

高反射工件表面缺陷偏振检测光学系统设计

彭星^{1,2,3}, 翟德德^{1,2,3}, 石峰^{1,2,3*}, 田野^{1,2,3}, 宋辞^{1,2,3}, 铁贵鹏^{1,2,3}, 沈永祥^{1,2,3},
乔硕^{1,2,3}, 申箫^{1,2,3}, 张万里^{1,2,3}, 王盛^{1,2,3}, 阮宁辉^{1,2,3}

1. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073;
2. 湖南省超精密加工技术重点实验室, 湖南长沙 410073;
3. 装备综合保障技术重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对激光增材制造高反射金属工件表面缺陷的高精稳健检测与评估这一工程难题, 设计了一种基于高反射抑制效应的偏振检测系统, 能够有效避免背景杂波干扰, 提升复杂检测环境下的缺陷探测能力。系统基于 Q-type 非球面设计, 其像差校正能力强, 简化了系统结构, 第 7 表面面型与最佳拟合球面偏离量仅 0.371 μm , 第 9 表面面型与最佳拟合球面偏离量仅 0.434 μm , 焦距为 50 mm, F 数为 2, 工作距离为 300 mm。仿真结果表明, 调制传递函数在奈奎斯特频率为 144.93 lp/mm 处优于 0.42, 满足成像质量要求; 公差分析和 2000 次蒙特卡洛分析结果显示, 在满足偏振检测系统成像质量条件下, 公差范围合理, 符合加工与装配条件。同时, 基于斯托克斯矢量法提取高反射检测图像中的缺陷偏振态信息, 实现斯托克斯矢量、偏振度和偏振角信息的高反射抑制重构, 有效提升偏振检测图像对比度、凸显缺陷轮廓信息及形貌特征, 对激光增材制造高反射金属工件表面缺陷的特征提取与表征分析具有重要意义。

关键词: 激光增材制造; 偏振检测; 光学设计; 缺陷

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220863

0 引言

选择性激光熔融 (Selective Laser Melting, SLM) 是能够从零件三维 CAD 模型快速直接成形各种复杂结构零部件的一种新兴前沿技术。相比于传统制造工艺, 增材制造技术具有无需模具、能缩短制造周期、减少制造工序、实现复杂构建的轻量化、功能一体化设计和制造等优势, 已成为全球制造业发展的共识^[1]。近年来, 随着相关工艺技术的发展, 增材制造在航空航天、军事、核电等领域凸显出良好的应用前景^[2]。随着特殊零部件结构和功能逐渐呈结构功能复杂化和多样化, 传统的铸造、锻造和焊接等加工工艺难以满足制造和修复需求, 而金属增材制造技术在复杂构件的制造和修复等方面展现了重要的应用价值

和潜力。在激光增材制造过程中, 具有高斯能量分布的激光光斑与粉末相互作用, 粉末颗粒瞬时熔融和凝固, 产生了许多复杂的非平衡化学与物理冶金过程, 涉及到流体流动、动量、质量和传热等^[3], 是一项复杂的力热耦合过程。迄今为止, 利用激光增材制造技术成功实现了各类合金与金属的加工, 主要包括铝合金、不锈钢、镍基高温合金和钛合金等。然而, 目前激光增材制造技术在可重复性、工件性能、质量检测和评价等方面仍面临许多问题和挑战, 影响工件质量的因素有很多, 包括粉末尺寸、激光功率、扫描速度等, 参数控制不当将导致缺陷产生并严重恶化零件的物理和机械性能^[4], 难以满足高性能零部件的制造和使用需求。

为攻克激光增材制造的质量提升难题, 实现缺陷

收稿日期: 2022-12-01; 修订日期: 2022-12-30

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2007504, 2021YFC2202101); 国家自然科学基金 (U1801259);

中国科学院战略性先导科技专项 (XD25020317)

作者简介: 彭星, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光学系统设计、缺陷检测方面的研究。

通讯作者: 石峰, 男, 研究员, 博士, 主要从事光学元件超精密加工方面的研究。

检测关键技术的突破,国内外学者积极开展相关研究。许多用于激光增材制造工件表面缺陷检测的方法已在核工业、航空航天、机械制造和石油化工等领域得以应用^[5-6]。根据传感器类型,激光增材制造工件表面缺陷检测技术包括使用高速摄像机、红外热像仪、光电二极管和高温计、X 射线显微成像和声学技术等。

Nadipalli 等人^[7]提出了在激光增材制造系统中安装同轴和离轴传感器,并测试了不同功率水平、占空比和扫描速度下的单轨样品,以研究工件缺陷与加工参数之间的关系。Bisht 等人^[8]提出了一种新型激光增材制造过程熔池检测工具,称为 DMP (Developed Melt Pool),其中利用 Ge 光电二极管检测熔池和手动数据分析方法分析零件质量。Ge 光电二极管安装在固定位置,其检测波长范围为 1150~1800 nm。结果表明,DMP 工具通过检测加工过程中的变化信号并将其标记为缺陷,能够有效预测零件质量。Pavlov 等人^[9]利用双色高温计研究激光增材制造过程中激光作用区域的温度辐射,并探讨了加工策略、扫描间距和粉末层厚度对热变化的影响,进而实现缺陷的检测。Schwerdtfeger 等人^[10]对加工过程中每一层粉末进行了红外数据采集,通过辐射强度确定缺陷的位置,并通过磨削获得了截面验证测试结果。Shrestha 等人^[11]利用 Heigel 的方法确定熔池边界,并分析捕获的红外图像获取 Ti-6Al-4V 合金和 Inconel718 材料熔融区域的辐射温度分布,进而确定缺陷位置并对其轮廓形貌进行分析。Joschka 等人^[12]提出了一种高分辨率的缺陷检测系统,结果表明,所提出的高分辨率检测系统能够获取沉积层 25~35 μm/pixel 的高分辨率图像,可有效检测粉末沉积层的拓扑缺陷和表面质量。Grasso 等人^[13]研究了一种在分层过程中利用可见光相机进行缺陷空间识别和检测的方法。利用基于主成分分析的统计描述符识别缺陷区域。此外,利用图像 K-means 聚类分析实现了缺陷自动检测技术。Millon 等人^[14]研究了裂纹缺陷的激光超声检测方法。通过使用脉冲激光(脉冲时间 7 ns)在零件中产生超声波,并利用激光干涉仪检测工件的表面波识别缺陷。

综上所述,激光增材制造缺陷检测一直以来都是制约其发展的一项技术难题,虽然国内外很多专家学

者在应用上述检测方法对工件缺陷检测方面做了大量且富有成效的理论研究与实验工作,但由于缺陷的产生机理过于复杂、高反射工件表面检测信息量不足、精度低、检测工况复杂等原因,使得部分技术难以实现缺陷的高精稳健检测。当基于反射照明的缺陷检测系统在具有高反射率的金属部件的表面上执行检测时,图像传感器的像素通常由于强反射光而过曝,导致大量缺陷信息被湮灭,很难凸显和提取缺陷区域的信息。因此,如何抑制强反射光对激光增材制造金属工件表面缺陷检测的影响是一项重要研究课题。

针对上述问题,文中基于偏振检测技术设计了一款适用于高反射表面缺陷偏振检测光学系统,实现激光增材制造高反射工件表面缺陷的快速稳健检测,为高品质工件的制造夯实理论与工艺优化预研。

1 理论分析

1.1 偏振信息提取

与传统的光学检测方法相比,偏振成像技术具有独特的优势,可以获得检测目标的光谱信息、偏振信息和空间信息,因此广泛应用于工业成像、遥感、生物医学诊断和军事应用等领域^[15]。基于偏振技术的缺陷检测有利于从检测目标的偏振信息中提取纹理结构、表面材料和表面粗糙度等信息,可有效提高准确性和可靠性。

根据光的电磁理论可知,反射光、入射光和折射光的振幅与相位之间的关系可以通过菲涅耳定律来进行表述^[16],平面矢量光波可分解为 s 分量和 p 分量,反射和折射系数定义为:

$$\begin{cases} r_s = \frac{E_{0rs}}{E_{0is}} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ t_s = \frac{E_{0ts}}{E_{0is}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ r_p = \frac{E_{0rp}}{E_{0ip}} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \\ t_p = \frac{E_{0tp}}{E_{0ip}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_s 和 t_s 分别为 s 分量的反射系数投射系数; r_p 和 t_p 分别为 p 分量的反射系数投射系数; θ_1 和 θ_2 分别表示光线反射角和投射角; n_1 和 n_2 分别代表不同介质材料的折射率。

在基于偏振技术的缺陷检测过程中,为了提取缺

陷检测图像的偏振态信息,采用斯托克斯矢量法来进行偏振光的表示。斯托克斯矢量法是将光束的斯托克斯矢量和光学器件的穆勒矩阵相结合,可用于表示偏振光的偏振态信息和光强,拉开了全偏振态测量的序幕。斯托克斯矢量法指出,光的任何偏振态可以通过四个斯托克斯矢量来表示,定义为:

$$S(x,y) = \begin{bmatrix} S_0(x,y) \\ S_1(x,y) \\ S_2(x,y) \\ S_3(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0(x,y) + I_{90}(x,y) \\ I_0(x,y) - I_{90}(x,y) \\ I_{45}(x,y) - I_{135}(x,y) \\ I_{right}(x,y) - I_{left}(x,y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中; $S(x,y)$ 为斯托克斯矢量,其通过 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 这四个参数组成的列向量来表示, (x,y) 为空间坐标; S_0 为系统总的入射光光强,通过 0° 和 90° 方向的线偏振光光强之和来表示; S_1 参量为 0° 和 90° 方向的线偏振光光强之差; S_2 参量为 45° 和 135° 方向的线偏振光光强之差; S_3 参量为右旋和左旋圆偏振光光强之差。

当系统入射光为线偏振光时, S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 满足的关系为:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (3)$$

当系统入射光为部分偏振光时, S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 满足的关系为:

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (4)$$

基于斯托克斯矢量法,任何一束偏振光均可以用偏振角 Aop 、偏振度 Dop 和偏振椭圆率 ϖ 来表示:

$$\begin{cases} Aop = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1} \\ Dop = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \\ \varpi = \frac{1}{2} \arcsin \frac{S_3}{S_0} \end{cases} \quad (5)$$

当入射光经偏振检测系统成像时,光学系统对入射光偏振态的改变可以用穆勒矩阵来进行描述,入射光的斯托克斯矢量用 $S(x,y)$ 表示,则出射光的斯托克斯矢量为:

$$S'(x,y) = M_u \cdot S(x,y) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0(x,y) \\ S_1(x,y) \\ S_2(x,y) \\ S_3(x,y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 偏振检测系统设计参数

偏振成像系统的设计参数如表 1 所示。该偏振

成像检测系统的使用需求为:激光增材制造金属工件表面缺陷在高反射湮没状态下的高效稳健检测,检测系统工作距离约 300 mm,检测区域范围约 40 mm×40 mm,室温下工作,能够分辨微观尺度常见孔隙、划痕等缺陷。该偏振检测系统是基于分焦平面偏振成像原理,通过将微偏振片阵列直接集成在探测器的感光芯片上,能够实时成像,无需分光元件,体积小,且具有较高透过率、高消光比、高可靠性、低功耗等特点,更加适用于缺陷检测。在设计过程中,焦距的选择与物方分辨率、视场角大小等都有着密切关系,焦距的大小是由检测区域的面积大小、工作距离和图像传感器尺寸共同决定的,该设计选取市面上常见的 50 mm 焦距。选用的 CMOS 图像传感器分辨率为 2448 pixel×2048 pixel,单像素尺寸为 3.45 μm 。

表 1 偏振检测系统设计参数

Tab.1 Design parameters of polarization detection system

Design parameters	Value
Wavelength/ μm	0.4-0.7
Image sensor type	CMOS
Pixel count	2448×2048
Pixel size/ μm	3.45
Focal length f /mm	50.0
F number	2
Working distance WD /mm	300
Half image height y /mm	5.61

根据光学系统孔径角的概念,系统的视场角大小可由公式 (7) 计算:

$$2\omega = 2\arctan\left(\frac{y}{f}\right) \quad (7)$$

式中: ω 为半视场角; y 为系统的半像高; f 为系统的焦距。考虑到系统的加工与装调公差,在设计中计算像高比实际图像传感器尺寸多出余量 0.15 mm^[17]。

偏振检测系统水平方向的视场角为:

$$2\omega_1 = 2\arctan\left(\frac{(8.45 + 0.15)/2}{50}\right) \approx 9.83^\circ$$

式中: ω_1 表示偏振检测系统水平方向的半视场角。

偏振检测系统垂直方向的视场角为:

$$2\omega_2 = 2\arctan\left(\frac{(7.07+0.15)/2}{50}\right) \approx 8.26^\circ$$

式中： ω_2 表示偏振检测系统垂直方向的半视场角。

偏振检测系统对角线方向的视场角为：

$$2\omega_3 = 2\arctan\left(\frac{\sqrt{(8.45+0.15)^2+(7.07+0.15)^2}/2}{50}\right) \approx 12.81^\circ$$

式中： ω_3 表示偏振检测系统对角线方向的半视场角。

系统的物方视场区域大小可根据焦距、工作距离和图像传感器尺寸计算得到：

$$2Y = 2\frac{y \cdot WD}{f} \quad (8)$$

式中： Y 为视场区域半宽度； WD 为工作距离； y 为系统的半像高； f 为系统的焦距。

根据公式 (8) 可得偏振检测系统水平方向的视场区域宽度为：

$$2Y_1 = 2\frac{(8.45+0.15)/2 \cdot 300}{50} = 51.60 \text{ mm}$$

式中： Y_1 表示偏振检测系统水平方向的视场区域半宽度。

偏振检测系统垂直方向的视场区域宽度为：

$$2Y_2 = 2\frac{(7.07+0.15)/2 \cdot 300}{50} = 43.32 \text{ mm}$$

式中： Y_2 表示偏振检测系统垂直方向的视场区域半宽度。

偏振检测系统对角线方向的视场区域宽度为：

$$2Y_3 = 2\frac{\sqrt{(8.45+0.15)^2+(7.07+0.15)^2}/2 \cdot 300}{50} \approx 67.37 \text{ mm}$$

式中： Y_3 表示偏振检测系统对角线方向的视场区域半宽度。

系统的极限分辨率与图像传感器像素尺寸大小有关，偏振检测系统图像传感器的单像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ ，工作波段范围为 $0.4\sim 0.7 \mu\text{m}$ ，中心波长设置为 $0.550 \mu\text{m}$ ，最小艾里斑尺寸应不大于 $3.45 \mu\text{m}$ ，即：

$$\alpha = 1.22\lambda F = 1.22 \cdot 0.587 \cdot F \leq 3.45$$

得到 $F \leq 5.14$ 。又根据系统的照度公式^[18]：

$$E = \frac{\pi}{4}\tau L\left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (9)$$

式中： τ 为光学系统的透过率； L 为目标面的光照亮度； D 为入瞳直径； f 为系统的焦距。根据公式 (9) 可知，系统的相对孔径越大，光通量越大，系统的光照度

也越大，但是会导致光学元件的横向尺寸变大，使得光学设计与加工过程更为复杂，且系统成本更高。因此，综合考量后，选定偏振检测光学成像系统的 F 数为 2，能够满足照度和分辨能力的要求，系统入瞳直径为 25 mm 。

根据奈奎斯特采样定理，图像传感器探测目标的截止频率为：

$$NL = \frac{1000}{2\sigma} \quad (10)$$

式中： σ 为图像传感器像元尺寸。计算出偏振检测光学成像系统的截止频率为 144.93 lp/mm 。

综合以上偏振检测系统光学设计参数，可以通过公式 (11) 来评估系统像差校正的难度以验证设计的可行性^[19]：

$$C_m = \tan\omega \cdot \frac{D}{f} \cdot \sqrt{\frac{f}{100}} \quad (11)$$

通常情况下， $C_m \leq 0.24$ 时，认为系统的像差可以进行有效的优化校正。设计中得到 $C_m \leq 0.08$ ，表明系统的像差可以通过光学设计与像质优化进行校正。

2 偏振检测系统光学设计与分析

2.1 设计实例

在偏振成像系统设计中，为简化光学系统，减少镜片数目，提升系统的整体像质，引入了非球面的设计。传统的幂级数非球面拟合项目超过 10 项时，相关的 Gram 矩阵容易出现病态，导致面型表征失败^[20]。为了保证非球面加工良品率，在设计过程中需要控制好镜片的斜率。因此，在偏振成像系统中，基于 Q -type 非球面进行了像质优化，其 Q_{bsf} 非球面能够控制好镜面的均方根斜率。随着超精密加工与检测技术的发展，包括 Q -type 非球面在内的各类非球面的加工与检测已成为可能。目前针对 Q -type 非球面的光学系统设计主要集中在相机镜头、紫外光刻镜头和全景环带，在偏振成像系统中尚未见相关应用。

Q -type 非球面以 Q 型多项式为附件多项式，分为温和非球面 Q_{bsf} 和强非球面 Q_{con} ^[21]。 Q_{bsf} 非球面的基准二次曲面是最佳拟合球面，即利用非球面通光孔径的最大值和非球面表面的顶点拟合得到的理想球面，得到最佳拟合球面的曲率为：

$$\rho_{\text{bsf}} = \frac{2f(h_{\text{max}})}{h_{\text{max}}^2 + f(h_{\text{max}})^2} \quad (12)$$

式中： h_{max} 为非球面矢高最大值； $f(h_{\text{max}})$ 为 Q_{bsf} 非球面和最佳拟合球面的偏差，记作 ΔZ 。可以表示为：

$$\Delta Z(r) = \frac{r^2(1-r^2)}{\sqrt{1-\rho_{\text{bsf}}^2 h^2}} \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bsf}}(r^2) \quad (13)$$

式中： a_m 为非球面项的系数， $m=0, 1, 2, \dots, M$ ； M 为非球面的最高项数； h 为非球面的矢高， $h^2 = x^2 + y^2$ ； ρ 为非球面顶点处的曲率； r 为归一化的非球面矢高。

$r = h\rho/\rho h_{\text{max}} = h/h_{\text{max}}$ ，则 Q_{bsf} 非球面的表达式为：

$$Z(h) = \frac{\rho_{\text{bsf}} h^2}{1 + \sqrt{1 - \rho_{\text{bsf}}^2 h^2}} + \frac{r^2(1-r^2)}{\sqrt{1 - \rho_{\text{bsf}}^2 h^2}} \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bsf}}(r^2) \quad (14)$$

其中， $Q_m^{\text{bsf}}(r^2)$ 为一组 Jacobi 多项式，其前六项为：

$$\left\{ \begin{aligned} Q_0^{\text{bsf}}(r^2) &= 1 \\ Q_1^{\text{bsf}}(r^2) &= \frac{1}{\sqrt{19(13-16r^2)}} \\ Q_2^{\text{bsf}}(r^2) &= \sqrt{\frac{2}{95}} [29 - 4r^2(25 - 19r^2)] \\ Q_3^{\text{bsf}}(r^2) &= \sqrt{\frac{2}{2545}} \{207 - 4r^2[315 - r^2(577 - 320r^2)]\} \\ Q_4^{\text{bsf}}(r^2) &= \frac{1}{3\sqrt{131831}} \left\{ 16r^2 \left\{ \begin{aligned} &7737 - \\ &4653 - \\ &7381 - \end{aligned} \right. \left[2r^2 \left[8r^2(1168 - 509r^2) \right] \right] \right\} \\ Q_5^{\text{bsf}}(r^2) &= \frac{1}{3\sqrt{6632213}} \left\{ 32r^2 \left\{ r^2 \left\{ \begin{aligned} &66657 - \\ &28338 - \\ &135325 - \end{aligned} \right. \left[8r^2[35884 - r^2(34661 - 12432r^2)] \right] \right\} \right\} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

在优化过程中，能够避免非球面的幂级数多项式系数之间的相互干扰和精度丢失，有利于提高优化的效率。偏振成像系统的光路图如图 1 所示，系统最大尺寸为 33.4 mm，光学总长为 70 mm，后截距为 17.5 mm，半像高度为 5.61 mm，光学总长与焦距的比为 1.40。第七个光学表面 S7 和第九个光学表面 S9 的面型为 Q_{bsf} 非球面，其表面面型分别如图 2 和图 3 所示，边缘处最大矢高为 1.070 mm 和 0.826 mm，S7 和 S9 两个 Q_{bsf} 非球面的相关系数如表 2 所示。 Q_{bsf} 非球面能够保留更多的有效数字，有利于提高光学系统的优化效率和加工精度。S7 面上 Q_{bsf} 非球面偏离量为 0.371 μm ，S9 面上 Q_{bsf} 非球面偏离量为

0.434 μm 。显而易见， Q_{bsf} 非球面的加工性强，有利于提高加工效率和精度。

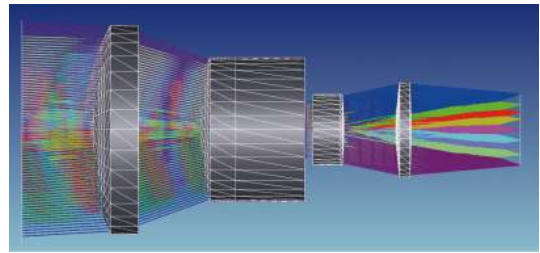


图 1 偏振成像系统光路图

Fig.1 Optical path diagram of polarization imaging system

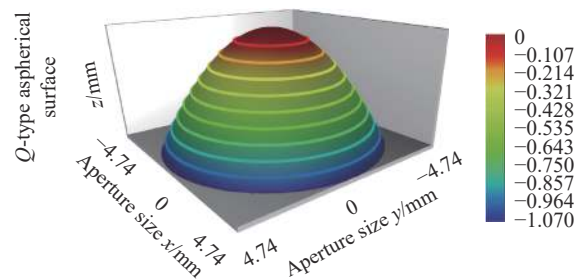


图 2 Q -type 非球面 S7 面型

Fig.2 Q -type aspheric of surface S7

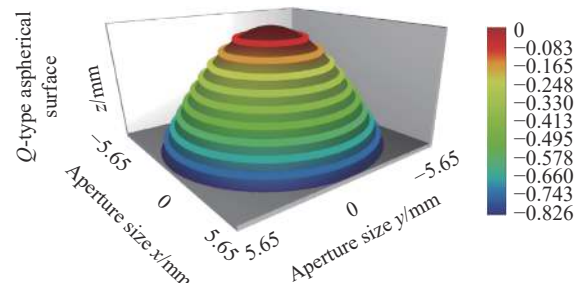


图 3 Q -type 非球面 S9 面型

Fig.3 Q -type aspheric of surface S9

表 2 Q -type 非球面 S7 和 S9 各项系数

Tab.2 Q -type aspheric coefficient of surface S7 and S9

Parameter	S7	S9
$\rho_{\text{bsf}}/\text{mm}$	-10.3915	-18.6013
h_{max}/mm	4.740	5.650
a_0/mm	7.376×10^{-1}	-2.020×10^{-2}
a_1/mm	4.195×10^{-1}	-1.133×10^{-3}
a_2/mm	-1.220×10^0	-3.396×10^{-1}
a_3/mm	6.795×10^{-1}	3.037×10^{-1}
a_4/mm	-1.882×10^{-1}	-1.219×10^{-1}
a_5/mm	2.160×10^{-2}	2.180×10^{-2}

经过上述优化步骤后得到了偏振检测光学成像系统设计结果,需进一步完成调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、点列图、能量图、场曲和畸变等像质评价,以评估系统的成像性能是否满足设计需求。偏振成像系统在工作距离为 300 mm 下的像质评价结果(包括 MTF 曲线图、场区畸变图、点列图、能量包围图、相对照度图和波前图)如图 4~图 9 所示。利用光学传递函数来综合评价光学系统的成像质量,是基于将物体看作是各种频率的波谱组成,即将物体的光场分布函数展开成傅里叶级数的形式,利用 MTF 计算所有视场位置的衍射调制传递函数,光学传递函数能全面反映光学系统的成像质量^[22]。 $MTF=(I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min})$,其中 I_{max} 和 I_{min} 分别表示最高和最低亮度。如图 4 所示,截止频率 144.93 lp/mm 处,偏振成像系统在轴上视场、0.3 视场、0.5 视场、0.707 视场和 1.0 视场下的 MTF 值分别为 0.54034、0.51694、0.37505、0.37505 和 0.32172,各视场的 MTF 值均大于 0.3。因此,偏振成像系统的设计结果良好,成像质量符合设计要求。

场曲是轴外点光束像差,其产生的原因是轴外光束在成像面上的汇聚点会由于光学系统的折射而相对高斯像点产生偏移。场曲仅是视场的函数,因为图

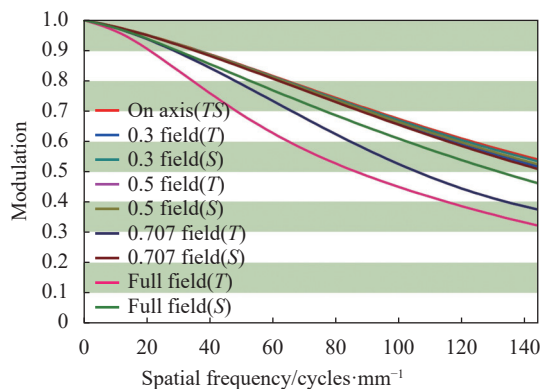


图 4 偏振检测系统 MTF 评价图

Fig.4 MTF evaluation chart of polarization detection system

像传感器为平面,场曲在一定程度上会对系统的成像质量造成较大影响。而畸变是衡量物体经过光学系统成像后发生变形的程度,其对于系统成像的清晰度没有影响,但是在缺陷检测的应用中畸变会影响对目标的几何特征识别与表征。像质评价过程中,应用 SMIA TV 畸变来进行畸变分析,其中,SMIA TV 畸变 (%)= $((h'-h)/h) \times 100\%$, h' 为图像角点的半高度, h 为图像中心的半高度。偏振检测光学成像系统的场曲和畸变图如图 5 所示,图 5(a) 为像散场曲曲线图,同波长的 T 和 S 曲线间距表示像散大小,横坐标的数值表示场曲值,由图可知系统最大的场曲值仅为 0.02,且

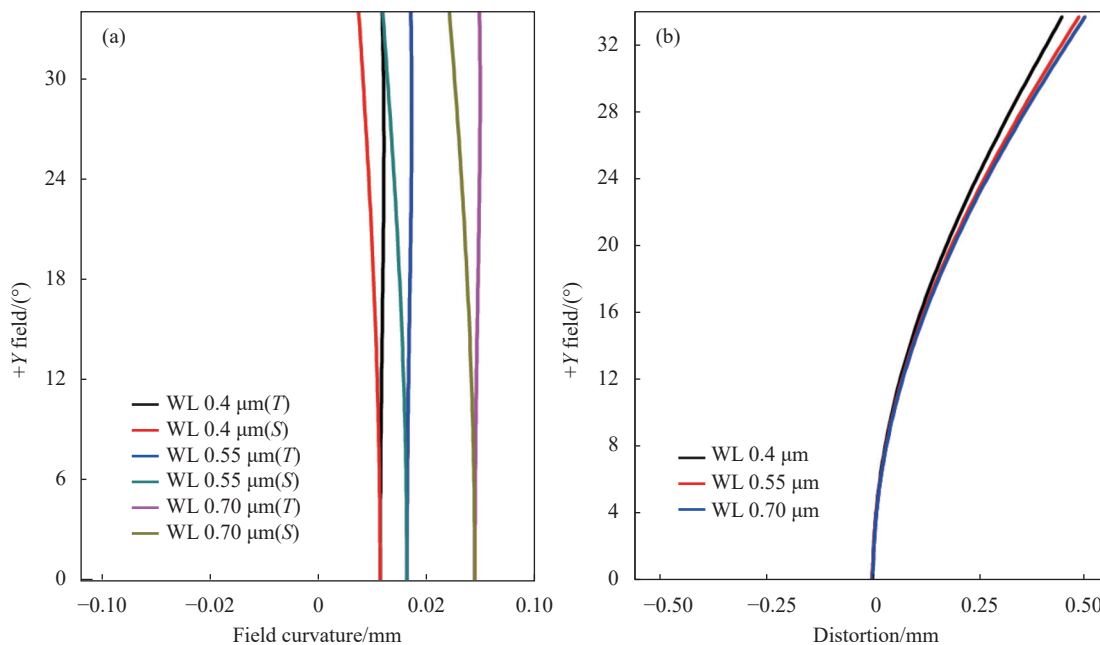


图 5 偏振检测系统 (a) 场曲与 (b) 畸变评价图

Fig.5 (a) Field curvature and (b) distortion evaluation diagram of polarization detection system

各工作波长下场曲线的间距很小,表明像散均较小,不影响图像传感器上接收图像的清晰度;图 5(b)为畸变图,可以看出畸变最大为 0.50%,完全满足设计要求。

点列图利用点的密集程度来衡量光学系统的成像质量,常常把集中 60% 以上的点所构成的图形范围称为有效的弥散斑^[23]。偏振检测光学成像系统的点列图如图 6 所示,不同颜色代表不同的工作波长。已知系统像元大小为 3.45 μm ,不同视场下点列图数值的相对变化不大,艾里斑尺寸为 1.931 μm ,轴上视场、0.3 视场、0.5 视场、0.707 视场和 1.0 视场下的弥

散斑均方值分别为 1.845 μm 、1.963 μm 、2.284 μm 、2.698 μm 和 4.281 μm ,其主要能量均集中在像元尺寸内,虽然边缘视场的弥散斑相对较为分散,但是其均方根值也小于两倍像元尺寸,能够满足设计需求。偏振成像系统的各视场下能量包围分布曲线如图 7 所示,可见轴上视场、0.3 视场、0.5 视场、0.707 视场有 81.51% 以上的能量都集中在像元尺寸 3.45 μm 内,1.0 视场下单个像元尺寸内能量占 73.34%,两倍像元尺寸内占 90.22%,系统的能量集中度高,能够满足成像检测需求。

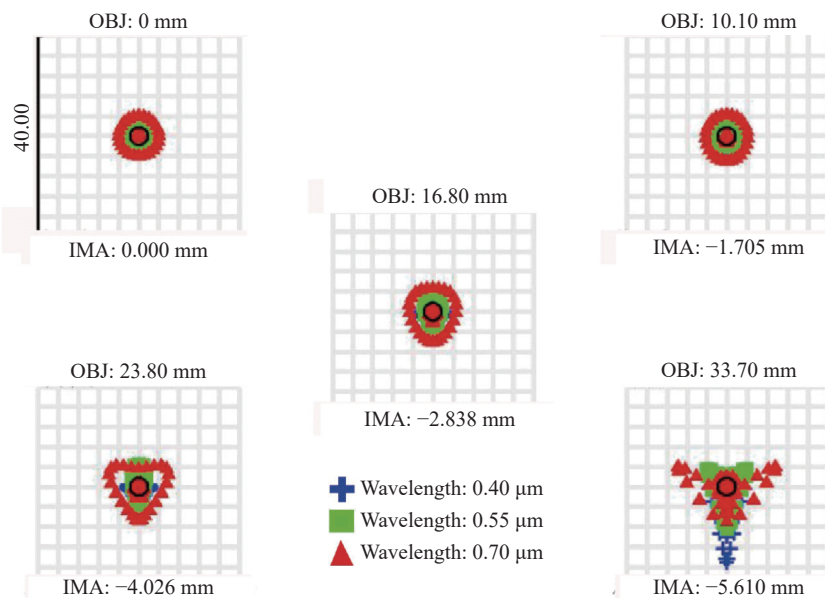


图 6 偏振检测系统点列图评价结果

Fig.6 Geometric spot diagrams results of the polarization detection system

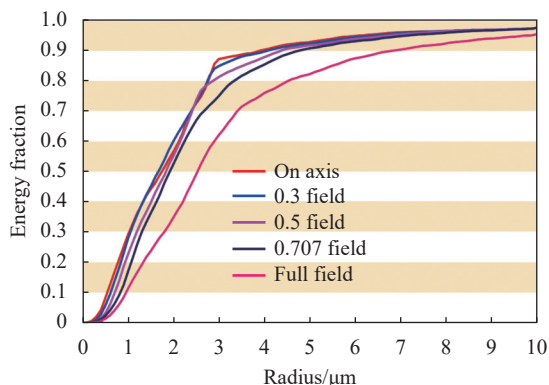


图 7 偏振检测系统能量包围图评价结果

Fig.7 Evaluation results of energy envelope diagram of polarization detection system

相对照度是指在图像传感器像平面上不同坐标点和中心坐标点的照度之比,该比值受畸变、渐晕和瞳孔像差的影响^[24]。如果光学系统的相对照度小,获取图像的照度不均匀,容易产生曝光不足或过度曝光的问题,严重影响视觉检测中的图像处理 and 检测目标的特征提取与表征。偏振成像光学系统的相对照度曲线如图 8 所示,其数值大于 99.88%,符合设计要求。系统的波前图如图 9 所示,也可用于评价系统的成像质量。理论上,波前的波峰-波谷 (Peak-to-Valley Value, PV) 值应小于 $\lambda/4$,表示成像系统具有较高的光学质量。由图可知,设计的 PV 值为 0.2242 λ ,其均方根数值为 0.0605 λ 。综合以上分析表明,偏振检测系

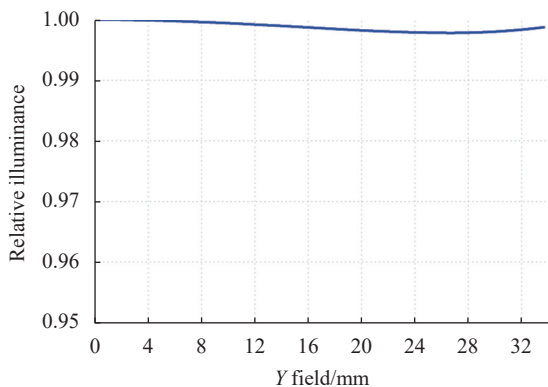


图 8 偏振检测系统相对照度评价图

Fig.8 The relative illuminance curve of polarization detection system

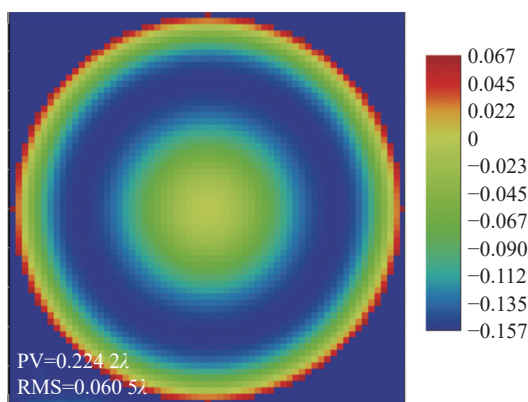


图 9 偏振检测系统波前图

Fig.9 The wavefront map of polarization detection system

统的成像质量较佳, 能够满足设计需求。

2.2 公差分析

基于上述偏振检测系统光学设计优化的结果, 在实际应用前还需考虑加工和装配过程所产生的误差, 通过完善的公差分析来确定系统误差范围, 以满足成像系统的要求。设计方案的公差分析过程中首先对光学系统的光学和结构参数设定初始公差数值并添加补偿参数, 同时进行蒙特卡洛分析, 用 MTF 平均值作为分析评价标准。根据分析结果, 针对个别参数的公差进行适当加紧或者放松, 得到满足加工装配要求的公差分析结果。

偏振检测系统的公差数值如表 3 所示。公差分析结果与蒙特卡洛分析结果分别如图 10 和图 11 所示。

其中, 透镜半径公差为 ± 0.20 mm, 中心厚度公差为 ± 0.14 mm, 表面偏心公差为 ± 0.08 mm, 表面倾斜公差为 ± 0.06 mm, 表面不规则度公差为 0.14 fringe, 元

表 3 偏振检测系统公差值

Tab.3 Tolerance value of polarization detection system

Tolerance	Value
Radius/mm	± 0.20
Thickness/mm	± 0.14
Surface eccentricity/mm	± 0.08
Surface inclination/mm	± 0.06
Surface irregularity/fringe	0.14
Element eccentricity/mm	± 0.05
Element tilt/(°)	± 0.20
Refractive index	± 0.001
Abbe number	$\pm 1\%$

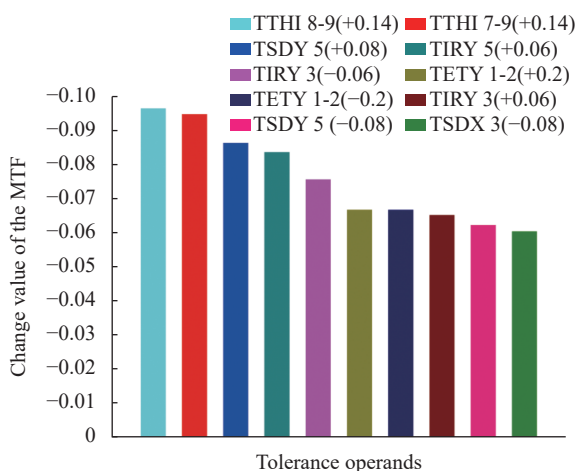


图 10 偏振检测系统的公差分析结果

Fig.10 Tolerance analysis results of polarization system

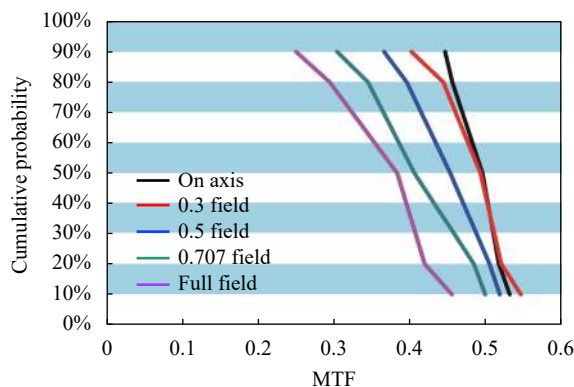


图 11 偏振检测系统的蒙特卡洛分析结果

Fig.11 Monte Carlo analysis results of the polarization detection system

偏心公差为 ± 0.05 mm, 元件倾斜公差为 $\pm 0.2^\circ$, 折射率公差为 ± 0.001 , 阿贝数公差为 $\pm 1\%$ 。采用灵敏度分析, 选择 144.93 lp/mm 处的 MTF 值作为评价标准, 蒙特卡洛分析模拟 2 000 次得到结果。控制 MTF 平均值在截止频率处的下降幅度在 10% 以内, 得到影响最大的前 10 项公差项目。分析结果表明, MTF 数值变化最大为 9.64%, 由 +0.14 mm 的表面偏心公差所造成。如图 10 所示, 影响最大的前 10 项公差项目所造成的 MTF 值下降幅度分别为: 9.64%、9.47%、8.63%、8.36%、7.56%、6.67%、6.67%、6.51%、6.22% 和 6.03%。如图 11 所示, 在轴上视场、0.3 视场、0.5 视场、0.707 视场和 1.0 视场下, MTF 值均有 90% 的概率大于 0.44508、0.40105 和 0.36488、0.30306 和 0.24891。综合以上公差分析结果, 可知偏振检测系统设计满足要求, 符合加工和装配的条件。

3 偏振检测实验结果

实验测试的激光增材制造工件表面存在高反射现象的区域, 使用常规的可见光相机采集图像容易导致部分关键缺陷信息被湮没, 严重影响检测结果。为了验证所提出的缺陷偏振检测光学系统对于检测表面高反射光的抑制效果, 搭建基于所设计的偏振检测光学系统的装置, 如图 12 所示。所搭建的高反射工件表面缺陷偏振检测系统包括 CMOS 传感器、所设计的偏振检测光学系统、照明装置、检测平台、位移控制器、大理石底座、照明控制器和图像处理计算机。其中, CMOS 传感器的像素为 2448 pixel \times 2048 pixel, 单像素尺寸为 3.45 μ m, 采样频率为 24 fps; 微偏振片阵列直接集成在 CMOS 探测器的感光芯片上, 能够有效保证每个单元与感光芯片的像素单元大小一致且逐一对准, 当光线通过微偏振片到达探测器后, 可同时获得四个对应的线偏振调制方向, 具有较高透过率、高消光比、高可靠性、低功耗等特点。设计的偏振检测光学系统焦距为 50 mm, 工作距离为 300 mm, F 数为 2, 在截止频率 144.93 lp/mm 处全视场下的 MTF 值大于 0.3; 照明装置主要为检测过程提供均匀照明条件, 照明控制器用于调节照明亮度; 用于图像处理和计算的计算机为 Lenovo ThinkPad S2, CPU 为 i5 8250U, 最大频率为 1.8 GHz。基于搭建的偏振检测

系统采集不同偏振角度下检测图像并将其从 RGB 通道转换为 HSV 通道进行阈值判定, 阈值大小为 0.65。进一步基于斯托克斯矢量法提取高反射检测图像中的缺陷偏振态信息, 计算得到斯托克斯矢量、偏振度和偏振角检测图像, 并将所得图像进行融合处理, 实现缺陷检测图像的高反射抑制重构, 进而实现高效、稳健的高反射区域表征和分析。

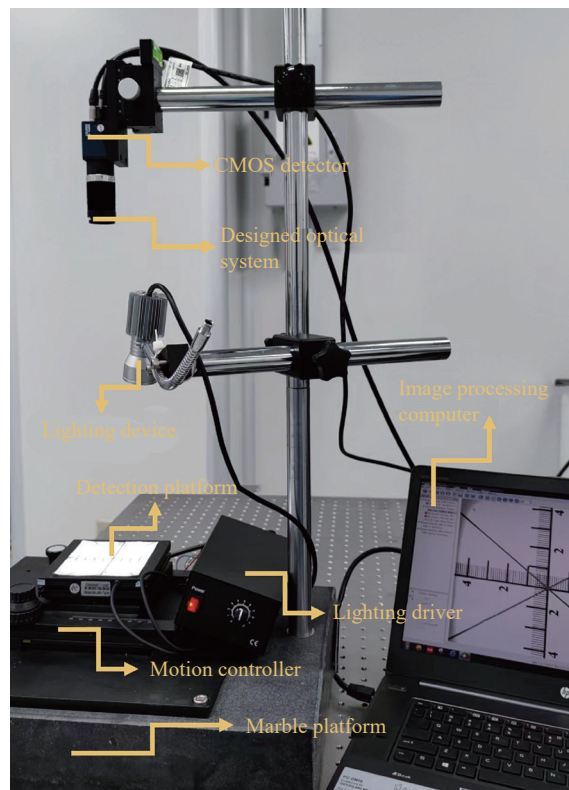


图 12 高反射工件表面缺陷偏振检测系统

Fig.12 Schematic of the polarization detection system for surface defects of highly reflective workpieces

图像的 RGB 模型将获取到的光强信息分为红色、绿色和蓝色三个独立的信道, 其根据图像颜色的融合进行区分和定义, 但是在基于偏振技术的缺陷检测应用中, 无法使用 RGB 模型来分析检测图像的高反射区域及高反射光抑制效果。因此, 将检测图像从 RGB 通道转换为包含色调、饱和度和明度信息的 HSV 通道, 通过提取与亮度相关的明度信道数值 (V-channel Value) 来分析图像中不同像素点的明亮程度。其中, 缺陷检测图像从 RGB 通道转换为 HSV 通道满足以下关系:

$$\begin{cases}
 I_H = \begin{cases} 0, & I_{MAX} - I_{MIN} = 0 \\ \frac{I_G - I_B}{I_{MAX} - I_{MIN}} \times 60, & I_{MAX} - I_{MIN} = I_R \\ \left(\frac{I_B - I_R}{I_{MAX} - I_{MIN}} + 2 \right) \times 60, & I_{MAX} - I_{MIN} = I_G \\ \left(\frac{I_R - I_G}{I_{MAX} - I_{MIN}} + 4 \right) \times 60, & I_{MAX} - I_{MIN} = I_B \end{cases} \\
 I_S = \begin{cases} 0, & I_{MAX} - I_{MIN} = 0 \\ \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX}}, & I_{MAX} - I_{MIN} \neq 0 \end{cases} \\
 I_V = I_{MAX} \\
 I_{MAX} = \max(I_R, I_G, I_B), I_{MIN} = \min(I_R, I_G, I_B)
 \end{cases} \quad (16)$$

式中： I_R 、 I_G 和 I_B 分别表示检测图像 I 在 RGB 通道的红、绿和蓝色信道分量； I_H 、 I_S 和 I_V 分别表示检测图像 I 在 HSV 通道的色调、饱和度和明度分量。

在偏振角度为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 下分别采集了四组高反射表面缺陷检测图像，如图 13 所示。根据公式 (2)~(5) 计算得到检测图像的斯托克斯矢量图像 S_1 和 S_2 以及偏振度图像 Dop 和偏振角图像 Aop ，如图 14 所示。经偏振处理后，斯托克斯矢量图像 S_1 和 S_2 的高亮度值像素点所占比例较低，低于阈值的像素分别占 98.15% 和 99.08%，偏振度和偏振角图像所占的比例分别为 83.29% 和 99.86%，相比于原始强度图像明显消除了高反射区域的负面影响。显见，检测图像中为常见的激光增材制造孔隙缺陷。在激光增材制造材料成型过程中进行着快速的融化与凝固，导致熔池中的气体难以及时释放，留在冷却构件中形成孔隙。同时，粉末颗粒会融化成少量气体或粉末中含有少量气体，一旦这些气体不能及时释放，就会产生孔隙缺陷。计算处理的斯托克斯矢量图像 S_1 和 S_2 代表了缺陷检测图像的线偏振信息，同强度图像相比具有更为均匀的灰度分布，图像中的部分关键缺陷区域的边缘轮廓信息得以凸显，但是也丢失了部分细节信息。而缺陷检测的偏振度图像和偏振角图像相比于斯托克斯矢量图像 S_1 和 S_2 具有更为清晰的缺陷区域细节信息，能够起到很好的细节补充作用。显见，所得斯托克斯矢量、偏振度和偏振角图像凸显的信息具有很强的互补性，为了提升系统整体的缺陷检测能力以及后期缺陷表征的可靠性，对上述缺陷检测信息进行融合，可以显著增大图像的信息量和对比度。

Fused 图像为斯托克斯矢量图像 S_1 和 S_2 以及偏振度 Dop 和偏振角 Aop 图像融合后的结果如图 14 所

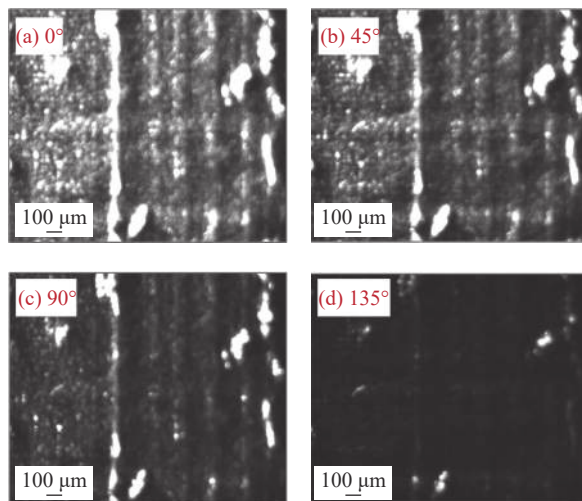


图 13 不同偏振角度下高反射表面缺陷检测图像

Fig.13 Detection images of high reflective surface damage precursors at different polarization angles

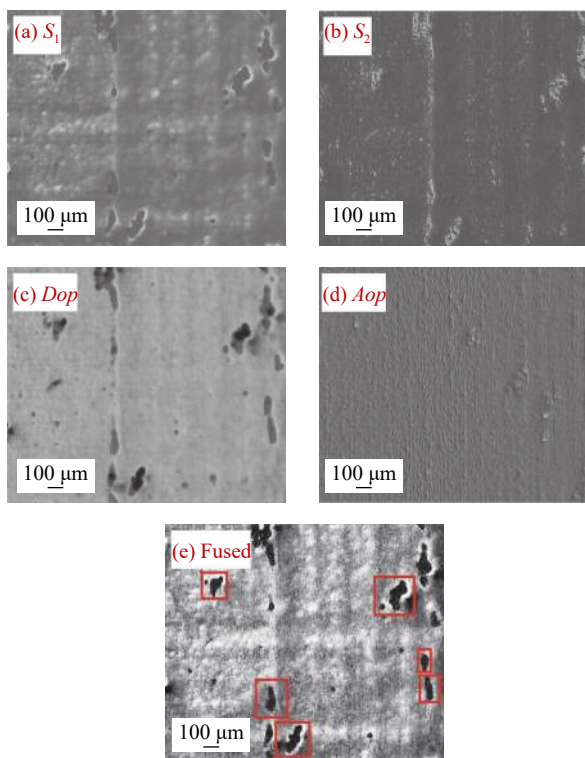


图 14 斯托克斯矢量图像、偏振度和偏振角图像，及其融合处理结果
Fig.14 The Stokes vector, polarization degree, polarization angle, and fused image processing results

示，可以看出，融合后的图像在缺陷区域的边缘轮廓上有明显的凸显作用，并且缺陷区域与邻近背景区域的对比度得以有效提升，使得缺陷的细节更为清晰直观，图像整体的对比度、清晰度以及信息量均得以提

升。为了客观、定量地评估融合后的图像质量,并与原始强度图像进行对比分析,采用平均梯度 (Average Gradient, AG)、信息熵 (Entropy, E)、空间频率 (Spatial Frequency, SF)、边缘强度 (Edge Intensity, EI)、标准差 (Standard deviation, SD) 对图像进行评估,结果如图 15 所示。相比于原始强度图像,融合图像的平均梯度、信息熵、空间频率、边缘强度和标准差的指标平均提

升率分别为 163.46%、20.04%、163.20%、123.03% 和 28.41%。以上结果充分说明:经融合处理后的偏振图像具有更加丰富的信息量,且图像细节更清晰,缺陷区域的对比度更高,缺陷的边缘轮廓信息更为清晰,对激光增材制造高反射金属工件表面缺陷的特征提取与表征分析具有重要意义。

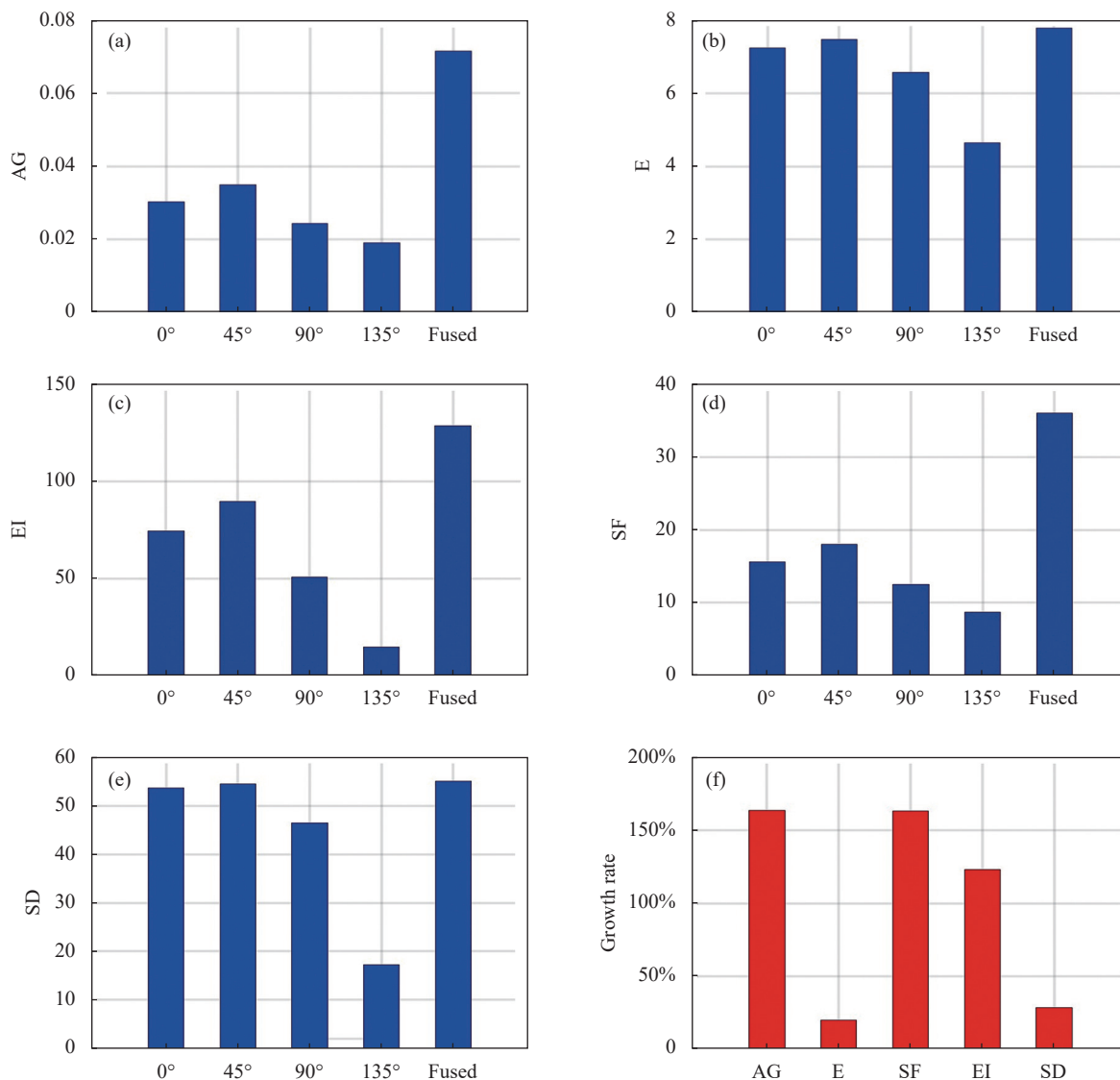


图 15 斯托克斯矢量图像及偏振度和偏振角图像处理结果

Fig.15 Stokes vector image, polarization degree and polarization angle image processing results

4 结 论

针对现有的激光增材制造高反射金属工件表面缺陷的高精稳健检测与评估难题,开展了基于高反射抑制效应的激光增材制造工件表面缺陷偏振检测系

统的研究。基于 Q -type 非球面设计了一款焦距为 50 mm、 F 数为 2、工作距离为 300 mm 的偏振检测光学系统。MTF 在奈奎斯特频率为 144.93 lp/mm 处优于 0.42, 满足偏振检测光学系统成像质量要求。系统最大的场曲值仅为 0.02, 畸变为 0.50%, 全视场范围内

相对照度大于 99.88%, 系统 PV 值为 0.2242λ 。公差分析和 2000 次蒙特卡洛分析结果显示, 在满足偏振检测系统成像质量的条件下, 公差范围合理, 符合加工与装配条件。基于斯托克斯矢量法采集不同偏振角度的检测图像并提取高反射检测图像中的缺陷偏振态信息, 实现斯托克斯矢量、偏振度和偏振角信息的高反射抑制重构。实验结果表明, 所提出的偏振检测光学系统能够有效抑制原始强度检测图像高反射区域的负面影响, 提升偏振检测图像对比度、凸显缺陷轮廓信息及形貌特征, 对激光增材制造高反射金属工件表面缺陷的特征提取与表征分析具有重要意义。

参考文献:

- [1] Pragana J P M, Sampaio R F V, Bragança I M F, et al. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review [J]. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2021, 2: 100032.
- [2] Chen Y, Peng X, Kong L B, et al. Defect inspection technologies for additive manufacturing [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3: 022002.
- [3] Mercado R, Rojas A. Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(1): 17-31.
- [4] Ma C P, Guan Y C, Zhou W. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 93: 171-177.
- [5] Ganapathy S W, Schmult W S. Analysis and design considerations for a real-time system for non-destructive evaluation in the nuclear industry [J]. *Ultrasonics*, 1982, 20: 249-256.
- [6] Fernandez A G, Grottker S, Emmelmann C, et al. In-situ quality assurance of surface roughness using an on-axis photodiode [C]//Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, DDMC, 2020: 032059.
- [7] Venkata K N, Sebastian A A, Jakob S N, et al. Considerations for interpreting in-situ photodiode sensor data in pulsed mode laser powder bed fusion [C]//Proceedings of the Joint Special Interest Group Meeting between Euspen and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing, 2019.
- [8] Bisht M, Ray N, Verbist F, et al. Correlation of selective laser melting-melt pool events with the tensile properties of Ti-6Al-4V ELI processed by laser powder bed fusion [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 302-306.
- [9] Pavlov M M, Doubenskaia I S. Pyrometric analysis of thermal processes in SLM technology [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 523-531.
- [10] Schwerdtfeger J, Singer R F, Körner C. In situ flaw detection by IR-imaging during electron beam melting [J]. *Journal of Rapid Prototype*, 2012, 18: 259-263.
- [11] Shrestha S, Chou K. Single track scanning experiment in laser powder bed fusion process [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 26: 857-864.
- [12] Zur J J, Kleszczynski S, Schneider D, et al. High-resolution imaging for inspection of laser beam melting systems [C]//IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2013: 707-712.
- [13] Marco G, Vittorio L, Quirico S, et al. In-process monitoring of selective laser melting: Spatial detection of defects via image data analysis [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(5): 051001.
- [14] Millon C, Vanhoye A, Obaton A F, et al. Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing [J]. *Welding in the World*, 2018, 62: 653-661.
- [15] Zhou Qiangguo, Huang Zhiming, Zhou Wei. Research progress and application of polarization imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(9): 817-828. (in Chinese)
- [16] Liu Zheng. Research of the target detection technology based on visible light polarization imaging[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [17] Ma Hongtao, Zhang Xiaohui, Han Bing. Design of telescope system with a wide spectrum, large field and small distortion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1755-1757. (in Chinese)
- [18] Cheng D, Wang Y T, Yu L, et al. Optical design and evaluation of a 4 mm cost-effective ultra-high-definition arthroscope [J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5: 8.
- [19] Jing Guifen. Design of optical system for monitoring based on optical fiber[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] Forbes G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [21] Tian Y, Yang W, Wang J. Image fusion using a multi-level image decomposition and fusion method [J]. *Applied Optics*,

- 2021, 60(24): 7466-7479.
- [22] Peng X, Kong L B. Design of a real-time fiber-optic infrared imaging system with wide-angle and large depth of field [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 011201.
- [23] Chen Jianfa, Pan Zhifeng, Wang Helong. Design of infrared optical lens with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190443. (in Chinese)
- [24] Zhou Xiangdong, Bai Jian. Small distortion panoramic annular lens design with Q-Type aspheres [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0722003. (in Chinese)

Design of optical polarization system for defect detection on highly reflective surfaces

Peng Xing^{1,2,3}, Zhai Dede^{1,2,3}, Shi Feng^{1,2,3*}, Tian Ye^{1,2,3}, Song Ci^{1,2,3}, Tie Guipeng^{1,2,3}, Shen Yongxiang^{1,2,3}, Qiao Shuo^{1,2,3}, Shen Xiao^{1,2,3}, Zhang Wanli^{1,2,3}, Wang Sheng^{1,2,3}, Ruan Ningye^{1,2,3}

- (1. College of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, Changsha 410073, China;
3. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, Changsha 410073, China)

Abstract:

Objective The defect detection of laser additive manufacturing (AM) has always been a technical problem that restricts its development. Due to the complexity of the defect generation mechanism, the insufficient detection information of the highly reflective workpiece surface, the low precision, the complex detection conditions, and other reasons, it is difficult to achieve high-precision and robust detection of defects. When the defect detection system based on reflective illumination performs detection on the surface of a metal part with high reflectivity, the pixels of the image sensor are usually overexposed due to the strong reflective light, resulting in a large amount of annihilated defect information, and it's difficult to highlight and extract the information of the defect area. Therefore, in view of the engineering problem of the high-precision robust detection and evaluation of surface defects of high reflective metal workpieces manufactured by laser AM, a polarization detection system based on a high reflective suppression effect is designed, which can effectively avoid background clutter interference and improve the defect detection capability in complex detection environment.

Methods The system is designed based on Q-type aspheric surface, which has a strong aberration correction ability and simplifies the system structure. The deviation between the seventh surface shape and the best-fitting spherical surface is only 0.371 μm (Fig.2-3). The deviation between the 9th surface shape and the best-fitting spherical surface is only 0.434 μm . The focal length is 50 mm, the number of F is 2, and the working distance is 300 mm.

Results and Discussions The simulation results show that the modulation transfer function is better than 0.42 at the Nyquist frequency of 144.93 lp/mm, meeting the requirements of the image quality (Fig.4). The tolerance analysis and 2 000 Monte Carlo analysis results indicate that the tolerance range is reasonable and meets the processing and assembly conditions under the condition of satisfying the image quality of the polarization detection system (Fig.10-11). To verify the suppression effect of the defect polarization detection optical system on the highly reflective light of the detection surface, the experimental device is built based on the designed polarization detection optical system (Fig.12). Based on the constructed polarization detection system, the detection images under different polarization angles are collected and converted from the RGB channel to the

HSV channel for threshold determination. Furthermore, based on the Stokes vector method, the defect polarization information in the high-reflection detection image is extracted. The Stokes vector, degree of polarization, and angle of polarization detection image are calculated. The calculated image is fused to achieve the high-reflection suppression reconstruction of the defect detection image, thus achieving efficient and robust high reflection area characterization and analysis. The experimental results show that the fused image has a prominent role in the edge contour of the defect area, and the contrast between the defect area and the adjacent background area has been effectively improved, making the details of the defect clearer and more intuitive (Fig.14). The overall contrast, clarity, and information content of the image have been improved. Besides, to objectively and quantitatively evaluate the quality of the fused image and compare it with the original intensity image, the average gradient (AG), entropy (E), spatial frequency (SF), edge intensity (EI), and standard deviation (SD) are used to evaluate the image, the results are shown (Fig.15). Compared with the original intensity image, the average improvement rates of the average gradient, information entropy, spatial frequency, edge intensity, and standard deviation of the fused image are 163.46%, 20.04%, 163.20%, 123.03%, and 28.41% respectively.

Conclusions The results fully illustrate that the polarized image after fusion processing has more abundant information, the image details are clearer, the contrast of the defect area is higher, and the edge contour information of the defect is clearer. The feature extraction and characterization analysis of the surface defects of highly reflective metal workpieces in metal manufacturing are of great significance.

Key words: laser additive manufacturing; polarization detection; optical design; defects

Funding projects: National Key R&D Program of China (2020YFB2007504, 2021YFC2202101); National Natural Science Foundation of China (U1801259); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XD25020317)