Preparation and Discoloration Performance of the Rmochromic Coatings[J]. Fine chemical industry, 2015, 32(9): 1046-1050.
- [22] PARGAONKAR J G, PATIL S K, VAJEKAR S N. Greener Route for the Synthesis of Photo- and Thermochromic Spiropyrans Using a Highly Efficient, Reusable, and Biocompatible Choline Hydroxide in an Aqueous Medium[J]. Synthetic Communications, 2018, 48(2): 208-215.
- [23] 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 Qian-jun, QIAN Kun, et al. Research Progress on Single Soldier Camouflage and Its Camouflage Methods[J]. Dyeing & Finishing Technology, 2019(8): 57-60.
- [24] 王顺奎. 热红外隐身涂料的研究与应用简况[J]. 红外与激光技术, 1993(1): 1-5.
WANG Shun-kui. Research and Application of Thermal Infrared Stealth Coatings[J]. Infrared and Laser Technology, 1993(1): 1-5.
- [25] 郭利, 徐国跃, 李澄, 等. 一种新型近红外伪装涂层的制备及光谱性能研究[J]. 红外技术, 2012, 34(10): 588-592.
GUO Li, XU Guo-yue, LI Cheng, et al. Preparation and Spectral Properties of a Novel Near Infrared Camouflage Coating[J]. Infrared Technology, 2012, 34(10): 588-592.
- [26] 华涛. 国外红外伪装服的研究与进展[J]. 产业用纺织品, 1999(12): 5-7.
HUA Tao. Research and Development of Infrared Camouflage Clothing Abroad[J]. Industrial Textiles, 1999(12): 5-7.
- [27] 徐园园. 还原染料的近红外伪装性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2008.
XU Yuan-yuan. Near Infrared Camouflage Properties of Vat Dyes[D]. Shanghai: Donghua University, 2008.
- [28] 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 Gong-rong, YU Xiao, ZHOU Lan, et al. Preparation of Low Emissivity Coating and Its Application in Thermal Infrared Camouflage of Polyester/Cotton Blended Fabric[J]. Silk, 2014, 51(2): 1-5.
- [29] 祝红良, 李妍, 何亮, 等. 新型耐高温防腐蚀涂料的研制[J]. 上海涂料, 2013, 51(4): 6-8.
ZHU Hong-liang, LI Yan, HE Liang, et al. Development of New High Temperature and Corrosion Resistant Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2013, 51(4): 6-8.
- [30] 费逸伟, 黄之杰. 颜料对低发射涂料红外辐射特性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2002, 20(3): 449-452.
FEI Yi-wei, HUANG Zhi-jie. Effect of Pigments on Infrared Radiation Characteristics of Low Emission Coatings[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2002, 20(3): 449-452.
- [31] 李发学, 张广平, 吴丽莉, 等. 相变材料在新型红外伪装服上的应用[J]. 纺织学报, 2003, 24(2): 79-81.
LI Xue-fa, ZHANG Guang-ping, WU Li-li, et al. Application of Phase Change Materials in New Infrared Camouflage Clothing[J]. Acta Textile Sinica, 2003, 24(2): 79-81.
- [32] 嵇海宁, 刘东青, 张朝阳, 等. 二氧化钒在红外伪装隐身技术中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(11): 4099-4105.
JI Hai-ning, LIU Dong-qing, ZHANG Chao-yang, et al. Application of Vanadium Dioxide in Infrared Camouflage and Stealth Technology[J]. Progress in Chemical Industry, 2017, 36(11): 4099-4105.
- [33] 鄢冬茂. 微胶囊相变材料用于热红外伪装的应用方式和领域[J]. 现代涂料与涂装, 2017, 20(10): 31-34.
YAN Dong-mao. Application Modes and Fields of Microencapsulated Phase Change Materials for Thermal Infrared Camouflage[J]. Modern Paint and Finishing, 2017, 20(10): 31-34.
- [34] DEMIRYONT H, MOOREHEAD D. Electrochromin Emissivity Modulator for Spacecraft Thermal Management[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009, 93(12): 2075-2078.
- [35] DEMIRYONT H. Electrochromic Infrared Tunable Filter and Emissivity Modulator: United States, US2006-0465485[P]. 2007-09-04.
- [36] SEHWENDEMAN I, HWANG J, REYNOLDS R, et al. Combined Visible and Infrared Electrochromism Using Dual Polymer Devices[J]. Advanced Materials, 2001, 13(9): 634-637.
- [37] YABLONOVITEH E, WUDL F, DUNN B, et al. Electrochromic Adaptive Infrared Camouflage[R]. Los Angeles: US Army Research Office, 2005.
- [38] LAESSON A L, NIKLASSON G A. Infrared Emittance Modulation of All-thin-film Electrochromic Devices[J]. Materials Letters, 2004, 58(20): 2517-2520.
- [39] 王小群, 杜善义. 热电制冷技术在航空航天领域的应用[J]. 中国航天, 2006, 10: 22-24.
WANG Xiao-qun, DU Shan-yi. Application Thermoelectric Cooling Technology on Avigation and Spaceflight Field[J]. Aerospace China, 2006, 10: 22-24.
- [40] RAMAN A P. Passive Radiative Cooling below Ambient Air Temperature under Direct Sunlight[J]. Nature, 2014, 515: 540-544.
- [41] MANDAL J. Hierarchically Porous Polymer Coatings

- for Highly Efficient Passive Daytime Radiative Cooling[J]. *Science*, 2018, 362: 315-319.
- [42] 王宏鹏, 王小群, 王振清, 等. 表面自适应变温材料系统中的控制设计[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(7): 1-3.
- WANG Hong-peng, WANG Xiao-qun, WANG Zhen-qing, et al. Control Design of Surface Adaptive Variable Temperature Material System[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(7): 1-3.
- [43] 张升康, 陈重, 冯来, 等. 表面控温红外智能隐身材料系统研制[J]. *表面技术*, 2004, 33(1): 63-64.
- ZHANG Sheng-kang, CHEN Zhong, FENG Lai, et al. Development of Smart Material System of Infrared Camouflage[J]. *Surface Technology*, 2004, 33(1): 63-64.
- [44] 韦第升, 王小群, 杜善义. 复合材料在红外隐身技术中的应用[J]. *航空学报*, 2009, 30(12): 2462-2468.
- WEI Di-sheng, WANG Xiao-qun, DU Shan-yi. Application of Composite Materials in Infrared Stealth Technology[J]. *Journal of Aeronautics*, 2009, 30(12): 2462-2468.
- [45] ZHU Huan-zheng, LI Qiang, ZHENG Chun-qi, et al. High-temperature Infrared Camouflage with Efficient Thermal Management[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 60.
- [46] 马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- MA Xi-Ying. Principle and Application of Photonic Crystal[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [47] TEYSSIER J, SAENKO S V, MILINKOVITCH M C. Photonic Crystals Cause Active Colour Change in Chameleons[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 63-68.
- [48] CHOU H, NGUYEN A, CHORTOS A, et al. A Chameleon-inspired Stretchable Electronic Skin with Interactive Colour Changing Controlled by Tactile Sensing[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8011.
- [49] KRAUSS T F, RUE R, BRAND S. Two-dimensional Photonic-Bandgap Structures Operating at Near-infrared Wavelengths[J]. *Nature*, 1996, 383(6602): 699-702.
- [50] FU Yue, Wang Yun-ming, Chen Dan, et al. Three-Dimensional Photonic Crystal Bulks with Outstanding Mechanical Performance Assembled by Thermoforming-Etching Cross-linked Polymer Microspheres[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(31): 311-317.
- [51] INAN H, POYRAZ M, INCI F, et al. Photonic Crystals: Emerging Biosensors and Their Promise for Point-of-care Applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(2): 366-388.
- [52] WANG Zhe, MENG Zi-hui, XUE Min, et al. Detection of Lysozyme in Body Fluid Based on Two-dimensional Colloidal Crystal Sensor[J]. *Microchemical Journal*, 2020, 157: 105-173.
- [53] 易怡, 邓联文, 罗衡, 等. 基于光子晶体的红外光与激光兼容伪装材料结构设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(11): 2966-2971.
- YI Yi, DENG Lian-wen, LUO Heng, et al. The Structure Design of Infrared and Laser Compatible Camouflage Materials Based on PCG[J]. *Journal of Zhongnan University (Natural Science Edition)*, 2017, 48 (11): 2966-2971.
- [54] 王超, 时家明, 赵大鹏, 等. 多波段兼容伪装方法的分析研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(5): 92-95.
- WANG Chao, SHI Jia-ming, ZHAO Da-peng, et al. Analysis and Research on Multi Band Compatible Camouflage Method[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2012, 35(5): 92-95.
- [55] HUANG Kun, ZHAO Dong, TJIPTOHARSONO F, et al. Bio-inspired Photonic Masquerade with Perturbative Metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6): 7529-7537.