

〈材料与器件〉

飞机材料及其伪装涂层的热红外偏振特性研究

寻丽娜^{1,2}, 薛模根¹, 曾献芳³, 王峰¹, 谢琛¹

(1.偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2.安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601;
3.安徽水利水电职业技术学院 电子信息工程系, 安徽 合肥 231603)

摘要: 钛合金和碳纤维材料因其优良的性能, 在飞机的结构材料中被大量使用。针对飞机红外偏振探测的需求, 以钛合金板、碳纤维板以及喷涂红外伪装涂料的上述两种目标板为实验样品, 开展了红外偏振光谱探测实验, 结果表明, 在 8~14 μm 热红外波段 4 种材料样本的偏振度随观测角度的增大而增大、随波长的变化无明显规律, 普通红外伪装涂料无法提供偏振伪装。

关键词: 红外偏振; 伪装涂层; 飞机检测

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)09-0783-05

Research of Infrared Polarization Characteristics of Aircraft Materials and Its Camouflage Coating

XUN Lina^{1,2}, XUE Mogen¹, ZENG Xianfang³, WANG Feng¹, XIE Chen¹

(1.Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei, 230031, China;

2.College of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, 230601, China;

3.Department of Electronics and Information Engineering, Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei, 231603, China)

Abstract: Titanic alloy and carbon fiber are widely used in aircraft because of their excellent characteristics. Taking the titanic alloy plate, carbon fiber plate and the same plates coated with camouflage coating respectively as the target plates, the infrared polarization experiments were conducted in order to detect the aircraft by using infrared polarization technology. The experiment results show that the polarization degree of plates increases with the viewing angle, but without obvious changes with the wavelength in 8~14 μm infrared wave band. Infrared camouflage coatings cannot provide the stealthy ability in infrared polarization detection technology.

Key words: infrared polarization, camouflage coating, aircraft detection

0 引言

随着偏振理论研究的进展和偏振仪器性能的提高, 红外偏振技术因其在目标探测中的优势, 在军事应用研究中越来越多地受到人们的重视^[1-2]。纽约大学的 Egan 利用 DCS460 型 Kodak 彩色红外相机, 获取了静止的 C-130 飞机和 B-52 轰炸机的红外偏振图像, 研究了飞机各个部位的红外偏振特征, 指出在适当的观测条件下, 红外偏振图像中飞机和天空背景的对比度较大, 相比于红外强度图像更利于飞机的探测^[3-4]。

美国空军实验室 (AFRL) 针对两种不同材质的小型遥控飞机模型开展了对空偏振成像目标跟踪试验, 获取了飞机模型在不同背景 (天空、树林、跑道和草地) 下的长波红外偏振图像, 实验结果表明: 红外偏振成像相比于红外成像和真彩色成像更能提高目标的探测性能^[5]。

随着飞机速度的不断提升, 对飞机的机体材料的要求也越来越高。目前, 飞机上常用的结构材料除铝合金外, 还有钛合金和碳纤维材料。钛合金具有比重小、强度大、耐腐蚀性好、耐热性高等特点, 在飞机

收稿日期: 2016-01-03; 修订日期: 2016-03-10.

作者简介: 寻丽娜 (1981-), 女, 山东金乡人, 博士, 讲师, 主要从事偏振探测、遥感信息处理等方面的研究。E-mail: xunlina@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41176158, 41406109); 中国博士后科学基金 (2015M582826); 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室研究资助项目。

发动机、骨架、蒙皮、起落架等方面应用越来越广泛,例如美国 SR-71 高空高速侦察机,钛占飞机结构重量的 93%,号称“全钛”飞机。碳纤维是一种力学性能优异的新型纤维材料,它兼具碳材料的强抗拉力和纤维的柔软可加工性,不溶不胀,具有良好的耐腐蚀性,广泛应用在火箭、导弹和高速飞行器等航空航天领域,在现役军用飞机上也被大量使用,例如美国的 F-22 战斗机、B-2 隐身轰炸机、“全球鹰”无人机等。

然而,在目标偏振特性的研究中,多集中在铝板、钢板这些金属材料^[6-9]。本文针对飞机红外偏振探测的需要,对钛合金板、碳纤维板以及喷涂红外伪装涂料的上述两种目标板进行了红外偏振光谱探测实验,分析对比了其在 8~14 μm 波段的热红外偏振光谱特性,以期了解飞机的表面红外偏振特性,为飞机的红外偏振目标检测提供实验基础和理论依据。

1 偏振测量原理

目标的偏振特性是指光束被目标透射或反射时偏振态的改变,常用 Stokes 参量和 Muller 矩阵来描述。Stokes 参量的定义如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_{\text{RCP}} - I_{\text{LCP}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:下标 RCP 表示右旋圆偏振;下标 LCP 表示左旋圆偏振; S_0 与入射光强有关; S_1 与 0° 和 90° 方向的线偏振有关; S_2 与 45° 和 135° 方向的线偏振有关; S_3 与左右旋的圆偏振有关。

由于自然界中目标的圆偏振分量很小,所以通常假设 $S_3=0$ 。透射轴与 x 轴成 θ 夹角的理想线偏振器的 Muller 矩阵为:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则从该偏振器出射光波的 Stokes 参量为:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

得到出射光强表达式为:

$$I_\theta = S'_0 = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta) \quad (4)$$

在实际测量中可以选取 3 个方向的线偏振光(例如 0° 、 60° 和 120°),测量其出射光强 I_{0° 、 I_{60° 和 I_{120° 。根据式(4)解算得到目标的 Stokes 参量 S_0 、 S_1 和 S_2 ,如下式:

$$\begin{cases} S_0 = \frac{2}{3} (I_{0^\circ} + I_{60^\circ} + I_{120^\circ}) \\ S_1 = \frac{2}{3} (2I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{120^\circ}) \\ S_2 = \frac{2\sqrt{3}}{3} (I_{60^\circ} - I_{120^\circ}) \end{cases} \quad (5)$$

进而代入式(6)求得线偏振度 DOLP 和偏振角 α :

$$\begin{cases} \text{DOLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \\ \alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \end{cases} \quad (6)$$

2 实验测量方法

2.1 测量仪器

实验中使用的红外偏振光谱测量系统由红外傅里叶光谱仪、红外偏振片、转动平台及数据采集与控制系统等部分组成,如图 1 所示。红外偏振光谱数据测量电动平台是系统的主要电源与载体,平台上稳固放置了样品转动平台、红外偏振片、傅里叶红外光谱仪。样品转动平台和红外偏振片均由电动平台控制,可旋转至任意观测角度和任意偏振方向。红外偏振光谱数据采集与控制系统同时与光谱仪及电动平台相连,实现系统控制与数据采集。其中,傅里叶红外光谱仪的光谱范围 $2 \sim 16 \mu\text{m}$,光谱分辨率 $4 \sim 16 \text{ cm}^{-1}$;

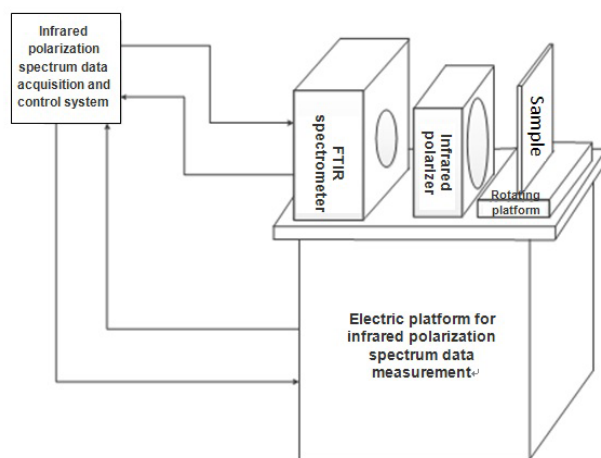


图 1 红外偏振光谱测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of infrared polarization spectrum measurement system

红外偏振片为 ZnSe 衬底的金属线栅偏振片,消光比

600:1。

2.2 实验样品的制备

为了研究飞机主要材料的热红外偏振特性，实验选用钛合金和碳纤维制作了目标板，尺寸有两种规格，分别为 $250\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。对钛合金板抛光后喷涂红外伪装涂料，碳纤维板直接喷涂红外伪装涂料，加上没有伪装涂料的两种原板共得到4块实验用目标板。图2是目标板的实物照片，从①号板到④号板依次为碳纤维板（Car板）、碳纤维涂层板（Car-P板）、钛合金板（Ti板）和钛合金涂层板（Ti-P板）。

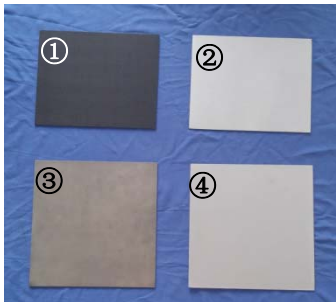


图2 目标板实物照片

Fig.2 The photo of target plates

2.3 实验步骤

实验中将目标板通过机械固定装置竖直固定在样品转动平台上，烤灯放置在目标板背后对目标板加热，待目标表面温度稳定后进行测量。样品转动平台

可携样品任意角度旋转，观测角定义为观测系统和目标板表面法线的夹角。

3 实验和结果讨论

3.1 偏振度随波长变化的分析

图3为钛合金板、钛合金涂层板、碳纤维板与碳纤维涂层板在观测角 0° 、 30° 、 60° 时 $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段的偏振度曲线图。由图可以看出，钛合金板和碳纤维板的偏振度随波长的变化不显著，两种喷涂红外伪装涂料的目标板（Ti-P板和Car-P板）的偏振度随波长的增加有轻微逐渐减小的趋势。但总体来说，钛合金和碳纤维材料的偏振度受波长的影响不大，在 $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段内没有明显的有利于探测用的特征波段或特征波形。

3.2 偏振度随观测角度变化的分析

图4是钛合金板、钛合金涂层板、碳纤维板与碳纤维涂层板在 $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段的偏振光谱积分值随观测角度的变化。可以发现，随着观测角度的增加，目标板的偏振度也都相应增加，且在观测角度较大时偏振度增加的更快。这一特征在图3中也有所体现，由图3可以看出，4个目标板在绝大多数的波段上均有观测角 0° 时的偏振度小于 30° 时的偏振度，观测角 30° 时的偏振度小于 60° 时的偏振度。这一结论和不少红外偏振模型^[10-11]的理论结果相符合，自发辐射的偏振度随观测角度的增加而增加。

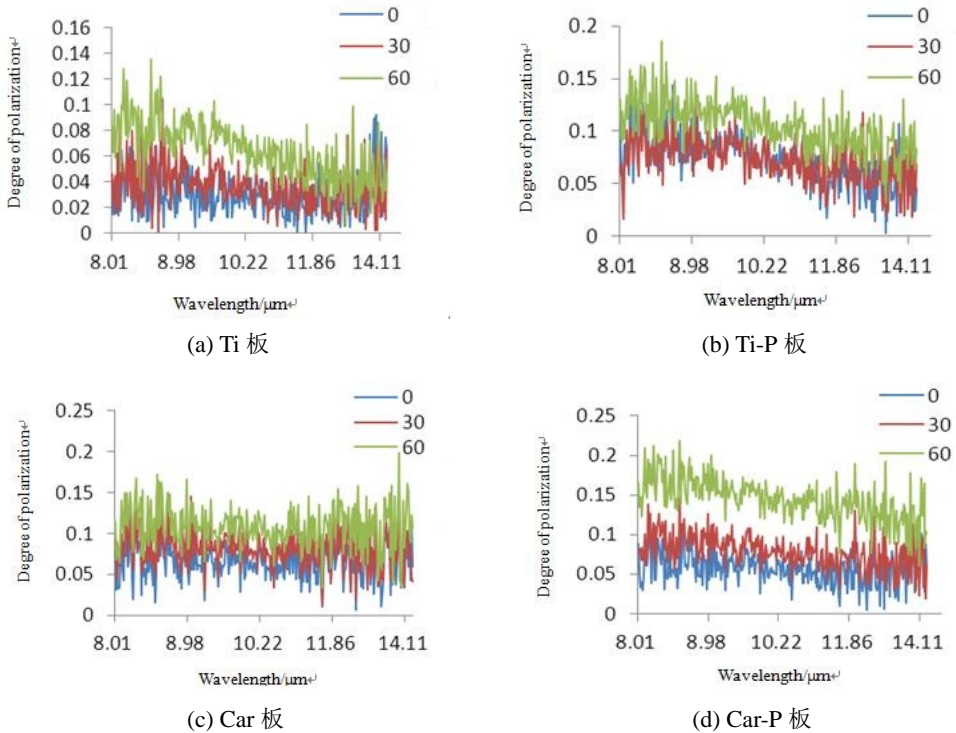


图3 不同波段下目标板的红外光谱偏振度曲线

Fig.3 The polarization degree of target plates at different wavelength

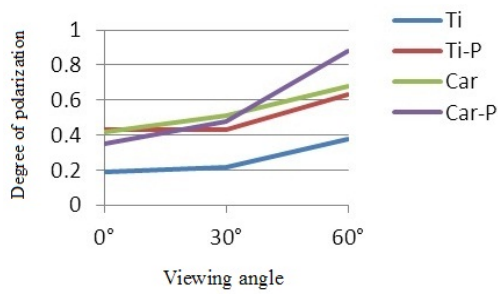


图4 不同观测角度下目标板的偏振度值

Fig.4 The polarization degree of target plates at different viewing angles

3.3 不同材料种类偏振度的分析

图5是0°、30°、60°观测角度时，钛合金板、钛合金涂层板、碳纤维板与碳纤维涂层板在8~14 μm的偏振度曲线图。由图可以看出，各观测角度下钛合金板的偏振度都低于其他3个目标板，因此，钛合金

材料相对于其他3种材料在红外偏振探测中不易被发现。由图还可以看出，0°、30°和60°观测角度时，钛合金涂层板的偏振度大于钛合金板；60°观测角度时碳纤维涂层板的偏振度大于碳纤维板，0°和30°观测角度时碳纤维涂层板的偏振度和碳纤维板相差不大。总之，红外伪装涂层板的偏振度都大于等于没有涂层的原板。目标板的这一特性在伪装目标识别中具有重要的意义，因为目前的红外伪装是为了降低目标的热辐射亮温值，减小其在红外图像中的亮度，达到“隐身”的效果，但这种伪装方式对目标的热红外偏振度没有影响，甚至某种程度上反而提高了目标的偏振度，所以目前对抗红外探测技术的红外伪装涂层对红外偏振探测是无效的，无法达到“隐身”的效果。因此，红外偏振探测技术相比于红外探测技术，对伪装目标的检测更具优势。

更进一步分析，该实验中涂层板比原板的偏振度

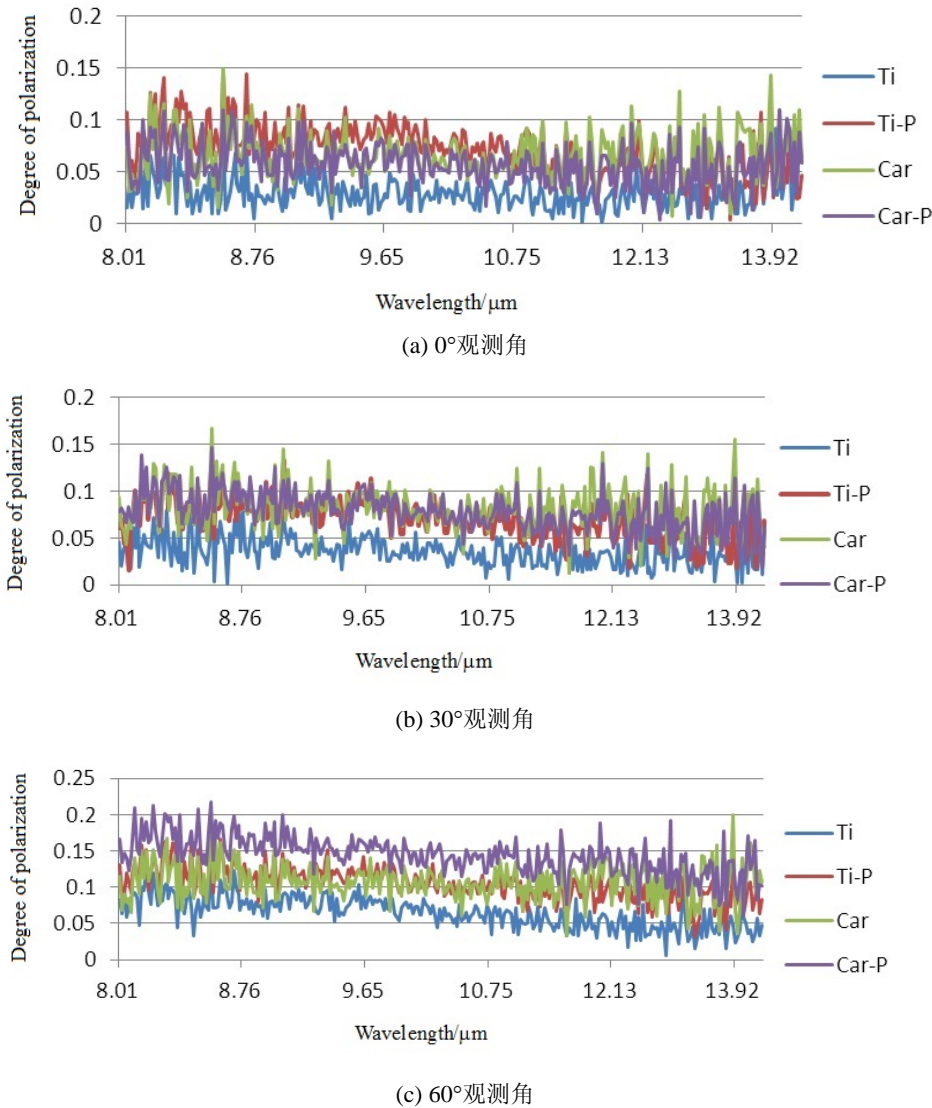


图5 观测角为0°、30°、60°时不同目标板的红外光谱偏振度曲线

Fig.5 Polarization degree of different target plates at a viewing angle of 0°, 30°, 60°

较大主要是因为涂层板的粗糙度比原板小而造成的。一般地,目标表面越光滑,偏振度越大。从这方面而言,在喷涂伪装涂料时适当增加涂层的粗糙度,有利于目标的红外偏振伪装。

4 结论

综上所述,目标板的热红外偏振特性和观测角度、目标材质以及表面处理方式都有着密切的关系。通过对实验数据的分析可以得出以下结论:

1) 没有涂层的钛合金板和碳纤维板板的偏振度随波长的变化不显著,观测角度对偏振度的影响更大。红外伪装涂层的偏振度随波长的增加有轻微逐渐降低的趋势。

2) 目前针对红外探测能够有效“隐身”的红外伪装涂层,并不能降低目标的偏振度,在红外偏振探测中起不到“隐身”的效果。

参考文献:

- [1] 段锦,付强,莫春和,等.国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, **36**(3): 190-195.
DUAN Jin, FU Qiang, MO Chunhe, et al. Review of polarization imaging technology for international military application(I)[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(3): 190-195.
- [2] 莫春和,段锦,付强,等.国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. 红外技术, 2014, **36**(4): 265-270.
MO Chunhe, DUAN Jin, FU Qiang, et al. Review of polarization imaging technology for international military application(II)[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(4): 265-270.
- [3] Egan W G, Duggin M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization[C]//*Proc. of SPIE*, 2000, **4133**: 172-178.
- [4] Egan W G, Duggin M J. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft[C]//*Proc. of SPIE*, 2002, **4481**: 188-194.
- [5] Bradley M R, Daniel A L, Robert T M, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8160**: 1-13.
- [6] Goldstein D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]//*Proc. of SPIE*, 2000, **4133**: 112-123.
- [7] Forssell G, Karlsson E H. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and the denial of surfaces covered with cenospheres[C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **5075**: 246-258.
- [8] 汪震. 金属表面热红外偏振特性的模型研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 707-711.
WANG Zhen. Model of polarized thermal emission from rough metal surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 707-711.
- [9] 郭泽成,邢晨,王峰,等.伪装涂料红外偏振特性的实验研究[J]. 红外, 2010, **31**(5): 8-11.
GUO Zecheng, XING Chen, WANG Feng, et al. Experimental study of infrared polarization characteristics of camouflage dope[J]. *Infrared*, 2010, **31**(5): 8-11.
- [10] 陈伟力,王淑华,金伟其,等.基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2014, **33**(10): 507-514.
CHEN Weili, WANG Shuhua, JIN Weiqi, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, **33**(10): 507-514.
- [11] 牛继勇,李范鸣,马利祥,等.热红外自发辐射偏振特性分析以及验证实验[J]. 光电工程, 2014, **41**(2): 88-93.
NIU Jiyong, LI Fanming, MA Lixiang, et al. The theoretical analysis of thermal infrared emission polarization and experimental verification[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(2): 88-93.