



·惯性约束聚变物理与技术·

基于高精度 3D 打印工艺的 ICF 调制靶^{*}

林祖德¹, 戴羽², 徐梦飞¹, 曹佳炜¹, 郑坤宇¹,
魏宁¹, 韩良智³, 王晓林¹, 刘景全¹

(1. 上海交通大学微米纳米加工技术全国重点实验室, 上海 200240; 2. 中国科学院物理研究所, 北京 100190;
3. 纳糯三维科技(上海)有限公司, 上海 200233)

摘 要: 惯性约束聚变(ICF)中的瑞利-泰勒不稳定性(RTI)研究需要基于多种结构的调制靶, 针对目前调制靶制备的工艺问题, 采用双光子 3D 打印工艺制备了平面调制、平面复合调制及球壳型调制三种典型结构的调制靶, 靶材料为光敏树脂(95%: $C_{23}H_{38}N_2O_8$, 5%: $C_4H_6O_2$)。采用激光共聚焦显微成像分析了三种调制靶的实际结构参数, 三种靶型的实测形貌及其参数与设计结构及参数具有良好匹配度。为进一步验证双光子 3D 打印新型工艺制备调制靶的可行性, 实验团队在“神光 II”高功率激光实验装置上进行了纳秒激光打靶实验, 结果显示靶表面的调制在激光直接驱动下受 RTI 的作用随时间呈增长趋势, 初始峰谷值为 $4\ \mu\text{m}$ 的调制在激光驱动 2.5 ns 后形成了长度达 $100\ \mu\text{m}$ 的高密度射流, 表明基于高精度 3D 打印工艺制备结构复杂的调制靶用于 RTI 研究具有较高可行性。

关键词: 惯性约束聚变; 瑞利-泰勒不稳定性; 调制靶; 双光子 3D 打印; 直接驱动

中图分类号: TL649

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230146

ICF modulation targets based on high-precision 3D printing technology

Lin Zude¹, Dai Yu², Xu Mengfei¹, Cao Jiawei¹, Zheng Kunyu¹,
Wei Ning¹, Han Liangzhi³, Wang Xiaolin¹, Liu Jingquan¹

(1. National Key Laboratory of Advanced Micro and Nano Manufacture Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Nanoscribe China Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: Rayleigh-Taylor instability (RTI) research in inertial confinement fusion (ICF) is based on modulation targets with multiple structures. In this paper, aiming at the present problems existing in the preparation of modulation targets, three typical modulation targets of planar modulation, planar composite modulation and spherical shell modulation have been prepared by two-photon 3D printing process. The target material is photosensitive resin (95%: $C_{23}H_{38}N_2O_8$, 5%: $C_4H_6O_2$). The actual structural parameters of the three modulation targets were analyzed using laser confocal microscopy imaging. The measured morphologies and parameters of the three targets show good matching with the designed structures. To further validate the feasibility of using new two-photon 3D printing process for preparing modulation targets, nanosecond laser targeting experiments were conducted on the “Shenguang II” high-power laser experimental facility. The results show that the modulation of the target surface increased with time due to the action of RTI under direct laser driving. The modulation with an initial peak valley value of $4\ \mu\text{m}$ formed a high-density jet with a length of up to $100\ \mu\text{m}$ after 2.5 ns of laser driving, which indicates that the preparation of complex modulation targets based on high-precision 3D printing technology is highly feasible for RTI research.

Key words: inertial confinement fusion, Rayleigh-Taylor instability, modulation target, two-photon 3D printing, direct laser driving

* 收稿日期: 2023-05-23; 修订日期: 2023-09-15

基金项目: 中科院战略性先导科技专项 (XDA25040100, XDA25040200, XDA25040300)

联系方式: 林祖德, linzude@sjtu.edu.cn。

通信作者: 刘景全, jqliu@sjtu.edu.cn。

核能被认为是最具应用潜力的终极能源,惯性约束聚变(ICF)是地球上实现受控热核聚变最具前景的两种手段之一^[1-3]。对于ICF实验,不论间接驱动或直接驱动方式,其对于燃料靶丸及驱动辐照的对称性、均匀性均有着严格的要求,以上因素的欠缺会导致压缩过程的不稳定性,即瑞利-泰勒(R-T)不稳定性^[4-6]。R-T不稳定性(RTI)的发展,会将初始的微小扰动不断放大,最终引起烧蚀层与燃料层的混合、热斑温度的降低,进一步降低内爆效率甚至导致点火失败^[7-8]。为了分析靶丸压缩过程中R-T不稳定性的增长过程,通常需要进行分解实验验证,如通过激光压缩表面具有调制图形的平面靶,对靶丸压缩、破裂和混合过程的R-T不稳定性进行模拟。调制靶的研制对R-T不稳定性的研究尤为重要。国内外已在调制靶设计、制备方面开展多项研究^[9-13]。国内中国工程物理研究院谢军、同济大学唐俊等通过金刚石车削技术在紫铜等金属表面进行正弦波调制图形加工,之后将调制图形转移至多种有机薄膜,并切割形成平面调制靶^[9-10]。同济大学朱秀榕等采用紫外皮秒激光在纯铝箔表面加工了调制波形,通过转移法制备了SiO₂、碳气凝胶、CH聚合物等材料的平面调制靶^[11],同校的孙骐、周斌等采用激光干涉法在光刻胶表面制备调制图形,结合图形转移工艺制备了溴代聚苯乙烯薄膜平面调制靶^[12-13]。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的Hsieh等人也基于高精度金刚石车削和转印技术研制了具有正弦波调制的平面靶^[14],同单位的Schappert等人使用金刚石车削与电火花加工(EMD)技术制备了具有尖峰调制的铜靶,并进行了相应的分解物理实验^[15]。综上,目前调制靶制备的主流工艺是通过多种微纳加工技术(金刚石车削、飞秒激光加工、激光干涉法等)在硬质衬底上制备出调制结构,再通过转印技术将调制结构复制到所需实验材料表面。金刚石车削、飞秒激光加工等微纳加工工艺具有较高加工精度,但针对不同结构通常需要采用复杂的控制程序及定制的样品夹具进行特殊化加工,难以根据实验需求进行各种异形调制结构的灵活制备。激光干涉法相较于金刚石车削及飞秒激光加工,过程简单且灵活性较强,但在结构加工精度及形貌控制方面难度较大。同时,转印工艺本身存在误差,模具表面轮廓转移至靶表面后容易产生变形^[16]。随着ICF理论及实验研究的不断深入,对调制靶的结构要求多样化,如复合平面调制靶及表面具有调制图形的球壳靶等,目前的调制靶加工方法已难以满足ICF物理实验所需多样化调制靶的制备需求。

在ICF实验所需的特殊构型靶零件制备方面,3D打印工艺已发挥重要作用,如多种微型柱腔结构及各种靶架的加工。但在调制靶制备方面,由于对调制结构的精度及表面粗糙度等有较高要求,目前对基于3D打印工艺制备的高精度调制靶报道较少。本文针对目前R-T不稳定性研究的调制靶制备需求及制备难点,设计了三种典型结构的调制靶,采用超高精度双光子3D打印技术进行了制备,并在“神光II”高功率激光实验装置上进行了初步验证。

1 调制靶设计及制备

本文针对R-T不稳定性研究需求,设计并制备三种具有典型结构的调制靶。在调制靶材料方面,只含有C、H两种低原子序数(低Z)元素的材料是常用的靶丸烧蚀材料,因此,本文采用主要构成元素为C、H的光敏树脂(Nanoscribe公司提供)进行调制靶加工,具体成分为:约95%质量分数二甲基丙烯酸氨基甲酸酯(C₂₃H₃₈N₂O₈),约5%质量分数γ-丁内酯(C₄H₆O₂),其余成分低于1%。

1.1 双光子3D打印制靶工艺

双光子3D打印的原理是基于“双光子吸收效应”,即由于光敏树脂中存在特殊的能级跃迁模式,出现的同时吸收两个光子的情况。双光子吸收产生的条件非常苛刻,要求特定的物质和极高的光能量密度,且作为一种三阶非线性效应,随着光能量密度的增加,该效应会随之迅速增强。只有当光强达到一定值,才会出现明显的双光子吸收效应。通过光路将激光聚焦至极小的点,则将在该焦点附近的小区域内产生双光子吸收,并使光敏树脂固化。通过纳米级精密移动台,使得该焦点在光敏物质内移动,则可形成任意设计结构的3D物体,并达到超高的打印精度。图1所示为Nanoscribe公司的双光子3D打印工艺原理图。本文中的双光子3D打印工艺均采用Nanoscribe公司的GT2型设备进行。

1.2 平面调制靶

依据物理分析,RT不稳定性增长率与调制波数相关的同时还受激光烧蚀的作用,在实验的激光条件下波长 λ 介于

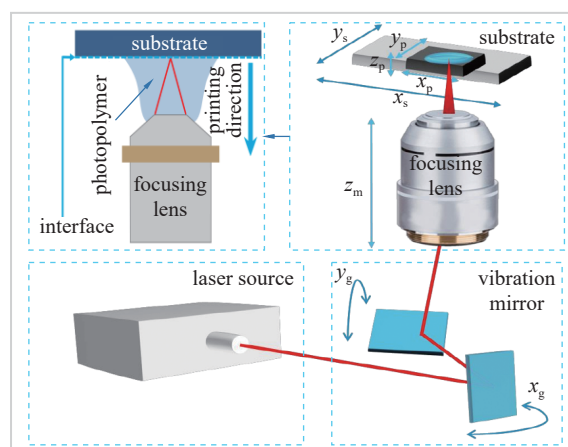


Fig. 1 Two-photon polymerization based 3D printing of target

图1 双光子3D打印制靶工艺

30~150 μm 之间的扰动更容易增长, 对 ICF 危害最大, 因此选择波长为 55 μm 的扰动作为实验观察对象。同时, 振幅 A 在小于 $\lambda/10$ 时 RT 增长处于线性阶段, 此时由基模的增长占据主导。当振幅超过该阈值后, 增长进入非线性阶段, 模式竞争和模式耦合开始出现, 容易产生燃料混合和壳层破裂的风险。故选取初始振幅为 2 μm 的调制有利于实验观察 RT 增长由线性阶段过渡到非线性阶段的过程。平面调制靶的扰动波长设计为 $\lambda=55 \mu\text{m}$, 扰动幅值设计为 $A=2 \mu\text{m}$, 调制靶厚度 d 为 20 μm。采用正弦波调制图形, 调制表面轮廓的设计曲线如式(1)所述。

$$y = 0.02 + 0.002 \sin(2\pi x / 0.055) \quad (1)$$

平面调制靶三维设计结构如图 2 所示, 其中黄色区域为打靶激光作用区, 表面具有调制波纹, 浅蓝色区域用于靶装配。

1.3 复合平面调制靶

复合平面调制靶为普通平面靶与调制平面靶复合而成。该靶型为目前金刚石车削等工艺较难完成的调制靶型。根据实验要求, 复合平面调制靶平面部分厚度为 50 μm, 调制部分表面调制波形与式(1)类似, 仍为正弦波。扰动幅值 A 为 4 μm, 扰动波长 λ 为 50 μm。

复合平面调制靶三维设计图如图 3 所示。其中黄色区域为调制平面靶部分, 蓝色区域为普通平面靶部分。

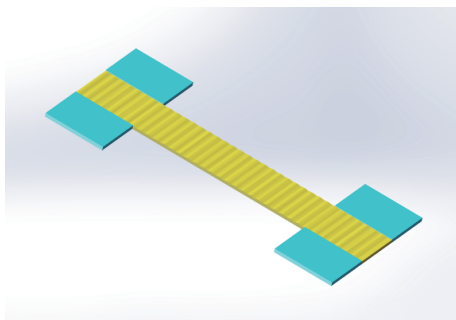


Fig. 2 Design diagram of the planar modulation target
图 2 平面调制靶结构设计图

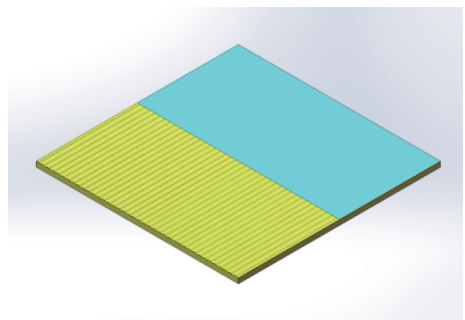


Fig. 3 Design diagram of the composite planar modulation target
图 3 复合平面调制靶结构设计图

1.4 球壳调制靶

球壳型调制靶在压缩过程的 R-T 不稳定性研究中具有关键作用。相比于平面调制靶, 球壳调制靶的结构更接近 ICF 点火实验所使用的燃料球形冰层, 因此对于燃料压缩过程中不对称性扰动发展的模拟也更具参考价值。但球壳型调制靶加工技术复杂程度高, 制备难度较大。本文中制备球壳型调制靶的结构设计如图 4 所示, 球壳内半径为 500 μm。

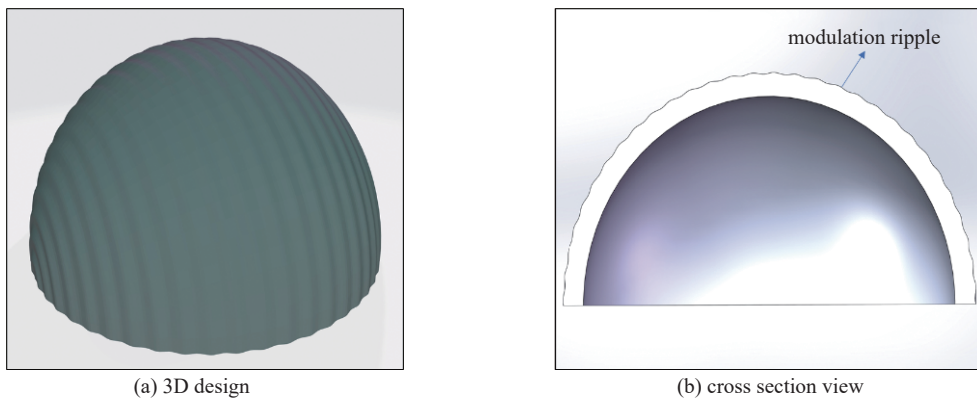


Fig. 4 Design diagram of the spherical shell modulation target
图 4 球壳型调制靶结构设计

球壳基准厚度为 50 μm, 表面调制波形的曲线如式(2)所述, 其中参数 t 的取值范围为 $0 \sim 2\pi$ 。

$$\begin{cases} x = (0.5 + 0.002 \sin(60t)) \cos(t) \\ y = (0.5 + 0.002 \sin(60t)) \sin(t) + 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

以上三种结构调制靶均采用高精度双光子 3D 打印工艺进行加工, 3D 打印基底采用硅衬底, 打印完成后采用异丙醇将衬底与调制样品分离。

2 调制靶制备结果及分析

2.1 平面调制靶

图 5 所示为平面调制靶装配后的光学照片。由于平面调制靶基准厚度较薄($20\ \mu\text{m}$), 在薄膜内应力作用下, 衬底与调制样品分离之后会有发生一定的卷曲, 经热处理及装配后卷曲效应会得到降低。图 5(a) 为平面调制靶装配在硅靶托的实物图, 调制靶表面可观测到显著且均匀的调制波纹。图 5(b) 为调制靶表面沉积金层结果, 在金层沉积过程中, 调制靶本身未发生明显卷曲, 沉积的金层有利于提高 R-T 不稳定性验证实验中的信号强度。平面调制靶靶托底部为 $200\ \mu\text{m}$ 厚铝, 并加工 $1\ \text{mm}$ 直径圆孔用于打靶过程中的等离子体喷出, 靶托上部分为 $300\ \mu\text{m}$ 厚硅结构, 用于调制靶支撑及装配。

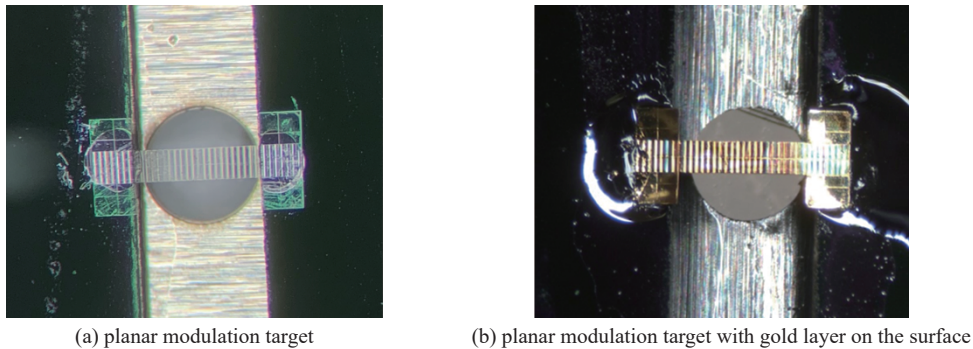


Fig. 5 Optical photo and measurement result of the planar modulation target

图 5 平面调制靶光学照片及表面扫描结果

图 6 所示为平面调制靶表面调制波纹的激光共聚焦显微镜扫描结果。其中图 6(a) 为顶视角度扫描高度分布图, 图 6(b) 为由高度扫描结果生成的三维轮廓图。为便于进一步分析打印的调制波纹形貌, 图 6(c) 展示了轮廓截面的扫描图。轮廓扫描结果表明调制扰动周期约为 $52.5\ \mu\text{m}$, 扰动幅度约为 $1.2\ \mu\text{m}$ 。相比于设计结果, 调制扰动周

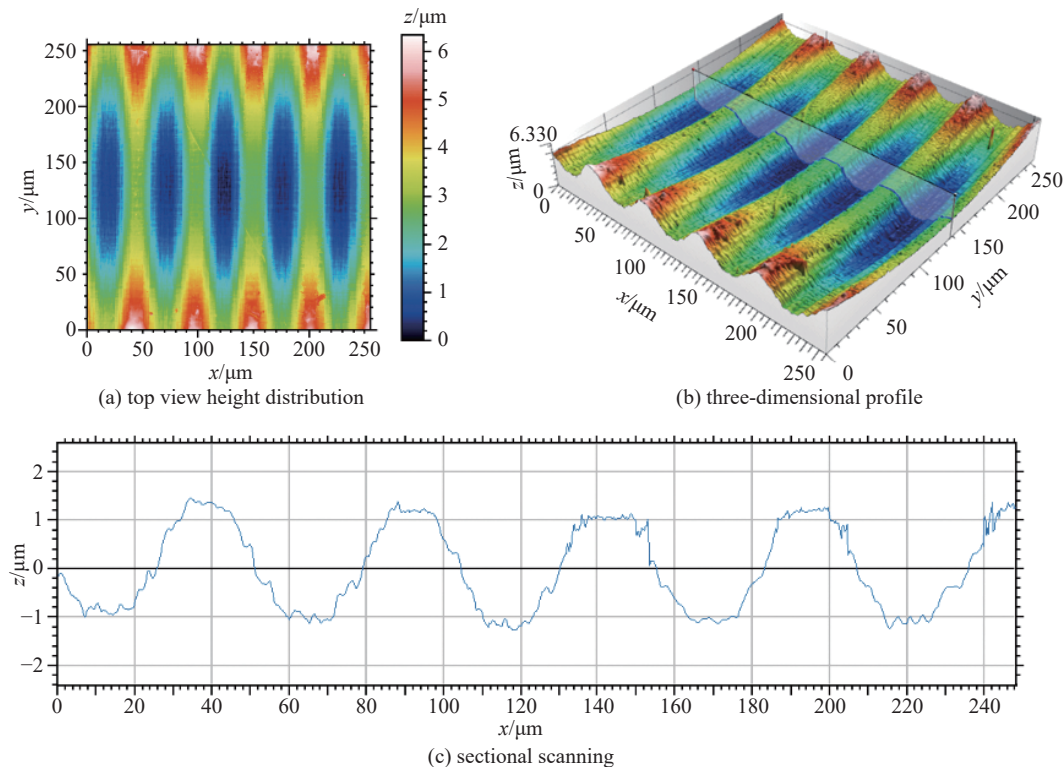


Fig. 6 Laser confocal scanning images of the planar modulation target

图 6 平面调制靶表面轮廓激光共聚焦扫描结果

期和扰动幅度分别有约 $2.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.8\ \mu\text{m}$ 偏差, 主要是由于调制靶设计厚度较薄, 衬底与调制样品分离释放后有部分形变或收缩, 后续将在调制靶打印参数及衬底与调制样品分离工艺方面进行优化, 提高靶设计参数与实际测量值之间的匹配度。

2.2 复合平面调制靶

复合平面调制靶功能区包括两部分, 其中平面区域需具有较低粗糙度, 调制部分需具有按需设计的调制结构。图 7 所示为复合平面调制靶部分区域的激光共聚焦扫描结果, 其中图 7(a) 为顶视角度高度扫描结果, 图 7(b) 为根据高度扫描结果生成的三维图, 图 7(c) 为调制部分的截面扫描结果图。

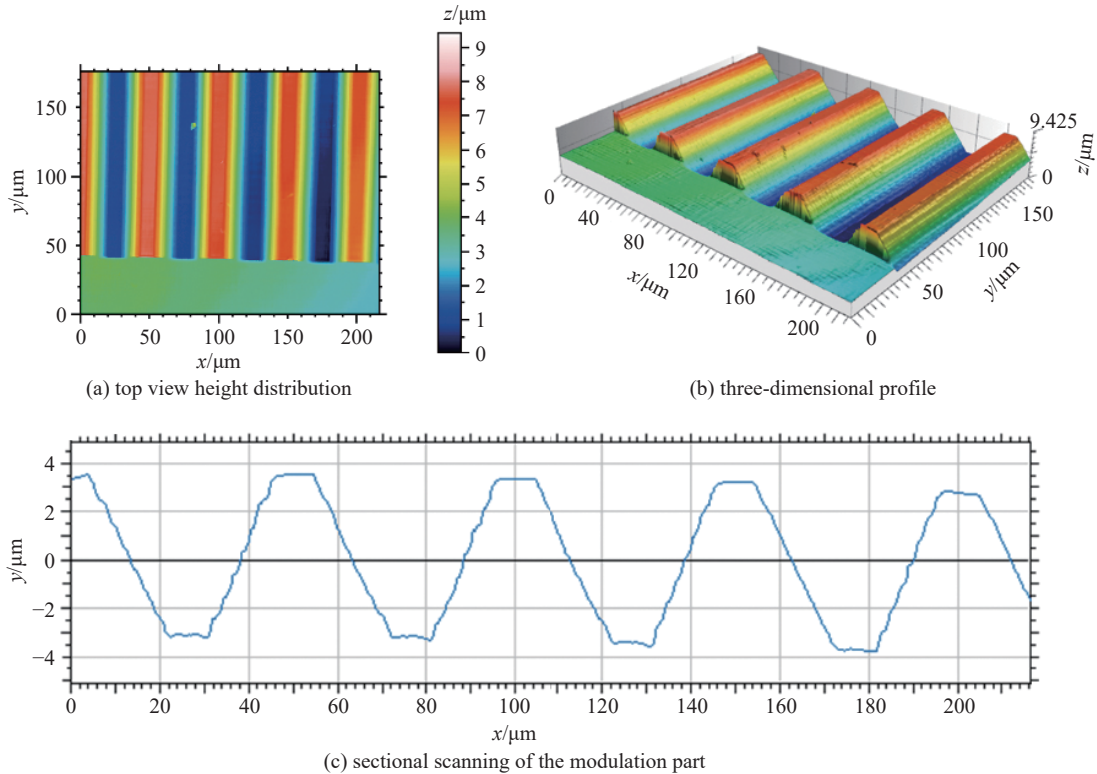


Fig. 7 Laser confocal scanning images of the composite planar modulation target

图 7 复合平面调制靶表面轮廓激光共聚焦扫描结果

根据激光共聚焦扫描结果, 平面部分的算术平均高度 (S_a , ISO 25178 标准) 约为 $100\ \text{nm}$, 表明具有较低的粗糙度, 满足靶型设计预期。调制结构部分调制扰动周期约为 $50\ \mu\text{m}$, 调制幅度约为 $3.6\ \mu\text{m}$ 。相较于靶型设计参数, 调制扰动周期具有超高契合度。调制幅度偏差约为 10% , 已达到靶型加工精度要求, 为进一步提高加工精度, 可在靶型设计模型方面进行参数补偿。

2.3 球壳调制靶

图 8 所示为球壳型调制靶的光学照片及激光共聚焦显微成像结果。

球壳调制靶的光学照片显示出明显的球壳表面调制条纹, 与图 4 所示球壳调制靶设计结构良好契合。为进一步分析球壳表面调制结构的形貌, 图 8(b) 展示了球壳顶部约 $0.25\ \text{mm} \times 0.25\ \text{mm}$ 范围的激光共聚焦成像结果, 图 8(c) 为沿球壳表面条纹垂直方向的截面扫描曲线。对激光共聚焦测量结果的评估表明, 球壳表面具有较高光滑度, 扰动调制的幅度约为 $1.8\ \mu\text{m}$, 与设计结构 $2.0\ \mu\text{m}$ 间具有较高的一致性。基于测量结果偏差分析, 为获得更高的球壳调制靶精度, 同样可进一步在球壳靶 3D 打印参数上进行补偿。

对以上不同类型调制靶的加工及测量结果表明, 采用双光子 3D 打印工艺进行调制靶加工可实现不同靶形、不同调制结构的灵活加工, 且调制结构加工精度较高、表面粗糙度较低。这主要得益于 3D 打印工艺本身可按需进行结构的灵活设计和制备, 对加工结构的形状要求显著低于金刚石车削、飞秒激光加工、热塑成型等方式。同时, 双光子 3D 打印工艺过程中, 激光聚焦点尺寸极小, 配合高精度的位移控制平台, 实现了调制结构的高加工精度和低表面粗糙度。而靶型的整体尺寸精度和形状控制还需进一步提升, 这主要是由于光敏树脂显影、固化、受热过程中的内、外应力所造成, 除可进行靶型设计参数补偿及热退火处理外, 还需对 3D 打印工艺参数进行进一步

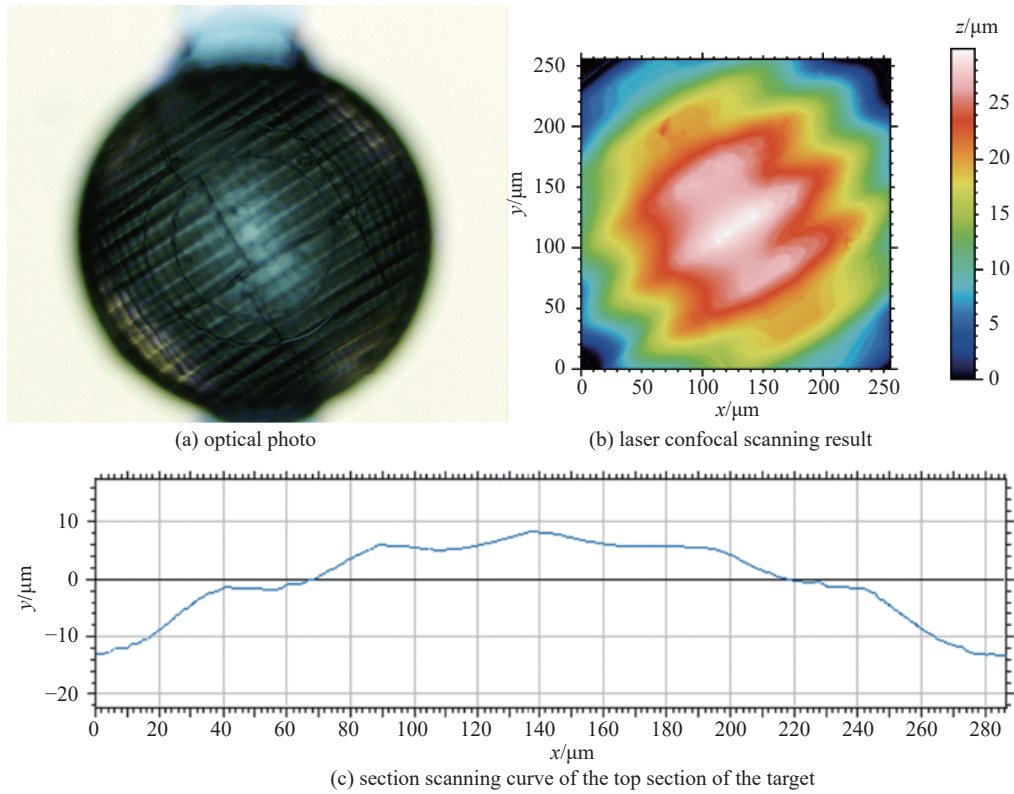


Fig. 8 Optical photo and laser confocal scanning result of spherical shell modulation target
图 8 球壳型调制靶光学照片及顶部激光共聚焦扫描图像

优化。此外,在靶型制备材料方面,目前双光子 3D 打印工艺仅支持光敏树脂材料,进行其他材料的调制靶结构加工,如金属、聚合物、气凝胶等,可基于双光子 3D 打印工艺设计并加工特殊结构的模具,后通过转印等工艺进行调制靶制备。

为进一步验证本文基于双光子 3D 打印工艺制备的调制靶在 R-T 不稳定性研究中应用的可行性,实验团队在中国科学院上海光学精密机械研究所的神光 II 装置上开展了激光烧蚀 RTI 的相关研究。实验采用 X 射线背光照相的方法,利用激光驱动产生的 X 射线源对平面调制靶进行了透射式侧向背光照相。平面调制靶作为主靶加载了四路激光,到靶能量最高为 880 J,脉宽约 2.5 ns,激光通过 300 μm 的连续相位板(CPP)进行束匀滑,靶面光强最高达到了 $4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$;副靶为钨平面靶,利用两路激光驱动作为 X 光背光源。实验利用 X 射线分幅相机进行拍照,相机前端为多针孔阵列,通过小孔成像的原理对打靶区域进行拍照。

图 9 所示为平面调制靶在纳秒激光辐照下, X 射线分幅相机拍摄的不同时刻等离子体图像。测量结果显示,主靶表面的调制在激光的直接驱动下受 RTI 的作用随时间呈增长趋势,初始峰谷值为 4 μm 的调制在激光驱动 2.5 ns

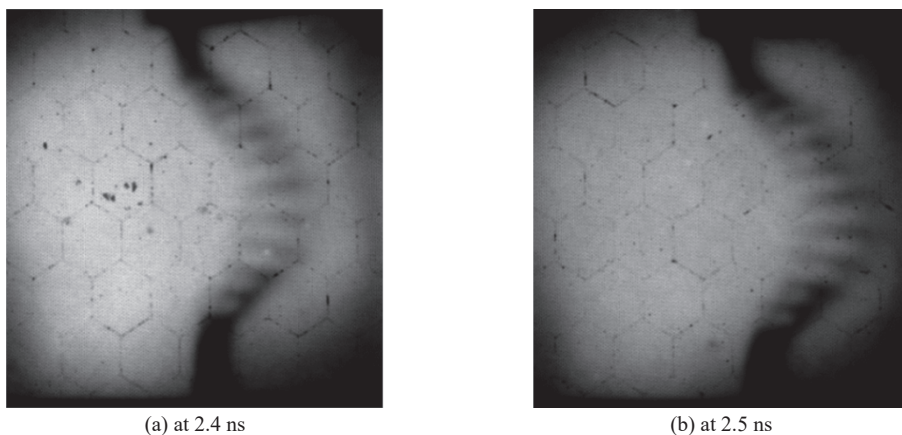


Fig. 9 X-ray framing camera imaging of planar modulated target under nanosecond laser direct driving
图 9 平面调制靶在纳秒激光直接驱动下不同时间的 X 射线分幅相机成像

后形成了长度达 100 μm 的高密度射流, 初始为正弦形状的调制也发展成为尖钉状射流和气泡空腔, 其中尖钉位置对应初始调制的峰、气泡位置对应初始调制的谷。由于其初始扰动振幅小于波长的 1/10, 因此该扰动的发展过程经历了线性增长到非线性增长的转变, 可以从该结果入手对激光烧蚀的 RTI 增长展开研究。以上打靶结果表明, 采用高精度双光子 3D 打印工艺制备的平面调制靶, 其参数达到了 R-T 不稳定性研究所需的调制靶的参数要求, 这为 ICF 研究所需调制靶的制备提供了新的技术途径。

3 结 论

本文针对 ICF 实验中 RTI 不稳定性研究所需调制靶的特点, 采用双光子高精度 3D 打印工艺进行平面型、复合平面型及球壳型三种典型结构调制靶的制备。三种调制靶型测量参数与设计参数间具有较高的匹配度, 且调制靶材料主要由 C、H 低 Z 元素构成, 与传统调制靶的材料契合。在 SG-II 高功率实验装置上的 ns 激光打靶结果显示, 制备的平面调制靶表面调制在激光直接驱动下受 RTI 的作用随时间呈显著增长趋势, 靶参数达到了 R-T 不稳定性研究所需的调制靶参数要求。本工作表明, 采用高精度双光子 3D 打印工艺进行平面型、复合平面型、球壳型等调制靶制备具有较高可行性, 且可进行靶结构的灵活设计, 这为 ICF 实验所需的复杂调制靶型制备提供了新的技术途径。

参考文献:

- [1] 单连强, 吴凤娟, 袁宗强, 等. 激光惯性约束聚变动理学效应研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 012004. (Shan Lianqiang, Wu Fengjuan, Yuan Zongqiang, et al. Research progress of kinetic effects in laser inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 012004.)
- [2] 王淦昌, 王乃彦. 惯性约束核聚变的进展和展望 (I)[J]. *核科学与工程*, 1989, 9(3): 193-207. (Wang Ganchang, Wang Naiyan. The progress and prospect in the inertial confinement fusion[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1989, 9(3): 193-207.)
- [3] 李恩德, 杨泽平, 官春林, 等. 我国惯性约束聚变领域中的波前控制技术[J]. *光电工程*, 2020, 47: 200344. (Li Ende, Yang Zeping, Guan Chunlin, et al. Wavefront control technology for ICF facility in China[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47: 200344.)
- [4] Khan N, Sharma P K. Investigation of Rayleigh–Taylor instability and internal waves in strongly coupled rotating magnetized quantum plasma[J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2023, 44: 7.
- [5] Schmitt A J, Obenschain S P. The importance of laser wavelength for driving inertial confinement fusion targets. II. Target design[J]. *Physics of Plasmas*, 2023, 30: 012702.
- [6] Kuang Yuanyuan, Lu Yan, Lin Zhi, et al. Coupled model analysis of the ablative Rayleigh–Taylor instability[J]. *Plasma Science and Technology*, 2023, 25: 055201.
- [7] 曹柱荣, 缪文勇, 董建军, 等. 烧蚀 RT 不稳定性 X 射线分幅诊断研究进展[J]. *物理学报*, 2012, 61: 075213. (Cao Zhurong, Miao Wenyong, Dong Jianjun, et al. Experiment progress of ablative Rayleigh–Taylor instability based on X-ray framing camera[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 075213.)
- [8] 缪文勇, 袁永腾, 丁永坤, 等. 神光 II 装置上辐射驱动瑞利-泰勒不稳定性实验[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032016. (Miao Wenyong, Yuan Yongteng, Ding Yongkun, et al. Experiments of radiation-driven Rayleigh–Taylor instability on the Shenguang- II laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 032016.)
- [9] Tang Jun, Xie Zhiyong, Du Ai, et al. Design and fabrication of a CH/RF/CH tri-layer perturbation target for hydrodynamic instability experiments in ICF[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2016, 35(2): 357-364.
- [10] Tang Jun, Xie Zhiyong, Du Ai, et al. Design and fabrication of a CH/Al dual-layer perturbation target for hydrodynamic instability experiments in ICF[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2014, 89(4): 466-472.
- [11] 朱秀榕, 周斌, 杜艾, 等. ICF 分解实验用双介质调制靶的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 012004. (Zhu Xiurong, Zhou Bin, Du Ai, et al. Fabrication of dual-layer perturbation target for ICF resolved experiments[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 012004.)
- [12] 孙骐, 周斌, 沈军, 等. ICF 研究中的 Rayleigh–Taylor 不稳定性实验用靶[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(12): 1535-1539. (Sun Qi, Zhou Bin, Shen Jun, et al. Modulation targets in Rayleigh–Taylor instability experiments for the ICF study[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(12): 1535-1539.)
- [13] 周斌, 孙骐, 黄耀东, 等. ICF 分解实验中的平面调制靶和薄膜靶的研制[J]. *原子能科学技术*, 2004, 38(1): 79-83. (Zhou Bin, Sun Qi, Huang Yaodong, et al. Development of surface perturbation target and thin silicon foil target used to research Rayleigh–Taylor instability in inertial confinement fusion experiment[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2004, 38(1): 79-83.)
- [14] Hsieh E J, Hatcher C W, Miller D E. Summary abstract: fabrication of Rayleigh–Taylor instability experiment targets[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1985, 3(3): 1278-1279.
- [15] Schappert G T, Batha S H, Klare K A, et al. Rayleigh–Taylor spike evaporation[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(9): 4156-4162.
- [16] 黄燕华, 高党忠, 谢军, 等. 平面调制靶的正弦波曲面超精密加工与表征[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1429-1433. (Huang Yanhua, Gao Dangzhong, Xie Jun, et al. Ultra-precision machining and characterizing of sinusoidal surface of surface perturbation target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1429-1433.)