

文章编号: 0258-7025(2002)07-0621-04

“星光 II”驱动铝靶产生热波、冲击波和 稀疏波测量

江少恩, 李文洪, 刘永刚, 胡 昕, 于燕宁, 于瑞珍

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要 在“星光 II”上, 使用三倍频激光打三种厚度(6, 10 和 20 μm)的铝介质平面靶, 采用光学条纹相机记录冲击波图像, 对热波和稀疏波进行测量, 同时开展冲击波、热波和稀疏波三波相互作用规律的初步研究, 采取多种措施成功地观测到冲击波在前、辐射热波在后、稀疏波更晚的三波物理图像。

关键词 冲击波, 热波, 稀疏波, 激光等离子体

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Experimental Investigation on Heat Wave, Shock Wave and Rarefaction Wave in Aluminum Driven by “XG II” Laser

JIANG Shao-en, LI Wen-hong, LIU Yong-gang, HU Xin, YU Yan-ning, YU Rui-zhen

(Laser Fusion Research Center, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

Abstract Aluminum targets with three kinds of thickness (6, 10 and 20 μm) were driven by laser at 0.35 μm wavelength on “Xingguang II” facilities. Shock-wave images were recorded by optical streak camera, heat wave and rarefaction wave images were measured using X-ray streak camera. The experimental investigation on the interactions among shock wave, heat wave and rarefaction wave was made. Through several measure technique, the three wave interaction physical images were obtained in which shock wave early heat wave was late and rarefaction wave was last.

Key words shock wave, heat wave, rarefaction wave, laser-plasmas

1 引 言

高压和高密度状态下物质的实验和理论研究对天体物理、惯性约束聚变(ICF)和其他相关领域都具有理论和实用价值, 自从开展 ICF 研究以来, 激光产生的冲击波变成了研究高压状态的一条重要途径^[1-3]。

当高功率激光与固体材料相互作用时, 激光加热材料产生等离子体, 通过线性和非线性吸收过程吸收激光能量, 并将其中一部分能量转换成 X 光辐射。由于强激光产生的压力和等离子体喷射反冲而向里的材料压力形成强冲击波。当冲击波冲出靶材料的背向时, 会形成反向稀疏波。这样激光和固体材料作用时, 会在材料中形成冲击波、辐射加热波及稀疏波三波物理图像^[4, 5]。由于这些过程与武器物

理过程存在有一定的相似性, 因此通过实验研究三波特性, 可以为武器物理实验室模拟研究提供重要实验依据。

图 1 为激光打靶条件下的温度、密度和压力空间分布示意图。激光从右方打靶, T_e , ρ 和 P 分别代表电子密度、温度和压力。图中 X_s , X_a 和 X_c 分别为冲击波、烧蚀面和临界面的位置。整个流场分为四区: 静态区($X < X_s$), 冲击压缩区($X_s \leq X \leq X_a$), 烧蚀区(或称电子热传导区、再辐射区)($X_a \leq X < X_c$) 和激光吸收区(或称电晕区、转换区)($X \geq X_a$)。在我们的研究中, 冲击波对应于冲击压缩区, 热波对应于再辐射区, 稀疏波对应于转换区。

同时获得三波区的时空图像对于分析强激光与物质间的相互作用过程是十分重要的, 一方面加深对激光打靶过程的理解, 另一方面可以对数值模拟

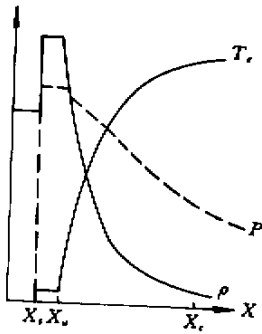


图 1 激光打靶条件下的物理空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of physical parameters when targets irradiated by laser

程序进行更为细致地检验,因为激光打靶过程十分复杂,涉及原子物理、辐射流体力学以及等离子体物理等领域,数值模拟需要许多相关物理模型,计算结果的正确与否必须经过实验的检验,对三波的测量可以定量地对理论程序进行校验。在 ICF 研究早期的 70-80 年代,主要对三波中的单一波进行各自的测量,比如仅测量冲击波的速度和压力等,90 年代后期,我们对冲击波和辐射热波的两波结构进行了实验研究,同时获得三波图像在国内外的 ICF 研究中还未见到。

2 实验条件及靶型

实验在“星光 II”激光装置上进行,打靶激光条件为: $\lambda = 0.35 \mu\text{m}$, $E_L = 100 \text{ J}$, $\tau_L \sim 0.6 \text{ ns}$, 激光焦斑直径为 $\varphi \approx 250 \mu\text{m}$ 。于是得到激光功率密度 I_L 为 $2.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 靶室真空度 $\sim 7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。实验采用三种不同厚度的铝箔靶,铝箔厚度分别为 $6 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 。

3 实验布局

实验布置如图 2 所示,激光束与靶法线方向成 0° 方向即正入射辐照铝箔靶,在靶后用带时标的可见光条纹相机测量靶后面的冲击波发光信号,通过滤光片组配置选择记录可见光波长范围为 $400 \sim 500 \text{ nm}$,滤光片透过率曲线见图 3,该滤光片组由 2 块 $0.35 \mu\text{m}$ 全反镜(K9)和 1 块 $0.35 \mu\text{m}$ 全反镜(石英)以及 2 块 QB5 衰减片组成。该成像系统参数为: $f/D = 4.5$, $f = 180 \text{ mm}$, 放大倍数 $M = 10$ 。引出靶室后成像于紫外可见光光学条纹相机(OSC)狭缝

上,OSC 的观测方向与靶法线成 45° 角,而不是与法线同向,这样就避免了从靶前向来的杂散光对 OSC 阴极造成的损伤。OSC 狭缝前加有特定滤光片防止杂散光的干扰。OSC 狭缝后接光学 CCD,再接至计算机,在计算机荧屏上记录条纹图像。

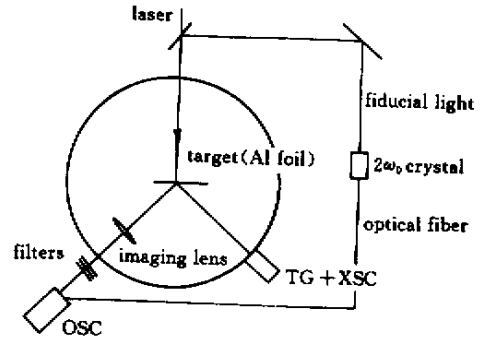


图 2 激光烧蚀铝靶三波相互作用观察实验布置示意图

Fig. 2 Scheme of three waves from aluminum target irradiated by laser

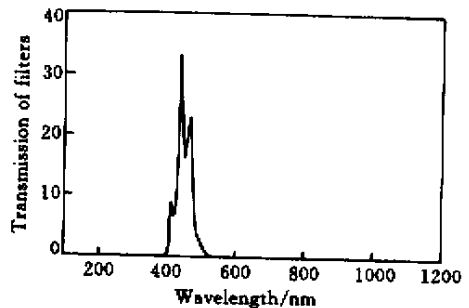


图 3 滤光片组透过率曲线

Fig. 3 Transmission curve of filters

利用带时标的 OSC 可获得不同厚度铝箔背侧冲击波发光时空图像,通过与时标信号及较薄铝箔测得的发光信号比较,可获得较厚铝箔靶中冲击波传播时间及相应速度。时标光是由主激光分光且加二倍频晶体得到波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 的倍频光。

利用透射光栅配 X 光条纹相机(XSC)测量铝箔靶后面发射的 X 光能谱时间过程,XSC 与靶面成 45° 角进行观测。在 X 光条纹相机光阴极前的中心区域狭缝上放置 $5 \mu\text{m}$ 厚 Al 膜衰减,衰减透射光栅零级衍射 X 光,以防止零级衍射 X 光过强而影响接近零级的高能 X 光测量。在冲击波冲出靶的背面后,靶膨胀会反向传递一个稀疏波,形成的烧蚀等离子体会产生低能 X 光辐射,由于所辐射的 X 光十分微弱,要记录信号必须采取适当措施提高灵敏度,为此

我们通过两个途径进行解决,一是 X 光条纹相机的阴极采用 CsI,它的灵敏度在感兴趣的能区是金阴极灵敏度的 10 倍;二是缩短光栅与阴极之间的色散距离。

透射光栅配 XSC 可测得 X 光能谱时间过程图像,由于零级 X 光用 5 μm 厚 Al 膜衰减,基本为能量较高的 X 光直穿信号 ($h\nu > 1 \text{ keV}$),可作为与激光同步的时标,将较低能区的 X 光信号与时标 X 光信号的时间过程比较,可观察到较薄铝箔靶中辐射加热波和烧穿后稀疏等离子体发光的时间延迟。对铝样品材料,热波发射 X 光能区处于 100 ~ 200 eV,稀疏等离子体发射 X 光能区为 < 70 eV。

4 实验结果及分析

实验中,对三种厚度的 Al 靶都进行了测量。对 6 μm 厚的 Al 靶,由光学条纹相机得到冲击波图像见图 4。图中纵向为时间扫描方向,横向为空间方

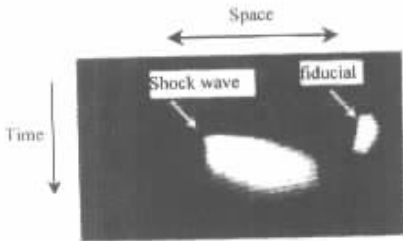


图 4 靶背的冲击波发光条纹图像(6 μm)
Fig.4 Optical streaked-image of the rear surface of an aluminum foil(6 μm)

向,图中已示出时标的位置。时标光和冲击波发光的时间差约为 200 ps,于是得到冲击波的速度 D 为

$6 \mu\text{m}/200 \text{ ps} = 3.0 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 。由冲击波关系式: $D = C_0 + \lambda U$ 和 $P = \rho_0 D U$ 得到 $P = \rho_0 D (D - C_0) / \lambda$,式中 U 为波阵面后粒子速度, P 为冲击波压力, ρ_0 为样品常态下的密度, C_0, λ 为样品的冲击绝热参数^[6]。由此可得样品中的冲击波压力。对 Al 样品 $C_0 = 5.25 \times 10^5 \text{ cm/s}$, $\lambda_0 = 1.39$, $\rho_0 = 2.79 \text{ g/cm}^3$ 。于是可求出冲击波压力为 $P = 12 \text{ Mbar}$ 。对图 3 需要说明的是,由图看出似乎时标光比冲击波发光晚一些,但实际上时标光的光路与探测冲击波发光的光路不同,时标光的光程略长,做实验前要进行主激光与时标光的光程差定标实验。

由一维流体动力学程序数值模拟给出的冲击波压力 P (以 Mbar 为单位)与吸收激光功率密度 I_a (以 10^{14} W/cm^2 为单位)的定标关系^[7] $P \approx 10 I_a^{0.7}$,并取激光吸收效率 $\eta_a = I_a / I_L \approx 50\%$ ^[6],于是估算出相应的冲击波压力约为 11.7 Mbar。此结果与光学条纹相机的结果比较接近。

由 X 光条纹相机配光栅得到靶背辐射的 X 光图像见图 5(a),图中纵向为时间方向,横向为衍射波长方向。图中 K 带辐射为 1 ~ 2 keV,6 μm 厚的 Al 膜对其吸收不大,于是 K 带基本和零级一样是直穿的 X 光,它可以作为 X 光条纹相机的时标光。图中的 L 带辐射能量为 100 ~ 200 eV,这些辐射主要是由烧蚀等离子体所产生的辐射即热波辐射的 X 光,它比时标光晚出现约 400 ps,由此知道热波辐射比冲击波发光要慢一些,并由此得到热波的传播速度为 $6 \mu\text{m}/400 \text{ ps} = 1.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 。通过缩短光栅到条纹相机阴极之间的距离即色散距离,在条纹相机的阴极可以记录冲击波冲出靶背时产生的稀疏等离子体辐射 X 光(< 70 eV),由图 5(a)可知稀疏波比热波出现的时间更晚。这样就得到冲击波在前、辐射热波在后、稀疏波更晚的三波物理图像。

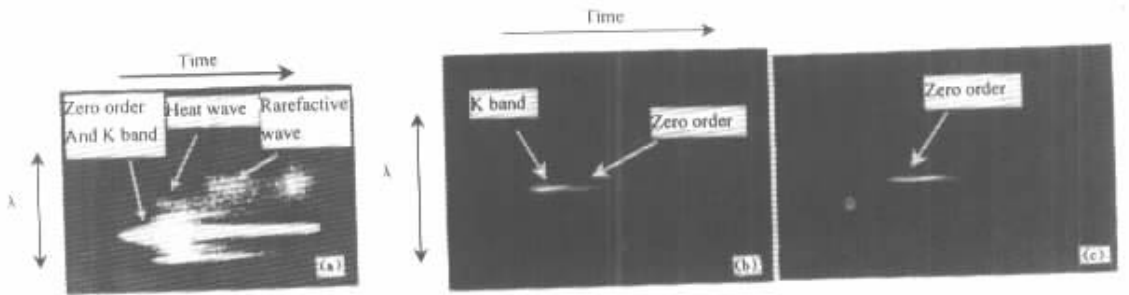


图 5 靶背辐射的 X 光图像
Fig.5 X-ray streak records of the rear emission of an aluminum foil
(a) 6 μm ;(b) 10 μm ;(c) 20 μm

对 $10\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 后的 Al 膜,可得到类似于图 3 的冲击波图像,但没有类似于图 4 的热波和稀疏波图像, $10\ \mu\text{m}$ 的 Al 靶仅有零级和 K 带(见图 5(b)),而 $20\ \mu\text{m}$ 的 Al 靶仅有零级(见图 5(c)),图 5(b)与图 5(c)中时间扫描方向和波长色散方向相同,所以这些方向没有标出。

5 结 论

在“星光 II”装置上开展了激光烧蚀不同厚度铝介质的冲击波、热波和稀疏波三波相互作用的研究工作。对 X 光条纹相机的阴极采用 CsI,提高响应的灵敏度,并缩短光栅与阴极之间的色散距离,从而成功地观测到激光驱动 $6\ \mu\text{m}$ 铝的冲击波在前、热波在后、稀疏波更晚的物理结构图像。但对于 $10\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 厚度的铝靶,由于厚度更大,对热波和稀疏波辐射产生衰减,所以没有观测到热波和稀疏波图像。

致谢“星光 II”运行组和制靶人员为本项工作付出了辛勤劳动,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Gu Yuan, Ni Yuanlong, Wang Yonggang *et al.*. Experimental observation of laser driven high pressure shock waves [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1988, **37**(10):1690 ~ 1693 (in Chinese)
- 2 Jiang Shaoen, Li Wenhong, Ding Y K *et al.*. Experimental observation of high pressure shock waves driven with $0.35\ \mu\text{m}$ laser light [J]. *Journal of High Pressure Physics* (高压物理), 2000, **14**(2):146 ~ 150 (in Chinese)
- 3 R. J. Trainor, J. W. Shaner, J. M. Auerbach *et al.*. Ultrahigh-pressure laser-driven shock-wave in Aluminum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **42**(17):1154 ~ 1157
- 4 Jiang Shaoen, Zheng Zhijian, Li Wenhong *et al.*. Measurement and analysis on shock wave driven by X-ray radiation [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2000, **49**(1):94 ~ 97 (in Chinese)
- 5 Jiang Shaoen, Yang J M, Ding Y N *et al.*. Investigation and analysis on shock wave and heat wave on aluminum disk irradiated by laser [J]. *Journal of High Pressure Physics* (高压物理), 2000, **14**(4):265 ~ 268 (in Chinese)
- 6 Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. Beijing : Science Press, 1986. 78 ~ 88 (in Chinese)
- 7 R. J. Trainor. Application of high-power laser to equation of state research at ultrahigh pressures [R]. UCRL-52562, 1978

第一届激光加工技术高级研讨班招生启事

为促进高等学校、科研院所和高科技企业激光加工领域高层次人才培养,推动我国激光加工技术的快速发展,国家教育部教人司[2002]22号文件批准并委托华中科技大学激光技术国家重点实验室、激光加工国家工程研究中心共同举办“第一届激光加工技术高级研讨班”。

此次高级研讨班采取专家专题讲授、学术交流与演示实践相结合的教学形式进行。届时聘请国内外知名专家、学者讲学,并组织学员进行必要的演示实践和学术交流与研讨。

研讨班的主要内容:1)激光束质量对激光加工

性能的影响;2)铝合金等特殊材料激光焊接、切割机理及工艺研究;3)激光等离子体对材料加工质量的影响及控制方法探讨。

研讨班时间安排:10月14日研讨班学员报到。10月15日至11月3日专家专题讲授、学术交流及研讨。11月4日至11月7日演示实践。11月8日小结,颁发结业证书。

有关本届高级研讨班的招生简章和报名办法详见激光技术国家重点实验室网站:<http://www.laserlab.hust.edu.cn>。

联系人:许德胜副教授,华中科技大学激光技术国家重点实验室 秘书

电 话:027-87543755 传 真:027-87543755

E-mail: lsklab@hust.edu.cn

网 页: <http://www.laserlab.hust.edu.cn>