

仿植被高光谱伪装材料技术研究进展

祖梅, 鄢峰, 程海峰, 刘东青, 陈晨, 李铭洋

国防科技大学空天科学学院陶瓷纤维及其复合材料重点实验室, 长沙 410073

摘要 近年来高光谱成像技术迅速发展,在军事领域应用十分广泛,这既为军事侦察带来了巨大机遇,也为军事伪装带来了前所未有的挑战。分析了高光谱成像探测技术对伪装隐身技术产生的威胁以及传统高光谱伪装材料与技术面临的巨大困境,分别从植物伪装技术、基于无机颜料的仿生伪装、基于叶绿素的仿生伪装等材料体系阐述了模拟植被背景的高光谱伪装材料与技术研究现状,指出现有高光谱伪装材料与技术仿生伪装技术存在仿生材料无法精准模拟绿色植被的特征吸收峰、稳定性及耐久性较差、材料整体厚度大,难以实现实际的大规模应用等弊端,在此基础上提出基于活体生物的“生态伪装”技术伪装对策,指出改进“仿生伪装”技术和优化“生态伪装”技术为高光谱伪装材料与技术的未来发展方向和趋势。

关键词 仿生伪装;生态伪装;高光谱;伪装材料与技术

近年来高光谱成像技术迅速发展,在军事领域应用十分广泛,具有高分辨率的高光谱设备不断涌现,逐渐成为目标侦察探测与识别的重要手段。高光谱成像探测技术的快速发展,一方面使伪装目标的准确快速识别成为可能,另一方面也对伪装材料的性能提出了更高的要求。为应对高光谱成像技术带来的威胁,必须对现有伪装技术加以改进,尤其要将原有“异谱同色”的光学伪装原则调整为光谱精准模拟,以最大程度地实现伪装目标与背景的融合,提高目标的战场生存概率^[1]。传统绿色伪装

颜料或涂料仅能实现与植被“同色”,但不能实现“同谱”,不能满足先进光学侦察下的隐身要求,因此仿绿色植被光谱特征的光学伪装技术和材料成为伪装领域的研究热点和发展趋势^[2]。本研究在总结现有植物伪装技术、基于无机颜料的仿生伪装以及基于叶绿素的仿生伪装技术3种材料体系的优势及弊端的基础上,提出了基于活体生物的“生态伪装”技术,为研究者进一步研制和开发仿绿色植被伪装材料提供新的方向。

收稿日期:2020-11-11;修回日期:2021-04-21

基金项目:国防科技重点实验室稳定支持科研项目(WDZC20195500505)

作者简介:祖梅,副研究员,研究方向为光电信息功能材料,电子信箱:zumei2003@163.com

引用格式:祖梅,鄢峰,程海峰,等.仿植被高光谱伪装材料技术研究进展[J].科技导报,2021,39(14):100-106;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.14.010

1 高光谱成像探测技术威胁分析

现代战争中,高技术侦察探测手段层出不穷。其中,高光谱成像探测技术将确定地物性质的光谱分析技术与把握其空间和几何关系的成像技术革命性地结合在一起,在军事侦察方面获得了广泛应用。目前,高光谱侦察的典型光谱范围为400~2500 nm,光谱分辨率可达到5~10 nm,因此可精确探测场景中每一个目标的物质组成^[3]。高光谱侦察技术能从复杂背景中提取出伪装隐身目标,分析伪装隐身材料与背景(天然植被或土壤等)光谱的差异,了解这种差异的光谱表现与产生机理,有目的地监测这些特征波段,从而分辨出绿色植被、沙漠背景中经伪装隐身后的真实伪装目标,实现对当前伪装隐身目标的探测和识别,这对地面军事目标构成了严重威胁(图1)^[4]。高光谱成像探测技术具有极强的反伪装、反隐蔽、反欺骗能力,已成为执行战略、战役和战术侦察的基本手段。这既为军事侦察带来了巨大机遇,也为军事伪装带来了前所未有的挑战^[5-6]。

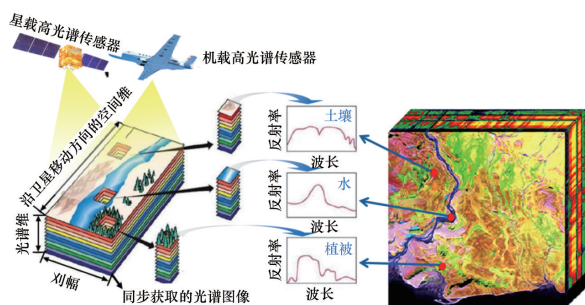


图1 星载/机载高光谱成像探测及其获取的数据立方体示意

自20世纪80年代高光谱成像技术出现后,以美国为首的西方国家在开展高光谱探测系统性能研究的同时,投入了大量的力量,探索其在军事探测中的应用,有计划地开展一系列的测试试验、验证试验、数据采集及算法研究等工作,逐步完善高光谱侦察技术,并形成武器装备^[7-11]。高光谱成像探测技术的发展对地面军事目标的伪装构成了严重威胁,亟需发展全新的伪装技术来对抗飞速发展的高光谱成像探测技术。

2 仿植被高光谱伪装材料技术研究现状

2.1 植物伪装技术

针对高光谱成像探测技术对伪装隐身技术产生的威胁,最古老的军事伪装方式之一是传统的植物伪装,即利用生长的、采集的植物或进行变色处理的植物实施伪装,从而达到隐蔽目标、降低目标显著性和改变目标外形的目的(图2)。利用生长植物进行伪装主要有三大优点:一是有着与背景一致的外貌和特性,当植物具有一定的密度时,能有效地对付光学、热红外和雷达的侦察;二是当采用移植成年树隐蔽目标时,可立即获得伪装效果,且不需特别的维护;三是可以平时与战时结合,军民结合,绿化环境,对较大的目标实施广泛的伪装。但用生长植物进行伪装也存在一定的缺点:一是植物落叶后,伪装效果降低;二是播种和栽培的方法,不能在短期内产生预定的伪装效果;三是植物的播种或栽植,均需要消耗一定的人力与时间;四是采集植物进行伪装目标可以立即获得伪装效果,但采集的植物易干枯,效果不持久,要经常更换,因而仅适用于临时性的伪装;五是植物伪装使用方式有限,无法应用于所有的伪装目标^[12]。



图2 植物伪装技术应用示意

2.2 基于无机颜料的仿生伪装

基于植物伪装技术,研究者又提出了模拟植被背景的人工仿生伪装技术。传统的仿生伪装材料主要通过两种技术途径来模拟绿色植被的颜色。其中一种是通过调配无机颜料来模拟植被颜色。

目前传统伪装中绿色光谱特征模拟大都采用无机颜料铬绿(Cr_2O_3),但铬绿在可见光区域的“绿色反射峰”与绿色植物的叶绿素特征反射峰有25 nm的偏差,且在近红外区域,其反射率呈缓慢上升

趋势,与植物在该波段的陡升存在较大差异,两者在曲线高度上也存在明显差别。因此,目前基于无机颜料的人工伪装技术无法达到“同色同谱”的要求。Ye等^[13-15]采用亲水性高分子聚乙烯醇(PVA)为成膜主体,绿色颜料 Cr_2O_3 和强吸湿剂LiCl为添加剂,采用溶液铸膜法制备出了仿生材料。由于使用了无机颜料 Cr_2O_3 为着色剂,使得仿生材料在可见光区的“绿色反射峰”峰位以及“红边”的起始位置和斜率与植物相比仍有一定的差异(图3)。其中,在400~780 nm可见光波段,仿生材料反射率较低,且433和664 nm处的吸收峰归因于叶绿素对蓝紫光和红光的强吸收,其对492~577 nm波段内的绿光吸收较少,因此在550 nm呈现出绿色反射峰,这是由植物叶片中的多种色素造成的,其中最主要是叶绿素a和叶绿素b;在680~780 nm波段内,由于该波段内叶绿素和水的吸收较小,且在664 nm处的强吸收与近红外区域的高反射形成强烈对比,反射率迅速增大,称为“红边”。夏晨硕等^[16]采用结晶水合物($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)和 Cr_2O_3 作为基本填料,以聚脲作为树脂基体制备出了仿生涂层。李敏等^[17]选用高吸水材料作为水的载体,Liu等^[18]采用高吸水树脂储存水来模拟叶片

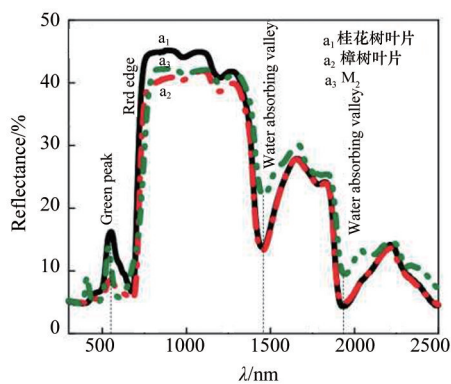


图3 植物叶片与仿生材料的反射率

2.3 基于叶绿素的仿生伪装

要实现绿色植被光谱特征的精准模拟,一个最简单、最有效的方式是直接采用和绿色叶片完全相同的着色“颜料”——叶绿素,因此,人们又提出了另一种仿生伪装材料的技术途径,即通过提取绿

细胞液泡储存水,郭利等^[19]直接以液态水为填料,制备含水的聚氨酯伪装涂层。Yuan等^[20]采用水热法将有机色素阴离子酸性绿(AG)和酸性黄(AY)成功插接到镁铝层状双氢氧化物(LDHs)层间,制备出具有天然绿色植物的可见光和近红外光谱特征的光学材料,将其与成膜树脂复合制备出了仿生涂层。同样地,由于均使用了着色颜料 Cr_2O_3 ,使得仿生涂层光谱曲线中的“绿色反射峰”峰位、“红边”起始位置及斜率等关键特征与绿色植物相比,仍存在一定偏差。Gao等基于纳米多孔材料、 Cr_2O_3 制备的新型仿生伪装材料的反射光谱曲线与绿色植被背景的可见光-近红外波段的光谱匹配度为99.72%,初步实现了与植物叶片的“同色同谱”,但其“绿色反射峰”峰位、“红边”起始位置及斜率等关键特征同样仍存在一定偏差(图3)^[14]。

图4为本研究组制备的高光谱仿生伪装材料与法国冬青叶片的反射光谱对比。基于无机颜料的仿生伪装虽然已能实现“同色”,但其使用的关键颜料并不具备与绿色植被完全“同谱”的能力。这种光谱特征上的显著差异难以对抗高光谱甚至超光谱等新型探测技术的分子识别,从而对军事目标的战场生存造成了严重威胁。

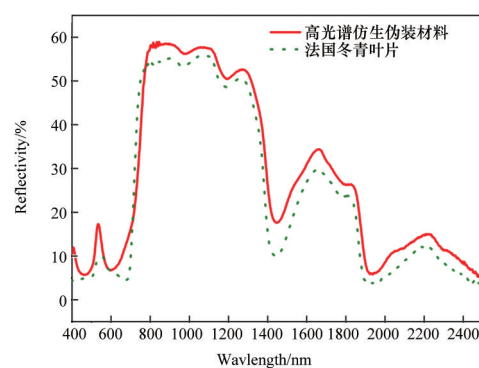


图4 高光谱仿生伪装材料与法国冬青叶片的反射光谱对比

色叶片的叶绿素来模拟绿色植被颜色。刘志明^[21]以叶绿体仿生色素微胶囊为芯材所制备出的仿生材料在长达3个月的室外光照情况下很容易丧失其光谱特征,其稳定性和耐久性难以满足伪装的需求。Yang等^[22]设计的多层仿生伪装材料将叶绿素

封装于PVA薄膜中,其封装的叶绿素同样易发生降解从而造成仿生叶片的反射曲线发生变化。黄之杰等^[23]在绿色涂料中添加了叶绿素,使涂层在可见光区域的反射峰与绿色植被更为接近,但叶绿素离开叶片后,在光照下1 d内就会分解,稳定性差。Qin等^[24]通过封装法研制的一种包覆叶绿素和水的尿素甲醛聚合物微胶囊实现了对植物叶片光谱反射特征的模拟,其采用微胶囊封装的叶绿素同样易发生降解,无法实现精准模拟。这限制了基于叶绿素的仿生伪装在伪装领域中的应用。

综上所述,目前研究者基于叶绿素以及无机颜料所制备出的伪装材料能够模拟绿色植被的光谱反射特征,但均存在一定的局限性。例如,离体叶绿素易受到外界环境因素如光照、酸、碱、热等的影响而发生分解,从而失去其光谱反射特性,时效性较差;而无机颜料 Cr_2O_3 最大的弊端在于其“绿色反射峰”峰位起止位置,“红边”起始位置及斜率存在偏差。

2.4 基于活体生物的“生态伪装”

综观国内外模拟植被背景的高光谱伪装材料的研究、开发和技术改进工作,并无重大创新之处,一直延续着“仿生伪装”的传统研究思路,因而近年来高光谱伪装材料与技术的发展并不令人满意,远远落后于高光谱侦察探测技术的发展速度,且两者差距越来越大。因此,迫切需要一种新型的伪装技术以填补对抗高光谱成像探测技术的空白。本研究组在基于纳米多孔材料的新型仿生伪装的基础上,着力于源头设计,提出了全新的“生态伪装”技术思路,即选用与天然植被具有极其相似的光谱反射特征的活体生物作为着色“颜料”,将有望突破传统“仿生伪装”技术中伪装材料难以与天然背景达到“同色同谱”的技术瓶颈,提高军事设施和装备器材在高光谱探测威胁下的伪装效能及生存能力。通过前期研究,初步制备出了与绿色植被在可见-近红外波段反射光谱高度相似的高光谱“生态伪装”材料(图5)。由图5可见,“生态伪装”材料实现了“绿色反射峰”峰位以及“红边”位置的精准模拟,采用交叉相关光谱匹配(CCSM)算法计算,其与绿色植被背景可见光-近红外波段的光谱匹配度分

别为98.67%,初步实现了与植物叶片的“同色同谱”。

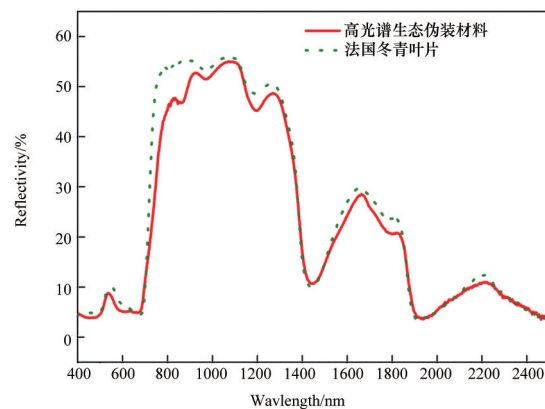


图5 高光谱生态伪装材料与法国冬青叶片的反射光谱对比

与传统的仿生伪装方法相比,“生态伪装”技术主要有三大优点:一是取材简单。生物在进行合成代谢时,大都以随处可见的物质(如空气、水、植物和矿物质等)为原料,以阳光等为能源,不仅原料成本低,而且取之不尽。二是安全可靠。与传统绿色伪装涂料中使用的无机颜料相比,天然生物对环境无污染,对人体健康无毒性,可实现真正意义上的绿色环保。三是拟合程度高。生物含有与高等绿色植物几乎完全相同的天然叶绿素,从而具有与绿色植被精细光谱特征完全相匹配的“同谱”能力。可见,“生态伪装”技术无疑为高光谱伪装开拓了新的研究思路,必将显示出广阔的应用前景。

2.5 基于生物仿生的变色材料

在现代高技术战争中,部队作战往往呈现作战区域广、快速机动、季节变换、背景变化大等特点。面对环境背景多样化、差异化的战场环境,现有单一模拟绿色植被背景的仿生伪装材料不具备自适应伪装能力,传统隐身技术极易失效,难以机动。如何使伪装目标能够更好地适应复杂的背景环境,近年来成为研究者关注的焦点。

国内外研究团队采用仿生方式对生物变色结构进行模仿,并将其应用到隐身伪装领域^[25-27]。Yang等^[28]设计了一款机械人造变色龙,它可以借助皮肤上的金属纳米颗粒进行颜色变换,几乎可变换

可见光谱的所有色调。Wang等^[29-30]正在研发一种“变色龙”坦克,它可以根据外界环境的变化随时变换体表颜色,其表面的薄膜能够随外界环境的颜色变化而改变坦克外观特征,也能够随时调整自身的温度,使敌人很难依据坦克的热辐射来探测其踪迹,以达到隐身的目的。

近年来,国内外正在努力研发热变色服和光变色服。热变色服是由热致变色材料制成的,它能够显著减小侦察设备的发现几率。光变色服是利用光敏变色布料制成的,它可以随外界环境的光色变化而随时改变颜色,从而达到隐身目的。这些“变色术”的研发成功与应用,将对未来战场产生重大影响。光致变色伪装材料具有触发方便的优点,但是可控性差。适用于伪装的无机光致变色材料不多,国内外研究较多的主要是有机光致变色材料,包括螺吡喃、俘精酸酐、偶氮苯类和二芳基乙烯等化合物,研究者也在继续探索和发现新的光致变色体系^[31-32]。美国、日本和俄罗斯等国家在光致变色材料方面开展了比较深入的研究,但其研发的光致变色材料目前存在着热稳定性和耐疲劳性差的缺点。目前,热致变色材料存在颜色变化种类少、变色温度较高和亮度可调控范围窄等缺陷^[33-34]。热致变色材料主要为有机类材料,无机类材料相对较少。常见有机类热致变色材料主要是席夫碱类化合物,该化合物在不同温度区间内有烯醇式和顺酮式2种结构,当温度变化时,这2种结构发生可逆变化,从而导致材料颜色发生变化。此外,根据苯环上取代基的不同,该化合物具有多种衍生物,若温度发生变化,则其衍生物结构和颜色发生转变。因此,通过对材料分子结构进行设计,可以获得不同伪装需求的材料。

3 仿植被高光谱伪装材料技术发展趋势

近年来,高光谱伪装材料与技术有了长足的发展,通过大力开展研究,不仅初步形成了高光谱伪装的理论体系,而且发展了“生态伪装”技术,大大提高了军事伪装的效能。仿植被高光谱伪装材料

与技术未来发展趋势如下。

1) 改进仿生伪装技术。国内外传统的伪装材料所用的无机或有机颜料与绿色植被中的生物色素完全不同,极易被高光谱探测识别。因此,想要提高目标的伪装性能,必须解决现有传统仿生伪装技术的短板。例如,可通过颜料复合、掺杂或添加类叶绿素光谱填料(如酞菁类化合物)以实现“绿色反射峰”“红边”等重要光谱特征的精准模拟。

此外,绿色植被的反射特征与其含水量密切相关,而现有伪装材料由于不含水或含水量非常低,难以实现对植被背景“水分特征吸收峰”的精准模拟。因此,仿生伪装材料的设计和制备必须重点研究其吸湿保水机制,使其具备类似植物的水分保持效果,从而呈现出与植被背景基本一致的光谱反射特征,实现对高光谱探测的有效对抗。

2) 优化“生态伪装”技术。在高光谱伪装的技术层面,基于活体生物的“生态伪装”技术面临的巨大挑战是如何设计出合理的材料体系实现高光谱伪装材料的伪装功能。首先,活体生物对材料的高光谱伪装功能起着决定性作用。活体生物一旦脱离天然的生存环境,其生物活性必将有所降低。因此,如何设计并制备出一种适宜活体生物长时生存的“人工土壤”,从而延长活体生物的生命周期,是实现高光谱伪装效果要解决的首要问题。其次,如何将活体生物与其他各类人工材料有机结合,以实现材料的高光谱伪装性能也是“生态伪装”技术要解决的又一关键问题。

在高光谱伪装的应用层面,“生态伪装”材料不仅要满足高光谱伪装的性能需求,还需兼顾在服役工况下的综合使用性能,满足一定的使用性能指标。现阶段主要体现在:如何在保证活体生物及材料保水率的基础之上,提高材料的易用性及在实际服役环境下的可靠性,以研制出高光谱伪装性能和综合使用性能兼优的“生态伪装”材料体系。

参考文献(References)

- [1] 马丽芳, 时家明, 陈宗胜. 绿色伪装涂料可见光和近红外反射率的探讨[J]. 红外技术, 2010, 32(5): 268-272.

- [2] 杨玉杰, 刘志明, 胡碧茹. 基于光谱分析的植物叶片仿生伪装材料设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1668-1672.
- [3] 刘凯龙. 地面目标伪装特征的高光谱成像检测方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 166-169.
- [4] Shaw G, Manolakis D. Signal processing for hyperspectral image exploitation[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(1): 12-16.
- [5] 马玲, 崔德琪, 王瑞, 等. 成像光谱技术的研究与发展[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊1): 573-580.
- [6] 张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 高光谱遥感的发展及其对军事装备的威胁[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 10-12.
- [7] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(5): 431-433.
- [8] Li X P, Chen J P, Wang X. Inversion of lunar nearside FeO and Al₂O₃ based on Chang'e-1 reflectance data[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(7): 150-156.
- [9] Bergman S M. The utility of hyperspectral data to detect and discriminate actual and decoy target vehicles[R]. Washington DC: Directorate for Information Operations and Reports, 1996.
- [10] Búrta V, Racek F, Krejčí J. NATO hyperspectral measurement of natural background[J]. The International Society for Optical Engineering, 2018, 10794: 1-16.
- [11] Stellman C M, Hazel G G, Schuler J M, et al. Spectral calibration, spatial mapping and flat fielding studies of the dark horse 1(DH1) march data collection[R]. Washington DC: Naval Research Laboratory, 1999.
- [12] 刑欣等. 隐身伪装技术基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2011.
- [13] Ye H, Gao Y, Li S M, Guo L. Bionic leaves imitating the transpiration and solar spectrum reflection characteristics of natural leaves[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(1): 109-116.
- [14] Gao Y, Ye H. Bionic membrane simulating solar spectrum reflection characteristics of natural leaf[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 115-124.
- [15] Xu K, Ye H. Preparation and optimization of biomimetic materials simulating solar spectrum reflection characteristics of natural leaves[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55: 12848-12863.
- [16] 夏晨硕, 陈乐, 孙惠敏, 等. 一种新型高光谱涂层的设计与研制[J]. 功能材料, 2018, 49(7): 7151-7155.
- [17] 李敏, 李澄, 郑顺丽, 等. 模拟绿色植物光谱的填料设计与涂层制备研究[J]. 红外技术, 2015(9): 788-792.
- [18] Liu Z, Wu W, Hu B. Design of biomimetic camouflage materials based on angiosperm leaf organs[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(11): 1902-1910.
- [19] 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(10): 588-592.
- [20] 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.
- [21] 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: 9.
- [22] 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(3): S43-S49.
- [23] 黄之杰, 费逸伟, 黄之宁. 叶绿素在绿色伪装涂料中的应用研究[J]. 特种功能材料, 2006, 9(4): 13-17.
- [24] 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): 737-743.
- [25] Wang Z Y, Wang C D, Hou H B, et al. A facile fabrication of stimulus-responsive amorphous photonic crystals in the near-infrared region[J]. Applied Surface Science, 2019, 479: 1014-1020.
- [26] Rossiter J, Yap B, Conn A. Biomimetic chromatophores for camouflage and soft active surfaces[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(3): 036009.
- [27] Wang X, Deng Y Q, Yang D, et al. Biomimetic inorganic camouflage circumvents antibody-dependent enhancement of infection[J]. Chemical Science, 2017, 8(12): 8240-8246.
- [28] Yang Y, Lin L, Cai Z H, et al. Plasmonic nanoparticles tuned thermal sensitive photonic polymer for biomimetic chameleon[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31328.
- [29] Wang G P, Chen X C, Liu S, et al. Mechanical chameleon through dynamic real-time plasmonic tuning[J]. ACS Nano, 2016, 10(2): 1788.
- [30] Long P, Iv W G W, Ordinario D D, et al. Camouflage coatings: Reconfigurable infrared camouflage coatings from a cephalopod protein[J]. Advanced Materials, 2013,

- 25(39): 5621.
- [31] 徐栋, 陈宏书, 王结良. 变色材料的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(3): 87-91.
- [32] 鲍利红, 曹苏毅, 赵曼雨, 等. 双羟基螺吡喃的合成及其光致变色性能研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(5): 137-143.
- [33] 张凤, 管萍, 胡小玲. 有机可逆热致变色材料的变色机理及应用进展[J]. 材料导报, 2012, 26(9): 76-80.
- [34] 张澍声. 可逆热致变色材料[J]. 染料工业, 2002, 39(6): 16-18.

Research status and development trend of imitated vegetation hyperspectral camouflage material technology

ZU Mei, YAN Feng, CHENG Haifeng, LIU Dongqing, CHEN Chen, LI Mingyang

Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory, College of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract In recent years, the hyperspectral imaging technology sees a rapid development and is widely applied in the military field, with great opportunities for military reconnaissance and unprecedented challenges for military camouflage. This paper analyzes a specular like detection technology for disguising the threat of the stealth technology and the difficulties in the traditional hyperspectral camouflage materials and technology. The researches of the hyperspectral camouflage materials and technologies for simulating the vegetation background are reviewed, focusing on four material systems: The plant camouflage technology, the biomimetic camouflage based on inorganic pigments, the biomimetic camouflage based on the chlorophyll and the "ecological camouflage" based on living organisms. The shortcomings of the existing hyperspectral camouflage materials and techniques in the biomimetic camouflage technology are analyzed. It is shown that the bionic materials cannot accurately simulate the characteristic absorption peak of the green vegetation, the stability and the durability of the biomimetic materials are poor, and the overall thickness of the materials is large, which is difficult to realize in the practical large-scale application. On this basis, a camouflage strategy is put forward to use the "ecological camouflage" based on living organisms. It is proposed that the future development direction and the trend of the hyperspectral camouflage materials and technology are to improve the "bionic camouflage" technology and optimize the "ecological camouflage" technology.

Keywords bionic camouflage; ecological camouflage; hyperspectral; camouflage materials and techniques ●



(责任编辑 王志敏)