

利用偏振成像在复杂现场快速识别金属碎屑(特约)

熊志航^{1,2}, 廖 然¹, 曾亚光², 刘 晋³, 马 辉¹

1. 清华大学深圳国际研究生院 广东省偏振光无损成像与检测工程研究中心, 广东 深圳 518055;
2. 佛山科学技术学院 物理与光电工程学院, 广东 佛山 528000;
3. 中华人民共和国公安部 物证鉴定中心, 北京 100038)

摘要: 爆炸犯罪杀伤群众, 破坏公私财产, 对公共安全造成危害。为快速侦破爆破案件, 需要在爆炸现场众多残留物中识别金属, 找出爆炸装置碎屑。针对在复杂背景中快速识别金属碎屑的需求, 提出了一种基于线偏振成像增强金属对比的方法。基于偏振光成像的原理, 搭建了两种多波长偏振图像采集装置。针对多种非金属和金属材料进行实验, 发现调整入射光的线偏振角度和入射角, 多波长偏振成像方法在复杂现场中可以对金属与非金属快速识别和分类。通过模拟研究了多波长下金属表面反射光的线偏振度和偏振角随入射角度变化的情况, 给出识别不同金属的最佳角度和照明偏振光。进一步实验结果显示: 多波长线偏振成像方法有区分不同种类金属的潜力。

关键词: 复杂现场; 爆炸物; 金属; 识别; 偏振成像

中图分类号: O436.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201012

Rapid identification of metal debris in complicated scenes by using polarization imaging(*Invited*)

Xiong Zhihang^{1,2}, Liao Ran¹, Zeng Yaguang², Liu Jin³, Ma Hui¹

1. Guangdong Engineering Center for Polarization Technologies, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China;
3. Institute of Forensic Science, The Ministry of Public Security of The People's Republic of China, Beijing 100038, China)

Abstract: Crimes associated to explosives always kill the lives of people, destroy the facilities, and threaten the public security. Rapid identifying the medal debris from the residuals of the explosives in criminal scenes is the key to speed up the detection of these criminal cases. Responding to these applications, in the paper, a method was proposed based on polarization imaging to rapidly identify the medal debris from the complicated scenes. Two setups were built, which can respectively capture polarization images with multiple colors and in a simultaneous imaging manner. Experiments of the medal and non-medal debris and their mixtures show that polarization imaging can effectively identify the medal debris if the incident angle polarization, and wavelength of the illuminating light are appropriately set. Simulations based on Fresnel formula show how the polarization

收稿日期: 2020-02-06; 修订日期: 2020-03-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406600); 国家自然科学基金 (41527901, 61527826); 深圳市科创委学科布局项目 (JCYJ20160818143050110)

作者简介: 熊志航 (1996-), 男, 本科生, 主要从事偏振光成像与目标识别方面的研究。Email: 13078183476@163.com

导师简介: 廖然 (1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事偏振光探测技术方面的研究。Email: liao.ran@sz.tsinghua.edu.cn

马辉 (1959-), 男, 教授, 博士, 主要从事偏振光方法方面的研究。Email: mahui@tsinghua.edu.cn

degrees and angles change with the incident angle, polarization, and wavelength of the illumination light. And the results suggest that polarization imaging can identify the types of the medal debris, which is proved by the additional experiments. In summary, it is indicated that polarization imaging has the potential to rapidly identify the medal debris from the complicated scenes which would help for the physical evidence in criminal detections.

Key words: complicated scenes; explosive; medal debris; identification; polarization imaging

0 引言

近年来,恐怖袭击、刑事犯罪等爆炸事件频繁发生,爆炸犯罪杀伤群众,破坏公私财产,对公共安全造成危害。检测爆炸装置碎屑并复原爆炸装置,对于侦破爆炸案件、严打爆炸犯罪活动有着重要的意义。爆炸装置中的关键部件和杀伤部件都含有金属成分,如电源、电子定时器、发火装置、爆炸填充物等。因此,在爆炸现场残留物中识别金属,对爆炸装置碎屑的检测起着至关重要的作用。由于爆炸后现场杂乱,靠人工收集现场物品,逐一查找耗费人力财力。

偏振是光的固有属性。在光波与目标物质相互作用时,由于不同物质的几何形状、表面粗糙度、结构和材质等不同,反射光的偏振特性会存在差别。利用偏振信息可以分析目标的物理特性,可对目标进行有效的探测和识别,或在复杂环境中有效检测和识别常规成像技术无法识别的目标^[1]。如今偏振探测技术已应用于材料分类^[2]、生物医学^[3]、大气光学^[4]、海洋探测^[5]等领域,引起国内外广泛关注。在金属与非金属分类应用中, Thilak 等利用相位延迟的方法提取目标的折射率,将铝片从绿色油漆和铜片中识别出来^[6]。Tominaga 等研究了物体表面镜面反射光的偏振度空间分布,发现该特性在金属和非金属方面有显著的不同^[7-9]。国内研究人员在这方面也有一些研究。比如,耿利祥等提出了一种利用探测物体表面的偏振菲涅尔反射比的主动线偏振成像方法,通过反演目标的折射率进行材料分类,该方法能对合金铝和涂料有效地分类^[10]。胡飞等研究了物体表面反射光的线偏振比随入射角度变化的关系,探讨了材料分类中最佳入射角度范围,提出了偏振成像在室外进行金属目标检测的可能性^[2]。根据材料表面反射光偏振特性,常见物体中如树木、泥沙、橡胶、布料等物体因表面粗糙发生多次散射而退偏^[11],金属由于强吸收,吸收会抑制退偏效应^[12],可用线偏振度分辨金属与非金属。

针对在复杂现场中识别金属的需求,文中研究了

主动照明下线偏振成像用于金属与非金属分类的方法和条件,提出了利用多波长线偏振成像快速识别金属碎屑的方法。通过实验和理论模拟,证明了多波长线偏振成像方法能够在复杂现场快速识别金属碎屑,同时还进行了金属分类的实验,表明了该方法在金属分类方面具有一定的发展潜力。

1 线偏振成像的基本原理

斯托克斯矢量模型是描述偏振光的一种常用方法,斯托克斯矢量 S 有 4 个分量, $S=(I, Q, U, V)^T$ 包含了光波的所有偏振信息,其中, I 为总光强, Q 、 U 为线偏振成分的信息, V 为圆偏振成分的信息。由于全偏振态的测量比线偏振成分的测量要复杂,文中主要分析斯托克斯矢量的线偏振成分。斯托克斯矢量的线偏振成分可表示为:

$$S' = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{pmatrix} \quad (1)$$

斯托克斯矢量能够直接和光强测量值联系起来,公式 (1) 中, I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 分别表示光在线偏振 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的分量。定义线偏振度 DOLP 和偏振角 AOP 描述光波偏振态的特性^[13]:

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

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

线偏振度 DOLP 表示线偏振分量的强度和光波总强度的比值,偏振角 AOP 描述了光的偏振方向。总光强可以分解为 0° 和 90° 光强之和,也可分解成 45° 和 135° 光强之和,至少需要三幅图像才能获得入射光的线偏振信息。

2 实验装置与方法

实验装置如图 1(a) 所示,主要有四部分组成:光源、起偏器 (Polarization State Generator, PSG)、样品

台、检偏器 (Polarization State Analyzer, PSA)。LED 光源能发出白色非偏振光,光源的前面可以加上一个旋转的线偏振片 P1 构成起偏器,旋转 P1 至 α ,使光源产

生偏振角 α 的线偏振光。光照射在样品表面上发生反射,入射角为 θ ,反射光被检偏器 PSA 接收,得到样品的偏振图像。

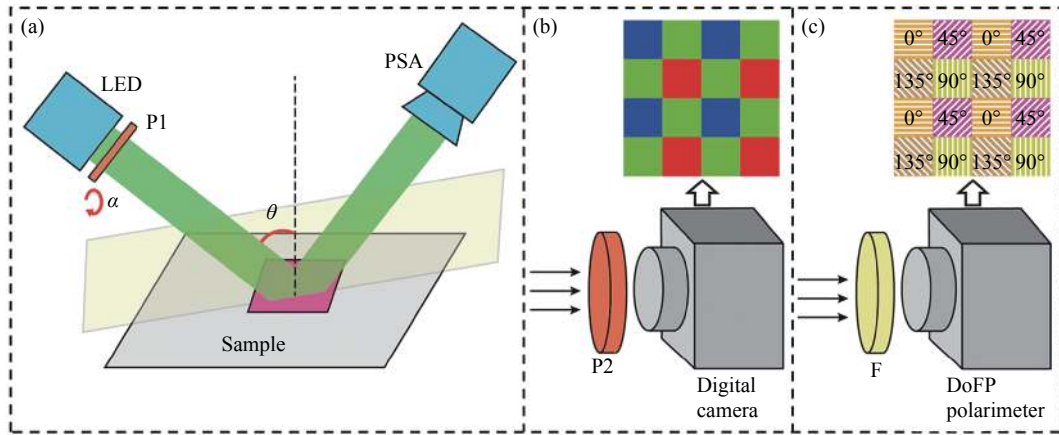


图 1 (a) 实验装置示意图; (b) 以数码相机为探测器的 PSA; (c) 以偏振相机为探测器的 PSA

Fig.1 (a) Schematic of the experimental setup; (b) PSA equipped by digital camera; (c) PSA equipped by polarization camera

文中采用的检偏器有两类,一类是以数码相机 (佳能 EOS M2) 作为探测器,如图 1(b) 所示,在数码相机前面装上一个可旋转的线偏振片 P2,分别旋转线偏振片至 0° 、 45° 、 90° 、 135° 对入射光进行检偏,各采集一张图像,根据公式 (1) 定义获得入射光的线偏振信息。数码相机的感光元件上有彩色滤光片,如图 1(b) 所示,每次测量同时得到 RGB(红绿蓝) 三个通道下的偏振图像。该方法操作简单,装置成本低,还能记录彩色图像,但由于需要旋转 P2 的方向,所以只适合静态 (或变化很慢的) 场景偏振信息的探测。

光,在入射角度为 30° 和 60° 的情况下采集样品的偏振图像。实验的结果如图 2 所示。

另一类是以偏振相机^[14](4D Technology) 作为探测器,如图 1(c) 所示,类似于彩色相机的设计,将四个不同偏振方向 (即 0° 、 45° 、 90° 、 135°) 的线偏振片集成在一起,置于感光元件之前,一次曝光便可获取四个偏振分量图像,用公式 (1)~(3) 计算偏振参数图像。由于可以同时获取偏振分量图像,所以该方法适用于现场动态偏振信息的快速探测。光源发出的光是白光。由于折射率是波长的函数,偏振相机前需要加一个滤光片 F 来获得不同波长的偏振图像;该滤光片可以是电控快速调节的滤光片。

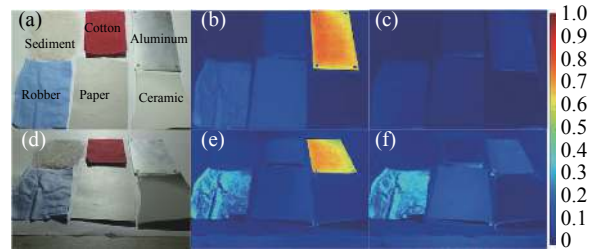


图 2 样品在不同入射角度、不同入射偏振态下的彩色图像与 DOLP 图像

Fig.2 Color image and DOLP image of the sample under different incident angles and different polarizations

3 实验结果

图 2(a) 是入射角度为 30° 时彩色图片,图 2(b) 和图 2(c) 是 60° 线偏振光和非偏振光照射下的 DOLP 图像。图 2(d) 是入射角度为 60° 下的彩色图片,图 2(e) 和图 2(f) 是 60° 线偏振光和非偏振光照射下的 DOLP 图像。图 2 中的偏振图像均用的是红色通道下的数据。当入射光为 60° 线偏振光时,金属的 DOLP 大,并且与其他样品对比度大,易于从背景中分离出金属,且 30° 入射角比 60° 入射角的效果好。若入射光为非偏振光,金属的 DOLP 低,难以从场景中区分金属。

将金属铝板、布料、橡胶、陶瓷、泥沙和纸片放置在平整的样品台上,以数码相机为检偏器采集样品的偏振图像。选取非偏振光、 60° 线偏振光作为入射

为了模拟复杂爆炸现场的情况,将铁、铝、铜碎屑、泥沙、橡胶、布料等混在一块,用 30° 线偏振光照

射,采集到 DOLP 图像。图 3(a) 为彩色图像,图 3(b)~(d) 分别对应的是红、绿、蓝通道下的 DOLP 图像,共用一个色标。从图 3(b)~(d) 中可看出金属的 DOLP 明显大于背景值。选取不同的颜色通道,金属的 DOLP 值会变化,同时背景 DOLP 也会变化。总体而言,金属与背景的 DOLP 有明显不同,并且选取红色通道下的 DOLP 与背景差异最大,选择红色通道的图像可以更好地识别金属。图 3(b)~(d) 显示了适当选择接收光波长、线偏振角度和入射角度时,线偏振成像可在复杂环境中有效检测和识别金属。

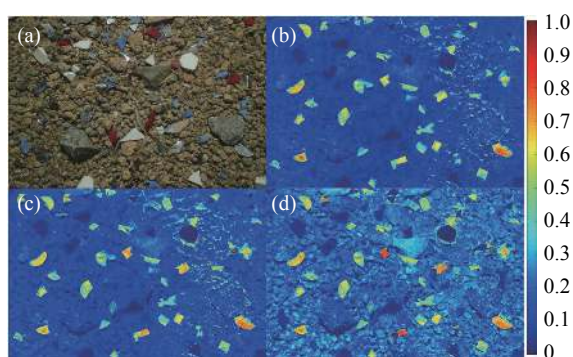


图 3 铁、铝、铜碎屑、泥沙、橡胶、布料的混合实验

Fig.3 Mixture experiment of the iron, aluminum, copper, and sediments, robber, cotton materials

4 讨论

光在介质表面发生反射,反射光偏振态发生改变,反射光的振幅和相位的变化遵循菲涅尔定律。对铜、铁、铝三种金属表面反射偏振变化进行了模拟。金属的折射率如表 1 所示^[15]。

表 1 常见金属的折射率

Tab.1 Refractive index of several common metals

Metal	λ/nm	n	k
Al	465	0.643	5.585
	660	1.488	7.821
Fe	465	2.276	3.279
	660	3.000	3.754
Cu	465	1.227	2.554
	660	0.214	3.67

根据参考文献 [16] 理论,模拟了反射光的 DOLP 和 AOP 随入射角度变化。在模拟中,入射光为

单色平行光,在金属表面发生镜面反射,反射光的 DOLP 和 AOP 随入射角度的变化,如图 4 所示。实际情景中大多数物质的表面粗糙并非发生镜面反射,使得偏振光在表面发生散射而退偏。金属与非金属相比,吸收效应强,吸收效应的增强会抑制甚至完全减弱退偏效应,因此,主要考虑金属表面反射的情况^[17]。

图 4 中 (a)~(c) 为样品在非偏振光、30°线偏振光、60°线偏振光入射时,红光 (R)、蓝光 (B) 波长的反射光 DOLP 随入射角度变化的曲线图,图 4(d)~(f) 对应 AOP 的变化。红、蓝曲线分别表示 $\lambda=660 \text{ nm}$ 和 $\lambda=465 \text{ nm}$ 入射光。由曲线图 4(a) 看出,无偏振光入射时,反射光在入射角度在 60~70°时,线偏振度高,其余入射条件下,DOLP 低,不利于区分金属和非金属。若用 30°和 60°线偏振光照射,当入射角度小于 30°时,线偏振度接近 1;当入射角度在 60~70°时,达到极小值;同时,当入射角度在 60~70°时,不同金属的 DOLP 和 AOP 产生差异,差异的大小与光的波长有关。所以,只要选择适当的接收光波长、入射光线偏振角度和入射角度,就可以利用线偏振成像方法有效地区分金属和非金属,以及不同金属。

根据模拟结果分析,入射角度小于 30°时,用 30°或 60°线偏振光照射在金属表面,反射光的 DOLP 接近 1。图 3 中给出的金属碎屑位置杂乱,反射面不统一,反射面粗糙导致 DOLP 小于 1,但从图 3 可看出金属的 DOLP 明显大于背景值。背景是尺寸远小于金属碎屑的土壤颗粒,表面漫反射导致严重退偏,DOLP 很小;对比图 3(b)~(d) 发现,背景在蓝光下 DOLP 较大,红光下 DOLP 最小。同时,在入射角小于 30°时,金属表面的 DOLP 对波长不敏感。在图 3 中,即便是某些金属碎屑,它的反射角大于 30°,DOLP 不是很大且随着波长变化,但此时仍然与背景 DOLP 差别很大而被突显出来。所以,选取红色通道下的 DOLP 图像更好识别金属。综合图 3 和图 4 可知,在适当选择接收光波长、线偏振角度和入射角度时,线偏振成像可在复杂环境中有效检测和识别金属。

同时从图 4 中注意到,在入射角在 60~70°时,不同金属的 DOLP 和 AOP 产生差异,可利用这一特性对金属分类。接下来用图 1(c) 的偏振相机对铜铁铝三类金属进行测试。

为了使金属在同一个入射面内,将平整的金属放

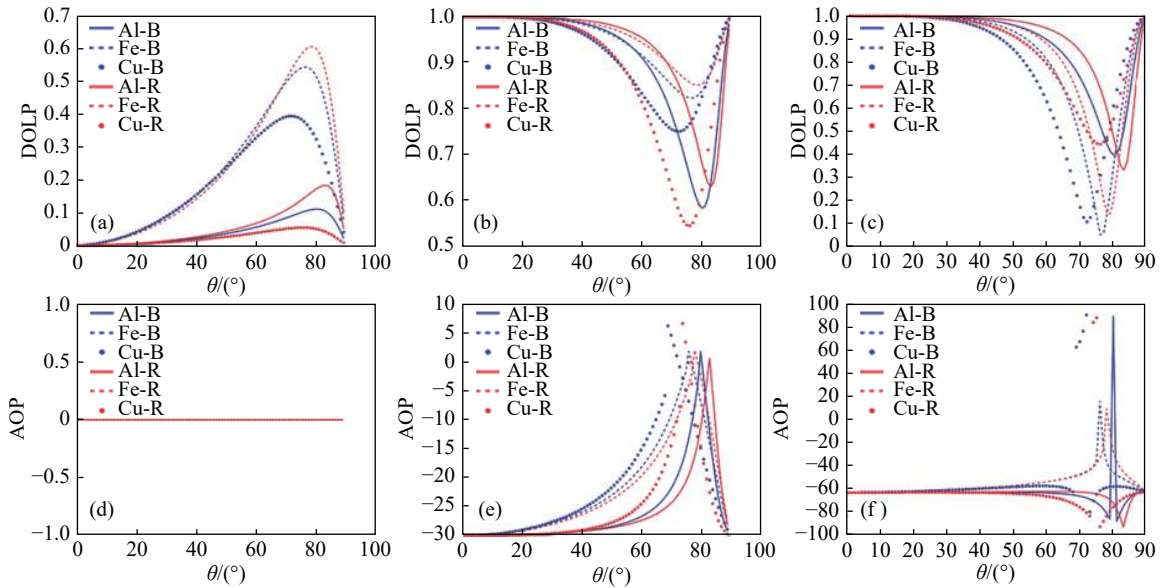


图 4 铜、铁、铝金属表面反射光线的 DOLP 和 AOP 变化随入射角变化的曲线图

Fig.4 Changes of reflected DOLP and AOP of light from the surfaces of the copper, iron and aluminum material, versus the incident angle of illuminating light

在同一平面上, 第一列是铜, 第二列是铁, 第三列是铝。入射角度为 60° , 偏振相机前装有中心波长为 660 nm 的滤光片 (福州浩蓝光电有限公司, AZURE-BP660)。实验发现: 在 60° 线偏振光入射时, 三类金属的偏振图像差异很大, 如图 5 所示。

图 5(a) 是 DOLP 图像, 图 5(b) 是 AOP 图像。选择图 5(a) 中黑色边框区域来做定量分析, 铜、铁、铝

各取一块区域。从图 5(a) 和 (b) 分别所示的 DOLP 和 AOP 中, 很明显看出差异。考虑到 DOLP 和 AOP 的量纲不一样, 为了简单起见, 直接采用公式 (1) 中的 Q 、 U 值, 图 5(c) 显示了图 5(a) 中所选区域像素点的 Q 、 U 分布图。从图 5(c) 可以看出, 在同一条件下, 三类金属反射光的偏振存在明显差异, 展示出线偏振成像区分不同材料金属的潜力。

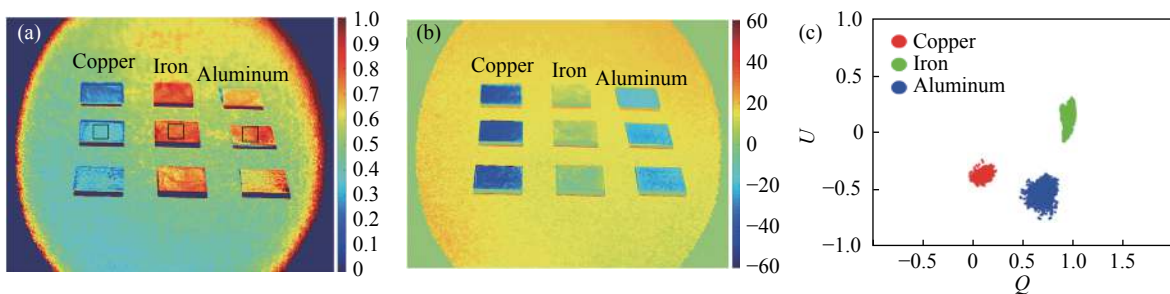


图 5 针对铜、铁、铝三种金属的偏振成像。(a) DOLP 图像; (b) AOP 图像; (c) Q 、 U 点图

Fig.5 Polarization imaging for three metal samples: copper, iron and aluminum. (a) DOLP images; (b) AOP images; (c) Q and U dot map

5 结论

文中提出了主动照明下线偏振成像对常见爆炸现场金属碎屑快速识别方法。通过对金属铝板、布料、橡胶、陶瓷、泥沙和纸片的线偏振成像实验以及混合实验, 在适当接收光波长、线偏振角度和入射角

度下, 金属的 DOLP 明显大于其他物体, 从而把金属碎屑从复杂现场快速识别出来。经过模拟发现, 在不同波长和入射线偏振光照明下, 金属材料表面反射光 DOLP 和 AOP 随入射角度变化; 当入射角小于 30° 时, DOLP 几乎为 1; 而当入射角在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 时, 不同金属之间差异较大。随后的实验表明, 在入

射角度 60~70°时,铜、铁、铝三类金属的偏振图像有显著区别,展示了线偏振成像区分不同金属的潜力。

参考文献:

- [1] Ju H J, Liang J, Zhang W F, et al. Simultaneous, real-time, chromatic polarimetric imaging technology with full-polarization-state detection [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(6): 744–748.
- [2] Hu F, Cheng Y, Gui L, et al. Polarization-based material classification technique using passive millimeter-wave polarimetric imagery [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(31): 8690–8697.
- [3] Qi J, He H, Lin J, et al. Assessment of tissue polarimetric properties using Stokes polarimetric imaging with circularly polarized illumination [J]. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11(4): e201700139.
- [4] Li D, Zeng N, Zeng M M, et al. Identification of soot particles in air based on polarization scattering method [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(6): 701–705.
- [5] Wang Y, Liao R, Dai J, et al. Differentiation of suspended particles by polarized light scattering at 120° [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 22419.
- [6] Thilak V, Creusere C D, Voelz D G. Material classification using passive polarimetric imagery [C]//IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2007.
- [7] Tominaga S, Yamamoto T. Metal-dielectric object classification by polarization degree map [C]//International Conference on Pattern Recognition. IEEE, 2008.
- [8] Tominaga S, Kimachi A. Polarization imaging for material classification [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(47): 760–760.
- [9] Tominaga S, Hirai K, Horiuchi T. Metal-dielectric object classification by combining polarization property and surface spectral reflectance [C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8652(3):221-237.
- [10] Geng L X, Chen Q, Qian W X, et al. A target discrimination method based on the active polarization imaging with the distribution of polarization Fresnel ratio [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1916–1920.
- [11] Chipman R A. Metrics for depolarization [C]//Proceedings of the SPIE, 2005, 5888:170-179.
- [12] Swami M K, Manhas S, Patel H, et al. Mueller matrix measurements on absorbing turbid medium [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(18): 3458–3464.
- [13] You Y, Tonizzo A, Gilerson A A, et al. Measurements and simulations of polarization states of underwater light in clear oceanic waters [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(24): 4873.
- [14] Ratliff B M, Lacasse C F, Tyo J S. Interpolation strategies for reducing IFOV artifacts in microgrid polarimeter imagery [J]. *Optics Express*, 2015, 17(11): 9112–9125.
- [15] Adachi S. The handbook on optical constants of metals [C]//International Conference on Information Technology: Research and Education. IEEE, 2012: 307-311.
- [16] Deibler L L, Smith M H. Measurement of the complex refractive index of isotropic materials with Mueller matrix polarimetry [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(22): 3659–3667.
- [17] Mishchenko M I, Liu L, Hovenier J W. Effects of absorption on multiple scattering by random particulate media: exact results [J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 13182.