

## 伪装涂层的偏振散射及其影响因素研究

张朝阳, 陈朝辉, 程海峰, 郑文伟

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:**利用多波段偏振 CCD 相机在光学与红外波段测试伪装涂层的偏振散射特征,并提取其中的偏振信息,研究了测试条件对涂层材料散射偏振度的影响.结果表明,测试过程中的光照条件与探测波段对涂层散射偏振度的影响很大.涂层对入射光的散射作用可以分为面散射和体散射两部分.面散射使偏振度增大而体散射具有消偏振的作用;光线垂直入射时,体散射起主要作用,涂层具有较小的偏振度;随着入射角的增大,面散射在散射光中的比例也逐渐增大,成为涂层偏振度的主要影响因素.研究发现在偏振遥感中利用合适的角度和波段进行探测对复杂背景中伪装目标的识别具有重要意义.

**关键词:**伪装涂层;偏振散射;偏振遥感;面散射;体散射

**中图分类号:** O 436.3 **文献标识码:** A

### 0 引言

偏振遥感以散射光的偏振特征作为探测信息,可以减小杂乱背景的影响<sup>[1-3]</sup>,识别常规遥感手段所不能分辨的目标<sup>[4-6]</sup>.偏振散射特征研究是偏振遥感应用的基础,国内外各科研机构做了部分研究.美国空军研究室的 D. H. Goldstein<sup>[7]</sup>对涂覆了军用油漆的铝板作了偏振检测. G. Forsell<sup>[8]</sup>和 Y. Aron<sup>[9]</sup>分别对车辆和帐篷进行了野外成像实验,纽约大学的 W. G. Egan<sup>[10,11]</sup>测量了飞机以及军事伪装车辆的偏振散射特征.研究表明:利用偏振成像可以有效降低自然背景影响,提高在复杂环境中对伪装目标的识别精度.

利用偏振遥感识别伪装目标是目前国内外研究的热点,伪装目标可以模拟背景环境的光谱反射特征,利用常规遥感手段很难进行识别,而目标的偏振散射特征与自然背景有较大差异,可以作为探测信息进行目标识别.目标散射光的偏振特征受光照条件、探测条件和材料自身的物理化学性质等多种因素影响.笔者通过对戈壁型三色迷彩伪装涂层材料的偏振散射特征测试,在不同探测波段研究了光照条件对偏振散射特征的影响.

### 1 偏振遥感侦察原理

偏振遥感中常用 Stokes 参数法表示光的偏振

状态.在直角坐标系中,电磁波可以分为平行于入射面和垂直于入射面的两个分量,两个分量之间的相位角  $d$  决定了电磁波的偏振状态,定义如下:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = I \begin{pmatrix} 1 \\ P_L \cos 2\varphi \\ P_L \sin 2\varphi \\ P_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $I$  是电磁波强度;  $P_L$  是线偏振度;  $P_C$  是圆偏振度;  $\varphi$  是线偏振角度.通过 Stokes 矢量可以定义偏振度  $P$  偏振角  $\theta$ :

$$\begin{cases} P = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}}{I} \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (2)$$

### 2 测量仪器与方法

#### 2.1 测量仪器

采用多波段偏振 CCD 相机测量样品的偏振特征,如图 1 所示,该相机的工作波段为 443 ~ 865 nm,光谱带宽为 30 ~ 50 nm.样品表面的散射光通过一个棱镜分成三部分,经过偏振片之后被 CCD 接收.相机通过旋转波片的方式控制探测波段,通过线偏振片来调节入射光的偏振状态.偏振片的偏振方向与入射平面夹角为  $\alpha$  时,入射光强度可以表示为

收稿日期:2008-09-15;修订日期:2008-10-30

基金项目:国防科技大学科研计划项目(JC07-01-03).

作者简介:张朝阳(1980-),男,吉林榆树人,国防科技大学博士研究生,主要从事伪装涂层材料的性能研究;

E-mail: zhangcy\_nudt@163.com

$$I(\alpha) = 1/2(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha) \quad (3)$$

将3个偏振片的偏振方向置于 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ ，测试3个偏振方向的光强度，计算 Stokes 矢量中的  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  3 个参数，进而求出偏振度  $P$ 。由于绝大部分地物的圆偏振分量 ( $V$ ) 非常微弱而被忽略。

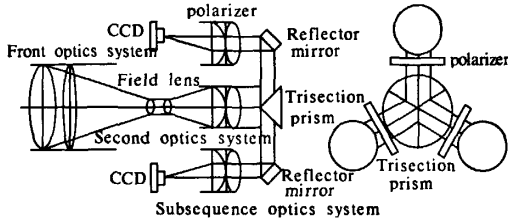


图1 多波段偏振 CCD 相机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of Multispectral Polarization CCD Camera

## 2.2 测试方法

选取国内某戈壁型伪装涂料，其3种迷彩颜色分别为草绿色、砂土色、褐土色。将伪装涂料均匀喷涂在光滑铝板表面，形成迷彩斑块。实验中，将喷涂后的铝板平铺在草地背景中，偏振相机位于入射面内，在不同的阳光入射角下测试样品的偏振状态，如图2所示，测试过程中保持入射角 ( $i$ ) 和探测角 ( $r$ ) 相等，通过调节 CCD 相机的位置和滤波片，研究不同入射角和不同探测波段下样品的偏振散射特征变化。

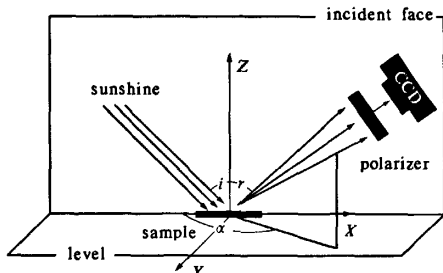


图2 偏振测量示意图

Fig.2 The sketch map of polarization measurement

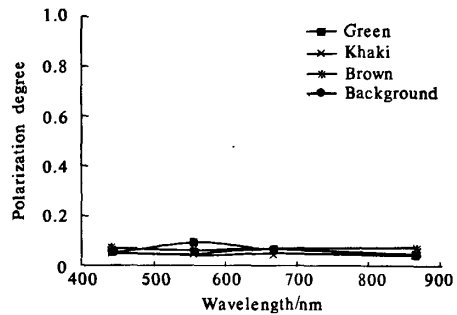
## 3 结果分析

目标的双向散射分布受表面形态和几何形状的影响很大。一般来说，散射光强度主要分布在以镜面反射方向为轴的椭圆形区域内。与散射强度分布类似，在以往的关于目标表面偏振散射研究<sup>[12-13]</sup>中发现，对于表面比较光滑的平面材料，偏振特征受测试方位角 ( $\alpha$ ) 的影响很大，在方位角接近  $180^\circ$  方向时，偏振散射特征差异显著；当方位角逐渐偏离时，偏振散射特征差异逐渐减小。因此笔者主要研究方位角  $180^\circ$  时伪装涂层的偏

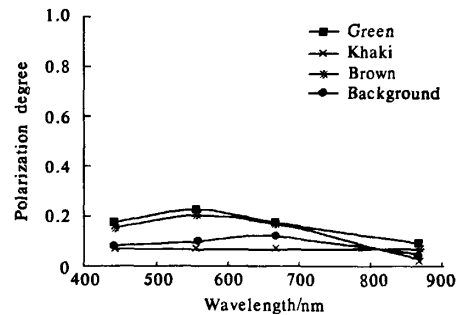
振散射特征。

伪装涂层可以模拟背景的光谱反射特征，常规遥感难以发现。但在偏振遥感中，伪装涂层具有较大的偏振度，与背景差别很大。如图3所示，样品散射光的偏振度随着入射角的增大而增大；在可见光波段，涂层的偏振度较大，随着探测波长的增加，偏振度呈减小趋势；同种测试条件下，深色涂层具有较大的偏振度。自然背景（如泥土、植被）的辐射或散射光的偏振度比较小，通常在 0.1 以下，在偏振图像处理过程中很容易消除背景的杂乱信号，分辨出目标信息。

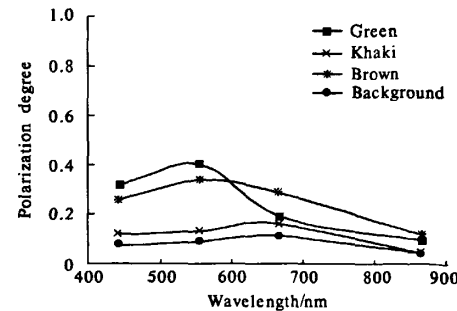
涂层由树脂和颜料、填料等组成，是一个多相的体系。光与涂层的作用可以分为两部分，面散射和体散射，面散射发生在涂层表面，面散射光的偏振度主要与涂层表面形态和折射率有关；入射光进入涂层内部经过各种散射作用后从表面再射出回空气中的部分即为体散射光，体散射发生在涂



(a) Angle of incidence/ $22.5^\circ$



(b) Angle of incidence/ $37.5^\circ$



(c) Angle of incidence/ $52.5^\circ$

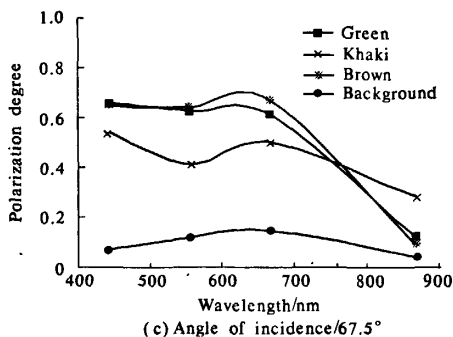


图3 方位角  $180^\circ$  时伪装涂层的偏振光谱  
Fig.3 Polarimetric spectrum of camouflage coatings at azimuth of  $180^\circ$

层内部,体散射过程中光束受到涂层内部的颜料、填料、气孔等散射体的多次散射作用,其偏振状态与散射体的颜色、粒径、折射率和分布状态密切相关。一般来说,体散射具有较强的随机性,能够消除光的方向性偏振散射,从而产生消偏振作用;两种散射作用满足 Fresnel 定律:

$$\begin{cases} R_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_d}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_d} \\ R_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_d}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_d} \\ T_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_d} \\ T_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_d} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $n_1, n_2$  为散射平面两侧介质的折射率;  $\theta_i, \theta_d$  为入射角和折射角;  $R_p, T_p$  ( $R_s, T_s$ ) 分别代表平行于(垂直于)入射面方向上的反射振幅比和透射振幅比。假设涂层内部的偏振散射在各个方向平均分布,利用 Fresnel 定律可以建立简单模型,模拟计算涂层表面两侧面散射光和体散射光的偏振反射比和透射比如图4所示。从图中可以看出:垂直入射时体散射光的偏振反射比和透射比很大并随着入射角的增加而逐渐减小;面散射光的偏振反射比和透射比较小并随着入射角的增加而增大。入射角等于布儒斯特角时,平行于入射面的方向上的偏振光发生相位偏转。利用下式可以进一步计算散射过程中的偏振度。

$$\begin{cases} P_r = (|R_s|^2 - |R_p|^2) / (|R_s|^2 + |R_p|^2) \\ P_t = (|T_s|^2 - |T_p|^2) / (|T_s|^2 + |T_p|^2) \end{cases} \quad (5)$$

$P_r$  是面散射光的偏振度,  $P_t$  是透射光的偏振度。从图中可以看出,面散射光的偏振度在垂直入射时为零,随着入射角的增加,其偏振度逐渐增

大,这与实验的结果基本一致。在入射角于布儒斯特角时面散射光的偏振度达到最大值,之后逐渐减小。涂层透射光的偏振度一直保持较低值,随着入射角的增加而缓慢增大。透射光进入涂层内部以后受到各种散射体的随机散射作用,其偏振方向的分布在各个方向趋于平均,因此体散射光的偏振度很小。涂层材料散射光的偏振度是面散射和体散射综合作用的结果,当入射角较小时,体散射起主要作用,此时偏振度较小;入射角增大时,面散射对偏振度影响也逐渐变大,使涂层的散射偏振度呈现增大趋势。

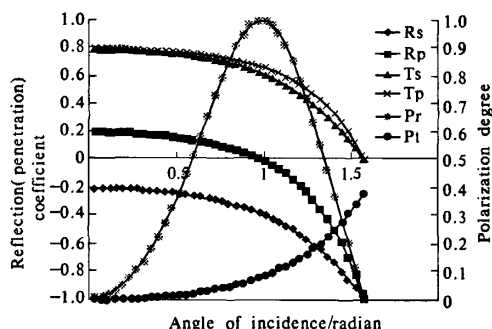


图4 散射的二向偏振反射比和偏振度计算结果  
Fig.4 Calculation of bidirectional polarimetric reflectance ratio and polarization degree of scattering

## 4 结论

作者根据伪装涂层材料二向反射分布的特点,研究了方位角为  $180^\circ$  时涂层的偏振散射特性。实验表明,伪装涂层散射光的偏振度随着入射角的增大而增大;随着探测波长的增大,偏振度逐渐减小;同种测试条件下,低反射率涂层具有较大的偏振度。伪装涂层材料对入射光的散射可以分为面散射和体散射两种作用,面散射作用使散射光产生较大偏振度,而体散射具有较强的消偏振效应。一般来说,草地背景散射光由于随机散射作用使其偏振方向随机分布,偏振度一直保持较低值。相对于草地背景,伪装涂层的偏振度较大且随着测试条件不断变化,所以在偏振遥感识别过程中通过选择合适的探测角度和波段,就很容易消除杂乱背景的影响,分辨出其中的伪装目标。

## 参考文献:

- [1] CREMER F, JONG W D, SCHUTTER K. Infrared polarization measurements of surface and buried anti-personnel landmines [A]. Abinask C, Dubey Detection and Remediation Technologies for Mines and

- Minelike Targets VI [C]. USA; SPIE - 4394, 2001, 164 - 175.
- [2] WOLFF L B. Applications of polarization camera technology [J]. IEEE, 1994, 10(5): 30 - 38.
- [3] VANDERBILT V C, GRANT L. Polarization of light scattered by vegetation [J]. Proc. IEEE - 73, 1985: 1012 - 1024.
- [4] BEN-DOR B. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [J]. Proc. SPIE - 1971. 1992: 68 - 76.
- [5] WEIDEMANN A, FOURNIER G R, Forand L, et al. In harbor underwater threat detection/identification using active imaging. Photonics for Port and Harbor Security [J]. Proc. SPIE - 5780, 2005: 59 - 70.
- [6] BRUN G L, JEUNE B L, CARIOU J, et al. Analysis of polarization signature of immersed targets [J]. Polarization and Remote Sensing. SPIE - 1747, 1992, 128 - 139.
- [7] GOLDSTEIN D H. Polarimetric characterization of federal standard paints [J]. Proc. SPIE - 4133, 2000: 112 - 123.
- [8] FORSELL G, KARLSSON E H. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres [J]. SPIE - 5075. 2003: 246 - 258.
- [9] ARON Y, GRONAU Y. Polarization in the LWIR [J]. Proc. SPIE - 5783. 2005: 653 - 661.
- [10] EGAN W G, DUGGIN M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization [J]. Proc. SPIE - 4133, 2000: 172 - 178.
- [11] EGAN W G, DUGGIN M J. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft [J]. Proc. SPIE - 4481, 2002: 188 - 194.
- [12] 金 伦, 张洪波, 赵云升. 地物偏振反射数据的获取与数据库的建立 [J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2000, 32(4): 98 - 102.
- [13] 宋开山, 张 柏, 赵云升. 东北主要高大落叶乔木单叶的偏振特性研究 [J]. 东北师大学: 报自然科学版, 2004, 36(1): 88 - 94.

### Study on Polarimetric Scattering of Camouflage Coatings

ZHANG Chao - yang, CHEN Zhao - hui, CHENG Hai - feng, ZHENG Wen - wei

(Key Lab of Advanced Ceramic Fibers and Composites of School of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The multispectral polarization CCD camera was used to gain the polarimetric characteristics of camouflage coatings in visible and infrared wave band, and the polarimetric information was got. The influences of testing conditions on the polarization degree were studied. The results indicate that the testing illumination and wavelength influence the polarization degree of camouflage coatings greatly. The action between incident light and coatings can be divided into two parts, surface scattering and volume scattering. Surface scattering increases the polarization degree while volume scattering decreases polarization degree of coatings. When light shines perpendicularly, volume scattering act the main function in scattering and polarization degree of coatings are relatively lower. As the incidence angle increases, the function of surface scattering rises and becomes the main influence factor of polarization degree. The study indicates that it is very important to use appropriate incidence angle and wavelength in detection of camouflage targets in complex backgrounds with polarization remote sensing.

**Key words:** camouflage coatings; polarimetric scattering; polarization remote sensing; surface scattering; volume scattering