

文章编号: 1001-2486(2011)05-0050-04

植物叶片仿生伪装材料的设计与制备*

杨玉杰, 胡碧茹, 吴文健

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要:设计和制备了一种新型的植物叶片仿生伪装材料,其由透明聚氯乙烯表层、叶绿素/聚乙烯醇薄膜、含水高阻隔袋和纸张四层组成。其中,透明聚氯乙烯表层提供防水性能,叶绿素封装于高隔氧材料聚乙烯醇中提高了其光稳定性,水封装于高隔水材料中降低了其蒸发散失速度,纸张提供了类植物叶片的疏松多孔结构。光谱测试结果表明,该仿生伪装材料在可见光、近红外和短波红外波段的反射光谱特征与植物叶片一致,相似度可达0.9983,室外日光照射三个月后仍能保持与植物叶片一致的反射光谱特征。该伪装材料与植物叶片光谱相似度高,耐候性好,有望可以有效对抗高光谱侦察。

关键词:植物叶片;仿生;伪装材料;高光谱

中图分类号:TB17;TB332;TN972.4 文献标识码:A

Design and Preparation of Bionic Camouflage Materials by Simulating Plant Leaves

YANG Yu-jie, HU Bi-ru, WU Wen-jian

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel bionic camouflage material, which is constituted of transparent poly(vinyl chloride) surface, chlorophyll/poly(vinyl alcohol) film, high-vapor-barrier water bag and paper, was designed and prepared by simulating plant leaves. The transparent poly(vinyl chloride) surface was used to provide waterproof capability of the camouflage material; the chlorophyll was concealed into the high-oxygen-barrier poly(vinyl alcohol) film to improve its photostability; the water was sealed into the bag of high-vapor-barrier poly(vinylidene chloride) to prevent its vaporization loss; and the paper was used to simulate the spongy mesophyll of plant leaf organs. The result of spectral tests showed that the reflectance spectra of camouflage material and plant leaves, whose similarity was 0.9983, exhibited the same characteristics in visible, near infrared and short wave infrared wave bands, and the spectral characteristics of camouflage material did not change after three months' sunlight treatment. The bionic camouflage material, which displayed a high spectral similarity with plant leaves and a good weather resistance, is an effective method to take on reconnaissance of hyperspectral imaging hopefully.

Key words: plant leaves; bionic; camouflage material; hyperspectral

高光谱成像是一种全新概念的对地观测技术,能够得到场景400nm~2500nm之间由二维空间信息和一维光谱信息构成的三维数据,光谱分辨率可达5nm~10nm,可分辨目标与背景反射光谱特性的细微差异^[1]。1998年后,美欧等国家和地区陆续发射升空了包括MODIS、Hyperion、MERIS、ARTEMIS等多个高光谱传感器,其光谱分辨率均优于10nm,且地面分辨率不断提高,尤其是2009年5月搭乘TacSat-3卫星升空的ARTEMIS高光谱传感器,其光谱分辨率达到了5nm,地面分辨率达到了5m^[2-3]。由此可见,高光谱成像技术发展迅猛,已成为反伪装、反隐身的

重要手段^[4]。

以绿色植被为例,传统的伪装材料由于仅能与其实现“同色”,而无法实现“同谱”,已难以对抗精细的光谱侦察^[5]。对抗高光谱探测的关键就是使伪装目标与环境背景达到精细的光谱特征匹配。而对植物叶片开展仿生研究,制备一种具有植物叶片精细反射光谱特征的仿生伪装材料正是实现这一目标的有效途径。

本课题组在前期的研究中已经证实了决定植物叶片反射光谱的三大要素为叶绿素、水和疏松多孔结构,在此基础上设计了植物叶片仿生伪装材料的模型,并通过制备含油溶性叶绿素和水的

* 收稿日期:2010-11-16

基金项目:国家省部基金资助项目

作者简介:杨玉杰(1982—),男,博士生。

聚氨酯发泡材料原理上验证了植物叶片仿生设计的可行性,材料与梧桐叶片反射光谱的相似度达到了0.969^[6]。但上述仿生伪装材料的设计中采用了叶绿素衍生物来代替光照下极其不稳定的叶绿素,其反射光谱特征与绿色植被相比有一定程度的蓝移,且并未解决材料中水分的保持问题。本文针对上述问题,采用高隔氧材料封装叶绿素,提高了其光稳定性,解决了仿生伪装材料的光谱蓝移问题;采用高隔水材料封装水分,解决了其蒸发损失的问题。在此基础上,调整了仿生伪装材料的设计,初步制备了植物叶片仿生伪装材料,并对其与绿色植被的光谱相似度和耐候性进行了探讨。

1 植物叶片仿生伪装材料的设计

由植物学和遥感学研究可知^[7],疏松多孔结构、叶绿素和水是植物叶片反射光谱的三个决定因素(图1)。其中,疏松多孔的结构使光在植物叶片内部经过多次折射后返回上表面射出,形成植物叶片表面40%~60%的较高反射率,与光的波长无关,对植物叶片反射光谱的全波段均有影响,在几乎没有吸收的780~1300nm之间形成“近红外高原”;叶绿素是植物叶片可见光波段反射光谱的决定者,其特征吸收使植物叶片反射光谱在可见光波段的反射率整体较低,且呈现出550nm处的“绿峰”和680~780nm之间的“红边”两大特征,是植物叶片呈现绿色的原因;水是1300nm之后短波红外波段的主要决定者,其特征吸收使植物叶片的反射光谱在短波红外波段的1440nm和1920nm处呈现出两个明显的水分吸收谷。

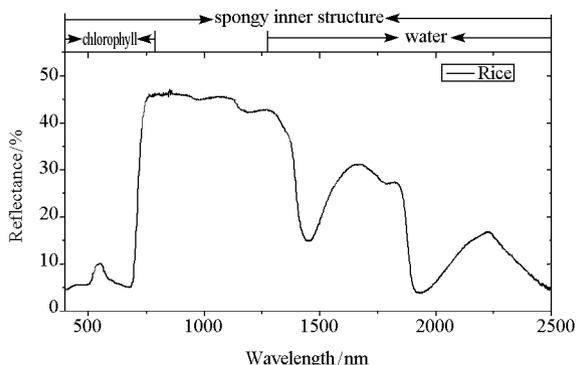


图1 植物叶片反射光谱决定因素

Fig.1 Determining factors of reflectance spectra of plant leaves

由此可知,要想实现对绿色植被反射光谱的高精度模拟,植物叶片仿生伪装材料必须包含疏松多孔结构、叶绿素和水三个要素。但离体叶绿

素在光照下极其不稳定,短时间内即会完全降解,使材料褪色^[9];而在开放体系中,水分也会在短时间内通过蒸发散失。由此,植物叶片仿生伪装材料要达到实用要求,必须解决离体叶绿素的光降解和水分蒸发两大难题。

首先,基于叶绿素光降解过程必须有氧参与的理论^[10-11],我们将叶绿素封装于对氧气具有高阻隔特性的聚乙烯醇(PVA)中,得到具有高光稳定性的叶绿素/PVA薄膜,解决了其光降解难题^[12];其次,将水封装于对水蒸气具有高阻隔特性的聚偏二氯乙烯(PVDC)包装袋中,解决了其蒸发损失难题;再次,我们采用聚氯乙烯(PVC)膜为材料的表面防水层,解决了聚乙烯醇耐水性能差的问题。由此,我们设计了如图2所示的仿生伪装材料,其为4层复合,其中,透明PVC膜为最上层,以提供防水性能;叶绿素PVA薄膜为第二层,以使伪装材料体现与植物叶片相似的外观颜色;封装水分的PVDC包装袋为第三层,以提供水的特征吸收;具有疏松多孔结构的纸作底层,以提供合适的光谱反射率。

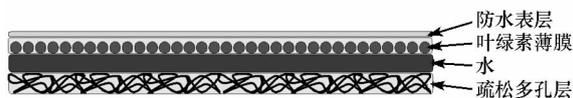


图2 植物叶片仿生伪装材料结构示意图

Fig.2 Structure of bionic camouflage materials simulating plant leaves

2 植物叶片仿生伪装材料的制备

2.1 原料

菠菜叶:购于市场的新鲜菠菜,去除茎和叶脉,洗净晾干。

聚乙烯醇(PVA-124),分析纯,醇解度大于97%,汕头西陇化工公司;丙酮、甲醇、无水硫酸钠和醋酸钠均为分析纯,湖南汇虹试剂有限公司;DEAE Sepharose CL-6B,美国Sigma公司;聚偏二氯乙烯高阻隔包装袋,郑州卫华包装有限公司;聚氨酯胶粘剂,郑州华宇科技有限公司;漂白木浆片,湖南省造纸研究所;透明聚氯乙烯膜,深圳方胜包装制品有限公司。

2.2 制备

(1) 叶绿素/PVA薄膜的制备

采用文献[13]方法,提取和分离得到叶绿素乙醇溶液;将PVA加热溶解于蒸馏水中,得到质量浓度为10%的PVA水溶液;将叶绿素乙醇溶液与PVA水溶液按质量比1:1混合均匀后倒入模具中,室温下避光晾干即得到叶绿素/PVA薄膜。

(2) 水分的封装

取 3.5g 蒸馏水加入面积为 300cm² 的 PVDC 高阻隔包装袋中, 排出其中的空气后用封口机封口。

(3) 疏松多孔结构层的制备

取 100g 漂白木浆片, 经过打浆、抄纸、压榨、烘干后得到规格为 70g/m² 的纸张。

(4) 材料的整体复合

将防水膜、叶绿素/PVA 薄膜、封水袋、纸张按顺序用聚氨酯胶粘剂粘结在一起, 得到厚度为 0.34mm、质量密度为 253.59g/m² 的植物叶片仿生伪装材料。

2.3 分析与表征

采用日立 U-4100 的紫外/可见/近红外光谱仪测试材料的反射光谱, 光谱范围为 400 ~ 2500nm, 数据采样间隔为 2nm。

3 结果与讨论

3.1 植物叶片仿生伪装材料与绿色植被的光谱相似性

图 3 所示为 400 ~ 2500nm 之间仿生伪装材料与樟树叶片的反射光谱比较。在 550nm 附近和 680 ~ 780nm 之间, 仿生伪装材料的反射光谱呈现出了与樟树叶片一致的“绿峰”和“红边”特征, 这是由于其使用了与植物叶片一样的叶绿素, 但仿生伪装材料在“绿峰”和“红边”起始位置处的反射率却略低于樟树叶片, 这是由于其所用原料的折射率低于樟树叶片所致, 在进一步的实验中可通过选用折射率更接近植物叶片的材料来进行改进; 在 780nm 后的近红外和短波红外波段, 仿生伪装材料的反射光谱不但呈现出高原平台形状, 而且出现了位于 1440nm 和 1920nm 处的两个水分吸收谷, 但其反射率整体上略高于樟树叶片, 这是仿生伪装材料中疏松多孔结构层略厚于樟树叶片所致。通过相似度公式计算, 得到仿生伪装材料与樟树叶片反射光谱的相似度为 0.9983, 进一步完善该仿生伪装材料的成分和制备参数, 可对植物的反射光谱实现高精度模拟。

3.2 植物叶片仿生伪装材料的耐候性

为了验证仿生伪装材料的耐候性, 我们将其置于室外进行日光照射, 三个月后的反射光谱如图 4 所示。由图可知, “绿峰”的位置和高度均未发生变化, 这说明, 经过三个月的日光照射后, PVA 中的叶绿素并未发生降解, 高隔氧材料封装的措施确实大大提高了叶绿素的光稳定性, “红

边”位置和斜率的不变也说明了这一点; 水分吸收谷的高度也未发生明显变化, 这说明高隔水袋子的封装也确实起到了抑制水分蒸发散失的作用; 但经过三个月日照后, 材料“近红外高原”的反射率出现了一定程度的降低, 但并未影响反射光谱的整体特征, 这是由于材料在室外的放置过程中底层纸张受到了挤压, 厚度减小所致。

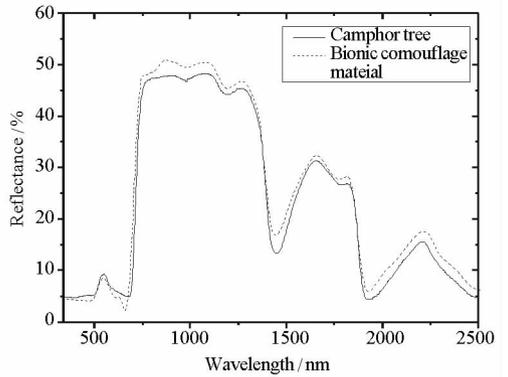


图 3 仿生伪装材料与樟树叶片的反射光谱
Fig. 3 Reflectance spectrum of bionic camouflage material and camphor tree leaf

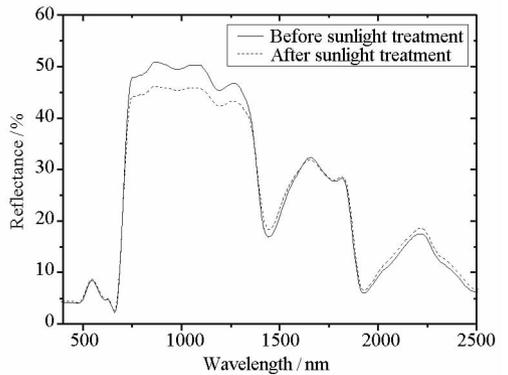


图 4 仿生伪装材料日照三个月前后的反射光谱
Fig. 4 Reflectance spectrum of bionic camouflage material before and after three months' sunlight treatment

4 结论

本文设计和制备了一种新型的植物叶片仿生伪装材料, 其同时含有叶绿素、水和疏松多孔结构三个植物叶片反射光谱的决定因素, 并通过将叶绿素封装于高隔氧材料和将水封装于高隔水材料中的方式, 解决了离体叶绿素的降解和水的蒸发散失两大难题。该仿生伪装材料的反射光谱具有与植物叶片一致的光谱特征, 相似度可达 0.9983, 且室外日光照射下的光谱稳定性超过三个月。该伪装材料与植物叶片的光谱相似度高、耐候性好, 为有效对抗高光谱成像技术的侦察探测提供了一种新型的伪装技术和手段。

参考文献:

- [1] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] Imaging Spectrometers[Z/OL]. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter2/chapter2_12_e.html. 2009.
- [3] TacSat-3[Z/OL]. http://directory.eoportal.org/get_announce.php?an_id=14941. 2010.
- [4] 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.
- [5] 刘志明,胡碧茹,吴文健,等. 高光谱探测绿色涂料伪装的光谱成像研究[J]. 光子学报,2009,38(4):885-890.
- [6] 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,2009,39(1):174-180.
- [7] Gates D M, Keegan H J, Schleter J C, et al. Spectral Properties of Plants[J]. Applied Optics, 1965, 4: 11-20.
- [8] Jacquemoud S, Baret F. Prospect: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75-91.
- [9] 陈文峻,蒯本科. 植物叶绿素的降解[J]. 植物生理学通讯,2001,37(4):336-339.
- [10] Foote C. Photosensitized Oxidation and Singlet Oxygen: Consequences in Biological Systems[J]. Free Radicals in Biology, 1976, 2: 85-133.
- [11] 刘晓庚. 光氧化及其对食品安全的影响[J]. 食品科学,2006,27(11):579-583.
- [12] 杨玉杰,吴文健,胡碧茹,等. 天然叶绿素在伪装材料中的应用[C]//第十一届伪装专业年会论文集,苏州,2010:427-431.
- [13] 杨建虹,陶冶. 大量分离叶绿素a和b的方法[J]. 植物生理学通讯,2002,38(2):156-158.

(上接第44页)

优化变量的取值范围如下: $D_{\max} \in [0.20, 0.35]$, $\theta_0 \in [7, 30]$, $P_{cndesign} \in [4000000, 8000000]$, $T_1 \in [4.5, 5.5]$, $Ma_{tr} \in [1.95, 2.20]$, $k_{cf} \in [5, 15]$, $K_{HB} \in [0.5, 2.0]$, $\delta \in [30, 60]$, $P_{cgdesign} \in [2000000, 5000000]$ 。

采用SDDO进行优化,优化方法采用的是MCOA,共计进行了3次子空间分解,进行了7个子空间的优化,目标函数计算次数为436次,最优解为254.8,获取最优解的设计变量为:(0.227, 15, 4577800, 4.5, 1.95, 15, 0.5, 60, 2675488);相对于文献[7]中目标函数计算次数11430次、最优解254.743相比较,目标函数计算次数显著减少,最优解相差不大。

4 结论

子空间分解与淘汰优化方法利用子空间的淘汰来减少需要计算的设计子空间;通过局部子空间样本的加密以提高近似模型精度;通过分解来获取可能淘汰和加密的空间,减少不必要的采样,从而提高优化效率。理论分析与函数优化实例验证了优化过程的有效性,在计算效率方面相对于

二级优化过程有一定的提高,也改善了优化过程的可实现性,同时在设计空间增加的情况下,其优化结果具有一定的稳定性和适应性。

参考文献:

- [1] Wang D P, Gray G. Extended Collaboration Pursuing Method for Solving Larger Multidisciplinary Design Optimization Problems[J]. AIAA Journal, 2007, 45(6):1208-1221.
- [2] 王振国,陈小前,罗文彩,等. 飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [3] Braun R D. Collaborative Optimization: An Architecture for Large-Scale Distributed Design[D]. Stanford University, 1996.
- [4] Braun R D, Kroo I, Moore A. Use of the Collaborative Optimization Architecture for Launch Vehicle Design[R]. AIAA 96-4018, 1996.
- [5] Alexandrov N M, Lewis R M. Analytical and Computational Properties of Distributed Approaches to MDO[R]. AIAA-2000-4718, 2000.
- [6] Lin W J, Renaud J E. A Comparative Study of Trust Region Managed Approximate Optimization[R]. AIAA-2001-1499, 2001.
- [7] 罗文彩,罗世彬,陈小前,等. 导弹总体设计多方法协作优化[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(3):16-19.