

激光驱动的冲击波稳定性的数值模拟研究

王 薇 袁瑞场 叶 萍

首都师范大学物理系, 北京 100048

摘要 激光驱动的冲击波进行高压物态方程(EOS)研究中,为保证高压物态方程的精确测量,需要在实验中保证样品中冲击波的稳定性。利用一维辐射流体力学程序 MULTI 对功率密度为 8.1×10^{13} W/cm²、波长为 1.053 μ m、脉宽为 1.0 ns 的准高斯型脉冲激光驱动的冲击波在各种厚度的平面固体 Al 靶中传播的稳定性进行了模拟研究。研究表明在阻抗匹配靶的设计中要保证样品中测得的冲击波的稳定性,衬底的厚度应当大于冲击波在靶中加速传播的距离,而样品的厚度应当近似等于冲击波在靶中稳定传播的距离,这样就可使样品中测得的冲击波的平均速度与样品中的稳定传播速度基本一致。

关键词 激光技术;激光等离子体;物质状态方程;冲击波;阻抗匹配靶

中图分类号 O536 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s214008

Numerical Simulation Study of the Stability of Laser-Driven Shock Waves

Wang Wei Yuan Ruiyang Ye Ping

Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract To get the accurate measurement of the equation of state (EOS) by using the laser-driven shock wave, it is necessary to guarantee the stability of shock propagation in sample target. Using one dimensional radiation hydrodynamics code MULTI, the stability of the shock wave propagation in planar Al targets driven by the laser power densities of 8.1×10^{13} W/cm², with 1.053 μ m wavelength, 1ns Gaussian pulse width is studied. The simulation results show that thickness of the substrate should be greater than the shock waves acceleration propagation distance, and the thickness of the sample should be approximately equal to the shock waves stable propagation distance in the design of impedance-match targets, in order to ensure the average velocity of shock waves in the sample approximately equals to the stable transmission velocity.

Key words laser technique; laser-produced plasmas; equation of state of material; shock waves; impedance-match targets

OCIS codes 140.3430; 280.5395; 350.5400

1 引 言

高压下(1Tpa)物质状态方程(EOS)的研究一直是材料科学、惯性约束核聚变(ICF)等现代物理许多领域中一个引人注目的课题。由于大多数流体力学程序和热力学程序中所采用的有限的一些物质的 EOS 数据是通过理论模拟计算获得的,并且它们只能由少数的几个实验所验证^[1]。为此,直接通过实验进行物质状态方程的研究变得越来越重要。近几十年来物理学家通过不断的努力,经过大量的理论和实验研究利用高功率脉冲激光作为驱动源获得了 1 TPa 量级的高压,它远远超过了通常实验室条件下利用其他手段所获得的^[2-6]。值得一提的是虽然在最初的一些激光驱动冲击波实验中便可以获得高达 10 Tpa 以上的压力^[7-8],但是当时实验中所得到的冲击波的质量很差,并不适合进行 EOS 的精确测量。为此科学家们开始致力于对实验进行不断的改进和完善,大大提高了冲击波的平面性、稳定性和波前低预热,使之适用于 EOS 研究^[9-11]。

收稿日期: 2015-03-04; 收到修改稿日期: 2015-03-31

作者简介: 王薇(1962—)女,博士,副教授,主要从事强激光与物质相互作用等研究。Email: ww@mail.cnu.edu.cn

采用一维辐射流体动力学程序 MULTI^[12] 数值模拟研究了功率密度为 $8.1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 、波长为 $1.053 \mu\text{m}$ 、脉宽为 1.0 ns 的准高斯型脉冲激光驱动的冲击波在平面固体靶中传播的稳定性,探究了冲击波在靶中的传输特性,给出了不同厚度的靶中冲击波开始稳定传输的时间和波前位置以及结束稳定传输的时间,并比较了各种厚度的靶的冲击波传播的平均速度和稳定传输速度。这些研究结果,在阻抗匹配靶^[13]的设计中对靶的厚度优化具有一定的理论意义。

2 激光驱动的冲击波进行高压物质状态方程的研究

通常实验中采用阻抗匹配法^[13]通过测量激光驱动的冲击波在靶中的传播速度来对靶的 EOS 进行研究。图 1 为阻抗匹配靶的结构示意图,A 为衬底,B 为待测样品,C 为标准样品。利用实验所测得的冲击波在样品中的平均传播速度以及已知的标准样品 A 的 EOS 数据,通过 P - U 图上的 Hugoniot 关系曲线^[14-15]便可得到待测样品的 EOS 数据。

值得注意的是利用激光驱动的冲击波进行 EOS 研究中,为保证 EOS 的精确测量,实验中必须保证在样品中得到的稳定传播的冲击波。

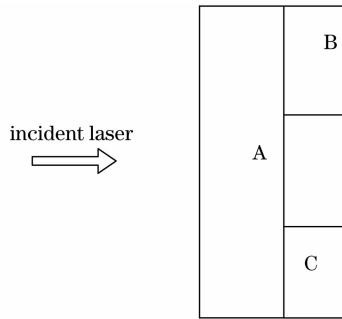


图 1 阻抗匹配靶

Fig. 1 Schematic diagram of the impedance-match target

3 数值模拟研究

3.1 冲击波在靶中的传输特点

激光聚焦在固体靶面上时,靶物质由于激光加热和电离而迅速地转化为等离子体状态,并且由于高温而开始由靶面向真空膨胀。激光烧蚀靶物质的过程中可以反向驱动一冲击波向靶的冷区方向传播。

图 2 给出了功率密度为 $8.1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 、波长为 $1.053 \mu\text{m}$ 、脉宽为 1.0 ns 的准高斯型脉冲激光驱动的冲击波在厚度为 $28 \mu\text{m}$ 平面 Al 靶中传播时的密度冲击波前和烧蚀波前的位置随时间的演化过程。由模拟结果可以清晰地看到冲击波加速,稳定传播和衰减三个阶段。

图 2(a)和(b)为加速阶段的冲击波。图 2(a)为 $t=0.8 \text{ ns}$ 时刻的冲击波。此时激光脉冲峰值尚未到达,烧蚀压随着激光辐射强度的不断增强而增加,并产生一系列的压缩波向靶内驱动,使得冲击波的压力不断地增强。图 2(b)为激光光强达到最大值 $t=1.0 \text{ ns}$ 时的冲击波。可以看到此时的冲击波仍处于加速阶段;之后随激光光强的减弱,烧蚀压开始随之衰减。衰减的烧蚀压会产生一些列稀疏波向靶内传播,约在 $t=1.4 \text{ ns}$ 时冲击波在靶内的传播开始由加速阶段进入到稳定传播[见图 2(c)];稳定传播一段时间后当稀疏波赶上了冲击波的波前,将导致冲击波由相对稳定传播转为衰减[见图 2(d)]。

由此可知对于高斯型激光脉冲,所驱动的从冲击波在靶中的传播经历加速,近似等速和减速三个不同的阶段。

3.2 冲击波传播的稳定性

由于衬底厚度主要依赖于冲击波开始进入稳定传播的时间,而样品厚度主要依赖于冲击波在靶中的稳定传播时间。为此利用一维流体动力学程序 MULTI 模拟研究了功率密度为 $8.1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 、波长为 $1.053 \mu\text{m}$ 、脉宽为 1.0 ns 的准高斯脉冲激光驱动的冲击波在平面 Al 靶中传播时开始稳定传播的时间和波前位置、稳定传播结束开始进入衰减阶段的时间以及冲击波到达靶后表面的时间。

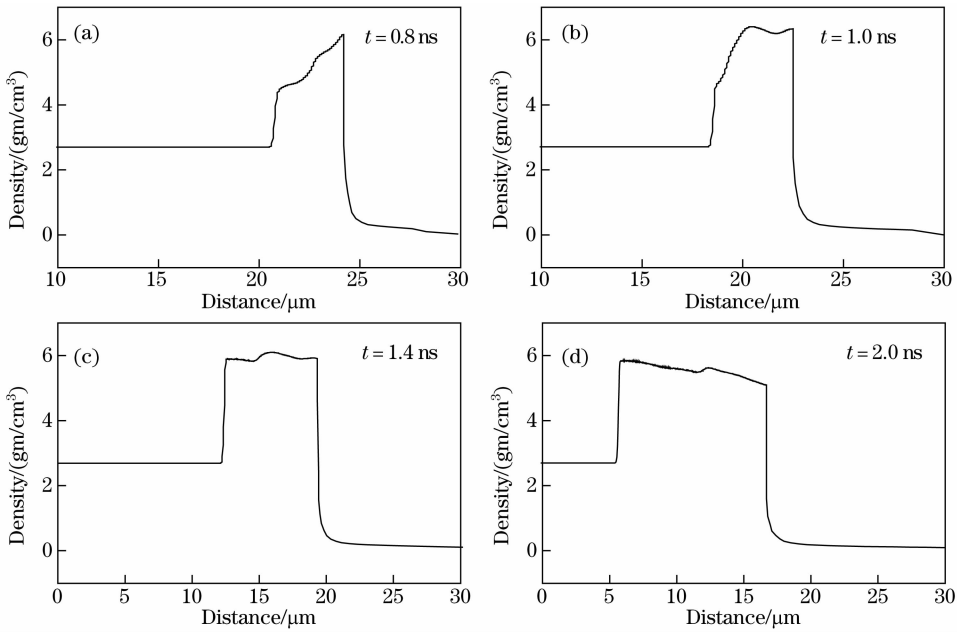


图 2 冲击波波前随时间的演化。(a) $t=0.8\text{ ns}$; (b) $t=1.0\text{ ns}$; (c) $t=1.4\text{ ns}$; (d) $t=2.0\text{ ns}$

Fig. 2 Evolution of shock wave front positions versus time. (a) $t=0.8\text{ ns}$; (b) $t=1.0\text{ ns}$; (c) $t=1.4\text{ ns}$; (d) $t=2.0\text{ ns}$

图 3 给出了激光驱动的冲击波在各种厚度的平面 Al 靶中冲击波开始稳定传播的时间和相应的波前位置。由模拟结果可以看到冲击波在靶中的加速传输过程一般都持续到峰值脉冲之后才开始进入到稳定传播阶段,并且靶的厚度对冲击波开始稳定传播的时间有影响。随厚度的增加,开始稳定传播的时间向后延迟。由模拟结果可以看到厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 的薄靶,开始稳定传播的时间约在 1.2 ns 左右,而厚度为 $36\ \mu\text{m}$ 的厚靶,开始稳定传播的时间推迟到约 1.6 ns 左右。由图 3 给出的开始稳定传播时所对应的冲击波波前位置,可以很方便地给出靶的衬底的厚度。

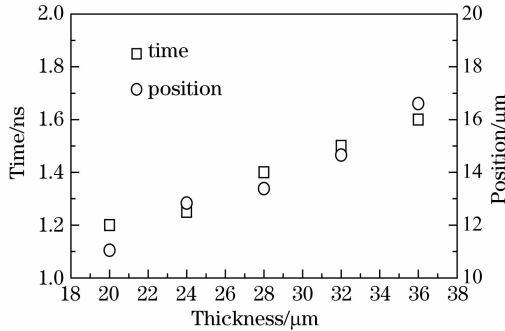


图 3 冲击波在不同厚度的靶中开始稳定传播的时间和波前位置

Fig. 3 Profile of the time and the wave front position of shock waves starting stable transmission in different thickness targets

图 4 比较了激光驱动的冲击波在各种厚度的平面 Al 靶中传播时到达靶的后表面的时间 T_1 及结束稳定传播的时间 T_2 。由模拟结果可以看到冲击波在不同厚度的靶中传播时到达靶后表面的时间和结束稳定传播的时间是不同的。由模拟结果可以看到在当前激光参数下,对于 $20\sim 24\ \mu\text{m}$ 的薄靶,冲击波在尚未结束稳定传播前就到达了靶的后表面,此时 $T_1 < T_2$ 。而对 $28\sim 36\ \mu\text{m}$ 的厚靶,冲击波是在稳定传播结束后在衰减阶段到达靶的后表面的,此时 $T_1 > T_2$ 。

图 5 计算了激光驱动的冲击波在各种厚度的平面 Al 靶中传播时稳定传播的速度 V_1 和冲击波的平均速度 V_2 。由图 5 可知对薄靶($20\sim 24\ \mu\text{m}$)由于冲击波在靶中的传播没有经历衰减阶段,所以冲击波的稳定传播速度与冲击波的平均速度一致,而对厚靶($28\sim 36\ \mu\text{m}$),由于冲击波在靶内的传播经历稳定区和衰减区,所以稳定传播速度和平均速度有差异,并且这种差异随靶的厚度的增加而增大。一般实验中所获得的是冲

击波在样品中传播的平均速度。为了得到精确的冲击波的稳定传播速度,需要将样品靶的厚度进行优化,以保证在样品中冲击波仅仅经历稳定传播阶段。

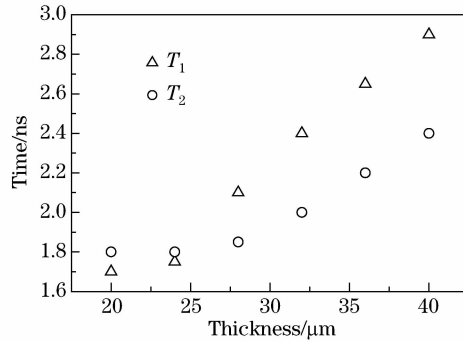


图 4 冲击波在不同厚度的靶中到达靶后时间(T_1)与结束稳定传输的时间(T_2)和的比较

Fig. 4 Comparison between the time of shock waves arriving on target rear side (T_1) and the end time (T_2) of shock waves stable transmission with different thickness targets

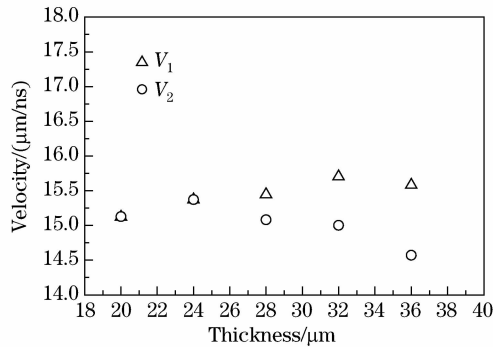


图 5 冲击波在不同厚度的靶中的稳定传播速度(V_1)和平均速度(V_2)的比较

Fig. 5 Comparison between shock stable transmission velocity (V_1) and average velocity (V_2) with different thickness targets

4 结 论

利用辐射流体力学程序 MULTI 对准高斯型脉冲激光驱动的冲击波在平面铝靶中传播的稳定性进行了详细的模拟研究,研究表明:1)激光驱动的冲击波在靶中的加速传输过程一般都持续到峰值脉冲之后才开始进入到稳定传播阶段,并且靶的厚度对冲击波开始稳定传播的时间有影响。通过数值计算得到的开始稳定传播时所对应的冲击波波前位置,可以很方便地给出靶的衬底的厚度;2)冲击波在不同厚度的靶中传播时到达靶后表面的时间 T_1 和结束稳定传播的时间 T_2 是不同的。当 $T_1 < T_2$, 冲击波在靶中的传播没有经历衰减阶段,所获得的冲击波传播的平均速度与冲击波的稳定传播速度一致,而当 $T_1 > T_2$, 由于冲击波在靶内的传播经历稳定区和衰减区,所获得的冲击波平均速度和稳定传播速度有差异,并且这种差异随靶的厚度的增加而增大。实验中为了保证所获得的冲击波传播的平均速度与稳定传播速度一致,在设计样品靶的厚度时需要确保样品中冲击波仅仅经历稳定传播阶段。

参 考 文 献

- Ranan III C E, Silbert M G, Diven B C, *et al.*. Shock compression of molybdenum to 2.0 TPa by means of nuclear explosive[J]. Appl Phys, 977,48(7): 2860-2870.
- Benuzzi A, Lower T, Koenig M, *et al.*. Indirect and direct laser driven shock wave and applications to copper equation of state measurements in the 10-40 Mbar pressure range[J]. Phys Rev E, 1996,54:2162-2165.
- Wang Hongjian, Xiao Shali, Ye Yan, *et al.*. Diagnosis of X-ray backlighter based on laser plasma[J]. Chinses J Lasers, 2014,41(3): 0315001.
- 王洪健,肖沙里,叶雁,等.激光等离子体 X 射线背光源诊断研究[J],中国激光,2014,41(3):0315001.
- Vesser L R, Solem S C. Studies of laser-driven waves in aluminum[J]. Phys Rev Lett 1978, 40(21):1391-1394.

- 5 Trainor R J, Lee Y T. Analytic models for design of laser-generated shock wave experiments[J]. *Phys Fluids*, 1982, 25(10):1898—1907.
- 6 Zhang Xingqiang, Lu Jianye. Preliminary analysis of laser sustained plasma propulsion mechanism [J]. *Chinese*, 2013, 40(8):0802008.
张兴强, 鲁健业. 激光等离子体推进机理的初步分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(8):0802008.
- 7 Batani D, Balducci A, Beretta D, *et al.*. Equation of state data for gold in the pressure range <10 TPa [J]. *Phys Rev B*, 2000, 61(5): 9287—9294.
- 8 Koenig M, Faral B, Boudenne J M *et al.*. Relative consistency of equations of state by laser driven shock waves[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(12):2260—2165.
- 9 Koenig M, Faral B, Boudenne J M, *et al.*. Optical smoothing techniques for shock wave generation in laser-produced plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1994, 50(5), R3314—R3317.
- 10 Lower T, Sigel R, Eidmann K, *et al.*. Uniform multimegabar shock waves in solids driven by laser-generated thermal radiation[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 72(20): 3186—3189.
- 11 Fu S Z, Gu Y, Wu J, *et al.*. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO₂ up to 0.4 TPa[J]. *Phys Plasmas*, 1995, 2(9):3461—3465.
- 12 Ramis R, Schmalz R, Meyer T V J, *et al.*. Multi-a computer code for one-dimensional multigroup radiation hydrodynamics[J]. *Phys Commun*, 1988, 49(3):475—505.
- 13 Xu X, Zhang W. Theoretical Introduction of Practical Equation of State [M]. Beijing: Science Press, 1986: 349.
- 14 Zeldovich Y B, Raizer Y P. Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena [M]. New York: Academic Press, 1967.
- 15 Ng A, Parfeniuk D, DaSilva L. Hugoniot measurements for laser-generated shock waves in Aluminum[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, 54(24): 2602—2608.

栏目编辑: 张浩佳