

〈制导与对抗〉

## 伪装涂层红外偏振辐射特性实验研究

谢琛<sup>1,2</sup>, 王峰<sup>1,2</sup>

(1. 偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 陆军军官学院光电技术与系统实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 伪装涂层的红外辐射强度信息较弱, 但红外偏振信息相对较强, 以钛合金为基底的伪装涂层样品为实验对象, 研究了其红外偏振光谱特性及方向特性, 设计实现了伪装涂层钛合金人造目标的红外偏振成像检测实验, 实验结果表明, 利用红外偏振成像检测技术能够实现对伪装涂层金属人造目标的有效检测。

**关键词:** 伪装涂层; 人造目标; 红外偏振; 偏振特性; 成像检测

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)10-0890-05

## Research on Infrared Polarization Radiation Properties Experiment of Camouflage Coating

XIE Chen<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>

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

2. Laboratory of Electro & Optical Technology and System, Army Officer Academy PLA, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The infrared radiation intensity information of camouflage coating is weak, but the infrared polarization information of which is relatively strong. The experiment object is camouflage coating sample of titanium alloy base, and its infrared polarization spectrum properties and orientation properties have been studied. Besides, the infrared polarization imaging detection experiment of camouflage coating titanium alloy artificial target has been designed and realized. The experiment result shows that infrared polarization imaging detection technology can realize the effective detection of camouflage coating metal artificial target and has a high application value.

**Key words:** camouflage coating, artificial target, infrared polarization, polarization properties, imaging detection

### 0 引言

近年来, 金属目标的红外偏振检测技术发展迅速, 研究表明, 利用金属目标在 8~12  $\mu\text{m}$  热红外波段的偏振信息, 能够有效区分出人造金属目标与自然背景的特征差异, 增加目标与背景对比度, 从而实现人造金属目标的有效检测<sup>[1-2]</sup>。

物体的红外偏振特性决定于物体的材质、表面粗糙度等理化特征, 是影响物体红外偏振信息强弱的主要因素<sup>[3]</sup>。目前, 国内外对红外偏振特性研究主要集中在光谱特性、方向特性 2 个方面, 研究的对象主要

包括金属材质的人造目标以及各种自然背景。由于光谱特性和方向特性是影响金属目标红外偏振检测效果的重要因素, 因此具有十分重要的意义与应用价值<sup>[4]</sup>。本文主要进行了钛合金板样品及钛合金涂层样品的红外偏振光谱特性和方向特性实验研究, 并开展了钛合金涂层飞机模型的成像检测实验, 验证了利用红外偏振手段检测金属目标的有效性和可行性。

### 1 红外辐射的偏振表述方法

红外辐射的偏振信息可以用一般的 Stocks 矢量法表述, 该矢量包含  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  四个参量, 它们

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-05-28.

作者简介: 谢琛 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事红外偏振成像探测方面研究。E-mail: 994403568@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 41406109; 国家自然科学基金项目, 编号: 41176158.

的定义为：

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{rc} + I_{lc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $I_0$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{45}$ 和 $I_{135}$ 依次表示 $0^\circ$ 偏振方向上、 $90^\circ$ 偏振方向上、 $45^\circ$ 偏振方向上和 $135^\circ$ 偏振方向上的偏振分量； $I_{lc}$ 与 $I_{rc}$ 依次表示左旋与右旋圆偏振分量<sup>[5]</sup>。

另外，还有2个重要的偏振分量用于表征偏振信息，分别是偏振度（Degree of Polarization, DoP）和偏振角 $\theta$ ，偏振度 DoP 和偏振角 $\theta$ 可以由 Stocks 矢量中的参量计算出来<sup>[6]</sup>：

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan^{-1} \left( \frac{U}{Q} \right) \quad (3)$$

然而，在很多实际情况下圆偏振分量相对于系统误差来说一般都很小，可以忽略不计，因此可以用线偏振度（Degree of Linear Polarization, DoLP）来表示目标的偏振度<sup>[7]</sup>：

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (4)$$

除此之外，还可由以上偏振参量计算出电矢量在 $x$ 轴方向上的分量 $E_x$ 、在 $y$ 轴方向上的分量 $E_y$ 以及二者之差 $\Delta E$ 。根据线偏振度和 Stocks 矢量的定义，令 $P = \text{DoLP}$ ，对部分偏振光有：

$$\begin{cases} E_x^2 + E_y^2 = I \cdot P \\ E_x^2 - E_y^2 = Q \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)解得：

$$\begin{cases} E_x = \sqrt{IP + Q} \\ E_y = \sqrt{IP - Q} \\ \Delta E = E_x - E_y \end{cases} \quad (6)$$

其中，忽略了 $E_x$ 和 $E_y$ 的 $2^{1/2}/2$ 的系数，因其不影响 $E_x$ 、 $E_y$ 参量图像的对比度。

## 2 红外偏振光谱特性实验研究

### 2.1 实验准备

钛合金具有比重小、强度大等特点，在工业上的应用越来越广泛。具有低发射率的红外伪装涂料能够有效降低人造目标表面的红外发射率，减小与自然背景的红外辐射强度对比度，从而降低红外探测系统对

人造目标的探测能力。

因此，制备了表面抛光的钛合金板材料样品（Ti）及涂有红外伪装涂料的钛合金板材料样品（Ti-Pretend），如图1所示，样品厚度0.2 cm，长和宽均为25 cm，金属表面经过了抛光处理。

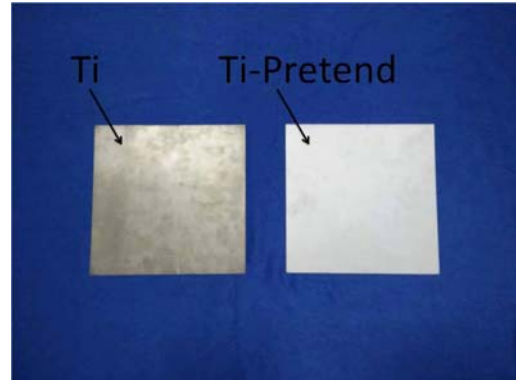


图1 表面抛光的钛合金板材料样品（左）与涂有红外伪装涂料的钛合金板材料样品（右）

Fig.1 The polished titanium alloy sample (left) and the pretended titanium alloy sample (right)

为了获取样品的红外偏振光谱数据，采用了将红外傅里叶光谱仪（Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR Spectrometer）与红外偏振片相结合的方法。其中，红外傅里叶光谱仪是由美国 D&P 电子仪器公司生产的便携式傅里叶红外光谱仪（TurboFT 102F），该仪器由一个辐射传感器和笔记本电脑组成，探测波段从 $2.5 \sim 16 \mu\text{m}$ ，精度为4波数，可全方位多角度精确测量物体的辐射亮度和亮温；所使用的偏振片为金属线栅偏振片，型号为GS57055，ZnSe 基质，有效通光口径为50 mm，光谱范围 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ ，消光比为600:1，能够高效透过红外辐射光强，减少红外辐射能量损失，提高偏振信息获取精度。

### 2.2 实验步骤

根据红外偏振理论可知，红外偏振光谱数据采集系统至少要获取目标样品在 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ 三个偏振方向上的光谱数据，再由此计算出 Stocks 矢量各个参量的光谱及其他红外偏振参量光谱，计算公式为：

$$\begin{cases} I_{in} = \frac{2}{3} (I_{out}(0^\circ) + I_{out}(60^\circ) + I_{out}(120^\circ)) \\ Q_{in} = \frac{2}{3} (2I_{out}(0^\circ) - I_{out}(60^\circ) - I_{out}(120^\circ)) \\ U_{in} = \frac{2\sqrt{3}}{3} (I_{out}(60^\circ) - I_{out}(120^\circ)) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $I_{out}(0^\circ)$ 、 $I_{out}(60^\circ)$ 和 $I_{out}(120^\circ)$ 分别为红外线偏振片与参考坐标轴夹角为 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ 时的出射辐射强度值； $I_{in}$ 、 $Q_{in}$ 和 $U_{in}$ 表示进入系统的红外偏振 Stocks

矢量中的参量,在实际过程中忽略 Stocks 矢量中圆偏振分量的影响。

基于以上理论,设计实验步骤如下:

1) 选择室内低温环境搭建红外偏振光谱测量系统,将系统各部分固定在光学平台上,将红外傅里叶光谱仪制冷剂液氮灌满,开机预热 10 min 使其工作在稳定状态;

2) 使用黑体进行定标。连接黑体并调整黑体的温度,包括一个低于环境温度的温度和一个略高于环境温度的温度(本次测量环境温度 15℃,定标低温 5℃,定标高温 25℃),将黑体置与探测器入口处获取原始强度及 0°、60°和 120°偏振方向上的黑体校正数据。

3) 将钛合金样品通过机械固定装置固定在样品转动平台上,平台角度复位使探测角度为 0,分别测量样品的原始强度光谱及 0°、60°和 120°偏振方向上的光谱,并将步骤 2) 获得的定标数据输入系统。

4) 调整样品转动平台使探测角度从 0°间隔 5°变化到 80°,测量该样品的多角度红外偏振光谱数据。

5) 更换样品,重复步骤 2)、3)、4),注意及时补充光谱仪制冷剂,否则会造成测量结果不准确,甚至对设备造成严重损害。

6) 利用式(3)~(5)的偏振参量计算公式,就可通过编程计算得到样品的多角度红外偏振光谱特性曲线。

## 2.3 红外偏振光谱特性结果与分析

表面经过抛光处理的金属材料样品红外发射率很低,通过对比上述 2 种材料样品的红外强度光谱可知,在 8~12 μm 热红外波段上,涂有红外伪装涂料的材料样品与表面抛光的钛合金板材料样品具有相

似的红外强度光谱特性,且伪装涂料的红外强度高与表面抛光的钛合金板样品,如图 2 所示。

而对比二者的红外偏振 $\Delta E$ 参量光谱,可以发现与红外强度光谱分布存在很大差异,且钛合金板材料样品的红外偏振 $\Delta E$ 参量高于伪装涂料材料样品的红外偏振 $\Delta E$ 参量。由此可见,经过红外伪装的目标降低了表面的红外辐射,使红外强度信息得到了隐藏,但其红外偏振信息却存在差异,可以利用其 8~12 μm 波段上的红外偏振信息对目标进行检测。

## 2.4 红外偏振方向特性结果与分析

对在 8~12 μm 波段钛合金伪装涂层样品红外偏振光谱积分值随探测角度的变化关系进行了研究,使用的是 Matlab 中的 CFTool 工具箱对数据进行拟合,得到其红外偏振光谱的方向特性曲线,如图 3 所示,分别是伪装涂料钛合金板样品红外强度特性曲线与红外偏振 $\Delta E$ 参量特性曲线,从图中可以看出当探测角度在 40°~50°之间时,二者的差异最大,在此条件下红外偏振探测效果较好。

## 3 目标红外偏振成像实验

### 3.1 实验准备

为了进一步探究自然背景下的金属涂层目标检测,制备了涂有伪装涂料的飞机缩比目标。该缩比目标是在 F-22 战斗机钛合金 1:48 仿真缩比模型的表面,喷涂了制备伪装飞机材料样品时所用到的红外伪装涂料,如图 4 所示。经过加工的缩比目标,具有实际飞机的结构形状与表面纹理特征,同时由于伪装涂料具有较低的红外发射率,因此,针对传统的红外成像检测具有比较好的伪装效果。

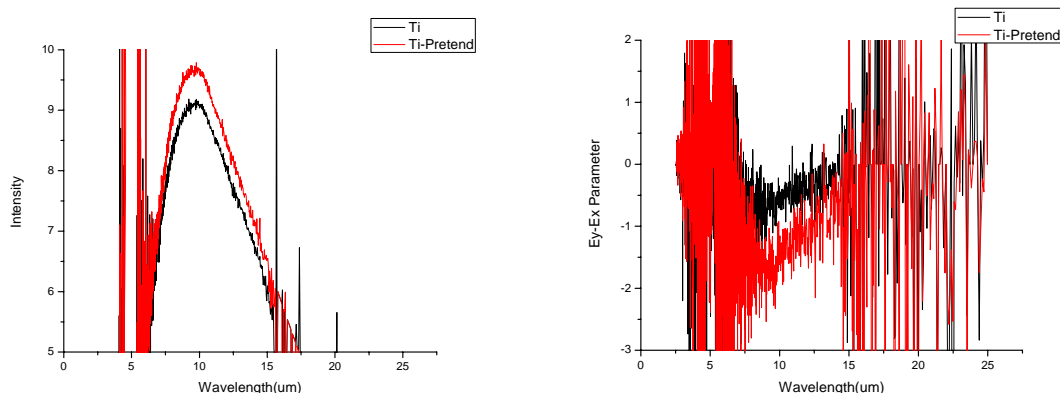


图2 钛合金板样品(Ti)与伪装涂层样品(Ti-Pretend)的红外强度光谱(左)与红外偏振 $\Delta E$ 参量光谱(右)

Fig.2 The IR intensity spectrum (left) and the infrared polarization  $\Delta E$  parameter spectrum (right) of titanium alloy sample and pretended titanium alloy sample

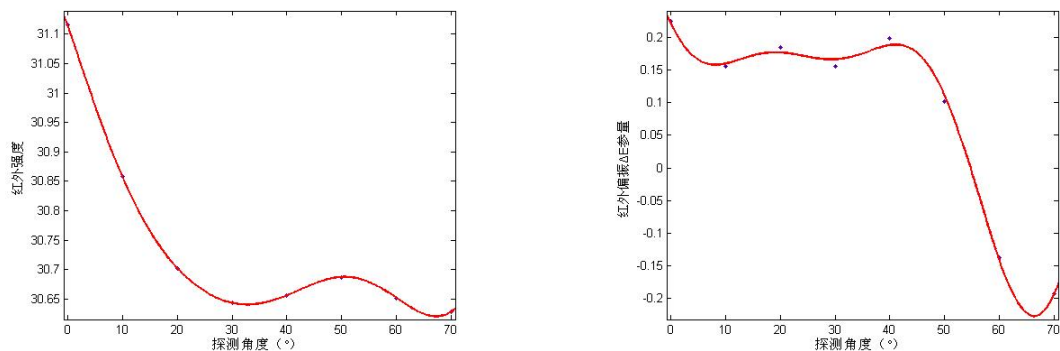


图3 钛合金伪装涂层样品的红外强度方向特性曲线（左）与红外偏振 $\Delta E$ 参量方向特性曲线（右）

Fig.3 The IR intensity directional characteristic curve (left) and the infrared polarization  $\Delta E$  parameter directional characteristic curve (right) of pretended titanium alloy sample



图4 伪装飞机缩比目标

Fig.4 The pretended plane shrinking target

采用4路平行的红外偏振同时成像系统获取伪装飞机缩比目标的红外偏振成像数据，该系统主要实现了同时获取3个偏振方向（0°、60°、120°）的原始偏振信息以及原始红外强度信息，并通过红外偏振图像处理软件，获取目标的多偏振参量图，从而对目标的偏振信息进行有效利用，实现红外偏振检测了，系统实物如图5所示。

3.2 实验步骤

实验是在阴天条件下进行的，当天室外气温约为5℃，利用8~12 μm 探测波段、在50°探测角度下进行实验。

首先，在室外环境下对红外偏振同时成像系统进行搭建，重点解决了探测器及采集与处理系统的供电问题、探测器的位置固定与角度调整问题、采集系统与探测器的连接问题、以及高空支架的搭建与样品固定的问题。

然后根据预先计算出的最佳角度，调整探测器的

探测角度到相应位置；开启探测系统调整高空支架的高度与位置使得伪装飞机缩比目标处于视场中心位置。

最后对静态目标进行单帧采集，采集结束时同时获取了天空背景下伪装飞机缩比目标的红外强度图像与0°、60°和120°偏振方向上的图像。

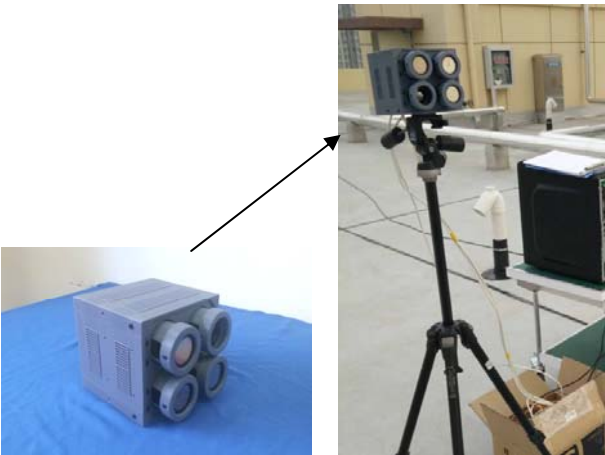


图5 红外偏振同时成像系统

Fig.5 The infrared polarization simultaneous imaging system

3.3 实验结果及分析

获取了0°、60°和120°偏振方向上的图像之后，利用偏振参量解算公式，通过偏振参量解算的图像处理程序，先对不同偏振方向上的数据进行配准，并计算出各偏振参量图，并将红外偏振 $\Delta E$ 参量图与红外强度图像进行对比，如图6所示。

通过计算图像的信息熵、标准差、目标与背景对比度，得到表1。

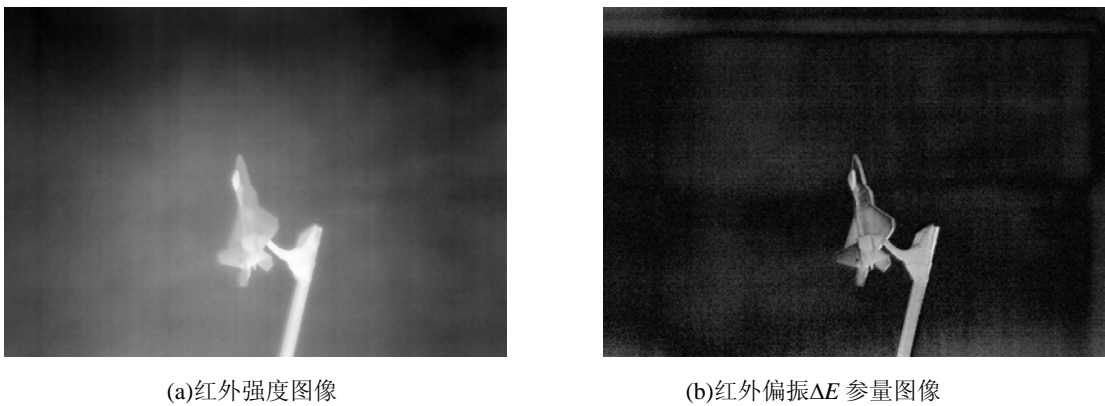


图6 天空背景下伪装飞机缩比目标红外强度图(左)及红外偏振 $\Delta E$ 参量图(右)

Fig.6 The infrared intensity image (left) and the infrared polarization  $\Delta E$  parameter image(right) of the pretended plane shrinking target in front of the sky background

表1 伪装飞机缩比模型红外偏振成像检测结果分析

Table 1 The infrared polarization imaging detection analysis of the pretended plane shrinking model

图像评价指标	缩比目标成像	
	红外强度图像	$\Delta E$ 图像
信息熵	6.2412	6.4918
标准差	35.6874	40.4099
目标与背景对比度	0.1326	0.5032

从表1中可以看出,  $\Delta E$  图像的信息熵高于红外强度图像, 其图像信息更加丰富;  $\Delta E$  图像的标准差高于红外强度图像, 说明其描绘目标细节的能力更加突出;  $\Delta E$  图像的目标与背景对比度都高于红外强度图像, 对目标的检测效果更好。

由此可见, 在对伪装飞机缩比目标的成像检测中, 红外偏振成像检测效果比红外强度成像检测效果更好。

4 结论

本文主要研究了金属涂层的红外偏振光谱特性和方向特性分析, 并利用红外偏振同时成像系统, 开展了伪装飞机缩比目标的红外偏振成像检测实验, 验

证了利用红外偏振成像手段检测伪装飞机的有效性和可行性。实验结果表明: 利用红外偏振成像检测技术能够有效提高伪装飞机缩比目标与天空背景的对比度, 从而实现对伪装飞机缩比目标的有效检测, 利用红外偏振成像检测手段检测人造金属涂层目标是一种可行的检测手段。

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.

[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.

[3] 马利祥, 李范鸣, 牛继勇. 目标红外偏振特性的影响因素研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 886-889.

[4] 白玉栋. 基于红外偏振成像的目标检测技术[J]. 红外, 2013, 34(3): 1-6.

[5] 唐坤, 邹继伟, 姜涛, 等. 目标与背景的红外偏振特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 611-614.

[6] 汪震, 乔延利, 洪津, 等. 金属板热红外偏振的方向特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 49-52.

[7] 张霞, 赵云升, 孙天琳, 等. 雪的热辐射多角度偏振特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 186-189.