

植被仿生材料的反射光谱调控研究现状与发展趋势

袁旦¹, 张典典², 黄豆豆², 周文^{*2}

(1. 江苏联合职业技术学院 无锡机电分院, 江苏 无锡 214028; 2. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:综述了高光谱伪装用植被仿生材料的反射光谱调控研究现状, 简述植被反射光谱的典型特征与形成机制, 归纳仿生材料光谱模拟性能的主要评价方法, 重点分析高光谱伪装用植被仿生材料的结构设计原理与制备策略, 探讨现有研究面临的瓶颈与挑战。分析表明, 未来需通过构建图谱一体的综合评价体系, 提升材料耐用性与便携性, 并积极发展环境自适应光谱伪装材料; 应结合贸易风险管理措施推动技术成果转化, 加快该类材料从实验室向迷彩服、伪装网等实际应用的转化, 为对抗高光谱探测的植被型伪装技术发展提供参考。

关键词: 仿生材料; 植被; 反射光谱调控; 高光谱探测; 迷彩服

中图分类号: TB 34; TN 972.43 文献标志码: A 文章编号: 2096 - 1928(2026)01 - 0011 - 10

Research Status and Development Trends of Reflection Spectrum Control in Vegetation-Inspired Biomimetic Materials

YUAN Dan¹, ZHANG Diandian², HUANG Doudou², ZHOU Wen^{*2}

(1. Wuxi Electromechanical Branch, Jiangsu Union Technical Institute, Wuxi 214028, China; 2. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This paper reviewed the research status of reflection spectrum control in vegetation-inspired biomimetic materials for hyperspectral camouflage, briefly described the typical characteristics and formation mechanisms of vegetation reflection spectra, summarized the main evaluation methods for spectral simulation performance, focused on analyzing the structural design principles and preparation strategies of vegetation-inspired biomimetic materials for hyperspectral camouflage, and discussed the bottlenecks and challenges faced by existing research. The analysis indicates that in the future, it is necessary to construct a spectrum-pattern integrated comprehensive evaluation system, enhance material durability and portability, and actively develop environmentally adaptive spectrum-changeable camouflage materials. Meanwhile, trade risk management measures should be combined to promote the transformation of technological achievements, accelerate the conversion of such materials from laboratory to practical applications such as camouflage uniforms and camouflage nets, and provide references for the development of vegetation-type camouflage technology for anti-hyperspectral detection.

Key words: biomimetic materials, vegetation, reflection spectrum control, hyperspectral detection, camouflage uniforms

收稿日期: 2026 - 01 - 19; 修订日期: 2026 - 01 - 30。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52403039)。

作者简介: 袁旦(1980—), 女, 副教授, 硕士。

* 通信作者: 周文(1992—), 男, 助理研究员, 硕士生导师。主要研究方向为功能性防护纺织材料的设计、制备及应用。

Email: wenzhou@jiangnan.edu.cn

隐身伪装技术是指通过改变己方目标的可探测信息特征,降低其与背景环境之间的信号差异,从而提升重要目标(如士兵、装备或指挥哨所)生存和作战能力的技术^[1-2]。近年来,高光谱探测侦察技术持续发展,对常规迷彩服装等伪装手段构成挑战。该技术可在可见光(400~780 nm)至近红外(780~2 500 nm)波段内,以5~20 nm的光谱分辨率进行扫描成像,通过将不同波段获取的多幅二维空间图像沿光谱维度叠加组合,形成包含二维空间信息与一维光谱信息的三维数据立方体,从而识别目标与背景之间的细微差异^[3-4]。迷彩伪装需与环境背景融为一体,包括以绿色植被为主的林地、黄棕色的沙漠、灰褐色的山地岩石等^[5]。由于植被在全球分布范围广、作战场景覆盖率高,因此成为迷彩伪装研究的重点方向。需要指出的是,即使是绿色植被,其颜色及光谱特征也会随地域(空间)和季节(时间)的不同而产生显著差异,表现为深绿、浅绿、墨绿、黄绿等多种色调。然而,传统印染技术生产的绿色伪装材料(如迷彩服面料)仅能在可见光波段实现与背景的颜色融合(即“同色”),在近红外波段则无法准确模拟植被反射光谱中的红边、水峰等特征(即“异谱”)。这种“同色异谱”现象,导致现有伪装材料难以有效应对高光谱探测和侦察^[6-7]。植被仿生材料通过模仿叶片中的叶绿素等成分以及栅栏组织等结构特征,能够在可见光至近红外波段精确复现植被的反射光谱特性。该类仿生技术因能有效应对林地环境中的高光谱侦察威胁,应用前景广阔。

不同植物叶片的形貌和尺寸差异较大,但在可见光至近红外波段均具有绿峰、红边、近红外高原、水分吸收谷等典型的反射光谱特征^[8-9]。Liu Z M等^[10]较早研发了能模拟梧桐叶片反射光谱的仿生材料。此后可模拟植被反射光谱特征的仿生材料成为隐身伪装领域的新兴研究热点,并取得了一系列重要研究进展^[11-15]。然而,目前尚无文献对该类材料的设计原则、制备方法、性能评价体系、实际性能水平及其在服装领域的应用进行系统梳理。因此,文中聚焦于可模拟植被反射光谱特征的仿生材料,概述天然植物叶片的反射光谱特征及其形成机制,介绍该类材料的性能评价方法,系统归纳模拟植被反射光谱特征的伪装材料在设计策略与制备技术方面的最新发展,探讨该领域目前面临的问题与未来发展趋势,以期为高光谱伪装技术及迷彩服的升级换代提供参考。

1 植被反射光谱特征

植被是国内外军事行动中较常见的作战环境要素,因此,探究能够有效模拟其反射光谱特征的仿生材料,已成为当前高光谱伪装领域的重要研究方向^[14]。不同植物叶片虽然形貌各异,但由于具有相似的微观结构与成分组成,其在400~2 500 nm的可见光至近红外波段内呈现出相近的反射光谱特征(见图1^[13]),这种共同的反射光谱特征主要源于叶片内部因折射率不连续而产生的散射现象(细胞壁、水、空气的折射率分别为1.4,1.3,1.0)。图1(c)为植物叶片(以白橡木为例)在可见光至近红外波段的反射光谱曲线^[16],可以看出该叶片的绿峰、红边、近红外高原、水分吸收谷等特征。绿色植被反射光谱特征参数见表1^[8]。由表1可见,绿峰为545~555 nm的弱反射峰,源于叶绿素对红光(664 nm)和蓝紫光(433 nm)的强吸收,以及对绿光(492~577 nm)的弱吸收;红边为670~788 nm波段反射率快速上升的陡坡,其形成主要源于664 nm处与近红外区域之间的巨大反射率差异,由于该区间内的反射率范围太大(约为5.0%~40.0%),对相关研究的参考价值较低,因此研究者更关注该段线条的斜率,通常以720 nm处的斜率(一般>4.5)来量化,而叶绿素含量的变化会影响红边形态,甚至导致该特征消失;近红外高原为780~1 312 nm出现的高反射率平台(反射率为41.1%~60.5%),这主要与叶片内部疏松多孔的叶肉和海绵组织有关:大量空气与细胞壁的界面导致入射光发生多次散射,从而产生较高的反射率;水峰为1 445~1 455 nm(反射率为5.2%~30.0%)和1 925~1 935 nm(反射率为3.6%~9.1%)的强吸收谷,也称水分吸收谷、水吸收带、水分吸收带等,其形成与植物叶片高含水量及羟基倍频吸收、组合频吸收有关。

综上可知,不同植被的反射光谱曲线均呈现出绿峰、红边、近红外高原、水峰等共性特征。然而,受地域与季节影响,其光谱细节也存在差异,如不同地域的植物冠层颜色各异(南方以绿色为主,北方常呈棕褐色);即便同为绿色,在季节上(不同生长阶段)也可细分为春季的嫩绿、夏季的深绿等。因此,仿生材料的研发不仅应着力于模拟绿色植被的共性光谱特征,也需关注不同种类植被在反射光谱上的细微差异,从而更精准地融入特定的植被环境背景之中。

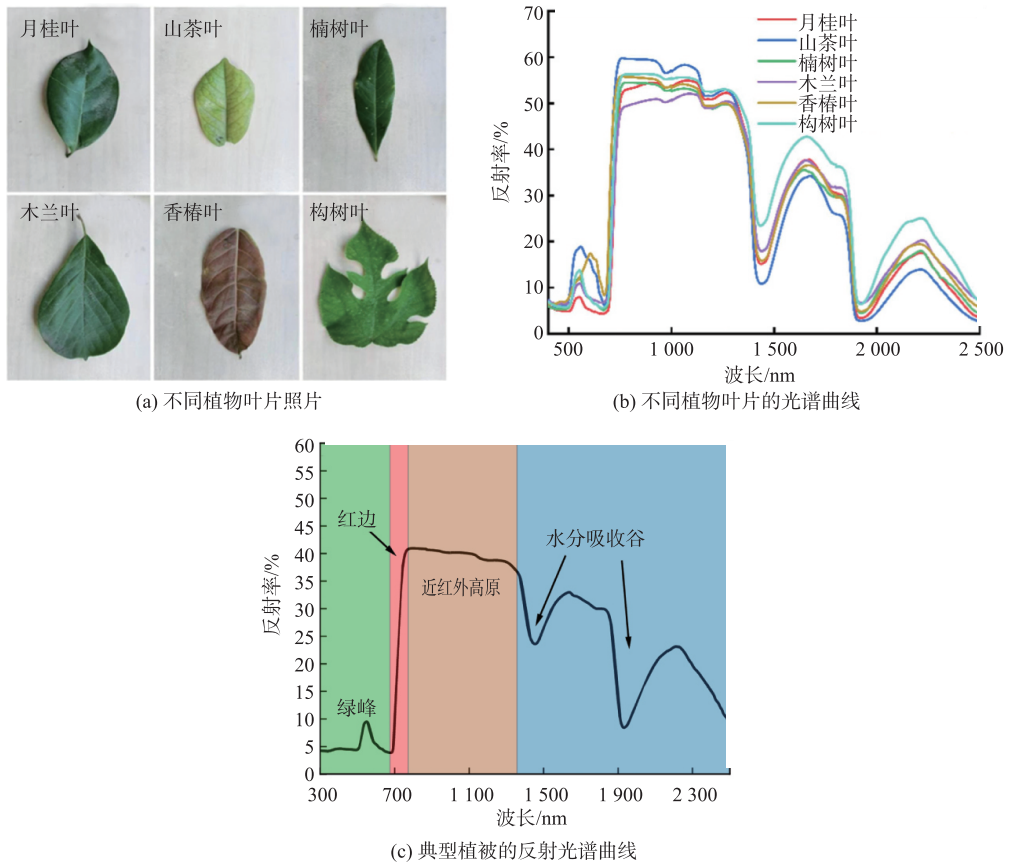


图 1 不同植物叶片的照片与反射光谱特征

Fig. 1 Photographs and reflectance spectral features of leaves from different plants

表 1 绿色植被反射光谱特征

Tab. 1 Reflectance spectral characteristics of green vegetation

反射光谱特征	波长 /nm	反射率 /%
绿峰	545 ~ 555	7.5 ~ 19.7
红边	670 ~ 788	
近红外高原	788 ~ 1 312	41.4 ~ 60.5
	1 445 ~ 1 455	5.2 ~ 30.0
水峰	1 925 ~ 1 935	3.6 ~ 9.1

2 植被仿生材料的反射光谱模拟性能评价

传统印染迷彩面料通常以色差来评估性能,而忽略了对面料与植被反射光谱相似性的系统评价。对于高光谱伪装的植被仿生材料,要评价其在可见光至近红外波段的伪装效果,需以天然植被反射光谱或相关标准规定的植被反射光谱曲线为参照数据,通过对比分析仿生材料与参照物(如天然植物叶片等)两者光谱特征的差异来定性或定量判断其

匹配程度^[17-18]。目前,常通过计算光谱相关系数、光谱角度、光谱角余弦值、光谱距离及光谱通道等指标,来评价其光谱匹配性能。

光谱相关系数(r_m) 又称皮尔逊相关系数,主要用于评价反射光谱曲线形状的相似程度,计算公式为

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}} \quad (1)$$

式中: p_i 和 q_i 分别为仿生材料和参照物在第 i 个波长点处的光谱反射率; \bar{p} 、 \bar{q} 分别为仿生材料和参照物光谱数据的平均反射率; n 为所采集光谱数据中的波长点总数。例如,若光谱仪每隔10 nm记录一个数据点,则在400~2 500 nm范围内共采集了211个数据点($n = 211$),且 $i = 1$ 对应起始波长为400 nm, $i = n$ 对应终止波长为2 500 nm。 r_m 的取值范围为-1~1,其绝对值越大,则仿生材料与植物叶片的光谱相似程度越高。

光谱角度(θ)是描述仿生材料与植被反射光谱曲线形状相似程度的指标,其计算公式为

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n p_i q_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2}} \quad (2)$$

光谱角余弦值 ($\cos\theta$) 又称光谱角度匹配或光谱相似角余弦值,是用于评价两条光谱曲线几何相似度的指标。其计算方法是将各波段的光谱数据视为多维空间中的向量,并计算仿生材料光谱向量与参照物光谱向量之间夹角的余弦值,具体公式为

$$\cos\theta = \frac{\sum_{i=1}^n p_i q_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2}} \quad (3)$$

上述光谱相关系数、光谱角度、光谱角余弦值 3 个指标均通过量化伪装材料与背景植被反射光谱曲线的波形相似度来进行评价。因其关注的是光谱形状而非绝对强度,故评价结果不受太阳入射角或光照强度变化的影响。

光谱距离 (d) 又称欧式距离,用于描述两条反射光谱曲线之间的整体差异程度,其数值越小,说明两条光谱曲线的相似性越高,具体计算公式为

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (4)$$

光谱通道 (f) 通过统计材料光谱值处于参考植被光谱区间内的波段比例,综合评估二者在光谱形状与数值上的差异,其计算公式为

$$f = \frac{\Delta x}{2\,500 - 400} \quad (5)$$

式中: Δx 为处于光谱通道内的波段范围。 f 值越大,则材料的光谱模拟效果越好。目前常用的光谱通道参考数据主要来自国内外相关标准以及相关研究团队所采集的天然叶片光谱数据^[18-19]。

单一光谱维度评价存在片面性,因此相关学者还开发了综合评价方法。例如,马世欣等^[20]利用每个像素与周围背景的差异性指标分割潜在目标区域,提出描述光谱差异性的显著性指标,开发了一种将探测和感知相融合的光谱伪装性能评价方法。Guo T 等^[15]采用绝对关联度、欧式距离、灰度共生矩阵,分别量化分析伪装材料和自然植被的光谱曲线形状相似度、光谱欧式距离、纹理欧式距离 3 类特征,从光谱信息和空间纹理信息两方面综合评价高光谱伪装材料的伪装效果。为进一步实现高光谱伪装评价的多特征约束,He Z X 等^[21]提出了基于灰度聚类和多特征描述的策略,并结合光谱距离特征、光谱微分技术、光谱曲线形状、空间纹理特征,构建了一种针对高光谱伪装图像光谱/纹理信息的综合

评价方法,实现了更准确、客观的高光谱伪装性能评估。

3 高光谱伪装用植被仿生材料的设计与制备

为准确模拟天然植被 400~2 500 nm 全波段反射光谱的特征,研究人员通过材料结构与组分设计,开发了多种植被仿生材料。

3.1 高光谱伪装用植被仿生材料的结构设计

高光谱伪装用植被仿生材料按结构可分为多层结构和单层结构。多层高光谱伪装材料一方面通过引入泡沫等多孔基体模拟叶片的多孔叶肉组织,从而在反射光谱曲线中产生类似于植物叶片的近红外高原特征;另一方面利用多层光学薄膜(也称光子晶体薄膜)的干涉原理,实现光谱精准调控的无机膜结构。单层高光谱伪装材料一般采用均质无孔高分子聚合物为基体制备单层伪装薄膜,通过在聚合物溶液中原位掺杂氧化铬或介孔氧化硅等功能性填料,来模拟植物叶片的近红外高原特征。

刘志明等^[22]以透光高分子薄膜模拟表皮,以发泡聚氨酯模拟叶肉,以叶绿素衍生物微胶囊模拟叶绿体,以高吸水性树脂颗粒模拟液泡,开发出仿植物叶类器官的多层伪装材料(见图 2)。该材料解决了传统印染面料中绿峰模拟准确性差的问题,其与梧桐叶片的光谱角余弦值高达 0.969。然而,叶绿素基着色剂的光稳定性较差,且多孔泡沫中的水分易蒸发。针对该问题,杨玉杰等^[23]以木浆纸片为疏松多孔层,利用聚偏二氟乙烯高阻隔包装袋封装液态水,并利用聚乙烯醇高阻隔材料封装叶绿素,进而在聚乙烯醇表层包覆聚氯乙烯膜。该材料与植物叶片的光谱角余弦值达 0.998,且在室外暴露 3 个月后仍保持稳定的光谱性能。

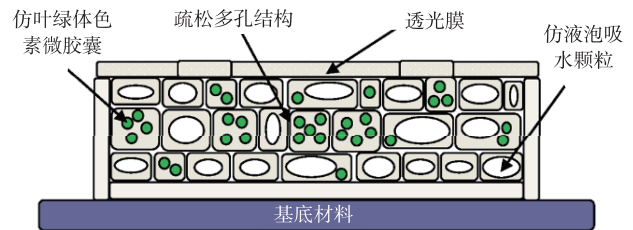


图 2 基于泡沫的植物仿生高光谱伪装材料结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the structures of biomimetic materials for hyperspectral camouflage based on polyurethane foams

与泡沫和纸张相比,纤维纺织品具有较好的力学强度与柔韧性,且技术可扩展性强,在迷彩服、伪装网等装备上的应用潜力巨大,因而受到研究者的

关注。Lu Q X 等^[24]在黏胶织物上印制分散染料(如分散橙 30 和分散黄 114 等),通过染料复配并结合二氧化钛的散射作用,制备了可模拟植被反射光谱的仿生织物,其在可见光波段与天然植物叶片的光谱相关系数 > 0.950 ,拉伸强度 > 7.7 MPa。后续该团队在织物表面构筑了海藻酸钙水凝胶(见图 3^[25]),并结合氯化钙的吸湿作用,赋予水凝胶复合织物水峰模拟能力,其与绿色叶片的光谱相关系数提升至 0.987。此外,光学多层薄膜作为在光电子领

域广泛应用的光学介质,由于其较强的结构可调谐性和设计灵活度,在高光谱伪装领域具有潜在应用价值。邢英鑫^[26]利用特征矩阵法和数值模拟法对光学多层膜结构进行优化设计,并采用蒸镀法制备了以二氧化硅为衬底的锆/氟化镁多层无机光学膜,其总厚度为 2 125.7 nm,在 400~2 500 nm 范围内均能匹配光谱通道,与植物叶片的光谱角度 < 0.12 rad,光谱距离为 1.85,但存在结构和制备工艺复杂、物理强度与韧性较差、难以大面积制备等问题。

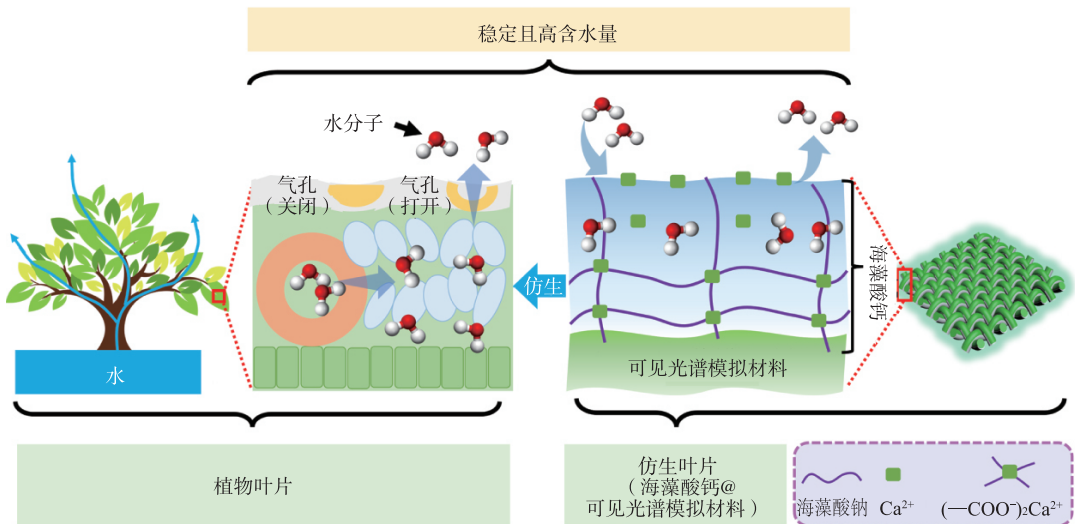


图3 基于织物的高光谱伪装用仿生材料结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structures of biomimetic materials for hyperspectral camouflage based on textiles

单层高光谱伪装用仿生材料具有结构简单、制备工艺可控性强、适用范围广等优点^[27]。该类材料利用氧化铬、聚乙烯醇等功能性填料模拟绿色植被的反射光谱特征(见图 4^[28])。Ye H 等^[29]通过溶液浇筑法开发了单层无孔伪装薄膜材料,其采用聚乙烯醇和氯化锂模拟水峰,通过掺杂氧化铬粉末模拟绿峰、红边、近红外高原特征,构建了能够模拟绿色植被光谱特征和蒸腾效应的单层无孔聚乙烯醇膜。其团队还研究了氧化铬含量、颗粒尺寸及金属基板对聚合物薄膜光谱模拟性能的影响规律,并进一步利用十八烷基三氯硅烷对涂层进行疏水改性,提高了薄膜的耐候性^[30]。由于二氧化钛在 400~2 500 nm 波段内没有明显的杂峰,因此 Xu K 等^[16]在聚乙烯醇溶液中掺杂二氧化钛与叶绿素,开发了仿生涂层材料,该材料在 550 nm 处呈现明显反射峰,在 690 nm 处产生红边起点,实现了对绿峰、红边、近红外高原的模拟。此外,Lü X J 等^[13]合成了白色介孔二氧化硅颗粒,通过调节水热合成过程中三甲基苯和嵌段共聚物的浓度来调控二氧化硅的形貌与尺寸,并利用二氧化硅颗粒对入射光的强散射作用,在 900~1 300 nm 波段产生了近红外高原特征。

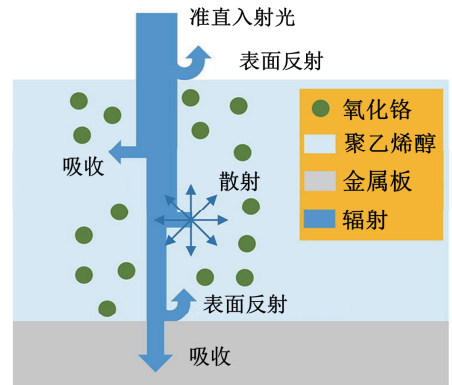


图4 基于单层涂层膜的高光谱伪装用仿生材料结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structures of biomimetic materials for hyperspectral camouflage based on single-layer coating films

3.2 可见光波段模拟植被光谱特征的仿生材料制备技术

植被在可见光波段的反射光谱特征主要包括绿峰和红边,常用叶绿素及其衍生物、氧化铬、酞菁锌、有机染料等着色剂进行模拟^[31]。

Liu Z M 等^[10]将油性叶绿素封装在多孔聚氨酯泡沫中,模拟叶绿体光谱特征,但空气中的氧气会加快叶绿素的光降解,导致其光谱稳定性较差。为此,Yang Y J 等^[32-33]利用聚乙烯醇密封叶绿素,将叶绿素与空气相隔离,有效抑制了叶绿素光的降解,该材料经阳光直射 3 个月后,其绿峰波长与反射率基本保持不变。Qin R 等^[34]采用微乳液原位聚合法,以叶绿素为芯材制备了聚脲醛微胶囊,该微胶囊与植物叶片的光谱角余弦值达 0.972,但叶绿素成本较高,且耐热性较差。

氧化铬是一种无机着色剂,其耐温性和化学稳定性优异,且成本低廉,因此可作为叶绿素的有效替代品。Ye H 等^[29]将氧化铬颗粒加入聚合物涂层溶液中,成功模拟了植被的绿峰和红边特征。该团队进一步通过四光流模型调控聚乙烯醇膜中氧化铬的含量以及材料光谱特征,发现当氧化铬质量分数为 1.61% 时,所得材料的反射光谱可满足美国相关标准的光谱通道要求^[30]。Gao Y 等^[27]研究表明,当氧化铬涂层厚度为 0.2 mm,且氧化铬在涂层中的体积分数为 0.8% 时,可遮盖底部不锈钢基材的反射光谱特征,实现对金属材质的有效隐身。

酞菁是具有与卟啉类似结构的大共轭体系化合物,与叶绿素的反射光谱特征相似。针对常规着色剂难以精准模拟叶片红边特征的问题,Xie D J 等^[11]以酞菁锌为芯材,合成了微胶囊着色剂,该微胶囊在非质子极性环境中能有效稳定酞菁锌化合物,模拟叶绿素的选择性吸收特性;其透明聚合物壳层可提供界面内反射,并通过调控聚乙烯亚胺浓度优化胶囊的屏障性能。该团队还基于微胶囊着色剂构建了以酞菁锌微胶囊为顶层、颜料橙 20 为底层的双层涂层,并通过优化酞菁锌质量浓度(20~200 mg/L)精准调控了红边位置。该涂层在 400~1 000 nm 波段与天然叶片的光谱相关系数达 0.996。

除了单一成分的着色剂外,还可利用配色技术,开发含有不同染料和颜料的配方,以模拟植物叶片在可见光区域的反射光谱特征。Hu A R 等^[9]将还原黄 1 和还原黑 27 两种还原染料进行复配,并加入聚氨酯发泡剂,制备了仿生泡沫材料;引入纤维素酮钠盐后,该材料与天然叶片的光谱相关系数高达 0.984。在实际应用中,伪装材料的色牢度至关重要,为提高材料的色牢度与耐用性能,Lu Q X 等^[24]通过印刷方法,使用黏合剂将分散染料(如分散橙 30、分散黄 114、分散蓝 291)和氧化钛黏附于黏胶纤维表面,并结合染料复配策略,制备了墨绿、浅绿等

不同颜色的伪装织物,所得织物与绿色植物叶片的光谱相关系数均高于 0.950。此外,层状双金属氢氧化物(又称水滑石)因其独特的夹层结构、较强的金属离子可调性及丰富的结晶水而受到广泛关注。Yuan L 等^[35]通过水热法与阴离子交换技术相结合,将酸性绿、酸性黄等染料插层至镁铝水滑石中,并精细调控其浓度与比例,制备了绿色镁铝水滑石,其在 400~800 nm 波段与绿色植被的光谱相关系数达 0.990。为提升该类水滑石材料的耐水性及红外伪装兼容能力,Xiao Y 等^[36]采用十六烷基三甲氧基硅烷对有机颜料进行改性,并将改性后的颜料插层至镁铝水滑石中,再与银纳米线复合,构建了高光谱与热红外兼容的伪装涂层。该涂层与绿色叶片的光谱角余弦值高达 0.953,热红外发射率降至 0.786;但银纳米线的引入会削弱近红外区水吸收峰的程度。除上述有机染料外,还可利用铁红、铬黄、铬绿、钴蓝等无机颜料合成仿生绿色墨水^[37]。Xiao F F 等^[14]采用丝网印刷法将无机颜料墨水(含铁红 4.39%、铬黄 40.53%、铬绿 10.00%、钴蓝 45.08%)印制于织物表面,该材料的光谱曲线处于绿叶光谱通道内。

3.3 近红外波段模拟植被光谱特征的仿生材料制备技术

水峰和近红外高原是绿色植物在近红外区域的主要反射光谱特征。近红外高原模拟可通过多孔基质或功能填料来实现,而水峰模拟通常采用液态水封装隔离、引入吸湿保水性材料(如吸湿性无机盐、水凝胶、无机矿物)等方法。

刘志明等^[22]在聚氨酯泡沫材料中掺入了高吸水树脂颗粒,以模拟植物叶片细胞的液泡,所得仿生材料与梧桐叶片的光谱角余弦值大于 0.969,但水分易挥发。为此,杨玉杰等^[23]采用聚偏二氯乙烯包装袋对液态水进行封装,提升了保水性与水峰稳定性,且室外日光暴露 3 个月后性能仍稳定。Qin R 等^[34]采用微乳液原位聚合法,以脲醛树脂为壁材封装叶绿素与水,所制得的绿色脲醛微胶囊与植物叶片的光谱角余弦值为 0.972,但叶绿素光稳定性较差。Zhuang S X 等^[38]采用反相乳液聚合法制备了封装液态水的聚氨酯微胶囊,并将其与氧化铬绿、环氧树脂复合,制得仿生涂层材料。该材料与叶片之间的光谱角余弦值达 0.978,但微胶囊壁材的机械强度较低。安镜澄等^[39]采用原位界面聚合工艺制备聚脲壁材包覆的山梨醇水溶液微胶囊,其水分含量达 80%,所得伪装涂层与冬青卫矛的光谱相关系数为 0.930,且该涂层的面密度仅 213.9 g/m²。上述研

究均通过封装水策略实现了近红外区域反射光谱模拟,但普遍存在水分逐渐流失、无法从外界环境中自主吸收水分进行补充的问题。

吸湿性聚合物或无机盐通过吸收外界水分,可使其反射光谱曲线呈现类似于植物叶片的水分吸收谷。Ye H 等^[29]以聚乙烯醇为基体,添加氯化锂和铬绿制备仿生膜,并通过苹果酸酯化交联反应在聚乙烯醇膜中构建三维交联网络,从而提高耐水稳定性。Xu K 等^[28]通过氯硅烷水解缩合反应,在聚乙烯醇仿生涂层膜表面构建了十八烷基疏水层,进一步增强了聚乙烯醇伪装材料在多雨环境中的耐久性能。Li Z R 等^[40]以氟碳树脂为基体,引入氧化铬、叶绿素铜微胶囊与氯化锂制备仿生涂料,该材料与不同叶片的光谱角余弦值均大于 0.950,且在恒温恒

湿环境中暴露 720 h 后,水分相关光谱特征的变化率低于 3%。Lu Q X 等^[25]通过海藻酸钙与氯化钙交联制备海藻酸钙水凝胶,并将其与可见光伪装织物复合,制得海藻酸钙复合仿生织物,该材料在户外放置 6 d 后仍能保持稳定的水峰,可直接用于迷彩服、伪装网,但其缺乏抗污表层。Jiang P L 等^[19]设计了一种具备超滑注液表层的吸水凝胶填充型三维间隔织物仿生材料(见图 5),在硅油浓度梯度的驱动下,该材料内部的油相持续向表层分泌,使其超滑表面具备自修复特性;所得仿生材料在 400~2 500 nm 波段与天然叶片的光谱相关系数大于 0.960,光谱角余弦值大于 0.970,降雨前/后的反射光谱水峰强度差值小于 2%。然而,这些有机高分子材料体系的耐霉菌性、耐气候老化性等耐久性能仍有待验证。

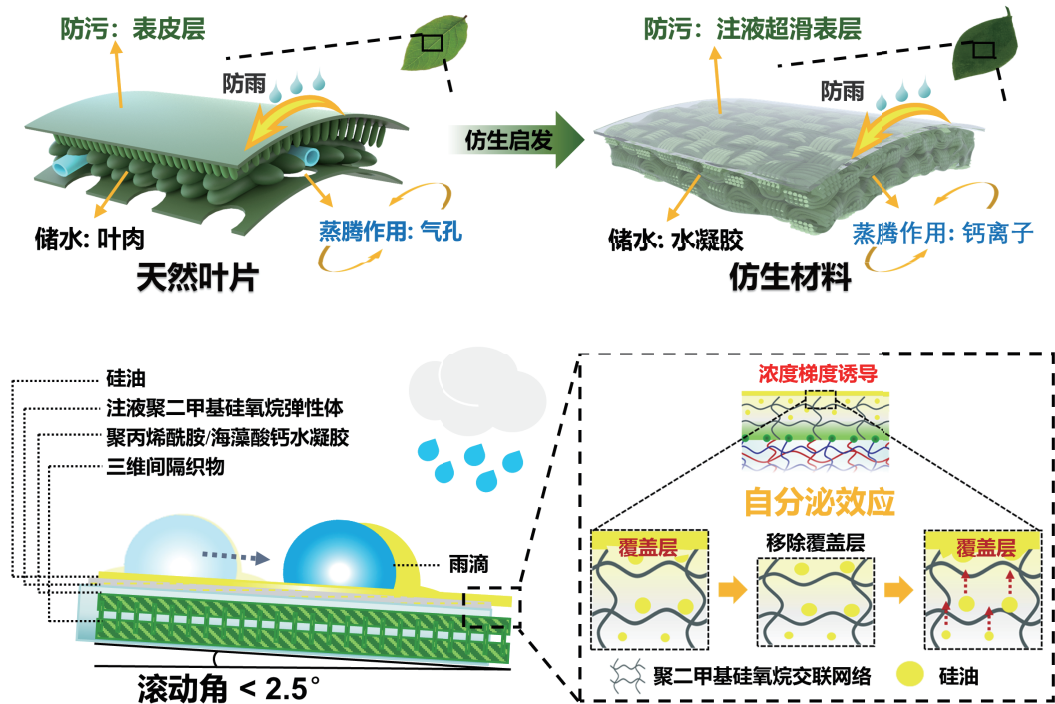


图 5 具备超滑注液表层的高光谱伪装用仿生材料结构设计及其自修复超滑机理

Fig. 5 Structural design and self-healable slippery mechanism of biomimetic materials with super-slippery liquid-infused surfaces for hyperspectral stealth and its spectral performance

高岭土、水滑石(即层状氢氧化物)、坡缕石、氧化硅等无机矿物因其富含结晶水和稳定的理化结构而备受关注。郭利^[41]开发了基于水凝胶/高岭土的高光谱伪装用复合材料,均匀分布的高岭土可提升近红外波段反射光谱的模拟效果。王晶^[42]采用共沉淀法制备了具有不同层间离子的镁铝水滑石,该材料在近红外波段与叶片的光谱相关系数大于 0.960,光谱角余弦值大于 0.970,经 180 °C 高温处理后的水滑石与处理前的光谱相关系数达 0.989,说明其具有良好的热稳定性。为提升水滑石材料的水峰模拟精度,Xie Z X 等^[43]将氯化锂引入镁铝水

滑石中,所制涂层的饱和吸湿率达 0.75,与天然绿叶之间的光谱相关系数提升至 0.974,但氯化锂含量过高易导致涂层表面发生盐析现象。Qing X L 等^[44]以氧化铬/水滑石和赝黑/水滑石为填料,以硅酸钾为黏结剂,开发了全无机涂层,该涂层在 1 500~1 800 nm 波段的反射光谱特征与植被的平均偏差仅为 5.4%。坡缕石是一种层链状含水镁质硅酸盐,含有大量的羟基和二维连续的硅氧四面体片,具有良好的吸附性和耐热性。Lu H P 等^[12]开发了基于坡缕石/氧化铬/聚氨酯的伪装涂层膜,该材料与天然绿叶之间的光谱相关系数为 0.912,光谱

角余弦值为 0.932,多数波段满足美国相关标准的光谱通道要求。Lü X J 等^[13]采用水热合成法制备了介孔氧化硅,其吸湿率高达 82.79%,在 900~2 500 nm 波段与天然叶片之间的光谱角余弦值为 0.990,但水峰较弱,且无法模拟可见光区域的反射光谱。Zhou M 等^[45]构建了氧化硅/聚乙烯醇复合凝胶材料,并结合叶绿素铜钠盐与溴化锂,研制出疏水仿生凝胶材料,该材料在 400~2 500 nm 全波段与天然叶片之间的光谱相关系数达 0.982,且蒸腾和光合作用性能均超越自然叶片,但溴化锂易吸湿潮解,可能发生二次分布并导致性能衰减;此外,长期使用过程中还可能引起氧化硅颗粒脱落,使疏水性能下降。

近年来,无机光子晶体薄膜和自适应变色材料为高光谱伪装技术的发展提供了新思路。华中科技大学研究团队^[46-48]通过电子束蒸镀制备了 Ge/ZnS、YbF₃/ZnS/Ge 等不同体系的多层光子晶体薄膜,并借助遗传算法与氧化硅基底的声子极化效应,使该薄膜在 400~2 500 nm 波段与天然植被之间的光谱角余弦值达 0.980,激光探测波段(1 060 nm)反射率降至 2.83%,热红外波段发射率降低至 0.22,实现了多波段兼容伪装,但仍存在大面积制备时均匀性较差、动态环境下角度稳定性有限等问题。此外,已有学者围绕变色材料与光谱调控展开自适应高光谱伪装的相关研究。Lu Q X 等^[49]开发了热致变色染料,其通过热致变色染料与炭黑的复配,使染料在 30 ℃ 以下呈绿色(与植被的光谱相关系数为 0.967)、在 30 ℃ 以上呈土黄色(与土壤的光谱相关系数为 0.989),但仅覆盖可见光波段。Jiang C Y 等^[50]通过静电纺丝技术制备了一种多层纤维膜。该材料与绿叶的光谱角余弦值达 0.991,其具有梯度多孔结构,能够使水分快速吸附、传输、蒸发,同时,利用水分对纤维材料折射率、光散射、蓝/红光吸收比例的影响规律,使材料实现“干燥黄-润湿绿”的可逆变色。然而,该材料的变色机制完全依赖于自身含水量,导致其无法在多雨或干旱环境下根据环境背景色实现主动调控。为解决上述问题,Tang S W 等^[51]以不对称紫罗碱为发色单元,结合再生纤维素膜与微孔镀金膜设计制备了可主动调节颜色和光谱的仿生电致变色器件,该器件在 0 V(黄色)或 -1.0 V(绿色)状态下与树叶之间的光谱相关系数均高于 0.960,但其作用机制依赖贵金属电极。Huang Z Z 等^[52]提出了活性-静态颜料复合模型,其通过四通量模型优化配比,制备了热致变色仿生材料,该材料在绿/黄状态下与植被叶片的光谱相关系

数为 0.960~0.990,热红外辐射特性与自然叶片一致。这些研究虽已逐步实现从单一背景适配向自适应协同的突破,但仍面临变色触发条件单一、稳定性较差、规模化制备难度大等问题。

综上所述,近年来研究人员围绕结构设计、可见光波段光谱模拟、近红外波段光谱模拟等方面对高光谱伪装用植被仿生材料开展了一系列研究。在结构设计方面,实现了从泡沫基到织物基、从高分子一体化涂覆到无机光子晶体薄膜的多元化发展;在可见光谱模拟方面,通过无机颜料遴选、着色剂复配、微胶囊封装、水滑石插层等方式解决了传统印染材料对红边等特征峰模拟不准、光稳定性差等问题;在近红外光谱模拟方面,提出了薄膜隔离、吸湿盐、水凝胶、无机矿物等多种水峰模拟技术路径,借助多孔基质或光子晶体膜层等方式实现了近红外高原的有效模拟。

4 展望

目前,高光谱伪装用植被仿生材料走向实际应用的过程仍面临诸多挑战,未来研究可围绕以下 4 个方面展开:

1) 构建完善的光谱-图像多维度评价体系。当前研究多集中于光谱相似性评价,对空间纹理、目标显著性等图像特征的关注不足。应进一步发展可融合光谱与空间图案特征的综合评价方法,结合迷彩斑点图案设计,提升其“光谱-纹理-形态”多维度综合伪装效能。

2) 提升材料的外场光谱稳定性与服役便携性。丛林战场环境通常复杂多变,如多尘、多雨、强光等,现有材料在野外场景下的光谱长期稳定性仍有待提升,且基于植被仿生材料的伪装遮障制品存在质量重、架设难等问题。需开发新型仿生体系、长效封装技术、超轻薄涂覆技术等,以提升仿生材料的光谱稳定性和服役便携性。

3) 发展自适应不同植被的动态变光谱伪装材料。不同地域或季节的植被光谱存在细微差异,现有材料的光谱难以随周围植被类型变化而调整。应结合刺激响应型着色体系(如热致变色染料、电致变色器件等),发展可自主感知与动态调节的变光谱伪装材料,丰富其变化触发要素,提高其灵敏度,形成自适应不同环境的动态伪装能力。

4) 推动材料的工程化应用。当前材料(如超滑防污水凝胶复合纺织品)普遍面临工艺烦琐、成本高、难以大量制备的问题,需开发基于常规原料和简易流程的可量产加工技术。同时,依托军民融合

战略,结合贸易风险管理,促进相关技术向户外服装、野营帐篷等民用领域转化,推动其在伪装遮障领域的工程化应用。

5 结语

植被仿生材料作为对抗高光谱侦察的关键手段,在材料制备与光谱调控等方面已取得显著进展。从早期的泡沫/纸张多层结构,到如今可用于服装的染整织物、高吸水凝胶、光子晶体薄膜等,其材料体系日益丰富,光谱模拟精度与穿着舒适性也不断提升。然而,该领域仍面临综合评价体系不完善、耐久性与便携性不足、工程应用与贸易风险管理不足等挑战。未来可通过跨学科创新,融合仿生设计、智能响应技术、先进制造与贸易风险管理等,发展出兼具反射光谱精准模拟、恶劣环境耐受及自适应光谱能力的新一代高光谱伪装材料,并进一步开发迷彩服、功能性户外服装等军民产品,为该类别仿生材料的场景化落地与应用推广提供有力支撑。

参考文献:

[1] Zhu R X, Zhu H Z, Qin B, et al. Digital camouflage encompassing optical hyperspectra and thermal infrared-terahertz-microwave tri-bands [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8112.

[2] Lin Y P, Ren L Q, Yang X D, et al. Design and application of bionic camouflage materials simulating spectral reflection characteristics of plants; a review [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14 (11): 4404.

[3] Shaw G, Manolakis D. Signal processing for hyperspectral image exploitation [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(1): 12-16.

[4] 路琪鑫. 纤维基仿植物叶片材料的结构设计、制备及高光谱性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.

[5] 吴忠倪, 张丽平, 柯莹, 等. 数码迷彩图案设计成型及伪装效果评价研究进展[J]. *服装学报*, 2024, 9(2): 110-114. Wu Zhongni, Zhang Liping, Ke Ying, et al. Research progress of digital camouflage pattern design, preparation and camouflage effect evaluation [J]. *Journal of Clothing Research*, 2024, 9(2): 110-114. (in Chinese)

[6] 祖梅, 郗峰, 甘沅丰, 等. 模拟绿色植被光谱特征的高光谱伪装材料与技术研究进展 [J]. *红外技术*, 2022, 44 (10): 1018-1026. Zu Mei, Yan Feng, Gan Yuanfeng, et al. Progress on hyperspectral camouflage materials and techniques for spectral characteristic simulation of green vegetation [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44 (10): 1018-1026. (in Chinese)

[7] 蒋晓军, 吕绪良, 潘家亮, 等. 基于光学和红外特征模拟的植物仿生材料设计制备 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(7): 1835-1839. Jiang Xiaojun, Lü Xuliang, Pan Jialiang, et al. Design and preparation of plant bionic materials based on optical and infrared features simulation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 1835-1839. (in Chinese)

[8] 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)

[9] Hu A R, Li M, Zhang L P, et al. Polyurethane-based bionic material simulating the Vis-NIR spectrum and thermal infrared properties of vegetation [J]. *RSC Advances*, 2019, 9 (71): 41438-41446.

[10] Liu Z M, Wu W J, Hu B R. Design of biomimetic camouflage materials based on angiosperm leaf organs [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(11): 1902-1910.

[11] Xie D J, Zu M, Li M Y, et al. A hyperspectral camouflage colorant inspired by natural leaves [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(47): e2302973.

[12] Lu H P, Bai X Z, Wang Z X, et al. Hyperspectral camouflage coating using Palygorskite to simulate water absorption of healthy green leaves [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, 156: 107293.

[13] Lü X J, Yuan L, Rao C S, et al. Structure and near-infrared spectral properties of mesoporous silica for hyperspectral camouflage materials [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2023, 129: 104558.

[14] Xiao F F, Xu W D, Liu J, et al. Multi-response mixture design applied for the formulation of a textile green camouflage ink with reproduction of a leaf green [J]. *Textile Research Journal*, 2023, 93(17/18): 4115-4125.

[15] Guo T, Hua W S, Liu X, et al. Comprehensive evaluation of optical camouflage effect based on hyperspectra [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101002.

[16] 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(27): 12848-12863.

[17] 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 Guoyue, Li Cheng, et al. Research on preparation and spectral properties of a new near-infrared camouflage coating [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(10): 588-592. (in Chinese)

[18] 沈涛. 基于高光谱探测的仿植物叶片材料研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

[19] Jiang P L, Cui X Q, Zhu D D, et al. A superslippery biomimetic leaf with self-driven water absorption performance for robust spectral simulation [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2026, 8(1): 262-274.

[20] 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 Shixin, Liu Chuntong, Li Hongcai, et al. Camouflage effect evaluation based on hyperspectral image detection and visual perception [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1485-1494. (in Chinese)

[21] He Z X, Gan Y Y, Ma S X, et al. Evaluation method for the hyperspectral image camouflage effect based on multifeature description and grayscale clustering [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2023(1): 11.

[22] 刘志明, 吴文健, 胡碧茹. 基于被子植物叶类器官的仿生伪装材料设计 [J]. *中国科学 (E 辑: 技术科学)*, 2009 (1): 174-180.

- Liu Zhiming, Wu Wenjian, Hu Biru. Bionic camouflage materials design based on angiosperm leaf organs[J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009(1): 174-180. (in Chinese)
- [23] 杨玉杰, 胡碧茹, 吴文健. 植物叶片仿生伪装材料的设计与制备[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(5): 50-53.
Yang Yujie, Hu Biru, Wu Wenjian. Design and preparation of bionic camouflage materials by simulating plant leaves[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(5): 50-53. (in Chinese)
- [24] Lu Q X, Li M, Tian A L, et al. Green plant leaf-inspired smart camouflage fabrics for visible light and near-infrared stealth[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2022, 19(3): 788-798.
- [25] Lu Q X, Guan Y, Fu S H. Self-driven super water vapor-absorbing calcium alginate-based bionic leaf for Vis-NIR spectral simulation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 296: 119932.
- [26] 邢英鑫. 可见-近红外-中红外多波段隐身研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [27] 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.
- [28] Xu K, Wang S M, Wang L W, et al. Bionic coating imitating reflection characteristics of plant leaf in solar spectrum waveband for hyperspectral camouflage[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2022, 127: 104477.
- [29] Ye H, Gao Y, Li S M, et al. Bionic leaves imitating the transpiration and solar spectrum reflection characteristics of natural leaves[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12(1): 109-116.
- [30] 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.
- [31] 谢东津, 吕呈龙, 祖梅, 等. 绿色植被可见-近红外反射光谱模拟材料研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4): 1032-1038.
Xie Dongjin, Lü Chenglong, Zu Mei, et al. Research progress of bionic materials simulating vegetation visible-near infrared reflectance spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4): 1032-1038. (in Chinese)
- [32] 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: 43-49.
- [33] Yang Y J, Liu Z M, Hu B R, et al. Design of plant leaf bionic camouflage materials based on spectral analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1668-1672.
- [34] 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.
- [35] 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 and Technology*, 2020, 107: 103328.
- [36] Xiao Y, Tan S J, Qu L J, et al. Highly water-resistant coating for vegetation mimicry with sunlight spectrum and infrared compatibility[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 686: 162218.
- [37] Xiao F F, Xu W D, Liu H, et al. Green camouflage coating for fabric screen printing[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2025, 116(9): 1965-1972.
- [38] Zhuang S X, Chen W Q, Li B, et al. A leaf-mimic material based on polyurethane microcapsules and Cr₂O₃ for hyperspectral stealth [J]. *Materials and Design*, 2024, 243: 113051.
- [39] 安镜澄, 娄鸿飞, 马剑平, 等. 原位界面聚合工艺制备超高水分含量微胶囊[J]. *涂料工业*, 2024, 54(12): 34-41.
An Jingcheng, Lou Hongfei, Ma Jianping, et al. Preparation of microcapsules with ultra-high water content by in-situ interfacial polymerization process[J]. *Paint and Coatings Industry*, 2024, 54(12): 34-41. (in Chinese)
- [40] Li Z R, Huang Z Z, Li W, et al. Leaf-inspired multifunctional paint for full-solar-spectrum hyperspectral camouflage with enhanced weather-resistance and adhesion [J]. *Small*, 2026: e12131.
- [41] 郭利. 模拟绿色植被光谱特征的近红外伪装涂层研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [42] 王晶. 绿色植被近红外光谱特征模拟材料设计、制备及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [43] Xie Z X, Yuan L, Qing X L, et al. Hygroscopic Mg-Al LDHs composite microspheres for highly efficient hyperspectral camouflage in the VIS and NIR wavebands[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 15649.
- [44] Qing X L, Weng X L, Yuan L, et al. Hyperspectral camouflage with an inorganic coating mimicking vegetation in the 1.5 ~ 1.8 μm spectral window [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2026, 152: 106246.
- [45] Zhou M, Sheng Z Z, Ji G B, et al. Aerogel-involved triple-state gels resemble natural living leaves in structure and multi-functions [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(32): 2406007.
- [46] 邓子琛, 王明亮, 刘佳琪, 等. 光子晶体薄膜可见光-红外光谱设计及其辐射特性分析[J]. *导弹与航天运载技术(中英文)*, 2024(3): 73-78.
Deng Zichen, Wang Mingliang, Liu Jiaqi, et al. Visible-infrared spectrum design and radiation characteristics analysis of photonic crystal films[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2024(3): 73-78. (in Chinese)
- [47] Deng Z C, Zhou P, Hu W Y, et al. Biomimetic multilayer film simulating solar spectrum reflection characteristics of natural vegetations for optical camouflage [J]. *Optics Express*, 2023, 31(22): 37082-37093.
- [48] Huang L Q, Li M, Deng Z C, et al. All-in-one multispectral camouflage film: highly mimicking green vegetation hyperspectral features with low laser and infrared detectability[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2025, 17(50): 68335-68344.
- [49] Lu Q X, Liu R, Zhang D D, et al. Thermochromic pastes for reversible dynamic simulation of colors and visible reflection spectra of green leaf and soil [J]. *Dyes and Pigments*, 2024, 230: 112314.
- [50] Jiang C Y, Wei P P, Yuan L, et al. An intelligent multi-band camouflage textile inspired by natural leaves[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(35): 2424325.
- [51] Tang S W, Zhang H Z, Liu Y L, et al. Breakthrough in anti-reconnaissance technology from a new perspective: a bio-inspired electrochromic device with hyperspectral characteristics of vegetation foliage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154604.
- [52] Huang Z Z, Long L S, Gao Y F, et al. A color-changing biomimetic material closely resembling the spectral characteristics of vegetation foliage[J]. *Small*, 2024, 20(10): 2303966.