

偏振光谱成像技术探测激光辐照环氧树脂损伤研究

冯茂林, 谭 勇

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年5月27日; 录用日期: 2022年7月4日; 发布日期: 2022年7月13日

摘 要

本文采用偏振光谱视频成像的在线检测识别方法, 结合偏振双向反射分布函数的探测原理和数学模型, 研究偏振光谱成像主动探测复合环氧树脂在激光辐照下的损伤演化过程。依据斯托克斯(Stokes)矢量分析法, 分析复合环氧树脂表面随激光脉冲数目和脉冲能量增加所引起的损伤变化规律。

关键词

偏振光谱视频成像, 激光辐照, 斯托克斯矢量

Polarization Spectrum Video Imaging Detection of Laser Irradiated Composite Epoxy Resin Damage

Maolin Feng, Yong Tan

College of Physics, Changchun University of Technology, Changchun Jilin

Received: May 27th, 2022; accepted: Jul. 4th, 2022; published: Jul. 13th, 2022

Abstract

In this paper, the online detection and identification method of polarization spectrum video imaging is used, combined with the detection principle and mathematical model of polarization bi-directional reflection distribution function, to study the damage evolution process of composite epoxy resin under laser irradiation. According to Stokes vector analysis method, the damage change law of composite epoxy resin surface with the increase of laser pulse number and pulse energy is analyzed.

Keywords

Polarization Spectrum Video Imaging, Laser Irradiation, Stokes Vector

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

偏振光谱成像探测技术[1]-[7]是近些年发展迅速的新型探测技术,能够获取目标物的空间信息、光谱信息以及各个谱段的偏振信息。偏振成像技术相比传统的探测技术对目标物体进行探测与识别时,在以下几个方面通常会体现出无法比拟的优势,偏振成像技术的优势是把信息量从3个自由度,即光强、光谱和空间,扩充到7个自由度,包括光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭率和旋转方向,这种丰富的信息量不仅提高了获取目标物的信息量,而且能够增强对目标物的探测和识别能力,有利于提高对研究目标探测的精确度。随着偏振成像技术在农业、环境、医学、工程、大气、天文等领域的应用范围日益扩大,在未来必然表现出广阔的应用前景[8] [9] [10] [11] [12]。

本文采用偏振光谱视频成像的在线检测识别方法,结合偏振双向反射分布函数的探测原理和数学模型,研究偏振光谱成像主动探测复合环氧树脂在激光辐照下的损伤演化过程。

2. 实验原理及装置

2.1. 斯托克斯矢量法

光的偏振通常使用 Stokes 矢量法 I、Q、U、V 参量来描述强度和偏振态,其对完全偏振光、部分偏振光和自然光,甚至是单色光和非单色光,都可用其完备的描述,为方便光电探测器的测量,四个 Stokes 参量用光强定义,其表现形式为:

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

偏振度(Degree of Polarization, DOP)是用来描述偏振光在总光强中占的比例,其表达式为:

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

线偏振度 DOLP 和圆偏振 DOCP 是用来表征线偏振光和圆偏振光在总光强中的比例,公式如下:

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (3)$$

$$DOCP = \frac{V}{I} \quad (4)$$

偏振角(Angle of Polarization, AOP)是光矢量与入射面之间的夹角,其表达式:

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (5)$$

其中 DOP 和 AOP 是偏振信息测量中表征目标的重要参数。

2.2. 实验装置及过程

实验装置如图 1 所示, 采用输出波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 固体脉冲激光器进行复合环氧树脂的激光损伤实验研究, 其输出的激光脉冲近似为高斯脉冲, 激光光束经聚焦透镜($f = 20 \text{ mm}$)聚焦入射到复合环氧树脂表面。实验过程中激光能量由能量计实时监测, 为了减少材料自身表面缺陷的影响, 实验所用激光能量远大于复合环氧树脂表面的初始损伤阈值。样品固定于三维位移台, 精确控制损伤点位置。采用基于 LCTF、LCPR、LCVR 以及 CCD 探测器研制的全偏振高光谱成像系统进行复合环氧树脂损伤特征的高光谱全偏振成像探测识别, 利用 LED 光源(起偏方向在 x 轴上时为 0° 线偏光)进行主动照明, 偏振光谱成像法通过对同一目标采集多帧的不同偏振角度图像, 为保证成像效果最优及确保所拍图像损伤位置一致, 固定相机与靶材表面法线所成角度 θ_2 为 5° 以及激光光束入射方向与靶材法线所成角度 θ_1 为 65° 。

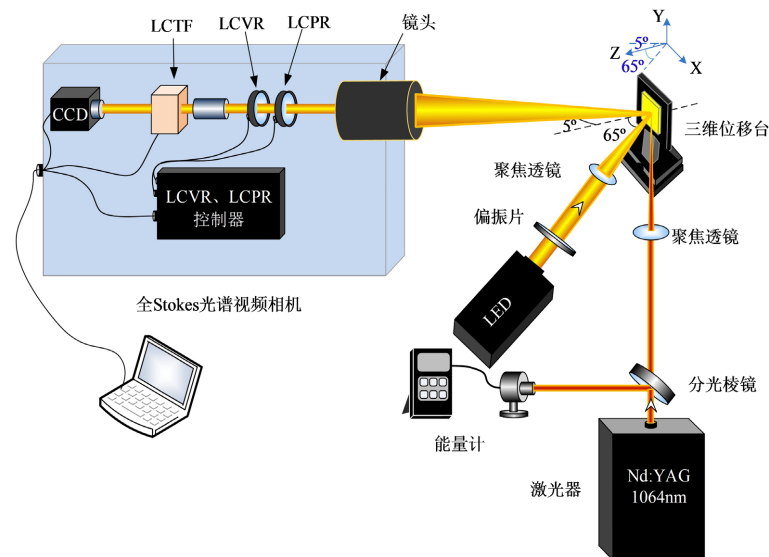


Figure 1. Experimental device of epoxy resin material irradiated by laser
图 1. 激光辐照环氧树脂材料实验装置

激光辐照复合环氧树脂材料表面时, 激光束作用于某一点上, 在该点附近区域容易形成局部高温区, 脉冲激光的不断作用, 会使局部高温区内的材料表面短时间内发生融化、蒸发而形成等离子体。为了观察突出明确表征损伤形貌的优势, 避免等离子体对成像的干扰, 利用可见光谱仪(QE65pro)获取等离子体光谱数据, 为了保证产生激光的时域一致性, 采用高速连续扫描模式, 每次积分时间 50 ms, 连续高速扫描 20 次, 对 100 mJ 纳秒脉冲激光损伤环氧树脂的连续光谱中的一帧进行等离子体谱线处理, 等离子体光谱图如图 2 所示。

由激光照射产生的离子体。在 558 nm、589 nm、615 nm 和 643 nm 附近最为明显。环氧树脂材料的主要成分为 C、H、O 和少量的金属元素, 由等离子体谱线观察发现, Fe 原子和 C 原子成分较多, 峰值比较明显, O 原子谱线最为明显, 根据相对强度判断, 大部分 O 原子来自于空气。所以主动探测时 LED 照明光源的中心波长选择为 650 nm。

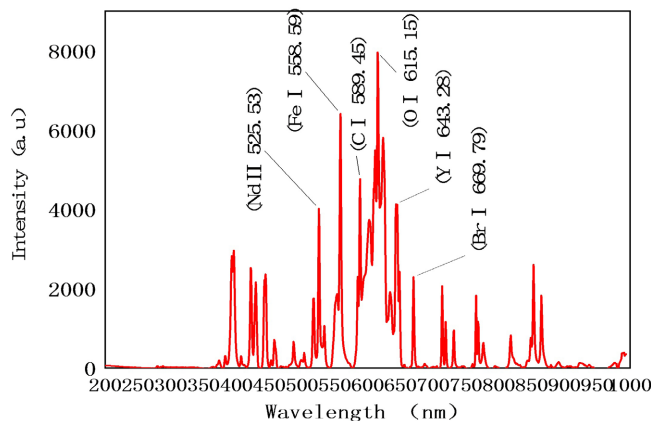


Figure 2. Spectrogram of composite epoxy resin irradiated by nanosecond laser

图 2. 纳秒激光辐照复合环氧树脂光谱图

在主动照明探测条件下, 采用 s-on-1 作用方式, 通过改变激光能量、重复频率激光参数, 获取激光损伤过程中每一参数下对应的 4 组不同相位延迟组合的偏振图影像数据, 获取激光辐照过程中熔池、裂纹和颗粒堆溅等变化规律, 基于偏振光谱成像探测技术对比分析不同激光参数下损伤形貌特征及损伤规律。

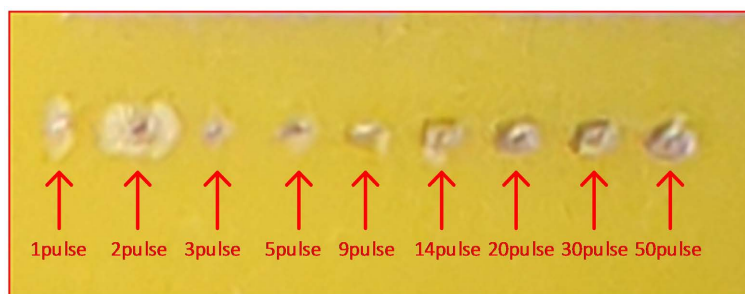


Figure 3. Array morphology of laser irradiated epoxy resin

图 3. 激光辐照环氧树脂材料的阵列形貌

图 3 为激光损伤复合环氧树脂的阵列形貌, 之后的点按照矩阵的形式进行排列, 实验每进行一次点的损伤, 就按照矩阵的形式调节一次三维精密移动调节平台, 根据不同激光工作参数, 每进行一次激光辐照都要进行精准调节。按上述方法依次记录实验数据, 并利用偏振光谱相机获取靶材影像变化, 将所得到的实验数据存入计算机中。

3. 实验结果及分析

在固定偏振光谱成像系统的光谱波长为 650 nm 后, 分别取在同一脉冲能量下 $I(0^\circ, 0)$ 、 $I(45^\circ, 0)$ 、 $I(90^\circ, 0)$ 、 $I(135^\circ, 90^\circ)$ 四组不同偏振状态对应的激光辐照环氧树脂产生的损伤特征随激光脉冲次数 N 的演化规律, 进行不同能量的多组次实验, 选取激光能量为 75 mJ, 100 mJ 与 150 mJ 损伤情形下的四组不同偏振参数下环氧树脂随脉冲数 N 变化的损伤偏振图像。

如图 4 所示, 为 75 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌的偏振光谱图像, 对损伤情况随脉冲次数 N 的变化情况进行分析。当 $N = 1$ 时, 激光只击穿了环氧树脂表面的薄膜, 图像中无明显损伤形貌, 在 $N = 3$ 时, 树脂表面出现明显亮斑, 在 90° 线偏振状态下, 亮斑并未出现, 并由明显暗斑出现。在 $N = 5$ 时, 可以

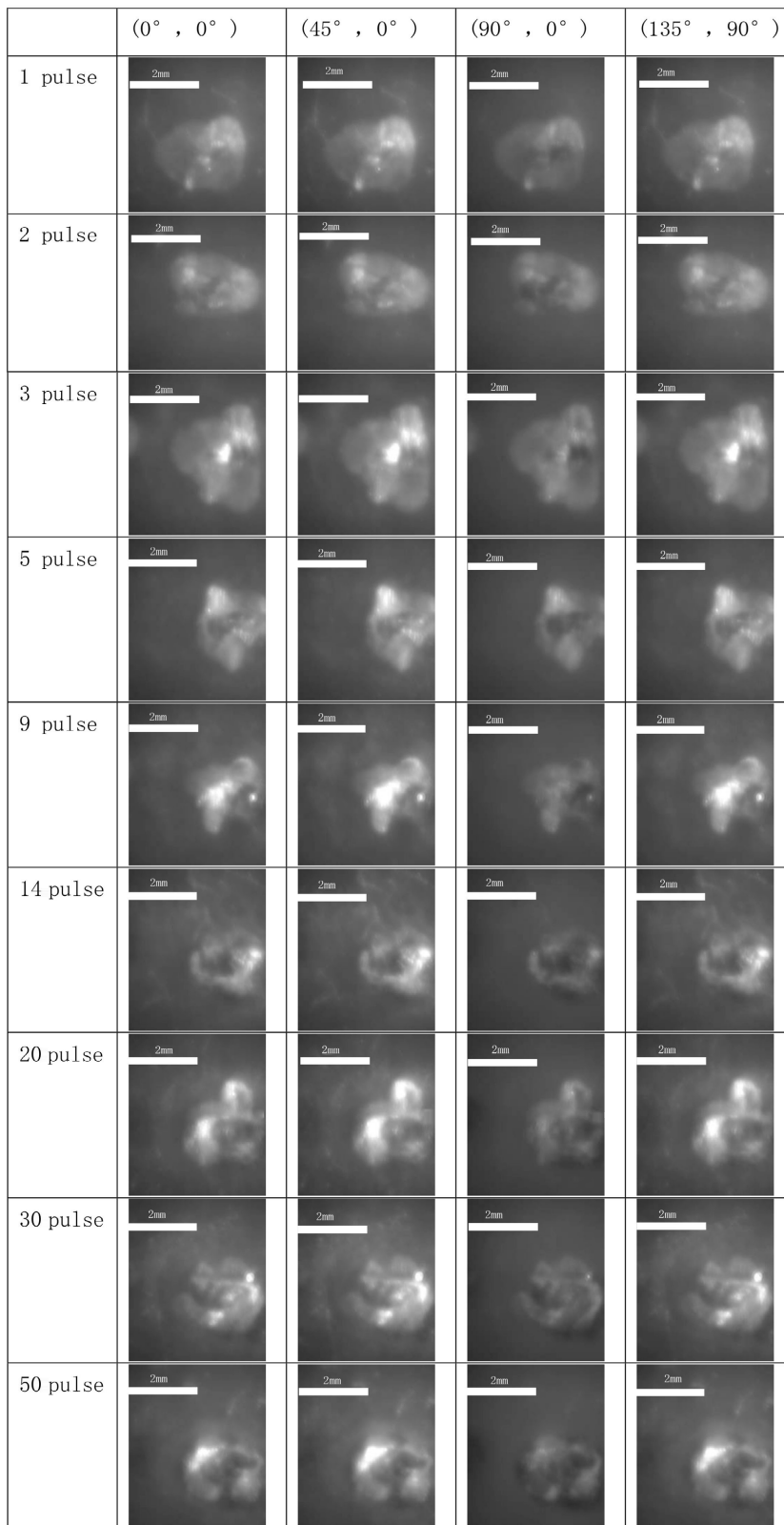


Figure 4. Polarization source image of epoxy resin damage morphology with pulse number n under 75 mJ laser energy

图 4. 75 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌随脉冲数 N 变化的偏振源图像

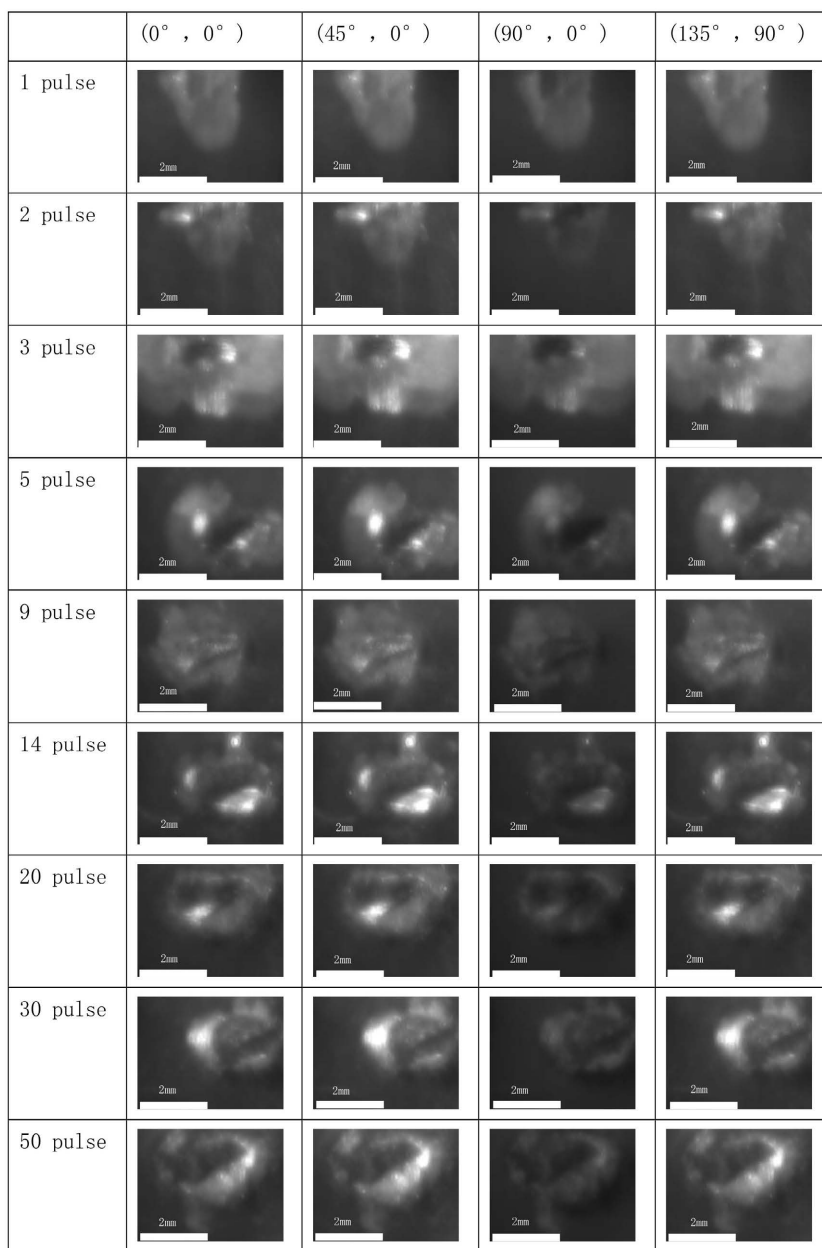


Figure 5. Polarization source image of epoxy resin damage morphology with pulse number n under 100mj laser energy

图 5. 100 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌随脉冲数 N 变化的偏振光谱图像

清晰看到损伤的位置与形状，同时对比四幅偏振光谱图像，90°线偏振状态下依然存在暗斑，并且位置处于损伤的中心区域；在 $N = 14$ 时，在图像的损伤区域之外，看到有环状的白色物质，在 45°线偏振状态下最为明显，在 90°线偏振状态下则看不到损伤区域之外的情况；随着激光脉冲数的增加，上述情况也更为明显。同时横向对比四幅偏振光谱图像，可以看到大体规律：45°线偏振图像最亮，135°圆偏振图像次之，0°线偏振图像较暗，但三幅图像并无明显差异，都可以看到材料表面整体的损伤形貌及损伤范围外的变化。在 90°线偏振图像与上述三幅图像差异较大，出现了独有的暗斑，无法表征损伤边缘及范围之外的情况，但暗斑反而更好表征了损伤的中心区域。

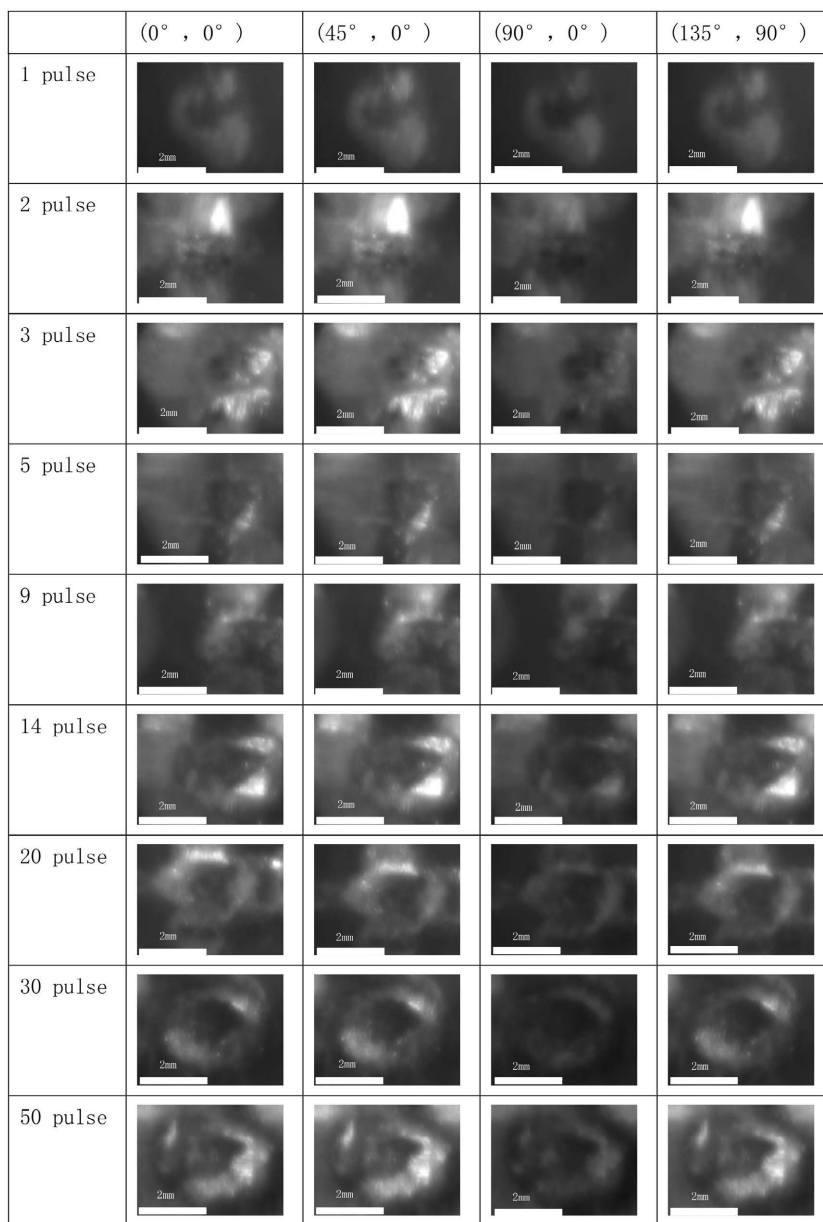


Figure 6. Polarization source image of epoxy resin damage morphology with pulse number n under 150 mJ laser energy

图 6. 150 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌随脉冲数 N 变化的偏振光谱图像

图 5 与图 6 分别为 100 mJ 与 150 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌的偏振光谱图像, 损伤情况与图 4 基本一致, 随着单脉冲能量的提高, 损伤形貌在低脉冲数时就表现明显。

为了进一步分析损伤区域与偏振参量之间的关系, 使用 MATLAB 编程提取不同激光能量下的四种偏振图像偏振图像 20 个灰度(DN)值, 取其平均值, 对比分析。取点位置如图 7 所示。

如图 8 所示, 在 $N = 1$ 时, 激光击穿薄膜; $N = 2$ 时, 在薄膜下发生损伤, 但被薄膜遮盖, 无法看到明显现象, 所以 DN 值低; $N = 3$ 时, 损伤现象出现在环氧树脂表面, DN 值较高, 在 N 为 5~20 时, 损伤区域逐渐扩大, 但由于损伤边缘扩张的不规律, 导致 DN 值出现不规律性, 在 $N = 30$ 与 50 时, 损伤区域趋于稳定, DN 值也逐渐稳定, 呈下降趋势。

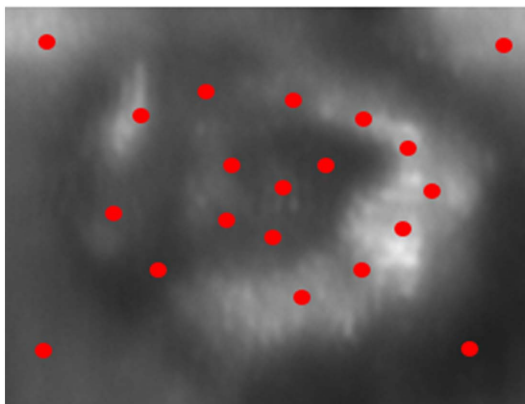


Figure 7. Digital Number point location
图 7. DN 值取点位置

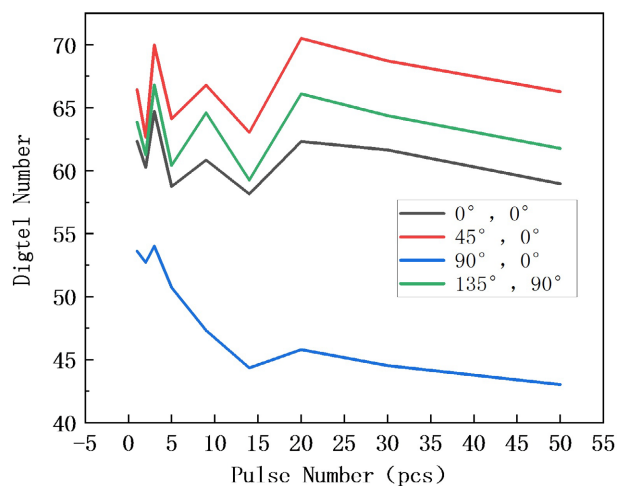


Figure 8. Polarization contrast diagram of epoxy resin damage morphology under 75 mJ laser energy
图 8. 75 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌偏振对比图

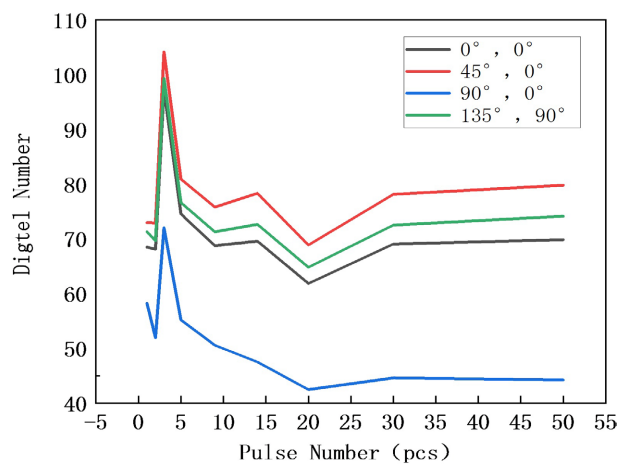


Figure 9. Polarization contrast diagram of epoxy resin damage morphology under 100 mJ laser energy
图 9. 100 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌偏振对比图

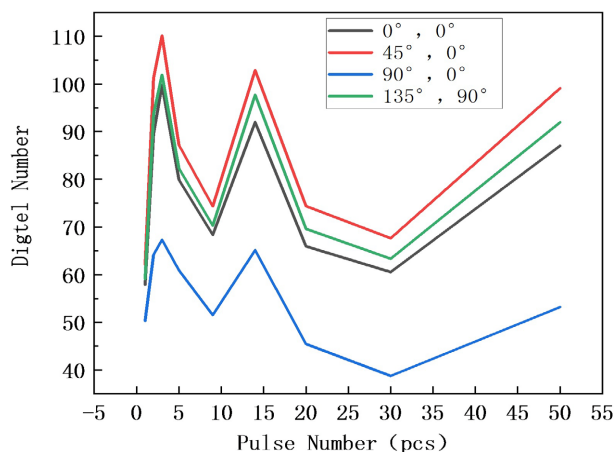


Figure 10. Polarization contrast diagram of epoxy resin damage morphology under 150 mJ laser energy

图 10. 150 mJ 激光能量下环氧树脂损伤形貌偏振对比图

在图 9 与图 10 中, N 为 1~20 时, 规律与图 7 相似, 在 N = 30 与 50 时, DN 值出现上升的趋势。同时对比四种偏振曲线, 其趋势基本一致, DN 值大小也与图像分析时一致。

综合图 8~10 三幅图, 可以看到, 在 45° 线偏振下, DN 值最高, 损伤区域表现最明显, 135° 圆偏振其次, 0° 线偏振更低, 而 90° 线偏振虽然 DN 值最低, 但反而更好表征了损伤的中心区域。

4. 结论

本文偏振光谱成像探测法从激光能量、脉冲次数 2 个方面进行, 进行了大量实验研究, 获取了激光辐照树脂基复合材料损伤过程的全偏振参量光谱图像, 并进行对比分析。

对比分析结果表明: 偏振光谱成像探测法能够实时在线获取激光损伤演化过程在全偏振状态下的损伤规律及特征; 能够对低对比度或复杂背景下的探测目标进行偏振特征提取达到明确辨识及表征微损伤的细节纹理信息的目的。

参考文献

- [1] Glenar, D.A., Hillman, J.J., Saif, B.N., *et al.* (1992) Acousto-Optic Imagnspectropolarimetry for Remote Sensing. *Proceedings of SPIE*, **1747**, 92-101. <https://doi.org/10.1117/12.138833>
- [2] Andre, Y., Laherrere, J.M., Bret-Dibat, T., *et al.* (1995) Instrumental Concept and Performances of the Polder Instrument. *Proceedings of SPIE*, **2572**, 79-90. <https://doi.org/10.1117/12.216932>
- [3] Suzuki, T., Kurosaki, H., Enkyo, S., *et al.* (1997) Application of an AOTF Imaging Spectropolarimeter. *Proceedings of SPIE*, **3121**, 351-360. <https://doi.org/10.1117/12.278978>
- [4] Yan, T.Y., Zhang, C.M., Zhang, J.R., *et al.* (2018) High Resolution Channeled Imaging Spectropolarimetry Based on Liquid Crystal Variable Retarder. *Optics Express*, **26**, 10382-10391. <https://doi.org/10.1364/OE.26.010382>
- [5] Zhang, C.M., Yan, T.Y., Jia, C.L., *et al.* (2020) Tempo-Spatially Modulated Imaging Spectropolarimetry Based on Polarization Modulation Array. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **261**, 107448. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107448>
- [6] Li, J., Qi, C., Zhu, J.P., *et al.* (2016) Static Fourier Transform Hyperspectral Imaging Polarimeter. 2016 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), Los Angeles, 21-24 August 2016, 1-4. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2016.8071674>
- [7] Tu, X.Z., Mceldowney, S., Zou, Y., *et al.* (2020) Division of Focal Plane Red-Green-Blue Full-Stokes Imaging Polarimeter. *Applied Optics*, **59**, G33-G40. <https://doi.org/10.1364/AO.391027>
- [8] 胡冬梅, 刘泉, 牛国成. 可见光偏振成像系统对低对比度目标的探测[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6):

118-123.

- [9] 付强, 黄旻, 景娟娟, 等. 用于液晶可调谐滤光片型多光谱成像仪的中继成像系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 184-189.
- [10] 王耀利, 张瑞, 王志斌, 等. LCVR 和 AOTF 的光谱偏振测量新策略[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(8): 2362-2367.
- [11] 张颖, 赵慧洁, 程宣, 等. 基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1375-1378.
- [12] 于洵, 杨焯, 姜旭, 等. 基于偏振光谱成像的目标识别方法研究[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 537-541.