

基于白光干涉的 ICF 靶丸表面缺陷测量方法

尹智瑶, 郭仁慧*, 杨鑫, 刘成兴, 李建欣

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 针对激光惯性约束聚变实验中的靶丸等微球表面缺陷的真实高度测量问题,为解决现有测量方法存在的缺陷跃变处 2π 整数倍相位缺失问题,提出一种基于垂直扫描白光干涉技术的零位显微干涉测量方法。该方法采用白光球面零位干涉思想,通过垂直扫描球面干涉获取全视场白光干涉图,然后运用七步移相算法及蝙蝠翼校正算法实现靶丸表面缺陷的形貌计算,最后将白光干涉测量法与激光干涉测量法进行对比实验。结果表明,白光干涉法能够有效解决激光干涉法在缺陷跃变处的 2π 整数倍相位缺失问题,实现靶丸表面缺陷的真实高度测量,从而扩展靶丸类微球表面缺陷的测量范围。

关键词 测量; 白光干涉; 球面零位干涉; 表面缺陷; 蝙蝠翼校正算法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1012004

Measurement Method for Surface Defects on ICF Capsules Based on White Light Interferometry

Yin Zhiyao, Guo Renhui*, Yang Xin, Liu Chengxing, Li Jianxin

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China

Abstract According to the real height measurement of defects on the surface of microspheres such as capsules in laser inertial confinement fusion (ICF) experiments, a null microscopy interferometric measurement method based on vertical scanning white light interferometry is proposed to solve the problem of missing integer multiples of phase 2π at the defect jumps in existing measurement methods. The method adopts the concept of white light spherical null interferometric microscopy, and obtains the full field of view white light interferograms through vertical scanning spherical interference. Then, the seven-step phase-shifting algorithm and the bat-wing correction algorithm are used to calculate the surface defect morphology of ICF capsules. Finally, the white light interferometry is compared with the laser interferometry through experiments and the results show that the white light interferometry can effectively solve the problem of missing integer multiples of phase 2π at the defect jumps, realize the real height measurement of the ICF capsule surface defects, and extend the measurement range of microsphere surface defects.

Key words measurement; white light interferometry; spherical null interferometry; surface defects; bat-wing correction algorithm

1 引言

激光惯性约束核聚变(ICF)是热核爆炸模拟、天体物理的重要研究手段^[1-2],主要利用高能量密度的激光轰击球形靶丸,使热核燃料压缩达到高温状

态,实现聚变点火。其中,作为核心部件的靶丸,其表面形貌的任何微小缺陷都可能引发不对称性压缩,导致实验效率降低甚至打靶失败,因此,对靶丸等微球表面缺陷的高精度测量具有重要的现实意义。

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-17; 录用日期: 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(62171225,U2031131,61975079)

通信作者: *grh@njust.edu.cn

近年来,国内外学者在微观形貌测量领域展开了研究,传统的缺陷检测方法主要包括显微镜测量、数字全息显微和干涉测量等方案,其中,2015年,四川大学的徐伟等^[3]在实验中分别利用扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)分析了不同压强条件下制备的中空微球的表面形貌。SEM和AFM的分辨率满足精度要求,但此时对应的视场为微米量级。Hermerel等^[4-5]提出采用数字全息显微法测量微球外表面轮廓信息的方法,该方法仅需采集一幅全息图像即可获得物体的相位与振幅信息,但单次测量的有效范围较小,不适合实际应用。随着光学干涉测量法的广泛发展,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)采用移相衍射干涉仪开展了靶丸全表面形貌检测的研究^[6];卢丙辉^[7]在LLNL的靶丸测量方案基础上进行了改进,保证了采集的干涉图中不存在非相干光强叠加形成的背景光强,从而提高了干涉条纹对比度;南京理工大学研究团队研制了一种基于零位显微干涉(NIM)的微球表面缺陷检测装置^[8-9],实现了不同尺寸微球轮廓形貌的高精度、无损式检测,且所测得的图像质量较高。然而,靶丸表面缺陷的特点是边缘处梯度较大,采用激光干涉技术测量其表面缺陷高度时,边缘处出现采样周期缺失,使得复原相位存在 2π 的整数倍缺失,从而使得获取的缺陷高度比真实高度要低^[10]。

白光干涉测量技术具有低相干性、大量程、非接触、高精度的特点^[11-12],相较于激光干涉测量技术更适用于台阶、沟槽等阶跃型表面形貌的测量。因此,本文将白光干涉运用于球面形貌测量中,提出一种基于垂直扫描白光干涉技术的Linnik型零位显微干涉的表面缺陷测量方法。首先建立用于球面测量的白光零位干涉模型,实现球面全视场的垂直扫描白光干涉,再应用传统的七步移相算法和改进的蝙蝠翼效应校正算法获取干涉图像的相位信息,实现靶丸表面缺陷真实高度的高精度测量,从而解决激光干涉测量中相位信息存在的 2π 整数倍相位缺失问题。

2 系统测量原理及算法

2.1 用于球面测量的白光零位干涉光路

白光干涉测量光路结构主要包括Michelson型、Mirau型和Linnik型,通过干涉光路使待测结构表面反射回来的测试光与参考光形成干涉条纹,宽光谱的低相干性决定了其干涉条纹的干涉极值只发生在零光程差附近,且条纹对比度随光程差的增

大迅速降低^[13]。这三种结构在平面元件的检测中得到了广泛应用,但是在测量靶丸这类球面形时,若依然采用平面作为参考面,会使得干涉条纹分布非常密集,在视场较大的区域干涉条纹过密导致欠采样,从而使得测量结果出现错误,因此条纹有效视场被限制在探测器中心一个非常小的区域内,使得测量效率降低。为了解决这个问题,提出采用球面参考镜的方式,使得参考光路经反射参考镜的反射后原路返回并与测试光路相遇后发生干涉,使得条纹不再集中,进而增大了测量视场。

本文提出的用于球面测量的白光零位显微干涉靶丸表面缺陷测量系统的光路如图1所示。系统采用传统的Linnik型显微干涉成像光路,将参考平面镜换成光洁微球,被测件为靶丸。白光光源模块包括白光光源、透镜和孔径光阑,调节三者相对位置,使得在孔径光阑处形成点光源,白光点光源出射的理想球面波经分光棱镜(BS)及偏振片1形成完全线偏振光并入射至偏振分束棱镜(PBS),分成两束偏振状态互相正交的线偏振光S光和P光,其中,反射光S光作为参考光经1/4波片1及显微物镜1会聚到作为参考微球的球心,经微球反射并沿原光路返回再通过1/4波片,通过旋转1/4波片光轴方向调整其与S光振动方向的夹角为 45° ,使得参考光变为P光;透射光P光作为测试光经过1/4波片2及显微物镜2会聚到靶丸的球心,经靶丸表面反射并沿原光路返回再通过1/4波片,同样通过旋转1/4波片的光轴方向使其与P光的振动方向夹角为 45° ,进而使得测试光变为S光。此时,参考光路P光和测试光路S光通过PBS入射至偏振片2,通过旋转偏振片2的透偏方向,获得P光与S光在透偏方向上相同的振动方向分量,从而满足光学系统中的干涉条件,最终通过成像镜到达相机(CMOS)靶面,由相机采集白光干涉图像。在此光路中,参考光路和测试光路的光学结构完全相同,因此,由两光路引起的波面变形可以抵消。此外,理论上参考光路P光与测试光路S光在PBS处发生完全透射与反射,但在实际系统搭建与调试的过程中,由于1/4波片的快轴方向与偏振光振动方向的夹角没有严格满足 45° ,因此,参考光路P光与测试光路S光在PBS处发生部分反射与透射到达BS,本文利用这部分光完成对点操作,通过对点相机判断参考光路P光与测试光路S光返回的光斑是否完全重合。图1中靶丸表面经显微物镜2和管镜成像到CMOS上,从而确保由白光干涉图复原的相位反映的是靶丸表面形

貌分布情况。

在测量时,首先利用精密的三维微位移台调节参考光路与测试光路中的微球和靶丸,使其能够清晰成像并且像点在对点相机中重合,然后将参考光路中显微物镜与参考微球作为整体,逐渐移动以匹配测试光路的光程,直至系统的测试光路与参考光

路的光程完全匹配,此时获得清晰的白光干涉条纹。通过高精度的 PZT 驱动参考微球以等步长间隔移动,完成对靶丸测量表面的垂直扫描,并采集干涉图,从而获得测量对象每个像素点在不同扫描位置的光强分布信息。最后通过白光干涉算法对于干涉图进行处理,获取靶丸的表面形貌和表面缺陷信息。

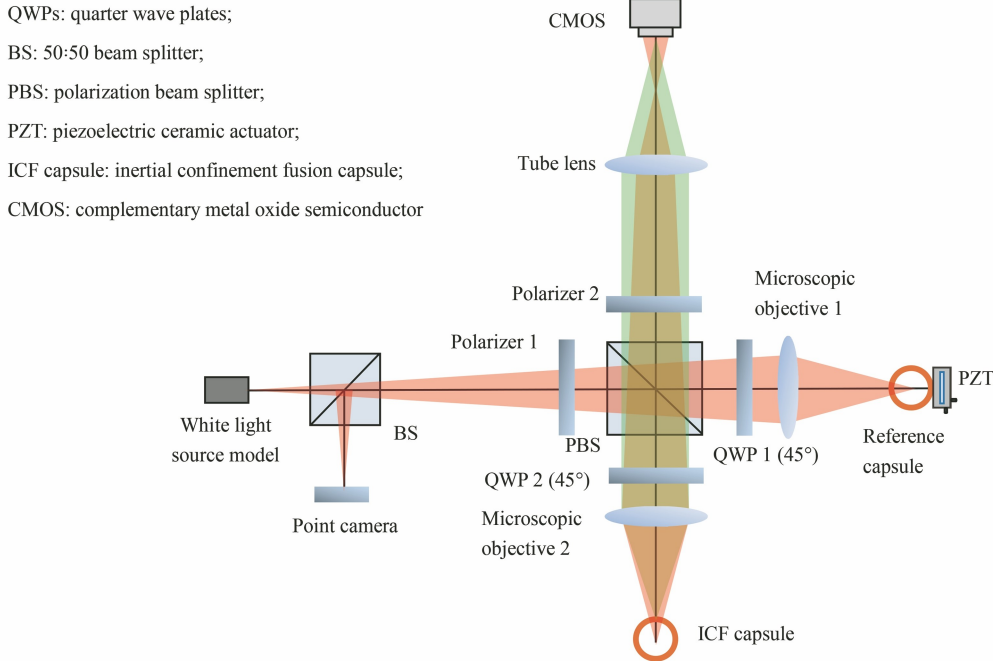


图 1 Linnik 型白光零位显微干涉靶丸表面缺陷测量光路

Fig. 1 Measurement optical path for surface defects of ICF capsule using Linnik type white light null micro-interference

2.2 移相干涉算法

本文通过时域移相的方式获取多帧白光移相干涉条纹图,由于白光干涉信号具有特征明显的零级位置,因此,当利用白光干涉测量微观形貌时,其核心是确定测量对象表面每个像素点所对应的零光程差位置,进而解算出待测对象的面形信息^[14]。目前白光干涉信号零光程差位置的确定方法主要包括重心法^[15]、空间频域算法^[16]、移相算法^[17-18]、连续小波变换方法^[19]、包络曲线拟合法^[20]等。本文采用一种将等步长相移法与白光垂直扫描相结合的七步移相干涉算法(PSI)对多帧白光移相干涉条纹进行处理,提取每个像素点的调制度包络峰值及相位信息,从而获得待测靶丸表面形貌缺陷的真实高度信息。

移相干涉算法通常是采用精密的步进驱动部件推动测量对象以等步长间隔进行移动扫描,获得不同像素点的白光干涉信号,然后根据移相公式计算干涉图像中每个像素点对应的干涉信号的调制度峰值与相位信息,进而解算出测量对象的形貌信息,其主要思路如下。

由相关光学理论可知,白光干涉光强^[21]可以表示为

$$I'(z, \delta\phi) = I_0 \{1 + v g(z) \cos[\phi(z) + \delta\phi]\}, \quad (1)$$

式中: I_0 为背景光强, $I_0 = I_1 + I_2$,其中 I_1 为测试光路光强, I_2 为参考光路光强; v 是对比度, $v = 2(I_1 I_2)^{1/2} / (I_1 + I_2)$; $g(z)$ 为相干包络; $\phi(z)$ 为相位值; $\delta\phi$ 为干涉图像的移相量。若通过压电陶瓷驱动器控制测量对象以一定步长等间隔移动,实现垂直扫描,将获得每个像素点对应的不同扫描高度位置 z ,在激光相移干涉中调制度始终保持恒定不变,而白光干涉信号的 $\phi(z)$ 与 $g(z)$ 都会发生变化。因此,假设白光干涉信号的相干包络 $g(z)$ 是局部线性的,经典的四步移相算法可以转换为七步移相算法,根据式(2)计算得出相邻 7 帧白光干涉图像中每个像素点的调制度值为

$$V = \frac{1}{\sqrt{(3I_{-1} + I_3 - I_{-3} - 3I_1)^2 + (4I_0 - 2I_{-2} - 2I_2)^2}}, \quad (2)$$

式中: $I_i (i = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3)$ 表示相邻 7 帧干涉图的光强值。

然后利用白光干涉信号调制度峰值探测算法定位式(2)的调制度峰值位置,并记录该位置对应的帧数 N 。

再根据式(3)计算得出相移变化量 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi(z) = \tan\left(\frac{3I_{-1} + I_3 - I_{-3} - 3I_1}{4I_0 - 2I_{-2} - 2I_2}\right) \quad (3)$$

最后根据帧数 N 和有效相位值 $\Delta\phi(z)$ 求得待测对象每个像素点的相对高度为

$$h = N(\lambda_0/8) + \Delta\phi\lambda_0/4\pi, \quad (4)$$

然后根据相对高度 h 解算待测物体的形貌信息。

本文在采用精密的步进驱动部件带动微球以 $\lambda/8$ 等步长间隔移相的过程中,被测微球将沿光轴方向运动并产生离焦,使得被测表面每个点引入的移相量并不相同,且越靠近边缘,移相误差越大^[22-23]。对此进行仿真研究,结果表明:在以 $\lambda/8$ 等步长间隔移相 100 步的情况下,测量结果误差为 $10^{-3} \mu\text{m}$ 量级。因此,移相误差对测量结果的影响较小。

2.3 蝙蝠翼效应校正算法

白光干涉技术在三维形貌测量领域得到了广泛的应用,根据实验研究,采用白光干涉法测量阶跃型物体表面形貌虽然能够解决激光干涉法中存在的 2π 整数倍相位缺失问题,但对于测量表面梯度变化低于光源相干长度的局部区域而言,光的衍射效应会使白光干涉信号的相干包络发生倾斜,其调制度峰值位置随之发生偏移,此时测量结果中局部区域产生形如蝙蝠翼的伪影,称之为蝙蝠翼效应,从而导致复原的微结构形貌失真,这影响了微球面形缺陷测量的横向分辨率与纵向分辨率。为了解决上述问题,Harasaki 等^[24]利用移相算法与相干峰值探测技术相结合的 WLPSI (White Light Phase-Shifting Interferometry) 算法克服了实验结果中的蝙蝠翼效应; Peter Lehmann 团队分别利用 Kirchhoff 基尔霍夫标量理论模型和 Richards-Wolf 矢量衍射积分模型研究蝙蝠翼效应的产生原因,并对系统光路结构进行改进^[23],从而通过改变测量系统物镜的数值孔径 f 等参数减弱蝙蝠翼效应。本文在此基础上研究蝙蝠翼效应校正算法^[24-26],旨在解决实际测量中存在毛刺点及突变点的问题。

本文采用的蝙蝠翼效应校正算法实现步骤如下:

1) 对复原的初始三维形貌进行 x 方向与 y 方向的差分处理,得到测量对象表面每个像素点与其

相邻像素点之间的形貌高度差值。其中, x 方向与 y 方向的形貌高度差值分别为

$$\Delta h_x = |h_{\text{phase}(x,y)} - h_{\text{phase}(x-1,y)}|, \quad (5)$$

$$\Delta h_y = |h_{\text{phase}(x,y)} - h_{\text{phase}(x,y-1)}|, \quad (6)$$

式中: $h_{\text{phase}(x,y)}$ 是测量对象表面像素点 (x, y) 处的高度信息。

2) 将 x 方向与 y 方向相邻两个差值依次相乘,将乘积值与 $(f\lambda/4)^2$ 进行比较,若待测表面某个像素点的高度差大于 $f\lambda/4$ 的变化时,则认定存在蝙蝠翼效应,需要对该像素点的形貌高度信息进行校正以去除蝙蝠翼效应, x 方向与 y 方向的具体校正方法为

$$h_{\text{phase}(x+1,y)} = h_{\text{phase}(x+1,y)} + \lambda/2 \times \text{round}(h_{\text{phase}(x+1,y)} - h_{\text{phase}(x,y)}) \times 2/\lambda, \quad (7)$$

$$h_{\text{phase}(x,y+1)} = h_{\text{phase}(x,y+1)} + \lambda/2 \times \text{round}(h_{\text{phase}(x,y+1)} - h_{\text{phase}(x,y)}) \times 2/\lambda, \quad (8)$$

式中: round 是对测量对象相邻像素点之间的高度差进行取整处理。

3) 通过蝙蝠翼效应校正算法得到测量对象准确的三维形貌高度信息。

为了验证蝙蝠翼校正算法的准确性,本文模拟仿真了理想台阶面、具有蝙蝠翼效应的台阶面和应用蝙蝠翼校正算法得到的台阶面,分别如图 2(a)~(c) 所示,结果表明当采用白光干涉法测量台阶式结构形貌时,此蝙蝠翼校正算法能够有效地消除伪影等影响。

针对采集的白光移相干涉图,本文首先利用七步移相算法对干涉图像进行计算,得到测量对象的初始形貌,然后由蝙蝠翼效应校正算法对初始形貌进行处理,从而获得测量对象准确的三维形貌缺陷信息,具体的算法执行流程如图 3 所示。

3 实验和结果分析

基于上述原理,本文搭建了白光零位显微干涉和激光显微干涉的靶丸表面缺陷测量装置,如图 4(a)和 4(b)所示。其中,光源分别选用中心波长为 545 nm、带宽为 110 nm 的宽光谱白光光源和波长为 630 nm 的激光光源;偏振分光棱镜的光谱范围为 420~680 nm,其消光比为 1000:1;1/4 波片选用波段范围为 450~650 nm 的消色差波片;根据 Linnik 型显微干涉成像光路结构,系统参考光路与测试光路选用两个完全匹配的放大倍数为 20、数值孔径为 0.4 的显微物镜进行显微成像;步进驱动部分采用德国 PI 公司的压电陶瓷驱动器,行程为 100 μm ,精度为 0.1 nm。

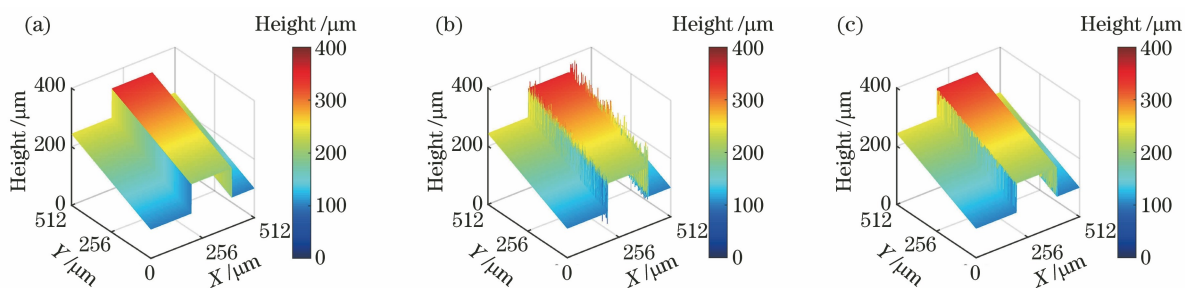


图 2 具有蝙蝠翼效应的台阶面与校正后的台阶面。(a)理想的台阶面；
(b)具有蝙蝠翼效应的台阶面；(c)蝙蝠翼校正算法处理后的台阶面

Fig. 2 Step surface with bat-wing effect and corrected step surface. (a) Ideal step surface; (b) step surface with bat-wing effect; (c) step surface obtained by bat-wing correction algorithm

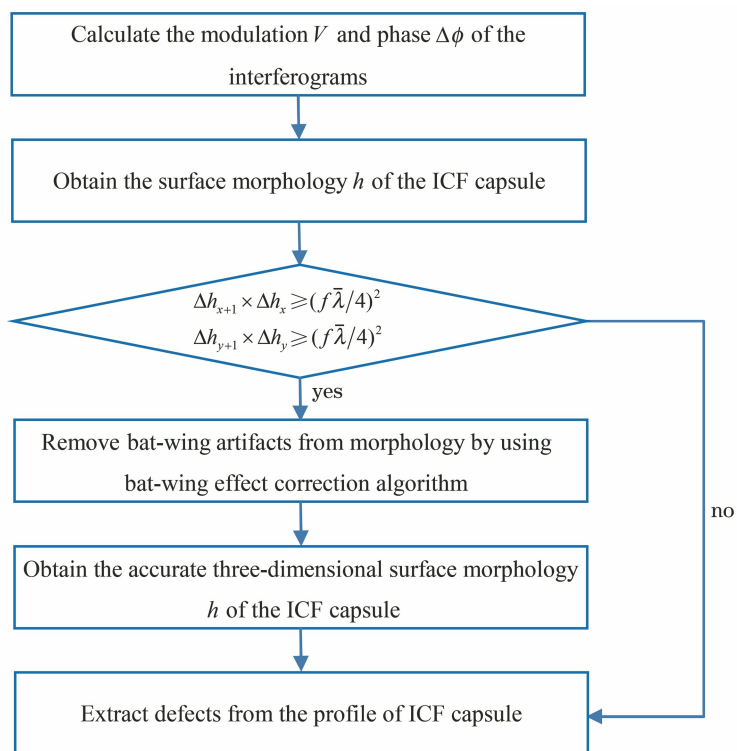


图 3 白光移相干涉算法流程图

Fig. 3 Flowchart of white light phase-shifting interference algorithm

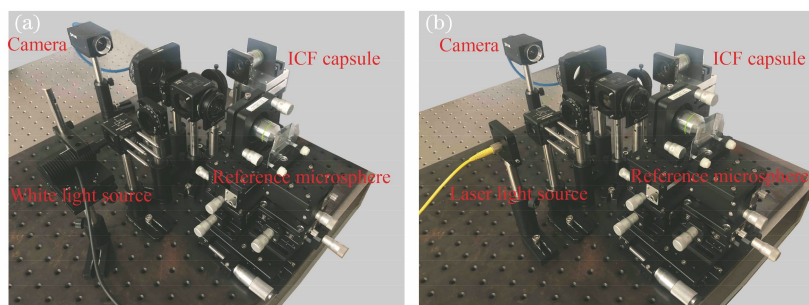


图 4 实验装置图。(a)白光零位显微干涉测量装置；(b)激光显微干涉测量装置

Fig. 4 Experimental devices. (a) Measurement device of white light null micro-interference; (b) measurement device of laser micro-interference

利用搭建的装置对直径为 1 mm 的靶丸进行测量,参考微球也采用相同直径的光洁微球,该微球在 0.4 mm 视场里表面粗糙度优于 0.5 nm。测量时,首先利用高精度的三维微位移台调节参考光路与测试光路,实现零光程匹配,再通过计算机控制压电陶瓷驱动器以推动参考靶丸以 $\lambda/8$ 步长等间隔移相,相机同步采集并保存 100 帧白光干涉图像用于后续处理,其中截取的连续 7 帧干涉图像如图 5 所示,干涉图间移相量为 $\pi/2$ 。

首先从 100 帧白光干涉图像中提取测量对象表面任意一个像素点的光强及调制度信息,绘制曲线如图 6 所示。然后,应用七步移相算法计算干涉图像中每个像素点的调制度及相位信息,由调制度峰值探测算法法定位零光程差点所对应的扫描采样帧数,从而根据式(4)计算每个像素点的有效相位,最终获得测量靶丸原始形貌轮廓图像,如图 7(a)所示,选取靶丸表面的一个孤立缺陷点进行 100 倍放大显示,如图 7(b)所示。



图 5 七步移相白光干涉图

Fig. 5 White light interferograms of seven-step phase-shifting

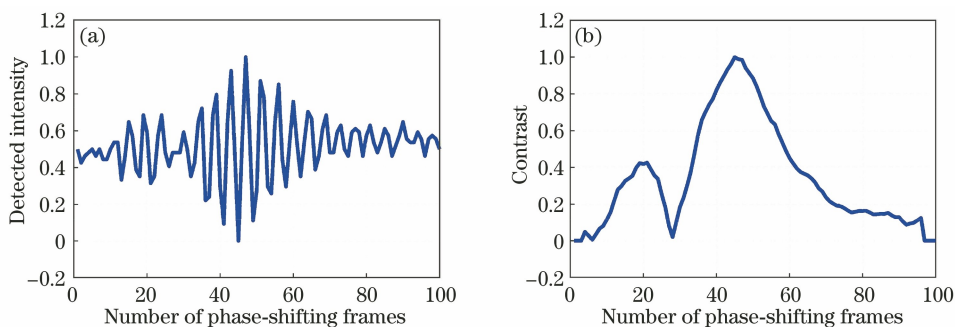


图 6 白光干涉光强及调制度。(a)干涉条纹强度;(b)干涉条纹调制度

Fig. 6 Intensity and modulation of white light interference. (a) Interference fringe intensity; (b) interference fringe modulation

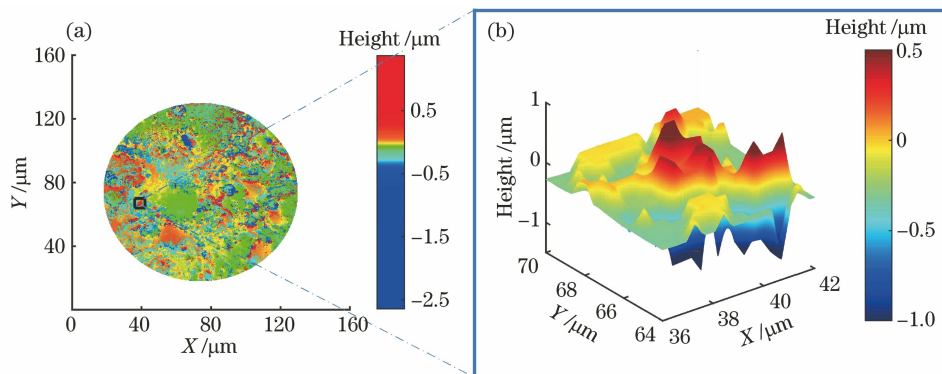


图 7 白光干涉测量的靶丸表面形貌。(a)三维图;(b)孤立缺陷

Fig. 7 Surface morphology of ICF capsule obtained by white light interferometry. (a) Three-dimensional image; (b) isolated defect

由图 7 可以看出,靶丸表面形貌存在大量毛刺点及突变峰,因此,本文运用蝙蝠翼校正算法对上述原始形貌轮廓进行处理,靶丸消除蝙蝠翼效应后的形貌轮廓图像如图 8 所示,从图中可以看出,该算法能够有效校正缺陷边缘处的突变峰,使恢复的面形信息更加准确。

为了验证本文提出的基于白光干涉的靶丸表面缺陷测量方法能够解决激光干涉测量法存在的 2π 整数倍相位缺失的问题并且可以实现台阶、陡坡缺

陷等梯度变化较大的物体表面形貌的真实高度测量,本文利用波长为 630 nm 的激光光源对靶丸相同区域进行测量,并由高精密的压电陶瓷驱动器推动靶丸以 $\lambda/8$ 步长移相,获得的四步移相干涉图像如图 9 所示,干涉图间移相量为 $\pi/2$ 。应用经典的四步移相算法对上述四帧干涉图像进行处理,得到靶丸表面形貌,并对相同区域处的孤立缺陷点进行 100 倍放大显示,如图 10 所示。

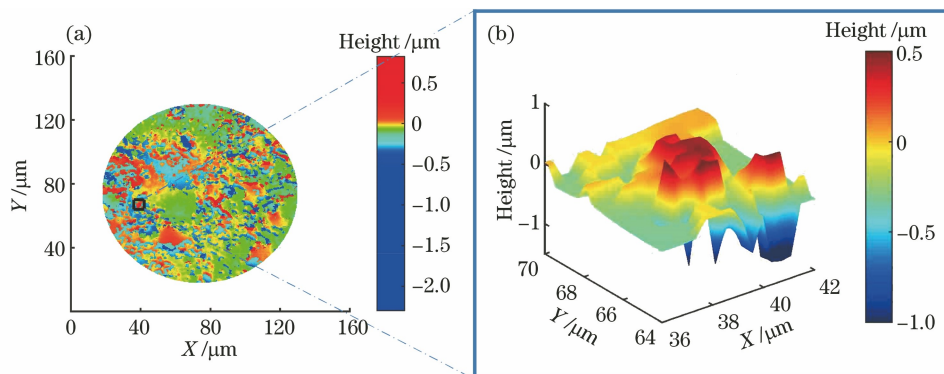


图 8 消除蝙蝠翼效应的靶丸表面形貌。(a) 三维图;(b) 孤立缺陷

Fig. 8 Surface morphology of ICF capsule when bat-wing effect is eliminated. (a) Three-dimensional image; (b) isolated defect

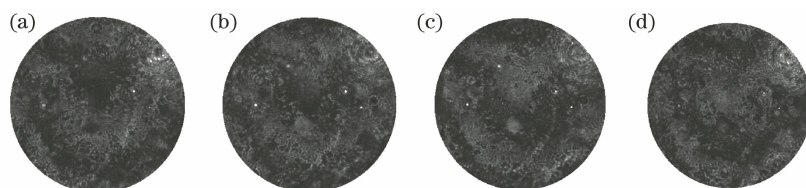


图 9 四步移相激光干涉图。(a) 0; (b) $\pi/2$; (c) π ; (d) $3\pi/2$

Fig. 9 Laser interferograms of four-step phase-shifting. (a) 0; (b) $\pi/2$; (c) π ; (d) $3\pi/2$

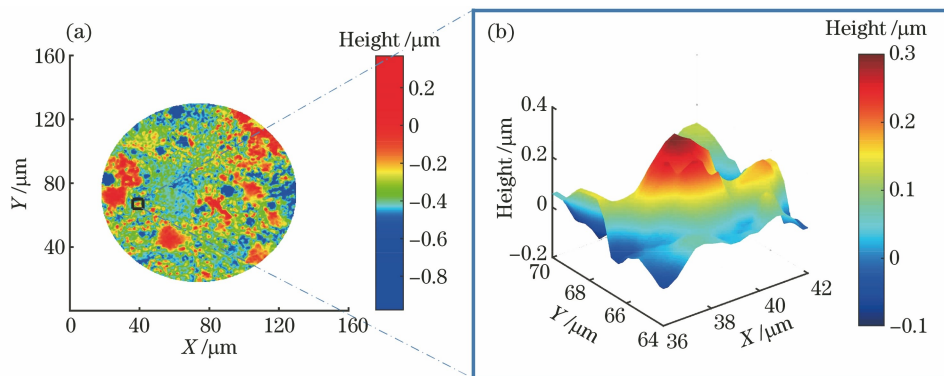


图 10 激光干涉测量的靶丸表面形貌。(a) 三维图;(b) 孤立缺陷

Fig. 10 Surface morphology of ICF capsule by laser interferometry. (a) Three-dimensional image; (b) isolated defect

从图 8 和图 10 可以看出,白光零位显微干涉和激光显微干涉两种方法得到的靶丸表面形貌分布和单个缺陷的形貌分布类似,但是形貌高度的数值不一致。

为了进一步验证本文所提方法可以精确测量靶丸表面缺陷的真实高度,本文将图 8(b)与图 10(b)的孤立缺陷三维形貌分布进行进一步对比分析,分别比较两种方法得到的缺陷在不同方向上的轮廓和

高度。图 11 为白光干涉法测量得到的靶丸缺陷在 X 方向某一行和 Y 方向某一列的轮廓,其高度变化范围最大值分别为 $1.8401 \mu\text{m}$ 和 $1.8338 \mu\text{m}$ 。图 12 为激光干涉法测量得到的相同行和列的轮廓,其对应的高度变化范围最大值分别为 $0.1632 \mu\text{m}$ 和 $0.3798 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,两种方法得到的靶丸表面形貌分布类似,但激光干涉法测量范围小于

白光干涉法测量范围,其原因在于激光干涉测量法在缺陷跃变处无法获取 2π 的倍数,从而使得相位数值缺失 2π 的整数倍且相位数值变小。因此,本文所提出的垂直扫描白光干涉法能够有效地扩展缺陷的动态测量范围,解决激光干涉测量方法中存在的 2π 整数倍相位缺失的问题,从而实现靶丸表面缺陷真实高度的精确测量。

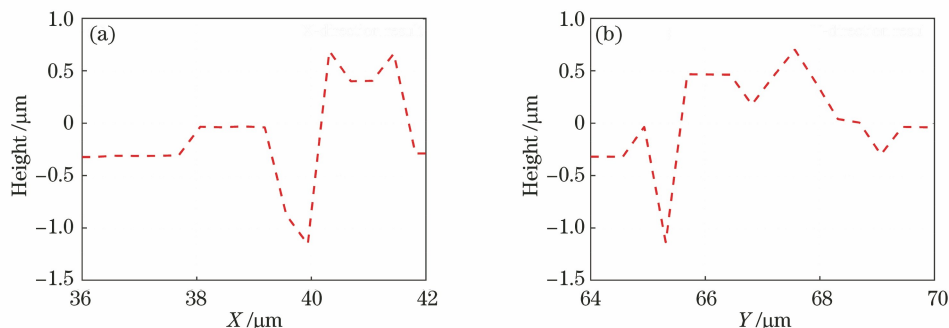


图 11 白光干涉测量靶丸缺陷不同方向的高度剖面。(a) X 方向;(b) Y 方向

Fig. 11 Height profiles of ICF capsule defect in different directions measured by white light interferometry.

(a) X-direction; (b) Y-direction

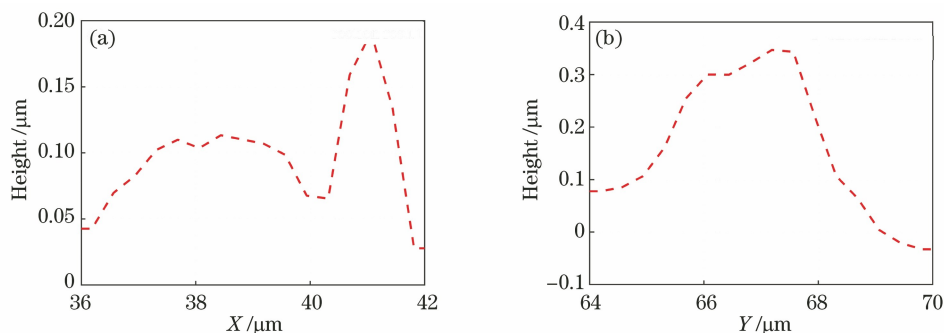


图 12 激光干涉测量靶丸缺陷不同方向的高度剖面。(a) X 方向;(b) Y 方向

Fig. 12 Height profiles in different directions of ICF capsule defect measured by laser interferometry.

(a) X-direction; (b) Y-direction

4 结 论

研究了一种基于垂直扫描白光干涉的零位显微干涉靶丸表面缺陷测量方法,旨在解决 ICF 靶丸类微球表面缺陷真实高度的测量问题。基于白光球面零位干涉的思想,将白光干涉技术与 Linnik 型显微干涉技术相结合,同时引入球面作为参考面,以实现全视场的靶丸零位干涉测量,并获取靶丸表面缺陷的真实高度。测量结果显示,白光零位显微干涉和激光显微干涉两种方法得到的靶丸表面形貌分布和单个缺陷的形貌分布类似,但高度数值不一致,这表明白光干涉方法可以解决在缺陷跃变处的 2π 整数倍相位缺失问题,能够准确获取表面缺陷的真实高度,扩大了阶跃型结构表面缺陷的测量范围。

参 考 文 献

- [1] Wang L X, Zhao W Q, Qiu L R, et al. Laser differential confocal measurement of the outer surface profile of a laser inertial confinement fusion capsule [J]. *Measurement*, 2019, 135: 333-340.
- [2] Wang L X, Qiu L R, Zhao W Q, et al. Laser differential confocal inner-surface profile measurement method for an ICF capsule [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28510-28523.
- [3] 徐伟, 王涛, 吴章文, 等. 工作压强对空心玻璃微球表面形貌和性能的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(12): 122004.
Xu W, Wang T, Wu Z W, et al. Influence of pressure on structure and properties of hollow glass microspheres [J]. *High Power Laser and Particle*

- Beams, 2015, 27(12): 122004.
- [4] Hermerel C, Choux A, Jeannot L, et al. Characterization of the microshell surface using holography [J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 59(1): 110-115.
- [5] Sandras F, Hermerel C, Choux A, et al. Characterization of the microshell surface using holographic measurements [J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 55(4): 389-398.
- [6] Montesanti R C, Johnson M A, Mapoles E R, et al. Phase-shifting diffraction interferometer for inspecting NIF ignition-target shells [J]. *Proceedings of the American Society for Precision Engineering*, 2006, 39: 15-18.
- [7] 卢丙辉. 移相衍射干涉法微球型靶丸全表面形貌检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Lu B H. Research on technologies of microspherical target entire topography inspection by phase shifting diffraction interferometer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [8] Wei C, Ma J, Chen L, et al. Null interferometric microscope for ICF-capsule surface-defect detection [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5174-5177.
- [9] Wei C, Li J X, Ma J, et al. High-efficiency full-surface defects detection for an ICF capsule based on a null interferometric microscope [J]. *Applied Optics*, 2020, 60(4): A62-A72.
- [10] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用 [J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504001.
Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504001.
- [11] 董一帆, 万新军, 孟涵, 等. 快速稳定的白光干涉测量法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051203.
Dong Y F, Wan X J, Meng H, et al. Fast and stable white light interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051203.
- [12] 张昭琳, 苏俊宏. 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构 [J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212002.
Zhang Z L, Su J H. Simulation and reconstruction of 3D microscopic morphology of damaged optical film surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0212002.
- [13] 杜海龙, 段照斌, 孙晓东. 基于 Fourier 频谱分析的白光干涉信号解算方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0907001.
Du H L, Duan Z B, Sun X D. White light interference signal processing method based on Fourier frequency spectrum analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0907001.
- [14] 邓钦元, 黄庆卿, 侯杰, 等. 白光干涉空间频域算法累积相位误差分析及抑制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0718001.
Deng Q Y, Huang Q Q, Hou J, et al. Analysis and restriction about accumulated phase error in spatial frequency-domain algorithm for white-light interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0718001.
- [15] Ai C, Novak E L. Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry: US5633715 [P]. 1997-05-27.
- [16] de Groot P, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain [J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(2): 389-401.
- [17] Sandoz P. An algorithm for profilometry by white light phase shifting interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(8): 1545-1554.
- [18] Du H B, Yu J H, Zhang S F. Improving the measurement accuracy of shadow moiré by three-step random phase-shifting algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(5): 054107.
- [19] Recknagel R J, Notni G. Analysis of white light interferograms using wavelet methods [J]. *Optics Communications*, 1998, 148(1/2/3): 122-128.
- [20] Chim S S, Kino G S. Three-dimensional image realization in interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(14): 2550-2553.
- [21] Sandoz P, Devillers R, Plata A. Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1997, 44(3): 519-534.
- [22] Wang D D, Yang Y Y, Chen C, et al. Calibration of geometrical systematic error in high-precision spherical surface measurement [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(16/17): 3878-3885.
- [23] 卢丙辉, 刘国栋, 孙和义, 等. 基于误差互补修正的微球干涉测量相位提取方法 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508004.
Lu B H, Liu G D, Sun H Y, et al. Phase extraction method of microsphere interferometry based on error complementary correction [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508004.
- [24] Harasaki A, Schmit J. Bat-wing attenuation in white-light interferometry: US6493093 [P]. 2002-12-10.
- [25] Xie W C, Lehmann P, Niehues J, et al. Signal modeling in low coherence interference microscopy on example of rectangular grating [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14283-14300.
- [26] 高志山, 施帅飞. 一种快速判断并消除蝙蝠翼效应的微结构光学检测方法: CN111521130A [P]. 2020-08-11.
Gao Z S, Shi S F. A microstructure optical inspection method for rapid determination and elimination of batwing effect: CN111521130A [P]. 2020-08-11.