

光学兼容红外伪装涂料研究进展

许卫东, 肖菲菲, 刘珩, 杨鑫

(陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:当前侦察设备波段宽、分辨率高,具备全天候、全天时侦察能力,对现有武器装备的伪装提出了挑战。伪装涂料采用功能颜、填料,通过一定的制备、施工工艺涂覆在目标表面,在不影响武器装备战场机动性能的前提下实现武器装备的伪装,是目前最有效的伪装技术手段之一。在阐述光学伪装涂料、红外伪装涂料、光学兼容红外伪装涂料伪装机理的基础上,梳理了3种伪装涂料技术的研究进展,总结了3种伪装涂料的技术特点和存在的问题,对伪装涂料技术今后的发展进行了展望,提出了发展光学兼容红外伪装涂料的技术实现途径,为有效对抗日益发展的先进侦察技术,满足战场伪装需求提供了方法指导。

关键词:伪装; 伪装涂料技术; 光谱反射特性; 发射率

中图分类号: TQ630

DOI: 10.12018/j.issn.2097-0730.20220818001

Research Progress on Visible-Infrared-Compatible Camouflage Coatings

XU Weidong, XIAO Feifei, LIU Heng, YANG Xin

(College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: At present, it is a severe challenge to effectively camouflage the existing weapons and equipment, for the reconnaissance equipment has the capabilities of wide reconnaissance spectrum, high reconnaissance accuracy, all-weather all-day reconnaissance. One of the most effective camouflage means till now is to camouflage the target weapons and equipment with coatings of functional colors and fillers on the surface, with certain preparation and processing technologies to achieve camouflage effects without affecting the performance of battlefield mobility. On the basis of elaborating on the camouflage mechanisms of optical camouflage coatings, infrared camouflage coatings, and visible-infrared-compatible camouflage coatings, this article sorts out the research progress of these three camouflage coating technologies, summarizes the technical characteristics and existing problems of the three camouflage coatings, and looks forward to the future development of camouflage coating technologies. In addition, this paper proposes a technical realization path for developing visible-infrared-compatible camouflage coatings, which provides methodological guidance for effectively countering the increasingly advanced reconnaissance technologies and meeting battlefield camouflage requirements.

Key words: camouflage; camouflage coating technology; spectral reflectance characteristics; emissivity

当前,军事侦察装备已实现从紫外(300~380 nm)、可见光/近红外(380~2 500 nm)、热红外(3~5 μm 、8~14 μm),直至整个雷达波段(1~140 GHz)的电磁波段的完整覆盖,且具备多传感器

数据与图像融合等能力;侦察精度进一步提高,如美国 KH-12 侦察卫星,地面分辨率达 0.1 m,全球鹰无人机载热像仪的高空温度分辨率达 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 、空间分辨率优于 0.2 mrad,典型的雷达成像卫星如美国

收稿日期: 2022-08-18

基金项目: 军内科研项目(62122062205)。

第一作者: 许卫东, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究伪装科学与技术, xweibing1968@aliyun.com。

通信作者: 肖菲菲, 博士研究生, 主要研究多频谱伪装涂料技术及应用, xiaofeifei8719@126.com。

“长曲棍球”，分辨率可达到 0.3 m；雷达侦察波段宽、识别能力强，作用距离可达数百至上千千米，如美国的 E-8A 飞机平台搭载的 JSTAR 系统，分辨率达 3 m，探测距离可达 150~200 km，可连续侦察敌方纵深内的地面目标；侦察网络覆盖全球，构成空地一体的侦察体系，实现了对目标的全方位侦察探测。不断提高的侦察能力，对军事目标的战场生存及作战行动实施产生严峻威胁，军事伪装技术面临更大的挑战。

军事伪装简称伪装，是为隐蔽己方，欺骗、迷惑敌方，降低敌方侦察监视和制导捕获效果，对作战企图、行动和目标等实施隐真、示假和干扰的活动^[1]。伪装涂料是实施军事伪装的重要材料，其通常通过研磨分散、调漆及过滤等工艺流程制备而成，根据涂覆基底的不同，经过喷涂、刮涂、丝网印花等方式涂覆至目标表面，形成具备一定物理、化学特性的固态涂层薄膜。涂料的制备方法及涂覆工艺相对简单、施工便捷、不受目标外形限制，不影响武器装备的战场机动性能，是最简便有效的伪装技术手段之一^[2]。

为有效对抗当前的宽频段、多波段侦察技术，伪装涂料应具备多波段兼容的伪装性能，即避免产生在一个波段具备伪装效果而在另一个波段导致目标暴露的现象，光学兼容红外伪装涂料技术是其中的关键点和难点。

1 光学伪装涂料技术

1.1 光学伪装涂料的伪装原理

目标被光学侦察设备探测识别的原因在于目标与背景之间的光学反射特性存有差异，光学伪装的基本原理是消除、减小、改变或模拟目标与背景之间光学反射特征差别，以应对光学探测^[3]。将由颜料颗粒和黏结剂等成分组成的光学伪装涂料涂覆在目标表面，改变目标表面的光学反射特性，是遵循光学伪装原理的一种行之有效的伪装方法^[4]。

物体表面的特征如光谱反射特性、粗糙度、受照情况、光源的光谱功率分布，探测仪器感光元件的响应特性等因素能够引起目标和背景在光学波段(UV、VIS、INF)的反射特性差异，其中，物体表面的本征光谱反射特性是最主要的影响因素^[5-6]。因此，研制光学波段的伪装涂料，出发点是材料的配制，最终目标是尽可能使伪装目标表面涂层与背景地物表面的光谱反射特性相协调。

1.2 光学伪装涂料的研究进展

国外对光学伪装涂料的研究较早，有很多定型

产品，从时间轴来看，早期产品如美国的醇酸型伪装瓷漆、英国的自干型无光泽伪装涂料、法国的 F1 伪装漆、瑞典的 C5-350 伪装涂料以及水性的伪装乳胶漆等，20 世纪 80 年代后期美国、英国、加拿大等国家相继研究开发了耐化学腐蚀的脂肪族聚氨酯伪装涂料^[7]。国内对光学伪装涂料的研究起步于 20 世纪中叶，相继有溶剂型伪装涂料、甲基纤维素型水性涂料和双组分涂料等^[8]。

随着侦察技术的发展，光学伪装涂料技术也在进步，近 5 年来光学伪装涂料的相关研究进展有：杨茜^[9]对 TiO₂ 掺杂改性并将其与色浆混合制备了氧化钛基绿色伪装涂料；Qiao 等^[10]提出了一种颜色可调光子晶体材料；Li 等^[11]设计制备了一种 Cs₂NaFeCl₆ 单晶，其在 80~500 K 范围内能实现超过 1 000 次的无滞后可逆热致变色(从黄色到黑色)；Zhou 等^[12]将 Mn-Li 的位点选择性母体掺杂到 Ca₃TeO₆ 的八面体 Ca 位 (CaB) 中，制备了绿色可调黄绿色颜料；Yuan 等^[13]使用水热法将有机阴离子嵌入到 Mg-Al 层状双氢氧化物(LDHs)的夹层中，制备了一种绿色颜料，其与绿色植物在 400~2 500 nm 波段的光谱相似度达 94%；Gao 等^[14]制备了一种含有氯化锂和三氧化二铬(Cr₂O₃)绿色颜料颗粒的聚乙烯醇伪装涂层，并探讨了含水量和涂层厚度对伪装性能的影响。可以看出，当前比较先进的光学伪装涂料技术有光致变色、热致变色材料以及叶绿素仿生材料等的研发，光学伪装涂料的研究重点是改善光谱反射特性。

地物光谱反射特性方面，对于土壤、砂石等沙土色背景自然地物，影响光学波段范围内反射率的最重要因素是其矿物成分，尤其是氧化铁。土壤、砂石的反射光谱特征曲线如图 1 所示^[15-20]。对于典型光谱特征的地物，如雪地、植被等，此类地物特征非常明显。绿色植被中由于叶绿素和水等物质的存在，在波段 380~2 500 nm 范围内存在 3 个显著的光谱特征，一是在波长 550 nm 处有一明显的绿色反射峰、在波段 670~780 nm 范围内反射率有一个陡升趋势；二是在波段 780~1 300 nm 范围内存有近红外高反射；三是在波长 1 490 nm 处和 1 950 nm 处存有明显的特征吸收峰。绿色植被是近些年研究的热点^[21]。植被的反射光谱特征曲线如图 1 所示^[15-20]。对叶绿素的光谱特征拟合，可以通过提取或改性植物叶绿素、对尖晶石型无机颜料掺杂不同元素以及合成类叶绿素结构的酞菁颜料等技术途径实现，目前实际应用中较多的是无机颜料掺杂技术^[22]。

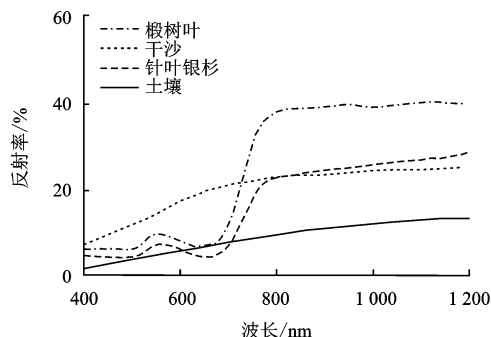


图1 典型地物光谱反射曲线图^[15-20]

无机颜料耐晒、耐热、耐候、耐溶剂性好,遮盖力强,被广泛用于伪装涂料。根据光谱特性匹配需求,土色颜料一般用氧化铁系列;绿色颜料中,氧化铬绿和钴蓝比较多,二者的光谱特征比较接近:反射系数在620~670 nm波段内不超过10%,反射系数在波长700 nm左右处不超过20%,反射系数在715~815 nm波段内为25%~65%,光谱特性与绿色植被比较接近;白色颜料中,锌白、钛白等在400~800 nm波段内具有较高的反射系数,但遮盖力较差,部分硫酸盐或钡、钙的氧化物与锑相应化合物作为原料的白色涂料由于近紫外反射值较高而被选用^[1]。

光学伪装涂料配色方面,计算机配色主要的理论依据是Kubelka-Munk(K-M)理论,需配套大量基础数据,当前研究中有人选择符合伪装要求的基础颜料,利用经验配色法或利用实验设计方法中的正交设计法、混料设计法安排配色实验,对实验数据进行多元线性或非线性回归获取配色模型,从而获得涂料颜料或色浆的最佳配比^[23-28]。

2 红外伪装涂料技术

2.1 红外伪装涂料的伪装原理

斯蒂芬-玻尔兹曼定律认为物体单位面积的辐射总能量与其辐射率和绝对温度的4次方的乘积成正比,表达式为

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中: ϵ 为发射率,表征物体的发射本领; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,取值为 $5.673 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{K}^4$; T 表示物体的热力学温度。定律表明红外辐射特征由发射率和温度决定,因此红外伪装涂料可通过调控涂层的温度或发射率,改变、减小被探测物体与背景之间红外辐射特征差异,从而达成目标的低可探测性,实现红外隐身。

红外辐射在大气中传输时会受到衰减和干扰,但在两个大气窗口(3~5 μm 和8~14 μm)的透过

率很高,目标因此易被热探测器发现、识别和跟踪,当前的军事装备在出厂前通常未做足够的红外伪装设计,导致其在大气窗口,尤其是在8~14 μm 波段具有较强的热红外特征,常温目标的红外伪装涂料主要针对的红外波段需为8~14 μm ^[29]。

2.2 红外伪装涂料的研究进展

美国最早开展对红外伪装涂料的研究,Honeywell公司1967年开展了反射性热红外涂料的研究,为减轻红外制导导弹的威胁,美国陆军阿伯丁研究中心于70年代开始研制抑制红外信号的涂料,80年代后,德、英、法、日、加、澳大利亚开始加入红外伪装涂料研究^[30]。近5年来对红外伪装涂料相关研究进展主要有:秦玉霜^[31]用共沉淀法制备了铝/掺锑二氧化锡(Al/ATO)复合粒子和铝/氧化铋(Al/Bi₂O₃)复合粒子功能填料,通过改变铝粉含量及表面包覆层的厚度可实现发射率的调控;黄家建^[32]以磷酸铬铝为黏结剂,分别以普通铝粉、球形铝粉和片状铝粉做填料制备了磷酸铝基底发射率材料,发现片铝-磷酸铬铝的红外发射率最低,球铝-磷酸铬铝的粘结强度最好;张云峰等^[33]制备了纳米SiO₂改性石蜡相变微胶囊涂料,发现SiO₂用量5%时有最大的相变焓和包裹率;陈翔等^[34]制备了石墨烯红外低发射率涂料,发现其比传统纯金属低红外发射率漆膜的红外发射率更低,力学性能更好;Han等^[35-36]报告了几种可用于高温热伪装的超薄碳化钛(MXene)薄膜/涂层,其工作温度范围广、温度改变幅度大。

军事目标的辐射强度一般会高于背景,为了达到红外伪装效果,可以通过减小目标表面温度及发射率来降低目标和背景的辐射强度差。从近些年的研究进展来看,热红外伪装涂料有通过调控温度或调控发射率实现的技术方案,但由于材料热惯量不足,实际中热红外伪装涂料倾向于选用降低发射率的技术途径,即通过由低发射率颜料或填料、黏合剂及功能助剂组成的涂料涂覆在目标表面,以此来降低目标的红外辐射特征,达成红外伪装的目的^[37]。热红外伪装涂料的研究方向集中在低发射率颜料、填料或黏合剂上。

在低发射率颜料或填料方面,有机颜料如酞菁蓝等,其复杂官能团结构会引起在6~11 μm 波段范围内形成吸收峰,又因其耐老化性能较差,红外伪装涂料中应用比较少,无机颜料具有优良的遮盖力、耐光性好、耐高温、难分解,被较多应用于红外伪装涂料中。金属颜料、半导体颜料、着色颜料是红外伪

装涂料中广泛使用的3类无机颜料。

金属颜料的红外反射率较高,发射率较低,是伪装涂料中常用的低发射率颜料种类,如Al、Cu、Ag、Au、Zn等^[37]。影响金属颜料发射率的主要因素有粒子的含量、形态、尺寸大小、粒径分布等。相关研究结论有:鳞片状的金属粒子能有效降低发射率,金属粒子的添加还需要控制在一定的范围内,含量过大时会无法有效调控发射率,甚至造成涂料涂层无法成型;涂层的发射率受金属粒子添加量影响较大,当铜粉的含量为10%时,涂层发射率大于0.8,当铜粉含量增加到50%时,涂层发射率降低到0.2以下等^[38-41]。在涂料中添加金属颜料会引起涂层明度的提高,在制备红外涂料时一般加入一些着色颜料如 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 、CdS、ZnS、CdSe等来降低涂层在光学波段的反射率,并使涂层具有光学色彩^[42]。

半导体材料由金属氧化物和掺杂剂组成,改变其载流子密度、载流子迁移率、载流子碰撞频率等参数可调控半导体材料的红外反射特性。半导体材料被用于红外伪装涂料的相关研究有:通过磁控溅射法制备的低发射率纳米ITO、纳米ZAO、纳米 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 多层膜,纳米ITO颜料的发射率范围在0.1~0.9之间,纳米多层膜的最低发射率可达0.05;ITO粉末的掺杂程度和固含量会影响涂层的发射率,ITO掺杂程度5%(SnO_2 含量)、固含量25%时,可获得最低发射率0.63等^[42-44]。

黏合剂是红外伪装涂料的重要组成,它的性能会影响涂料的红外伪装性能,其作用主要是成膜和调节涂层发射率。低发射率涂层的黏合剂在大气窗口应当红外透明,与填料相容性应较高,还应具备一定的机械强度以保证使用过程中具备优良的物理机械性能^[45-46]。红外伪装涂料中,要尽量避免使用在热红外区有强烈吸收的树脂材料作黏结剂^[47]。环化橡胶、丙烯聚氨酯、氯化聚苯乙烯、氯丁橡胶及乙丙橡胶等树脂材料是目前研究较多的热红外透明黏合剂^[37]。相关研究结论有:三元乙丙橡胶具有较高的红外反射率,但其与填料的相容性较差,对三元乙丙橡胶进行环化和乳化改性后其远红外波段的发射率可达0.58,可用作热红外伪装涂料,将三元乙丙橡胶与丙烯酸接枝获得的共聚物在8~14 μm 波段内无强吸收峰,具备优良的红外透明性能,还有良好的耐冲击性、耐酸碱盐性能;测试多种黏合剂和粉体及以聚氨酯树脂为黏合剂制成的涂膜在8~14 μm 波段的发射率,结果表明Karton树脂具有较低的红外发射率等^[41,48-49]。

3 光学兼容红外伪装涂料技术

3.1 光学兼容红外伪装涂料的伪装原理

光学兼容红外伪装涂料需要涂层在光学波段具有所需的颜色、亮度等光学特征,在红外波段具备变温或梯度发射率等特征。实际应用中,由于一般的材料热惯量不够大,通常是在目标表面涂覆具备特定颜色、亮度特性的低发射率涂料,配合使用相应的高、中发射率涂料。这样既可以对抗光学侦察,也可以在红外热图上形成明暗相间的斑点,分割目标原有规则红外图像,使得探测器难以分辨目标,实现红外伪装。因此,光学兼容红外伪装涂料的关键在于保证涂料光学波段颜色特性及较低反射率特性的前提下,调节涂料红外波段的发射率,形成梯度发射率的涂料体系^[50]。此外,光学兼容红外伪装涂料的黏合剂应当具备良好的光学、红外透明性以及良好的物理机械性能。

3.2 光学兼容红外伪装涂料的研究进展

光学兼容红外伪装涂料需兼顾光学伪装和红外伪装性能,关键是在保证涂料光学伪装特性的基础上对红外波段的发射率进行调控以实现红外兼容。国内外近5年光学兼容红外伪装涂料进展较少,如Fu等^[51]利用微观粉末阳极氧化技术制备多孔阳极氧化铝/铝片仿生结构材料,用于视觉和红外伪装;Woo等^[52]采用氧化物-金属-氧化物3层结构的纳米网格图案化方法制备了一种可见透明和红外反射(VTIR)涂层,实现了光学和红外伪装兼容。

当前光学兼容红外伪装涂料的主流技术途径是使用低发射率颜、填料,包括使用着色颜料掺杂金属粉末作颜、填料,使用复合粉体作颜、填料,使用着色颜料掺杂半导体材料作为颜、填料。

着色颜料掺杂金属粉末作低发射率颜、填料可以兼容着色颜料在光学波段的光谱反射特性和金属粉末的低发射率特性,片状铝粉由于密度低,性价比高,施工性好,实际应用中使用比较多。片状铝粉调节发射率的能力强,但其强烈的金属光泽会提升光学波段范围内的反射率,于光学伪装兼容不利^[53]。

为了更好地利用着色颜料和金属颜料的特性,以达到光学和红外伪装的兼容,国内外学者采用着色颜料对片状铝粉包覆改性形成核壳结构的复合粉体,在尽可能低地牺牲红外发射率的前提下最大限度降低铝粉金属光泽和明度^[42]。相关研究有:利

用液相沉淀法制备深绿色 Al/Cr₂O₃ 低发射率复合颜料;利用溶剂热法制备低可见光反射率和高红外反射率的 Al/Fe₃O₄ 复合颜料等^[54-57]。核壳结构复合粉体虽然解决了着色颜料掺杂金属粉末技术的弊端,但也存在一些问题:红外伪装涂料中使用的铝粉粒度在纳米级,比表面积大、活性高,容易被氧化;制备复合粉体时需要保证包覆层的完整均匀;制备的复合粉体还需要具有良好的分散性。

相较于着色颜料掺杂金属粉末、核壳复合粉体技术,颜料掺杂半导体材料可能是更具可行性的技术途径。比如,钢锡氧化物 ITO 薄膜在红外光的反射率能达到 80% 以上,对紫外光的吸收率在 85% 以上,对可见光的透射率达 80%,同时,还有较好的隔热性能,具备优良的多波段兼容特性^[58]。

4 展望

从伪装涂料的伪装原理出发,综述了不同类型伪装涂料的研究进展。当前,光学兼容红外伪装涂料的研究取得了一些进展,但还存有一些弊端:目前油性伪装涂料体系居多,大量溶剂的存在会造成安全隐患、环境污染以及人身伤害;伪装涂料的多波段兼容性有所欠缺,稳定性不够好;难以有效对抗高光谱侦察设备。

针对上述弊端,对伪装涂料的未来发展展望如下:多研发水性体系伪装涂料,避免安全隐患、降低挥发性有机污染物(volatile organic compounds, VOCs)排放、减少对人体的伤害;通过将光学兼容红外伪装涂料与其他功能材料复用,拓展伪装的作用波段或增强伪装效能,例如与雷达吸波基底复合以实现兼容雷达波段的伪装,与大热惯量的相变材料复用以增强红外伪装效果;深入研究仿生材料,将其应用于伪装涂料,以更有效地应对高光谱侦察;研究多波段自适应伪装涂料,以便与背景更好地融合,从而有效对抗全天候、智能化探测^[59-63]。

参考文献:

[1] 胡江华,贾其,李凌,等. 伪装技术[M]. 北京:兵器工业出版社,2020.
HU Jianghua, JIA Qi, LI Ling, et al. Camouflage technology [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2020.

[2] 邓龙江,周佩珩,陆海鹏,等. 多频谱隐身涂层材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8): 449-462.
DENG Longjiang, ZHOU Peiheng, LU Haipeng, et

al. Research progress in multispectral stealth coating material[J]. Materials China, 2013, 32(8): 449-462.

[3] 初苗,田少辉,喻钧,等. 迷彩设计中基于 SOFM 的背景图像聚类方法[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(10): 218-221.
CHU Miao, TIAN Shaohui, YU Jun, et al. SOFM based background image clustering in camouflage pattern design[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(10): 218-221.

[4] 杨欣欣,拓锐,张彬,等. 隐身技术光谱反射率的发展探讨[J]. 化学分析计量, 2011, 20(S1): 136-138.
YANG Xinxin, TUO Rui, ZHANG Bin, et al. Development of stealthy technology and spectral reflectance[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2011, 20(S1): 136-138.

[5] 邱贞慧,彭著良,孙元宝,等. 现代伪装涂料的研究进展[J]. 表面技术, 2005, 34(1): 5-7, 21.
QIU Zhenhui, PENG Zhuliang, SUN Yuanbao, et al. Recent progress of modern camouflage coating [J]. Surface Technology, 2005, 34(1): 5-7, 21.

[6] WINKELMANN M. Analysis of exploitable spectral features of target and background materials[C]// Target and Background Signatures. Toulouse: SPIE, 2015: 202-208.

[7] 杨力祥. 无机颜料细化工艺及其光谱性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016.
YANG Lixiang. The refining process and spectral properties study of inorganic pigment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.

[8] 王向伟. 伪装隐身技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2021.

[9] 杨茜. 氧化钛基绿色伪装反射散热涂层的制备及其性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
YANG Qian. Study on the preparation and properties of green camouflage reflection radiation coating based on titanium oxide[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[10] QIAO Y, MENG Z H, WANG P P, et al. Research progress of bionic adaptive camouflage materials[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 637664.

[11] LI W Z, RAHMAN N U, XIAN Y M, et al. Regulation of the order-disorder phase transition in a Cs₂NaFeCl₆ double perovskite towards reversible thermochromic application[J]. Journal of Semiconductors, 2021, 42(7): 44-57.

[12] ZHOU X, ZHAO M H, YANG J, et al. Chemical pressure enlarged camouflage color zone in Mn(IV)-activated yellow-green pigments[J]. Materials Today Chemistry,

- 2022, 25: 100902.
- [13] YUAN L, WANG C, QING X L, et al. Synthesis and fine spectroscopy tuning of the hyperspectral simulation material based on organic anions intercalated Mg-Al layered double hydroxide[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 107: 103328.
- [14] GAO Y, TANG B, JI G J, et al. A camouflage coating with similar solar spectrum reflectance to leaves based on polymeric inorganic composite[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(6): 066404.
- [15] BURKINSHAW S M, HALLAS G, TOWNS A D. Infrared camouflage[J]. *Rev. Prog. Coloration*, 1996, 26: 47-53.
- [16] KIMMEL B W, BARANOSKI G V G. A novel approach for simulating light interaction with particulate materials: Application to the modeling of sand spectral properties[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9755-9777.
- [17] 刘志明. 植物叶片仿生伪装材料研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
LIU Zhiming. Research on bionic camouflage materials for plant leaves[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [18] YANG Y J, LIU Z M, HU B R, et al. Bionic composite material simulating the optical spectra of plant leaves[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, 7(S): 43-49.
- [19] YUAN Z, YE H, LI S M. Bionic leaf simulating the thermal effect of natural leaf transpiration[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(1): 90-97.
- [20] GATES D M, KEEGAN H J, SCHLETER J C, et al. Spectral properties of plants [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(1): 11-20.
- [21] 许卫东, 刘君, 张控勤, 等. 绿色植被蒸腾作用机制及红外辐射特征[J]. *陆军工程大学学报*, 2022, 1(1): 38-43.
XU Weidong, LIU Jun, ZHANG Shuanqin, et al. Transpiration and infrared radiation characteristics of green plants[J]. *Journal of Army Engineering University of PLA*, 2022, 1(1): 38-43.
- [22] 许浩, 刘珩. 绿色植物光谱特征拟合技术研究进展[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(2): 157-162.
XU Hao, LIU Heng. Advances in spectral signature fitting of green plants[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(2): 157-162.
- [23] 鞠建军, 胡江华, 刘珩, 等. 多元回归在迷彩配色中的应用[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(6): 61-65.
JU Jianjun, HU Jianghua, LIU Heng, et al. Application of multiple regression on color matching for pattern painting[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(6): 61-65.
- [24] YU J, HU Z Y. Study on tent cloth materials for desert type camouflage [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 590: 134-137.
- [25] YU J, HU Z Y. Study on digital camouflage tent cloth and its application with pigment printing [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 578: 78-81.
- [26] YU J, HU Z Y. Implementation of camouflage tent cloth materials and camouflage effect evaluation [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 578: 166-169.
- [27] 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.
- [28] ASOFIEI I, CRISTIAN BOSCORNEA A, BULIGA D I, et al. Mixture design experiments applied for the formulation of a textile ink with reproduction of the NATO IRR green color used in military camouflage[J]. *Textile Research Journal*, 2021, 91(3/4): 249-260.
- [29] 程从亮. 8~14 μm 低发射率红外隐身涂料研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
CHENG Congliang. Research on 8—14 μm low-emissivity infrared stealth coatings[D]. Nanjing University of Technology, 2005.
- [30] 李新华, 陈雷, 孟晓雄, 等. 国外涂料型红外隐身材料研制现状和发展方向分析[J]. *红外技术*, 1994, 16(1): 5-11.
LI Xinhua, CHEN Lei, MENG Xiaoxiong, et al. Development status quo of camouflage coatings and their future prospects[J]. *Infrared Technology*, 1994, 16(1): 5-11.
- [31] 秦玉霜. 铝基红外隐身功能填料的制备及其性能研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
QIN Yushuang. Preparation and properties of aluminum-based infrared stealth functional fillers [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [32] 黄家建. 磷酸铬铝基低红外发射率材料的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
HUANG Jiajian. Research on chromium aluminum phosphate based materials with low infrared emissivity [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [33] 张云峰, 张璐, 刘鹏, 等. 纳米 SiO_2 改性石蜡相变微胶囊涂料的制备及性能表征[J]. *涂料工业*, 2021, 51(1): 34-39.

- ZHANG Yunfeng, ZHANG Lu, LIU Peng, et al. Preparation and characterization of nano SiO₂ modified paraffin phase change microcapsule-based coatings[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2021, 51(1): 34-39.
- [34] 陈翔, 庄海燕, 王晶晶, 等. 石墨烯红外低发射率涂料制备及性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2020, 35(1): 32-35.
- CHEN Xiang, ZHUANG Haiyan, WANG Jingjing, et al. Preparation and properties of infrared low emissivity coating of grapheme[J]. *Development and Application of Materials*, 2020, 35(1): 32-35.
- [35] HAN M K, ZHANG D Z, SHUCK C E, et al. Ultralow and selective infrared emission from MXenes[J/OL]. arXiv: 2105.04011. 2021. <https://arxiv.org/abs/2105.04011>.
- [36] ZHANG X, YANG Y Z, XUE P, et al. Three-dimensional electrochromic soft photonic crystals based on MXene-integrated blue phase liquid crystals for bioinspired visible and infrared camouflage[J]. *Angewandte Chemie*, 2022, 134(42): 202211030.
- [37] 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 Guangde, LIU Dongqing, WANG Yi, et al. Research status and progress of the thermal infrared camouflage technology[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(6): 495-503.
- [38] 张帆, 王建营, 杜海燕, 等. 红外隐身涂料研究进展[J]. *化学与粘合*, 2004, 26(2): 87-89, 94.
- ZHANG Fan, WANG Jianying, DU Haiyan, et al. Development of IR camouflage coating research[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2004, 26(2): 87-89, 94.
- [39] 沐磊, 王丽熙, 黄芸, 等. 红外隐身涂料的研究与发展趋势[J]. *材料导报*, 2007, 21(1): 122-125.
- MU Lei, WANG Lixi, HUANG Yun, et al. Research and development tendency of infrared stealthy coatings[J]. *Materials Review*, 2007, 21(1): 122-125.
- [40] 陶睿, 刘朝辉, 班国东, 等. 8~14 μm 波段低发射率涂层材料的制备及性能研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(10): 207-212.
- TAO Rui, LIU Zhaohui, BAN Guodong, et al. Preparation and properties of low-emissivity coatings in 8—14 μm band[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(10): 207-212.
- [41] 吴飞, 王智勇, 江振经. 低发射率涂层材料研究[J]. *宇航材料工艺*, 2011, 41(3): 50-52.
- WU Fei, WANG Zhiyong, JIANG Zhenjing. Paint materials with low emissivity[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2011, 41(3): 50-52.
- [42] 徐聪. 低发射率片状铝粉的制备及红外性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- XU Cong. Preparation and infrared properties of low emissivity flake aluminum powder[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [43] 刁训刚, 郝维昌, 王天民, 等. 低发射率薄膜的红外隐身特性研究[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(5): 39-42.
- DIAO Xungang, HAO Weichang, WANG Tianmin, et al. Infrared stealth properties of low emissivity thin films[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007, 37(5): 39-42.
- [44] 王自荣, 余大斌, 於定华, 等. ITO 涂料在 8~14 μm 波段红外发射率的研究[J]. *红外技术*, 1999, 21(1): 41-44.
- WANG Zirong, YU Dabin, YU Dinghua, et al. Infrared emittance of paints with ITO pigments in 8—14 μm waveband[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(1): 41-44.
- [45] YUAN L, WENG X L, DENG L J. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 56: 25-29.
- [46] QIN R, XU G Y, GUO L, et al. Preparation and characterization of a novel poly(urea-formaldehyde) microcapsules with similar reflectance spectrum to leaves in the UV-Vis-NIR region of 300-2500 nm[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 136(2/3): 737-743.
- [47] CALVERT R, GAGLIARDI J, MCLACHLAN A D. Surface coatings for low emittance in the thermal surveillance band[R]. [S. l.]: Materials Research Labs Ascot Vale, 1984.
- [48] 张梅, 崔占臣, 蔡红莉, 等. 织物用热红外伪装涂料在 8~14 μm 波段红外发射率的研究[J]. *天津工业大学学报*, 2002, 21(2): 33-36.
- ZHANG Mei, CUI Zhanchen, CAI Hongli, et al. Study on infrared emissivity of thermal camouflage coating in 8—14 μm for fabrics[J]. *Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology*, 2002, 21(2): 33-36.
- [49] 王庭慰, 程从亮, 张其土. 8~14 μm 波长低红外发射率涂料的研究[J]. *光学技术*, 2005, 31(4): 598-600.
- WANG Tingwei, CHENG Congliang, ZHANG Qitu. Study on low infrared emissivity of coating in 8—14 μm[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(4): 598-600.

- [50] 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 & Finishing, 2020, 39(16): 1137-1142.
- [51] FU S Q, ZHANG W, WU Y, et al. Bioinspired porous anodic alumina/aluminum flake powder for multi-band compatible low detectability[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(6): 8464-8472.
- [52] WOO H K, ZHOU K, KIM S K, et al. Visibly transparent and infrared reflective coatings for personal thermal management and thermal camouflage[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(38): 2201432.
- [53] 刘默伟, 李航. 红外隐身技术的发展分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(5): 25-27.
LIU Mowei, LI Hang. Development analysis of the infrared stealth technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(5): 25-27.
- [54] 陈娇, 黄啸谷, 王丽熙, 等. 共沉淀法制备 Al/Cr₂O₃ 复合粒子及其性能研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(3): 455-459.
CHEN Jiao, HUANG Xiaogu, WANG Lixi, et al. Preparation by coprecipitation and properties of Al/Cr₂O₃ composite particles[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(3): 455-459.
- [55] 袁乐, 翁小龙, 卢虎, 等. Al/Cr₂O₃ 复合粉体的制备及红外反射特性研究[J]. 无机材料学报, 2013, 28(5): 545-550.
YUAN Le, WENG Xiaolong, LU Hu, et al. Preparation and infrared reflection performance of Al/Cr₂O₃ composite particles[J]. Journal of Inorganic Materials, 2013, 28(5): 545-550.
- [56] YUAN L, WENG X L, DU W F, et al. Optical and magnetic properties of Al/Fe₃O₄ core-shell low infrared emissivity pigments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 583: 492-497.
- [57] Chesonis G, Harris D. Low emissivity camouflage coating[R]. AD-A310642, 1995.
- [58] 张怡青. ITO 粉体制备及其光电性能[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
ZHANG Yiqing. Preparation of ITO powder and its optoelectronic properties[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [59] 王真, 吴玉茵, 卜铁伟. 可见光-激光兼容隐身涂层的制备与性能研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(3): 27-31.
WANG Zhen, WU Yuyin, BU Tiewei. Preparation and properties of visible-laser compatible stealth coatings[J]. Plating and Finishing, 2021, 43(3): 27-31.
- [60] 张钊, 王瑞华, 赵薇, 等. 雷达探测原理及吸波涂料研究近况[J]. 中国涂料, 2020, 35(12): 10-14.
ZHANG Zhao, WANG Ruihua, ZHAO Wei, et al. The radar detection principle and recent research on absorbing coatings[J]. China Coatings, 2020, 35(12): 10-14.
- [61] 吴晴晴, 林伟, 李玉鹏, 等. 多波段、自适应智能伪装技术及材料研究进展[J]. 冶金与材料, 2017, 37(5): 15-17.
WU Qingqing, LIN Wei, LI Yupeng, et al. Research progress of multi-band and adaptive intelligent camouflage technology and materials[J]. Metallurgy and Materials, 2017, 37(5): 15-17.
- [62] 何梓健, 孙锐, 刘晖, 等. 涂料发射率与相变层在伪装中的要求分析[J]. 光电技术应用, 2018, 33(5): 61-68.
HE Zijian, SUN Rui, LIU Hui, et al. Research on camouflage requirement of PCM layer and coating emissivity[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(5): 61-68.
- [63] 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.