

涂层材料的偏振光谱反射特性分析

李兆兆^{1,2}, 武文远^{1,2}, 黄雁华^{1,2}, 杨云涛¹, 范化喜¹

(1. 解放军理工大学理学院, 江苏 南京 211101; 2. 解放军理工大学 电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要:绿色涂层是重要的军事伪装材料。本文基于偏振探测理论,通过高光谱反射偏振实验测量,对比分析了深绿与中绿两种涂层材料的反射与偏振特性,得到了它们的二向反射函数、线偏振度随波长的变化规律,以及二向反射函数BRF与线偏振度DOLP之间的相互关系。结果表明:(1)相比近红外波段,两种涂层在可见光波段的BRF差异较明显,镜面反射的探测角更容易区分两种涂层;(2)当入射角不变时,涂层线偏振度随着探测角增大而增大;随着入射角的减少(或镜面反射的探测角减小),深绿与中绿涂层的DOLP差异增大;(3)涂层的BRF与DOLP的变化在400~1000 nm波段具有负相关性。

关键词:涂层;高光谱;二向反射函数;线偏振度

中图分类号:0436.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.010

Analysis on polarization spectral reflectance properties of coating materials

LI Zhao-zhao^{1,2}, WU Wen-yuan^{1,2}, HUANG Yan-hua^{1,2}, YANG Yun-tao¹, FAN Hua-xi¹

(1. College of Science, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China;

2. National Key Laboratory on Environmental Electromagnetic Effects and Electro-Optic Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: Green coatings are an important military camouflage material. Based on the theory of polarization detection, polarization properties and reflection properties of deep green and medium green coatings were compared and analyzed by the polarization experiments of hyper spectral reflectance, and the change rule of bidirectional reflectance function and linear polarization degree with the wavelengths was obtained; the relationship between bidirectional reflectance function BRF and linear polarization degree DOLP was also obtained. The results show that: (1) Compared with the near-infrared band, the BRF difference between two coatings in the visible band is obvious, and detection angle of specular reflection is easier to distinguish the two coatings. (2) When the incident angle is constant, the linear polarization degree of coating increases with the increase of detection angles. With the reduction of the incident angle or detection angle of specular reflection, the difference of DOLP between green and medium green coatings increases. (3) The BRF and DOLP changes of coatings have negative correlation in the 400 - 1000nm bands.

Key words: coating; hyper spectral; bidirectional reflectance function; linear polarization degree

1 引言

现代军事技术采用伪装涂层、伪装网等进行军

事伪装,能够实现目标与背景的“同色同谱”,这给仅仅利用强度探测伪装目标的传统探测方法带来很

基金项目:国防科技重点实验室基金项目(No. FD2015010)资助。

作者简介:李兆兆(1992-),男,硕士生,主要从事伪装材料偏振成像探测方面的研究工作。E-mail:1066526046@qq.com

收稿日期:2016-11-03;修订日期:2016-11-30

大难度^[1]。研究发现,当目标与背景的光谱强度相同时,它们的偏振信息往往会有较大差别,因此利用偏振探测可以弥补强度探测的不足,将传统光强探测获得的三维(光强、光谱和空间)信息量扩展到七维(光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭圆率和旋转的方向)。随着偏振探测技术的发展^[2-3],利用目标与背景偏振特性的差异进行探测已经成为一种新的探测手段,可以解决传统光学探测无法解决的一些问题^[4]。因此,研究伪装材料的反射特性、偏振特性是一项十分重要的工作。反射特性通常采用二向反射分布函数等理论表征^[5],而偏振特性主要采用偏振度、偏振角等物理量表征。以往的研究主要对材料的反射特性或偏振特性单一特性研究,并未对材料的反射特性与偏振特性进行综合对比探究。例如,张朝阳通过测试染料型与涂料型伪装材料的偏振散射光谱,研究了不同探测波段下粗糙材料表面的偏振散射机理^[6];赵永强对材料和背景偏振光谱二向反射进行了建模和仿真^[7]。绿色涂层材料是重要的军事伪装材料,本文通过实验测量对比分析深绿与中绿两种涂层的反射和偏振特性,得到它们的二向反射函数、偏振度随波长的变化规律,以及二向反射函数与线偏振度之间的相互关系,研究结果对伪装材料的反射偏振探测具有重要的现实意义。

2 理论依据

二向反射函数^[8] (Bidirectional Reflectance Function, BRDF) 是材料重要的反射特性参数,与材料表面特性、波长、温度等因素有关。其具体定义为,在一定的辐照和观测条件下,材料的反射辐亮度与处于同辐照度和观测条件下的漫反射参考标准板(朗伯表面)的反射辐亮度之比^[9],即:

$$f_{\text{BRF}} = \frac{dL_T(\theta_r, \phi_r; \lambda)}{dL_p(\theta_r, \phi_r; \lambda)} \quad (1)$$

其中, L_T 表示材料的反射辐亮度; L_p 表示参考标准板的反射辐亮度; θ, ϕ 分别代表天顶角和方位角; λ 表示反射光的波长。BRF 反映了材料表面的反射特性,因此可以通过测量 BRF 来探究伪装涂层的空间反射特性。

光的偏振态通常采用 Stokes 矢量 $(I, Q, U, V)^T$ 表示^[10],其中, I 表示总光强; Q 表示水平线偏振分量与垂直线偏振分量之差; U 表示 45° 线偏振分量

与 135° 线偏振分量之差; V 表示右旋圆偏振分量与左旋圆偏振分量^[11] 之差,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} I = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ U = I_{45^\circ} + I_{135^\circ} \\ V = I_{\text{right}} - I_{\text{left}} \end{cases} \quad (2)$$

在实验过程中,若以入射平面为参考平面,将偏振片透光轴与入射平面的夹角分别转到四个不同角度 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$, 获得该角度的光强值,则可求出涂层反射光的 (I, Q, U) 三个参数,则伪装涂层反射光的线偏振度为:

$$\text{DOLP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \frac{\sqrt{(I_{0^\circ} - I_{90^\circ})^2 + (I_{45^\circ} - I_{135^\circ})^2}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} \quad (3)$$

3 实验与分析

实验样品是采用绿色涂料制成了深绿和中绿两种伪装涂层材料(以铝板为基底),尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,涂层厚度约 2 mm ,测得实验波长为 632 nm 时,其折射率实部为 1.39 ,虚部为 0.337 。

实验测量是在偏振光遥感实验室完成,采用的测量系统是由东北师范大学赵云升教授设计的多角度多光谱偏振反射平台^[12],入射光源为 300 W 平行卤钨灯,参考版为标准白板,测量原理示意图如图 1 所示。实验方案:调整光源与探测器方向,入射角分别设定为 $20^\circ \sim 60^\circ$,反射角分别设定为 $0^\circ \sim 60^\circ$,角度间隔均为 10° ;入射光线的方位角固定为 0° ,反射光线的方位角分别设定为 $90^\circ \sim 180^\circ$,间隔为 30° ;调整偏振片透光轴与入射平面的夹角,使其分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° ,实验流程图如图 2 所示。通过分析实验数据发现,在反射光线方位角为 180° 时,反射和偏振相比其他方位角均具有较大的,所以下研究只限于反射光线方位角为 180° 的情况。

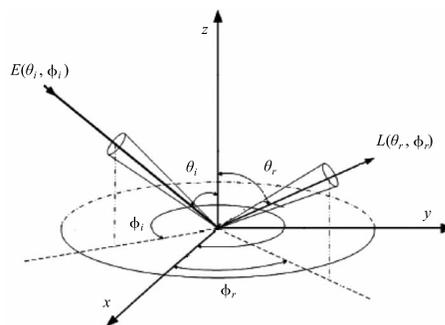


图 1 涂层材料测量示意图

Fig. 1 Sketch map of coating target

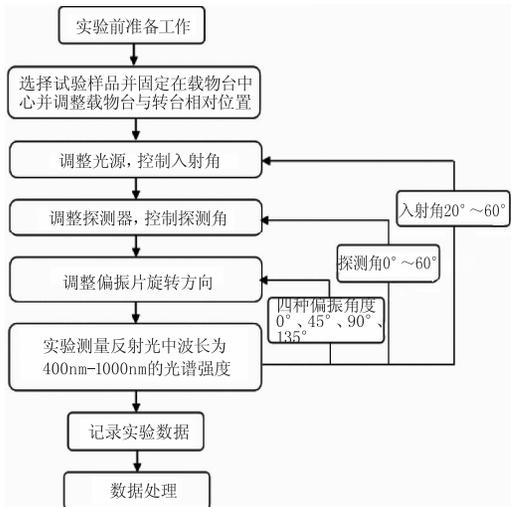


图2 实验流程图
Fig. 2 Experimental flow

3.1 入射角和探测角对涂层反射特性的影响

图3(a)、(b)表示深绿涂层在不同入射角和探测角的二向反射函数(BRF)随波长的变化关系。入射角分别为20°,50°,每个入射角改变探测角分别为20°,30°,40°,50°;图4(a)、(b)为中绿涂层,测量条件与深绿涂层相同。

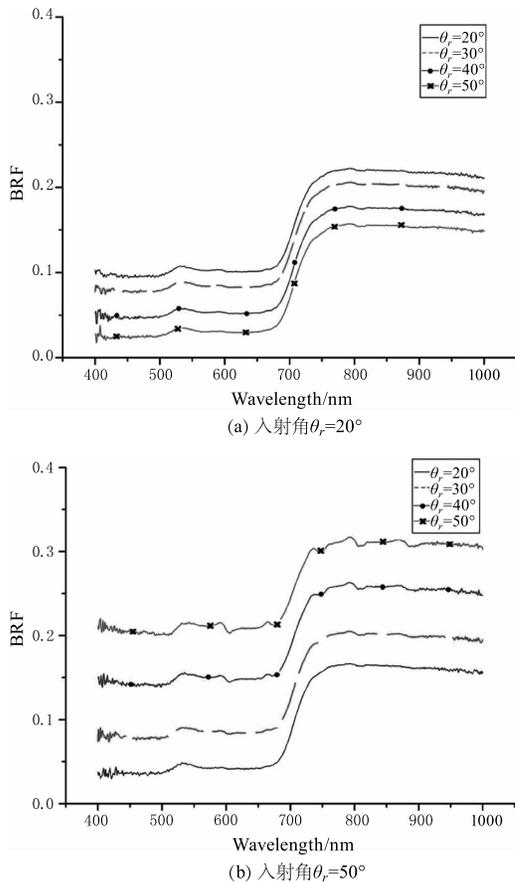


图3 不同探测角下,深绿涂层 BRF 随波长变化关系
Fig. 3 The relationship between BRF of the deep green coating and the wavelength under different detection angle

由图3、4可以看出,上述两种涂层 BRF 随波长变化的关系有相似之处。表现如下:(1)在400~680 nm 波段,两种涂层的 BRF 较小且随波长变化较小;在680~770 nm 波段,BRF 急剧增大;在770~1000 nm 波段,两种涂层的 BRF 较大但随波长变化较小。其原因是两种涂层材料的反射特性主要受镜面反射、体散射以及表面吸收等因素影响,在不同波段涂层的反射率与吸收率差别较大,从而导致的 BRF 不同。(2)当探测角为镜面反射角时(即探测角与入射角相同),涂层的 BRF 值最大,相反当探测角远离镜面反射角时,涂层的镜面反射降低,涂层 BRF 值减小,其原因主要是镜面反射能量较强。

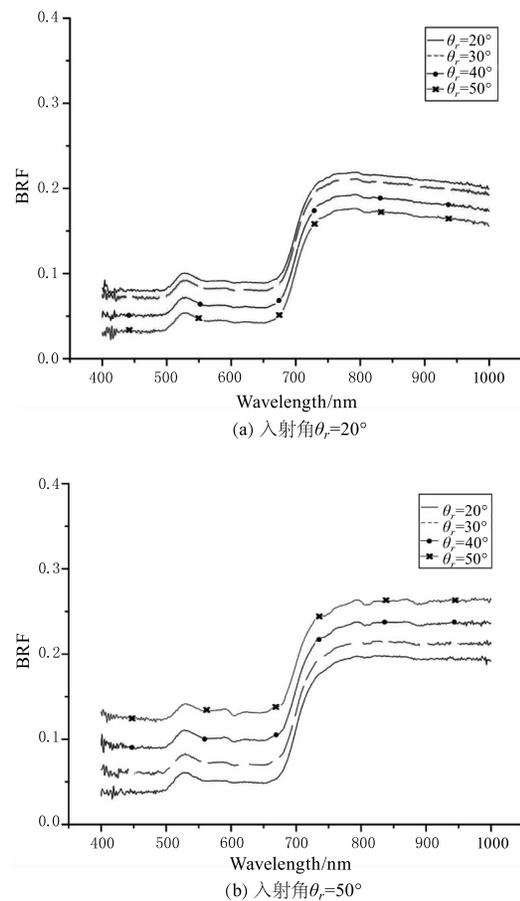


图4 不同探测角下,中绿涂层 BRF 随波长变化关系
Fig. 4 The relationship between BRF of the medium green coating and the wavelength under different detection angles

由图3、4可以看出,两种涂层是有较大差异,本文通过比较两种涂层的相对误差(Relative Error)分析 BRF 的差异,公式如下:

$$RE_{BRF} = \frac{f_{深绿} - f_{中绿}}{f_{深绿} + f_{中绿}} \quad (4)$$

式(4)中 f 为式(1)BRF值,对比结果如图5(a)、(b),可以看出:①探测波长大于770 nm时,两种涂层的BRF相对误差值较小,这是因为探测波长大于770 nm时,根据涂层的BRF与波长关系,涂层的BRF较大,根据式(4),两者的BRF相对差值较小;②探测角与镜面反射角差值越大,两涂层BRF相对差值越大,这是由于差值越大,镜面反射成分减小,体散射所占比重增大,而涂层的体散射与其内部的颜料和填料相关,导致两涂层的体散射成分差距较大,进而导致BRF相对差值增大。③综合①②可知,可见光波段深绿与中绿涂层差异较明显,镜面反射的探测角较容易区分两种涂层。

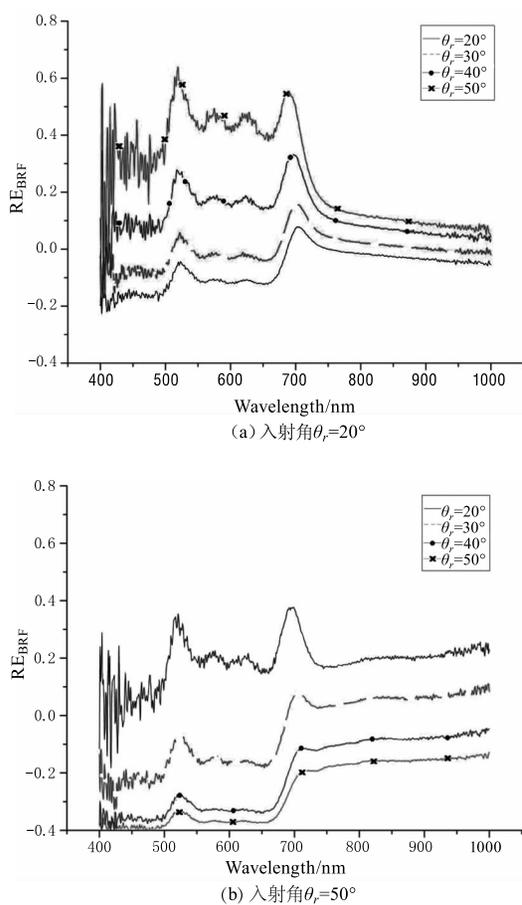


图5 不同探测角下,深绿与中绿涂层BRF的相对误差随波长变化关系

Fig. 5 The relationship between the relative error of BRF in deep green and medium green coating with the wavelength under different detection angles

3.2 入射角和探测角对涂层偏振特性的影响

图6(a)、(b)表示深绿涂层在不同入射角和探测角的线偏振度(DOLP)随波长变化关系。入射角

分别为20°,50°,每个入射角改变探测角分别为20°,30°,40°,50°;图7(a)、(b)为中绿涂层,测量条件与深绿涂层相同。

由图6、7可以看出,上述两种涂层BRF随波长变化的关系有相似之处。表现如下:(1)在400~680 nm波段,涂层的DOLP较大且随波长变化较小;在680~770 nm波段,涂层DOLP随波长增大而急剧较小;在770~1000 nm波段,涂层的DOLP较小且随波长变化较小。DOLP变化趋势与BRF的变化趋势恰好相反。(2)当探测角不变时,涂层线偏振度随着入射角增大而增大;当入射角不变时,涂层线偏振度随着探测角增大而增大。这是由于当入射角或探测角增大时,镜面反射作用逐渐增强,镜面反射会使偏振方向趋于一致而产生较大的偏振度。由菲涅尔公式易知,当以布儒斯特角附近产生镜面反射时,偏振度较大,而两种涂层的折射率约为1.39(布儒斯特角约为50°),从而导致了镜面反射角增大时,其偏振度增大。

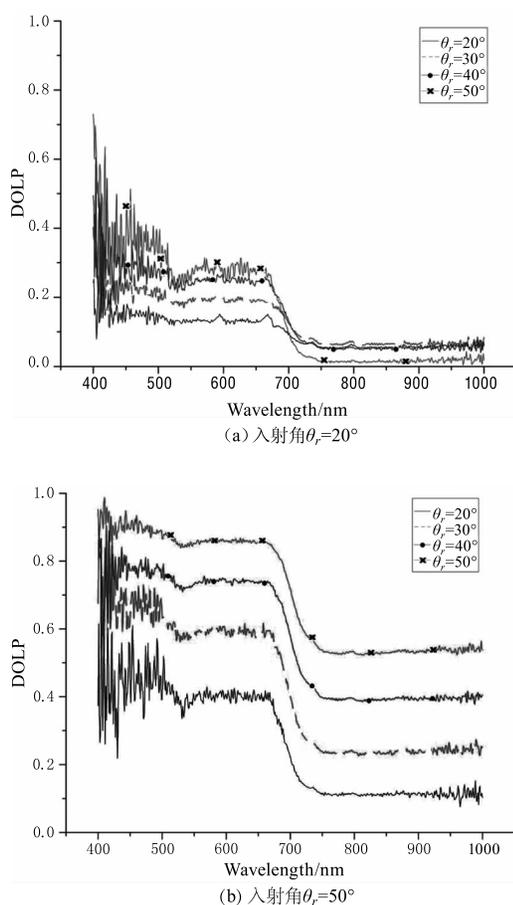
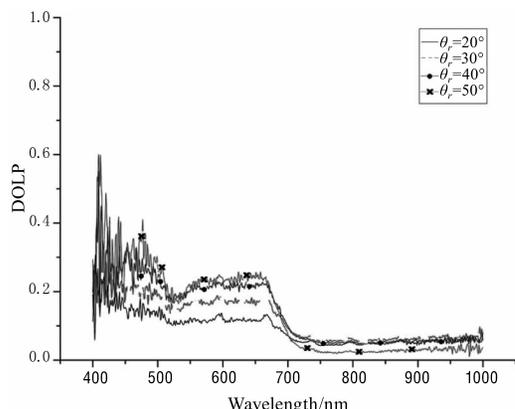
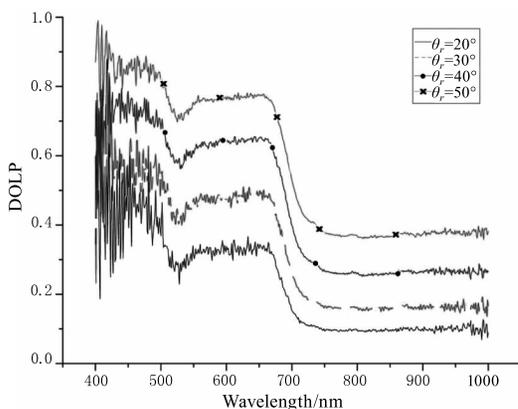


图6 不同入射角下,深绿涂层DOLP随波长变化关系
Fig. 6 The relationship between DOLP of the deep green coating and the wavelength under different detection angles



(a) 入射角 $\theta_i=20^\circ$



(b) 入射角 $\theta_i=50^\circ$

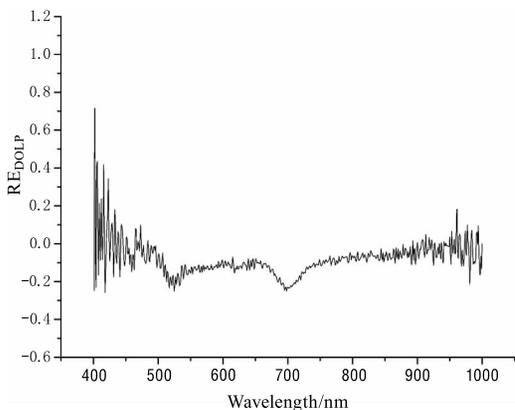
图7 不同入射角下,中绿涂层 DOLP 随波长变化关系

Fig.7 The relationship between DOLP of medium green coating and the wavelength under different detection angles

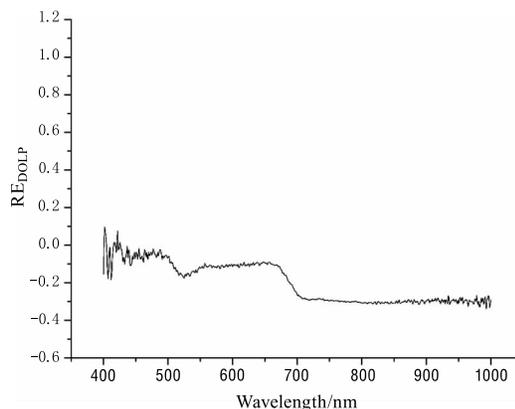
由图 6、7 可看出,两种涂层的 DOLP 存在差异,方法同式(4),通过比较两种涂层的相对误差(Relative Error)分析 DOLP 的差异,

$$RE_{DOLP} = \frac{D_{深绿} - D_{中绿}}{D_{深绿} + D_{中绿}} \quad (5)$$

式(5)中, D 为式(1) DOLP 值,对比结果如图 8(a)、(b),可以看出:深绿与中绿涂层 DOLP 的相对差值随着入射角的增大而减小。



(a) 入射角 $\theta_i=20^\circ$



(b) 入射角 $\theta_i=50^\circ$

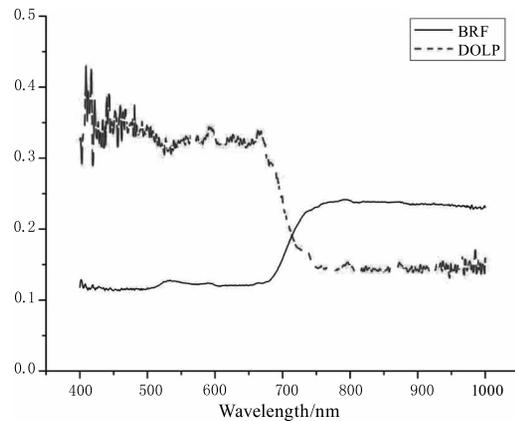
图8 不同入射角下,深绿与中绿涂层 DOLP 的相对误差随波长变化关系

Fig.8 The relationship between the relative error of DOLP in deep green and medium green coating with the wavelength under different detection angles

这是由于随着入射角增大,镜面反射作用增强,而两种涂层的镜面反射差异较小。因此,随着入射角的减少(即镜面反射的探测角减小)深绿与中绿涂层的差异增大。

3.3 涂层材料的 BRF 与 DOLP 的关系

图 9 为入射角与探测角均为 30° 时深绿与中绿涂层 BRF 与 DOLP 的对比。由图易知,在 $400 \sim 680 \text{ nm}$ 波段涂层 BRF 较小而 DOLP 较大,在 $770 \sim 1000 \text{ nm}$ 波段涂层 BRF 较大而 DOLP 较小,涂层的 BRF 与 DOLP 变化趋势具有负相关性。这是由于在 $400 \sim 680 \text{ nm}$ 波段,涂层吸收率较大,反射率较低,且反射主要以镜面反射为主,而镜面反射容易产生较大的偏振度;而在 $770 \sim 1000 \text{ nm}$ 波段,涂层吸收率较低,反射率较大,且反射主要以多重体散射为主,而体散射具有消偏作用,从而导致涂层线偏振度较低。



(a) 深绿涂层

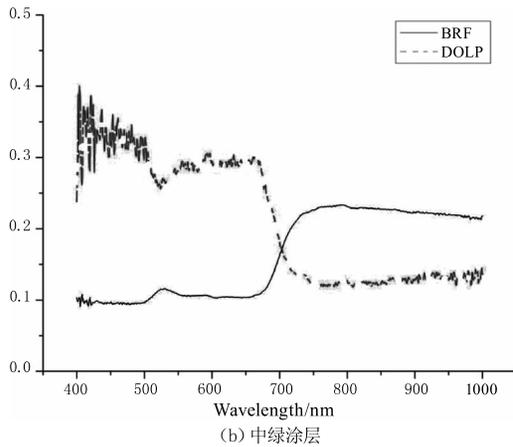


图9 入射角与探测角为 30° ,深绿、中绿涂层的BRF与DOLP随波长变化关系

Fig. 9 When the incident angle and detection angle is 30° , the relationship between BRF and DOLP in the deep green and medium green coating with the change of wavelength

4 结论

本文利用地物光谱仪结合多角度测量装置以及偏振测量装置在实验室环境下测量了两种绿色伪装涂层的反射特性以及偏振特性信息,可以得到以下具体结论。

(1)反射特性。当探测角为镜面反射角时(即探测角与入射角相同),涂层的BRF值最大,相反当探测角远离镜面反射角时,涂层的镜面反射降低,涂层BRF值减小。两种涂层反射特性区别是可见光波段深绿与中绿涂层BRF差异较明显,镜面反射的探测角较容易区分两种涂层。因此在对涂层进行光谱探测时,应尽量使探测角接近入射角。

(2)偏振特性。当探测角不变时,涂层线偏振度随着入射角增大而增大;当入射角不变时,涂层线偏振度随着探测角增大而增大,尽量采用大探测角能提高偏振度的信息量,采用较大的入射角或探测角;随着入射角的减少(或镜面反射的探测角减小)深绿与中绿涂层的DOLP差异增大。

(3)相互关系。伪装涂层的BRF与DOLP变化具有负相关性,在 $400 \sim 680 \text{ nm}$ 波段,BRF较小而DOLP较大,在 $770 \sim 1000 \text{ nm}$ 波段,BRF较大而DOLP较小,所以,采用偏振探测时必须考虑到波段等因素的影响。

参考文献:

- [1] ZHANG Chaoyang, CHENG Haifeng, CHEN Zhaohui, et al. Polarimetric contrast characteristics of camouflage target and background [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1354 - 1358. (in Chinese)
王启超, 时家明, 赵大鹏, 等. 伪装材料与背景的偏振对比特性 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1354 - 1358.
- [2] YAN Xiaoyan. Research on target recognition system based on fourier spectrum polarization imaging techniques [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)
闫晓燕. 基于傅里叶光谱偏振成像技术材料识别系统研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [3] YANG Tiejuan, ZHAO Yongqiang, PAN Quan, et al. A new measurement method of polarimetric spectral bidirectional reflectance distribution function [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2520 - 2524. (in Chinese)
杨铁恒, 赵永强, 潘泉, 等. 一种新的偏振光谱二向反射测量方法 [J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2520 - 2524.
- [4] LI Yingchao, WANG Chao, AN Yan et al. Research of laser and infrared polarization detection technology for underwater moving stealth target [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 209 - 213. (in Chinese)
李英超, 王超, 安岩, 等. 水下隐身动目标激光与偏振红外探测技术研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 209 - 213.
- [5] LING Jun, ZHANG Shuanqin, WU Jianye, et al. Measurement and experimental study of laser reflectance characteristics of camouflage coat [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0308005 - 1 - 0308005 - 6. (in Chinese)
凌军, 张拴勤, 吴坚业, 等. 伪装涂层激光反射特性检测与实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0308005 - 1 - 0308005 - 6.
- [6] ZHANG Chaoyang, CHENG Haifeng, CHEN Chaohui, et al. Geometrical optics solution for surface polarimetric scattering of camouflage materials [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1064 - 1067. (in Chinese)
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 伪装材料表面偏振散射的几何光学解 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6):

- 1064 – 1067.
- [7] ZHAO Yongqiang, PAN Quan, CHENG Yongmei. Imaging spectropolarimetric remote sensing and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
赵永强, 潘泉, 程永梅. 成像偏振光谱遥感与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] G Schaepman-Strub, M E Schaepman, et al. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103 (1): 27 – 42.
- [9] SONG Fangni, FAN Wenjie, LIU Qiang, et al. A method of acquiring BRDF of objects in the field [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11 (3): 296 – 302. (in Chinese)
宋芳妮, 范闻捷, 刘强, 等. 一种获取野外实测材料物 BRDF 的方法 [J]. 遥感学报, 2007, 11 (3): 296 – 302.
- [10] Schott John R. Fundamentals of polarimetric remote sensing [M]. Washington: SPIE, 2009.
- [11] II Shell, R James. Polarimetric remote sensing in the visible to near Infrared [D]. Wright State University, 2005.
- [12] SUN Zhongqiu, LI Shaoping, ZHAO Yunsheng, et al. Quantitative analysis of the polarized reflection factor of influence of oil film on water surface and their interaction [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31 (5): 1384 – 1387. (in Chinese)
孙仲秋, 李少平, 赵云升, 等. 水面油膜偏振反射影响因子及其交互作用定量分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31 (5): 1384 – 1387.