



·惯性约束聚变物理与技术·

基于显微 CT 影像的靶丸表面缺陷检测方法*

汤玉玲, 赵庆贤, 刘家铭, 罗守华

(东南大学 生物科学与医学工程学院, 南京 210096)

摘 要: 靶丸的内外表面缺陷分布对激光惯性约束聚变实验成功率及效率有重要影响, 目前观测不透明靶丸的内表面仅有用 X 射线直接成像技术获取局部二维信息。运用显微 CT 实现靶丸三维成像, 可得到靶丸内外全表面形貌信息; 运用边缘检测、理想曲面拟合分割出缺陷区域, 通过连通域分析对表面缺陷进行分块, 并分别计算各区域的宽度、高度; 运用体绘制方法交互绘制出了靶丸三维数据的立体效果, 尤其突出了缺陷区域的彩色高度场效果, 并通过虚拟切割观察靶丸内表面。基于该方法的靶丸内外表面缺陷观测技术, 能识别大多数表面缺陷, 且能较为准确地计算出缺陷尺寸参数, 未识别出的缺陷通过体绘制可被观察到作为补充, 为研究人员提供了良好的辅助分析手段。

关键词: 三维分割; 缺陷检测; ICF 靶丸; 显微 CT; 体绘制

中图分类号: O434.12

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230257

Surface defect detection method for capsule based on micro-CT image

Tang Yuling, Zhao Qingxian, Liu Jiaming, Luo Shouhua

(School of Biological Science and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The distribution of defects on the inner and outer surfaces of the capsule has an important impact on the success rate and efficiency of the laser inertial confinement fusion experiment. At present, the only way to observe the inner surface is to use direct X-ray imaging technology to obtain local two-dimensional information, while this paper uses micro-CT to photograph the capsule to non-destructively obtain the full surface morphology information of its inner and outer surfaces. On this basis, a technique is proposed for the observation of defects on the inner and outer surfaces of the capsule. First, the defect area was segmented by edge detection and ideal surface fitting. Then the defects were divided into blocks by connected domain analysis, and the width and height of each area were calculated separately. In addition, a stereoscopic image of the capsule was interactively drawn using a volume rendering method, especially highlighting the colored height field in the defect areas and allowing the inner surface of the capsule to be observed by virtual cutting. This method can identify most surface defects, and can calculate the defect size parameters more accurately. Unidentified defects can be observed as a supplement through volume rendering, providing researchers with a good aid for analysis.

Key words: three-dimensional segmentation, defect detection, inertial confinement fusion capsule, micro-CT, volume rendering

惯性约束聚变(ICF)是有望实现可控热核聚变反应的途径之一, 旨在为人类提供理想能源。靶丸是装填该实验燃料(氘、氚)的球壳状载体, 在实验中受激光或激光产生的 X 射线驱动快速压缩, 达到极高密度和温度, 进行热核燃烧释放聚变能量^[1]。由于流体力学不稳定性, 靶丸内外表面的细微缺陷都有可能被放大, 导致实验效率降低或者实验失败。因此, 需要对靶丸制作工艺进行优化, 以期制作出接近理想球壳形状的靶丸。优化工艺的前提是对靶丸内外表面形貌进行高精度的观测, 识别出缺陷。当前, 对靶丸外表面的观测方法主要基于显微镜、光学干涉和数字全息显微技术^[2]等。其中最通用的方法是将精密气浮轴系和原子力显微镜结合进行全表面测量, 可获得

* 收稿日期: 2023-08-08; 修订日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61871126); 江苏省重点研发计划项目 (BE2022828)

联系方式: 汤玉玲, 220212236@seu.edu.cn.

通信作者: 罗守华, luoshouhua@seu.edu.cn.

纳米级的精度^[3-4]。对于透明靶丸的内表面,上述方法中除了原子力显微镜都可以测量,其中白光共聚焦显微镜能够得到高精度的内表面形貌^[5]。而对于不透明的靶丸,当前只有通过X射线技术才能够对内表面进行测量。

近年来,X射线及相应的计算机断层成像技术(CT)被广泛应用于靶丸结构分析中。Patterson等人将显微CT作为二维微束X射线荧光图像的 z 轴信息补充,更好地分析靶丸的三维结构^[6];Sain等人用显微CT分析靶丸的同心度和壁厚均匀性,分辨率在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ^[7];Nora等人运用显微CT来分析靶丸材质内部的空洞半径和深度^[8];Ferris等人拍摄靶丸的CT图像后,用球谐函数来拟合靶丸的内表面数据进行分析^[9];赵学森等人运用X射线直接成像技术对靶丸内表面轮廓进行定位,测量了靶丸的直径、壁厚分布等参数^[10];王琦等人优化了靶丸X射线直接成像技术,达到了较好的成像衬度、成像分辨率和较高的成像效率^[11]。目前,未见利用显微CT的三维全表面特征直接对表面缺陷进行分析的相关报道。本文提出了一种基于靶丸显微CT图像的辅助分析技术,基于边缘检测、曲面拟合和连通域分析对靶丸内外表面的凹凸缺陷进行自动提取,对其宽度、高度进行测量。此外,为了直观呈现靶丸三维效果,基于光线投射法对靶丸进行绘制,并突出了缺陷区域高度场效果,可通过旋转、虚拟切割进行交互查看。

1 检测方法

ICF靶丸为空心球壳结构,由于制作工艺问题,其内外表面上分布着凹凸缺陷。图1显示了显微镜下观察到的靶丸表面缺陷,一般缺陷宽度在 $20\ \mu\text{m}$ 以下,高度在 $1\ \mu\text{m}$ 以下。

用分辨率 $1\ \mu\text{m}$ 的显微CT对其进行拍摄时,其表面的缺陷表现为凹陷或凸起形态,沿三维表面延展。本文首先通过亚体素级边缘检测算法得到靶丸表面点,对内外表面点进行分离后分别进行采样;然后根据采样点坐标进行曲面拟合,得到靶丸内外表面的理想无缺陷表面,与靶丸实际数据进行比对,提取出缺陷区域;再运用连通域标记技术将缺陷区域分块,计算出各个缺陷区域的宽度和高度;最后采用体绘制方法将靶丸缺陷进行三维可视化。

1.1 靶丸内外表面点采样

读入靶丸的三维数据之后,通过边缘检测的方法提取靶丸的内外表面。常用的边缘检测方法有用Sobel算子、Laplace算子对图像进行卷积得到边缘图像,但上述方法得到的边缘较粗,一般有几个像素宽。要精准定位靶丸的表面点,需要检测出的边缘尽可能细,因此采用能够得到一个像素宽的边缘的Canny算法检测边缘^[12]。

上述步骤是在二维图像的基础上实现的,若只是沿深度方向对每一层二维图像应用Canny算法,则会遗漏沿深度方向的梯度信息,出现部分边缘未检测到的情况。采用公式(1)更为精确地提取三维边缘。

$$E = (E_{\text{width}} \wedge E_{\text{height}}) \vee (E_{\text{width}} \wedge E_{\text{depth}}) \vee (E_{\text{depth}} \wedge E_{\text{height}}) \quad (1)$$

沿图像宽度方向对二维图像应用Canny算子提取三维边缘图像 E_{width} ,沿长度方向提取三维边缘图像 E_{height} ,沿深度方向得到三维边缘图像 E_{depth} ,对他们两两求交集后再取并集得到体素级精度的三维边缘^[13]。Pirillo根据泰勒展开推导出了在Canny检测出的体素级边缘上计算亚体素级边缘的方法^[14],公式如下

$$(x,y,z) = (a_x, a_y, a_z) - \frac{f''}{f'''}(f_x, f_y, f_z) \quad (2)$$

式中: (x,y,z) 是亚体素级的边缘坐标, (a_x, a_y, a_z) 是体素级的边缘坐标, (f_x, f_y, f_z) 是 (a_x, a_y, a_z) 位置处的灰度值, f'' 和 f''' 分别是该位置处图像灰度值的二阶导数和三阶导数。应用该方法计算得到亚体素精度的边缘点坐标。

提取出的边缘图像包含内外两个表面,需要一种方法自动将它们分离。如图2(a)所示,在三维边缘图像沿深度方向 z 上的每一层二维图像 (x,y) 上(如图2(b)所示),从中心点 O 分别向从竖直向上方向开始,逆时针每 45° 发出一条射线。以沿竖直向上方向为例,发出一条射线,分别记录其与外边缘交点 A 、与内边缘交点 B ,取 AB 中点 C_1 ,设 C_1 点到图像中心点 O 的距离为 d_1 。沿其余方向执行同样操作,可得 $d_2\sim d_8$,计算均值 d 。随后以图像中心点为圆心, d 为半径作圆,在圆外的边缘点位于外表面,在圆内的边缘点位于内表面。当二维图像中仅包含外边缘时,

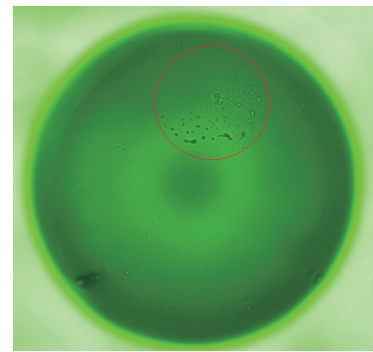


Fig. 1 Microscopic image of ICF capsule defects

图1 靶丸缺陷显微镜图像

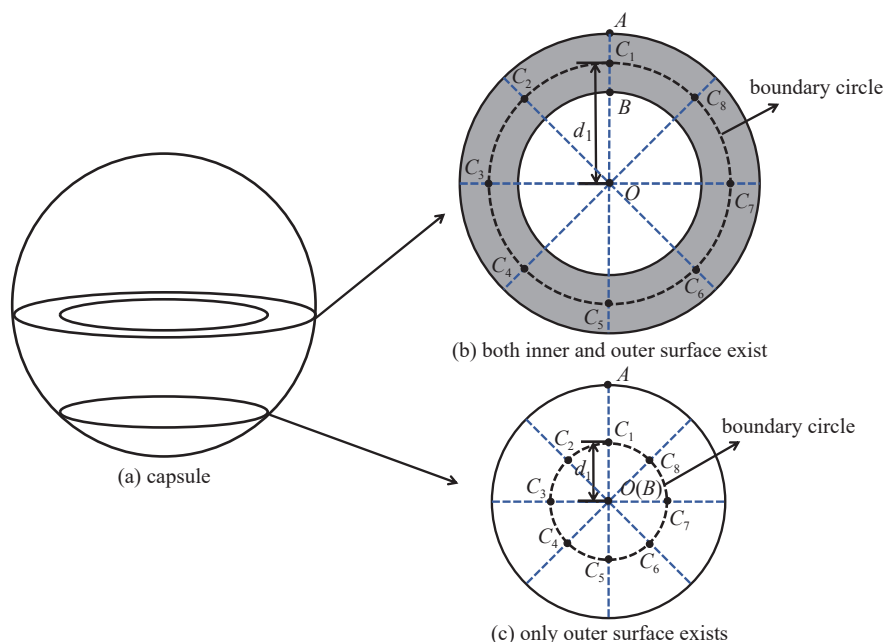


Fig. 2 Schematic diagram of boundary circle

图 2 中间界限圆示意图

内边缘缩到了圆心位置,如图 2(c)所示。该方法能够成功分离出内外表面点有以下几点依据:首先,虽然靶丸受到固定材料外力发生形变,但形变极微小,其截面中的内外表面也十分接近圆形;其次,三维 CT 数据由多层二维图像组成,由于拍摄摆位控制,靶丸在沿深度方向的二维断层图像基本都呈现出圆环状,内外圆心十分接近该层图像的中心;此外,靶丸的壁较厚,导致各层断层图像中内外圆环半径相差较大。

1.2 靶丸理想表面拟合

分离出靶丸的内外表面点后,分别在内外表面点上采样进行标准曲面拟合。理想的无凹凸缺陷的靶丸表面是一个标准球面,但是在用显微 CT 拍摄靶丸的过程中,为了防止靶丸发生位移造成运动伪影,需要将靶丸固定在 CT 机台上。这会导致靶丸受到外力发生微小形变,于是将其理想表面当作椭球面进行处理。此外,由于固定材料与靶丸的 CT 值有所重合,难以分割,在表面采样时放弃与底部材料相连层的表面点。

椭球面的一般表达式如下

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + a_{12}xy + a_{13}xz + a_{23}yz + b_1x + b_2y + b_3z + c = 0 \quad (3)$$

式中: x, y, z 为位置坐标,其余符号为参数。为了保证计算得到的参数的数值精度,取 c 为 $-1\ 000\ 000$,代入采样点坐标,可根据最小二乘法估计出椭球面的参数,进而求得理想椭球面的表达式。

1.3 靶丸缺陷区域提取及参数计算

求得理想椭球面表达式后,遍历三维数据,将原图像中大于给定阈值且偏离理想表面的体素标记为缺陷区域。如此标记得到的缺陷部分局部断层图像如图 3 所示。可以观察到除了虚线圈出的真正缺陷区域外,边界处很多离散点(实线框出)也被误标记为缺陷点。解决方法为在三维图像上应用 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体结构体对孤立误识别点进行腐蚀,再用同样的结构体进行膨胀,恢复缺陷区域的初始形状。

缺陷区域标记完成后,可通过三维连通域标记算法将缺陷点分区。对于每一块缺陷区域,将其中的每一个体素与理想椭球面球心连线,求出与理想椭球面的交点,即该体素在理想表面上的投影点(如图 4 所示)。缺陷体素点与投影点的距离为缺陷高度,一块缺陷区域的投影点中最远的两点距离为缺陷宽度。

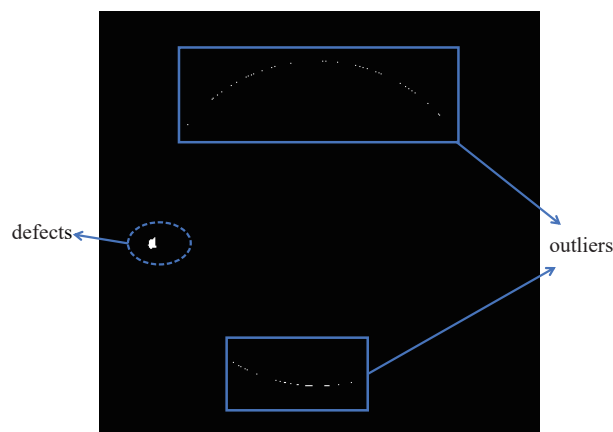


Fig. 3 Schematic diagram of outliers when separating defects

图 3 缺陷分离时离散点示意图

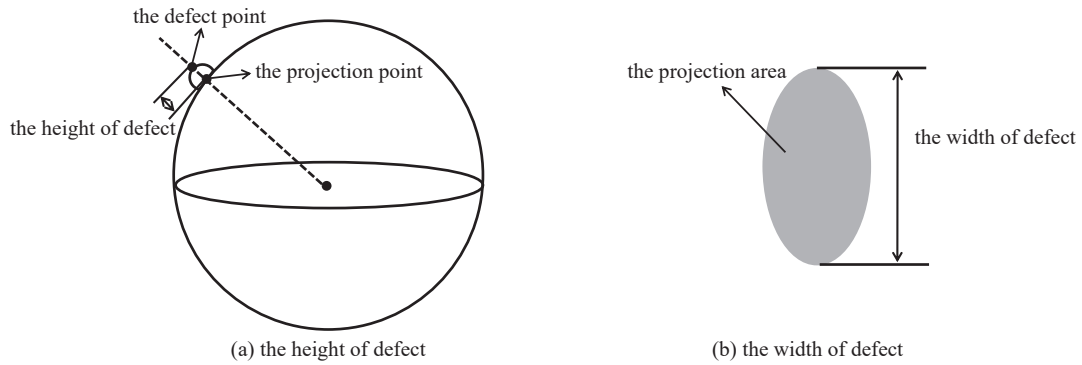


Fig. 4 Schematic diagram of defect parameters

图 4 缺陷参数示意图

1.4 表面缺陷的可视化

为了更好地展现上述缺陷分割及参数计算的结果,以及充分利用显微CT特有的三维全表面信息,我们基于体绘制技术设计了一种可视化方案。该方法将靶丸三维数据存为以长方体为载体的三维纹理。首先采用光线投射算法对靶丸进行基本绘制,将三维的显微CT数据映射为屏幕上的二维呈现^[15]。该方法基于吸收-发射光学模型^[16],假设光线穿越物体时仅有物体对光线的吸收衰减和物体自身发出的光。仅考虑靶丸材质对光的吸收作用,且为了便于处理,基于光路可逆,从每一个屏幕像素的中心点发出一条光线穿越体数据,不同光线之间相互平行,呈正交投影。沿光线对体数据进行插值采样,由透明度累加公式模拟光线的衰减效果,得到最终屏幕像素的RGBA颜色值。然后,为了增强对靶丸细节结构的感知,为物体添加了外部光照。计算每一个采样点处的中心差商梯度,以梯度方向近似法线方向,在此基础上应用冯氏光照模型^[17]。最后为了便于后续研究者进行多角度、多尺度的观察,在该方案中添加了交互功能。对上文提到的长方体载体进行旋转、缩放,即可实现屏幕上对应的旋转、缩放效果。此外,设置虚拟切割面,将切割面一侧区域中的采样值设置为0,如此应用上述方法后能够观察到靶丸内表面形貌。采用一个三维纹理存储缺陷高度,并通过颜色表将不同高度的缺陷点映射为不同颜色,直观地在屏幕上绘制出缺陷高度场效果。

2 结果与讨论

在射线源管电压 45 kV,管电流 175 mA,曝光时间为 5 s 的条件下用显微CT对靶丸进行拍摄,像素宽设置为 $0.675 \mu\text{m}$,实际分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 。

应用上文方法对靶丸显微CT图像进行处理,得到靶丸外表面体绘制和缺陷高度场效果如图5所示,可以观察到能够识别出大部分表面缺陷区域,并由颜色定性表达出缺陷高度。而部分高度较低的缺陷或者孤立缺陷点未能成功识别出,可能是由于去除噪声点时采用的腐蚀形态学操作误去除了。同时,体绘制结果中可以观察到未被检测到的缺陷,这是缺陷检测的有利补充。此外,由于靶丸内表面缺陷尺寸较小,低于显微CT的分辨率,目前还不

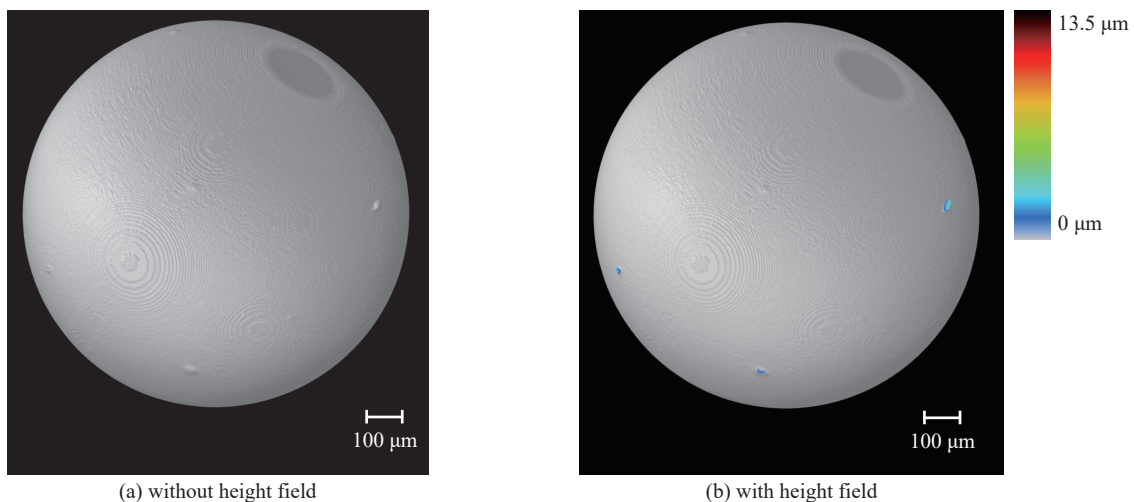


Fig. 5 Volume rendering images of outer surface of the micro-CT data of the capsule

图 5 靶丸显微CT数据的外表面体绘制效果

能在体绘制图像中观察到。为了验证该方法对内表面缺陷检测的有效性, 剖开靶丸, 将聚苯乙烯微球吸附于其内表面上, 分别用扫描电子显微镜(SEM)和显微 CT 进行观察。加入直径为 20 μm 、3 μm 的微球效果分别如图 6、图 7 所示, 除了在拿取过程中发生位移的少部分微球外, 电镜图像与显微 CT 图像中的聚苯乙烯微球分布基本对应。加入 20 μm 微球的靶丸高度场效果基本与电镜中观察到的高度相符合, 在重叠微球处较为明显。加入 3 μm 微球的靶丸能显示宽度较大的缺陷区域高度场, 不能完全识别孤立缺陷区域, 这在体绘制图像中得到了补充。

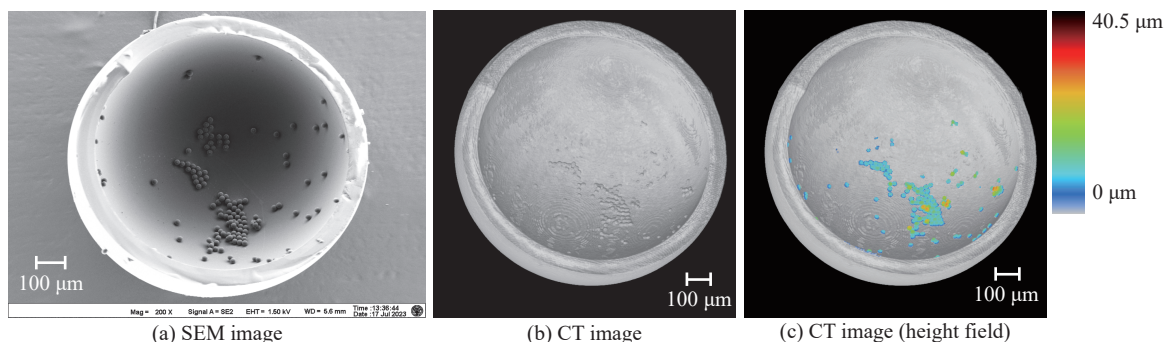


Fig. 6 The inner surface of the capsule photographed in different ways (with 20 μm microspheres)

图 6 不同方式拍摄的靶丸内表面(添加 20 μm 微球)

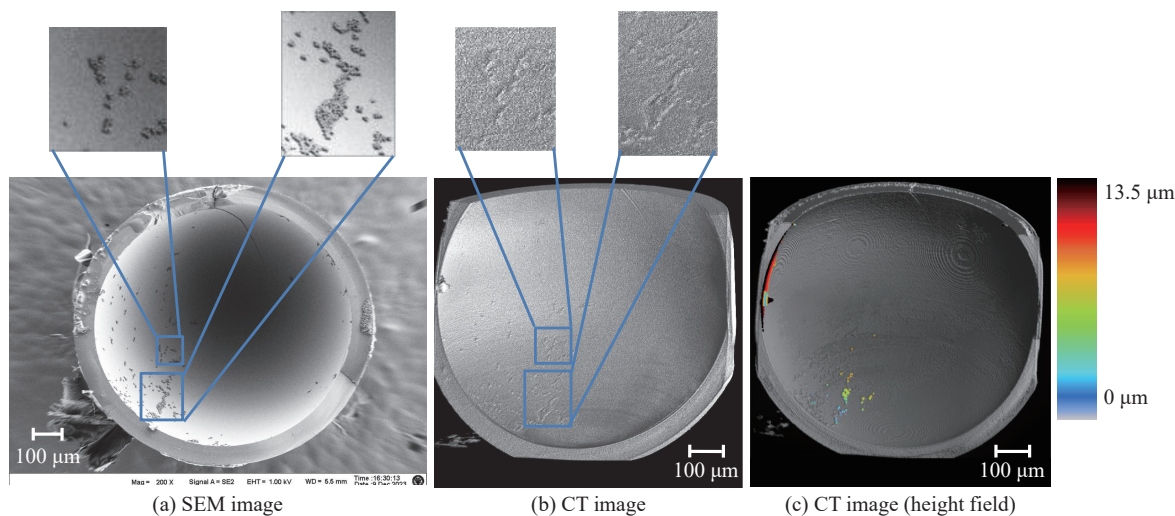


Fig. 7 The inner surface of the capsule photographed in different ways (with 3 μm microspheres)

图 7 不同方式拍摄的靶丸内表面(添加 3 μm 微球)

为了检测对内外表面缺陷参数计算的准确性, 创建仿真数据: 内外表面均为理想椭球面, 并在内外表面上随机添加了多个不同宽度不同高度的缺陷。对仿真数据各个缺陷块的高度和宽度进行计算, 靶丸缺陷参数测量结果如表 1 所示, 尺寸较小时测量误差较大, 尺寸较大时较为准确。在设置的 40 个缺陷中, 有 1 个没有被识别到, 可见能够识别出绝大多数缺陷。

表 1 靶丸缺陷参数测量结果

Table 1 Measurement results of capsule defect parameters

height of the defects/voxel	measured height/voxel	average error of height/%	width of the defects/voxel	measured width/voxel	average error of width/%	GT quantities	measured quantities
3	2.65±1.44	11.7	6	6.21±1.13	17.2	12	12
6	6.39±1.33	6.5	12	12.38±0.69	3.1	14	13
10	10.99±1.54	9.9	20	21.01±0.63	5.1	14	14

3 结论

本文提出了基于显微 CT 图像数据的 ICF 靶丸缺陷辅助分析技术, 通过拟合标准曲面与实际表面比对, 自动识别出了大部分缺陷区域, 较准确地计算出了缺陷宽度、高度等参数。此外, 运用体绘制技术呈现了靶丸的三维立

体效果,以此观测未被识别出的缺陷区域作为补充。尤其突出了缺陷区域的高度场效果,可以通过虚拟切割对内表面进行观察,为后续研究人员提供了良好的交互观测工具。相比光学干涉方法、数字全息成像等技术,该方法可以对非透明靶丸的内表面进行非破坏性观察;相比X射线直接成像技术,该方法能够在三维尺度上对靶丸进行立体观察,对沿靶丸表面延展的三维缺陷进行更直接准确的测量。但是,该方法不能识别出孤立缺陷点和高度1像素宽($0.625\ \mu\text{m}$)以内的缺陷区域,对尺寸较小的缺陷参数测量误差相对较大,需要优化以提高缺陷识别和测量准确度。且目前虽能够观测内表面并有对缺陷进行检测的能力,但由于当前显微CT成像分辨率的限制,还没有在数据中观测到尺寸较小的实际内表面缺陷。当前,显微CT的成像分辨率正在不断提升,期待在不久之后能够解决这一问题。此外,除了表面存在形状缺陷,靶丸的内部还存在表现为灰度差异的空洞缺陷,随着国内显微CT衬度的提升,有望在未来实现对空洞缺陷的检测,可以在本方法的基础上实现内部缺陷的深度定位和直径计算,实现更全面的靶丸缺陷检测。

致 谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心的王琦给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 高莎莎, 吴小军, 何智兵, 等. 激光惯性约束聚变靶制备技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 032001. (Gao Shasha, Wu Xiaojun, He Zhibing, et al. Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 032001)
- [2] 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.
- [3] Meng Jie, Zhao Xuesen, Tang Xing, et al. Surface characterization of ICF capsule by AFM-based profilometer[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5: 03000e21.
- [4] McEachern R L, Moore C E, Wallace R J. The design, performance, and application of an atomic force microscope-based profilometer[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1995, 13(3): 983-989.
- [5] 唐兴, 王琦, 马小军, 等. 靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量技术[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 266-272. (Tang Xing, Wang Qi, Ma Xiaojun, et al. Determination of the inner-surface profile of a capsule using chromatic confocal spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 266-272)
- [6] Patterson B M, Obrey K A D, Havrilla G J, et al. Nondestructive investigations of a copper- and argon-doped sputtered beryllium capsule using X-rays in three dimensions[J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 55(4): 417-423.
- [7] Sain J D, Brown W D, Martz H E, et al. Analysis procedures for double-shell target concentricity and wall thickness[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2006.
- [8] Nora R, Clark D, Masse L, et al. Modeling the interactions of multiple voids in inertial confinement fusions implosions[C]//APS Division of Plasma Physics Meeting. 2021.
- [9] Ferris A L, Kuettner L, Loomis E, et al. CT analysis of double shell targets[C]//APS Division of Plasma Physics Meeting. 2020.
- [10] 赵学森, 高党忠, 马小军, 等. X射线法 ICF 靶丸几何参数批处理及壁厚分布计算[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(4): 487-492. (Zhao Xuesen, Gao Dangzhong, Ma Xiaojun, et al. Batch processing of geometric parameters and wall thickness distribution calculation of ICF capsule by X-ray imaging method[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(4): 487-492)
- [11] 王琦, 高党忠, 马小军, 等. 惯性约束聚变靶丸高精度 X 射线数字成像[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 324-333. (Wang Qi, Gao Dangzhong, Ma Xiaojun, et al. High precision X-ray digital imaging of inertial confinement fusion capsules[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 324-333)
- [12] Gonzalez R C. Digital image processing[M]. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2008: 741-747.
- [13] Yagüe-Fabra J A, Ontiveros S, Jiménez R, et al. A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(1): 531-534.
- [14] Pirillo F. Study on segmentation techniques for geometric measurements in industrial computed tomography[D]. Milan: Polytechnic University of Milan, 2022: 37-40.
- [15] Engel K, Hadwiger M, Kniss J M, et al. Real-time volume graphics[C]//ACM SIGGRAPH 2004 Course Notes. 2004: 29-es.
- [16] Max N. Optical models for direct volume rendering[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995, 1(2): 99-108.
- [17] Phong B T. Illumination for computer generated pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.