

文章编号: 1001-3806(2010)02-0178-03

激光驱动的1维准等熵压缩数值计算

周素云¹, 袁孝², 程坤²

(1. 江西科技师范学院 通信与电子学院, 南昌 330013; 2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了研究激光辐射驱动平面材料的准等熵压缩过程, 基于激光间接驱动的1维平面应力装载过程和熵增的数学模型, 用拉格朗日法计算了平面材料在1维压缩情况下不同位置的压缩比、应力和熵增随时间的变化过程, 并用已有的实验数据进行计算, 数值计算结果与文献报道的结果符合得很好。结果表明, 粒子速度、材料比热容、Hugoniot参量和 Grüneisen系数是表征1维准等熵压缩的基本参量; 综合运用这些参量可以判断等熵压缩过程。

关键词: 激光物理; 表征方法; 拉格朗日法; 准等熵压缩**中图分类号:** O521 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.010

Numerical simulation for 1-D quasi-isentropic compression irradiated by laser

ZHOU Su-yun¹, YUAN Xiao², CHENG Kun²

(1. Institute of Communication and Electronic, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China;

2. College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the sake of studying isentropic compression of plane material irradiated by laser, based on the model of 1-D stress loading and entropy increase. The evolution of compression ratio, stress and entropy increase of plane material's Lagrangian points were computed with Lagrangian method and the existing experimental data. The simulation results are consistent with reported experimental results and show the basic characterization parameters, such as particle velocity, material specific heat, Hugoniot parameters and Grüneisen coefficient. Quasi-isentropic compression can be judged with these parameters.

Key words: laser physics; characterization method; Lagrangian method; quasi-isentropic compression

引言

材料在冲击压缩后密度只能提高4倍, 而等熵压缩过程密度可以提高到250倍^[1], 因此, 等熵压缩被认为是实现激光核聚变快点火的重要条件。传统的冲击波压缩材料也能达到几个 10^{11} Pa量级的纵向压力, 由于冲击波在材料中产生温度的突变, 会引起样品的融化。在铝样品中 1.4×10^{11} Pa冲击波压力产生的温度在4000K以上, 这样的温度足以融化样品^[2]。等熵压缩过程不仅可以提高压缩倍数, 还可以控制温度的增加, 避免材料的融化。许多技术被发展来探索等熵压缩, 例如电流缓慢上升产生的磁压装载^[3,4], 气枪装置

的飞片撞击方式^[5-6], 高爆炸 (high explosion, HE) 化学能量驱动的压缩^[7-8], 这些实验过程的时间尺度从几百个纳秒到几个微秒。激光驱动的等熵压缩实验 (isentropic compress experiment, ICE) 的装载时间是几十个纳秒, 原则上, 通过对激光的整形可以实现等熵压缩^[9-10]。激光驱动的准等熵压缩的实验研究近几年广泛开展, 美国 Lawrence Livermore 实验室^[11-12] 用激光间接驱动的准等熵压缩在铝样品中产生压力 10^{11} Pa, 温度只有500K, 压缩比大约1.1倍~3倍。美国的 Los Alamos 国家实验室 SWIFT 等人^[13] 用13束180ps的激光束合成在2.5ns内强度逐渐上升的包络场, 峰值强度达到 2×10^{11} W/cm², 用这种整形激光打在不同的平面固体样品上, 压力达到15GPa, 在样品的另一侧用任意反射面的速度干涉仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR) 装置测量自由表面速度, 并从自由面加速度线是否平滑来判断加载过程是否是等熵过程。

数值计算是判断压缩过程是否等熵的重要方法, 不仅可以通过实验数据计算熵增, 还可以通过设计实验来

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助项目 (10676010; 10876011); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2008AA8040209)

作者简介: 周素云 (1971-), 女, 副教授, 主要从事激光等离子体的研究。

E-mail: suyunzhou@yahoo.cn

收稿日期: 2009-03-09; 收到修改稿日期: 2009-04-21

减少熵增,以达到准等熵压缩的目的。DING 等人^[14]用热力学流体方程计算单轴应力装载和不同加载波条件下的材料响应情况,指出材料的等熵响应必须经历非常低的应变率装载路径。原则上,如果材料的等熵线是已知的,就可以通过比较等熵线和测量的 $p-\rho$ 曲线来判断压缩过程是否是等熵过程。但是一般材料的等熵线的测量非常困难,间接表征则更加切实可行。本文中用拉格朗日分析法建立了压缩过程的数值计算模型,计算了压缩过程中压缩比、应力和熵增的动态变化过程,并将计算结果与参考文献[12]中的计算进行对比。结果表明,粒子速度、材料比热容、Hugoniot 参量和 Grüneisen 系数是表征 1 维准等熵压缩的基本参量。

1 数值计算方法

对于激光间接驱动的 1 维平面应力装载过程,可以采用拉格朗日分析法进行计算,计算方程如下^[15]:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_x - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_t = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_x + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x}\right)_t = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)_x + \frac{\sigma}{\rho_0} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_t = 0 \quad (3)$$

式中, ρ_0 是初始密度, u 是粒子速率, v 是比容积或者体积度(等于 ρ^{-1}), σ 是传播方向的应力, t 是时间, X 是拉格朗日位置, E 是内能。如果实验中测出每个拉格朗日点的粒子速率 u , 并考虑:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_t = \frac{du}{dx} - \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_x \frac{\partial t}{\partial x} \quad (4)$$

由(1)式可以数值计算压缩比随时间的变化过程:

$$\frac{v_2}{v_0} - \frac{v_1}{v_0} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{du}{dx}\right)_1 + \left(\frac{du}{dx}\right)_2 \right] \Delta t - \frac{1}{2} (u_2 - u_1) \left[\left(\frac{dt}{dx}\right)_1 + \left(\frac{dt}{dx}\right)_2 \right] \quad (5)$$

式中, $\Delta t = t_2 - t_1$ 是一个时间间隔, v_2/v_0 表示时刻 2 的压缩比, v_1/v_0 表示时刻 1 的压缩比。

应力的计算不能直接积分得出,采用参考文献[16]中的方法,可以得到某个拉格朗日点在一个时间间隔 Δt 的应力关系:

$$\sigma_2 = \sigma_1 + \left(\frac{\rho_0}{t_x}\right) \Delta u + \frac{1}{2} (\sigma_{x2} + \sigma_{x1}) \left(\frac{\Delta t}{t_x}\right) \quad (6)$$

式中,

$$\sigma_{x2} = \left[\sigma_{x1} \left(1 - \frac{\Delta t_x}{2t_x} + \frac{t_{xx}}{2t_x^2} + \frac{\Delta t_{xx} \Delta t}{4t_x^2} - \frac{\Delta t_x^2}{2t_x^2} + \frac{t_{xx} \Delta t \Delta t_x}{2t_x^3} \right) + \sigma_{xx1} \frac{\Delta t}{t_x} + \frac{\rho_0}{t_x} \left(\frac{\Delta u_{xx} \Delta t}{2t_x} + \Delta u_x - \Delta u \frac{t_{xx}}{t_x} \right) \left(1 - \frac{\Delta t_x}{t_x} \right) \right] \times$$

$$\left(1 - \frac{3\Delta t_x}{2t_x} + \frac{3t_{xx} \Delta t}{2t_x^2} - \frac{\Delta t_{xx} \Delta t}{4t_x^2} + \frac{\Delta t_x^2}{2t_x^2} - \frac{t_{xx} \Delta t \Delta t_x}{2t_x^3} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$\sigma_{xx2} = \frac{2}{t_x} (\sigma_{x2} - \sigma_{x1}) \left(\frac{t_x \Delta t_x}{\Delta t} - t_{xx} \right) + \frac{2}{t_x^2} (\sigma_{x2} + \sigma_{x1}) \times \left(2t_{xx} \Delta t_x + t_x \Delta t_{xx} - \frac{2t_x \Delta t_x^2}{\Delta t} \right) + \frac{\rho_0}{t_x} \left(\Delta u_{xx} - \frac{2\Delta u_x \Delta t_x}{\Delta t} + \frac{2\Delta u t_{xx} \Delta t_x}{t_x \Delta t} \right) + \sigma_{xx1} \quad (8)$$

式中,下标 x 表示对 x 的导数,下标 1,2 表示时刻 1 和时刻 2 的数值,其中 $\Delta u = u_2 - u_1$, $t_x = dt/dx$, $t_{xx} = d^2t/dx^2$, $u_x = du/dx$, $u_{xx} = d^2u/dx^2$, $\sigma_x = d\sigma/dx$, $\sigma_{xx} = d^2\sigma/dx^2$, 只要已知时刻 1 的 $\sigma_1, \sigma_{x1}, \sigma_{xx1}$, 就可以算出时刻 2 的应力 σ_2 。根据热力学第一定律 $TdS = dE - \sigma dV$, 当计算的实际情况与等熵状态处于同一比容积时,熵增为^[17]:

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT \quad (9)$$

式中, $T_2 = T_0 \exp(\gamma_0 \eta) + \frac{c_0^2}{c_v} \exp(\gamma_0 \eta) \int_0^\eta \frac{\lambda \eta^2}{(1 - \lambda \eta)^3} \times \exp(-r_0 \eta) d\eta$ ($\eta = 1 - v/v_0$), $T_1 = T_0 \exp(\gamma_0 \eta)$, T_0 为初始温度, c_v 为比定容热容, c_0 和 λ 为 Hugoniot 常数, γ_0 是 Grüneisen 系数。

如果 T_2 与 T_1 较接近,假设 c_v 为常数,对(9)式积分得:

$$\Delta S = c_v \ln(T_2/T_1) \quad (10)$$

2 计算结果及讨论

SMITH 等人^[12]用激光辐照间接驱动压缩波对 3 台阶铝靶面进行压缩,实验采用能量 5.9kJ,脉冲宽度 2ns 的 15 束激光辐照 180 μm 厚的 Br-CH 薄膜靶。激光驱动的冲击波过后,Br-CH 等离子体穿过一个 400 μm 的真空带,作用在 3 台阶 Al 样品上产生一个平滑单调上升的装载,上升时间约为几个纳秒。Al 样品 3 个台阶的厚度分别是 10 μm , 20 μm 和 30 μm 。样品初始密度为 2.7g/cm³,样品最后的温度为 425K。用 VISAR 装置测出的 Al/LiF 样品每个台阶界面速度如图 1 所示。

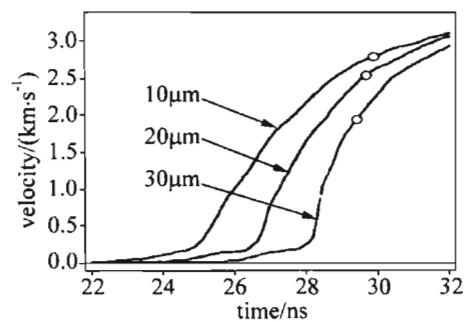


Fig. 1 Evolution of velocity in Al/LiF sample

因为 Al 和 LiF 阻抗匹配较好, Al/LiF 界面速度接近粒子速度,所以,计算中可以把界面速度近似看做粒子速度。把 Al 样品中 3 个台阶位置看做 3 个拉格朗日点,用方程(5)式、(6)式和(9)式分别数值计算比容比、应力和熵随时间变化的动态过程。计算结果反映在图 2、图 3 和图 4 中。图 2 是 3 个拉格朗日点的比容

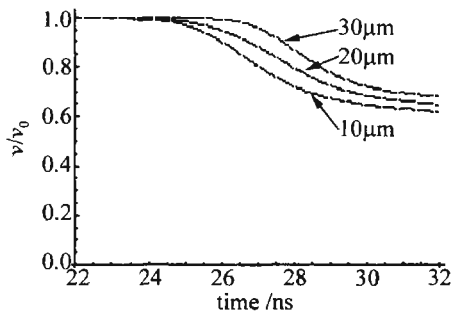


Fig. 2 Evolution of compression ratio v/v_0

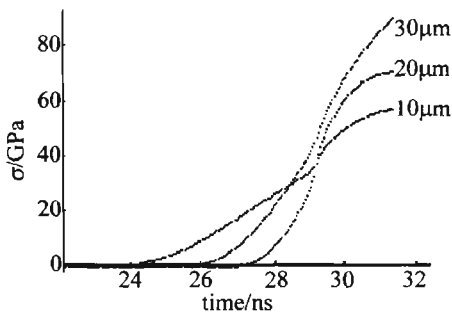


Fig. 3 Evolution of stress with time

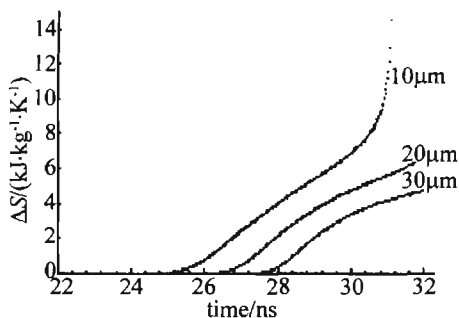


Fig. 4 Evolution of entropy production

压缩比,最大值达到 0.6,对应密度压缩 1.7 倍,这和参考文献[12]中的计算结果一致。在这里把 Al 金属看做弹塑性流体,因为金属在一定温度和压力下会呈现流体特性,流体方程仍然适用。等离子体经过真空带后,在 Al 样品中产生缓慢增加的压缩波,驱动粒子运动,同时压缩样品。图 3 是 3 个台阶上应力的变化过程, $\sigma_1, \sigma_{x1}, \sigma_{xx1}$ 初始值均取为 0,在 32ns 处,最大应力达到 105GPa,基本符合文献中计算得到的最大值 110GPa,这里所用计算方程(6)式中的应力其实是包括了流体压力和应力,一般材料中的应力是张量,这里只考虑单轴应力情况,正是这种 1 维应力驱动粒子运动。图 4 是熵增随时间的变化过程,相关参量取值: $c_0 = 5.355, \lambda = 1.345, \gamma_0 = 2.13, c_v = 24.9 \times 1000/27J/(kg \cdot K)$ 。特别要说明的是,由于温度变化不是特别

大,固体材料的相变没有考虑,材料的比热容在这个过程可以看作为常数。从图 4 可以看出,在 30ns 之前,熵增很缓慢,处于同一数量级,到 30ns 后,熵突然增加很快,这是由于冲击波的形成而造成的,图 1 中所示的圆圈正是表示冲击波开始出现。因为是间接驱动,没有考虑辐射热传导和超热电子预热,仅考虑压缩波引起的熵增,从(9)式可以看出,熵增主要与压缩比 $\eta = 1 - v/v_0$ 有关。

应力随密度的变化过程为^[12]:

$$p = \rho_0 \int_0^u \langle C_L \rangle du, \rho = \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \int_0^u \frac{du}{\langle C_L \rangle} \right)^{-1} \quad (11)$$

式中, $\langle C_L \rangle$ 是拉格朗日声速的平均值。用这种方法计算应力需要计算拉格朗日声速的平均值,而且得不到应力随时间的变化过程。本文中所采用的方法可以直接从粒子速度分布来计算应力的变化。另外,本文中计算熵增的目的在于寻找表征 1 维准等熵过程的参量,(9)式、(10)式表明,这些表征参量除了粒子速度之外,还需要考虑材料的比热容、Hugoniot 常数 c_0, λ , Grüneisen 系数 γ_0 。

3 结 论

(1)对于多台阶样品,采用拉格朗日分析法,用数值计算方法可以准确计算每个拉格朗日点的压缩比、应力、熵增随时间的变化过程。(2)得出表征压缩过程是否准等熵的参量:粒子速度和样品比热容,其中比热容和温度有关,以及材料的 Hugoniot 常数 c_0, λ , Grüneisen 系数 γ_0 。(3)文中计算的比容压缩比和应力变化趋势与 DING 等人^[14]的分析结果也符合得很好,其中熵增过程也表明材料初始的压缩过程是准等熵的,经过一段时间后发展成冲击压缩,这些结果都表明这种方法可以用来表征准等熵压缩。

参 考 文 献

- [1] CHANG T Q, ZHANG J, ZHANG J T, *et al.* Interaction of laser and plasma and nuclear fusion [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1991: 408 (in Chinese).
- [2] CHIJOKE A D, NELLIS W J, SILVERA I F. High-pressure equations of state of Al, Cu, Ta, and W [J]. J A P, 2005, 98(7): 073526/1-073526/8.
- [3] REISMAN D B, TOOR A, CAUBLE R C, *et al.* Magnetically driven isentropic compression experiments on the Z accelerator [J]. J A P, 2001, 89(3): 1625-1633.
- [4] HALL C A, ASAY J R, KNUDSON M D, *et al.* Experimental configuration for isentropic compression of solids using pulsed magnetic loading [J]. Review of Science Instrument, 2001, 72(9): 3587-3595.
- [5] CHHABILDAS L C, BARKER L M. Dynamic quasi-isentropic com-

通过调节棱镜与双 Wollaston 棱镜间的距离可以改变平行光束间的距离,一改过去固定的分束模式,既能获得对称分束光又能获得平行分束光,还节省了材料。通过实验测试和误差分析可以看出,修正后的双 Wollaston 棱镜能够满足较精密的测量需要。

参 考 文 献

- [1] LI J L, WANG Y W, LI Y H. Research on performance of CaCO_3 for light-polarized device [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31(4):413-416 (in Chinese).
- [2] WANG W, WU F Q, SU F F. A modified symmetric splitting angle prism [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(9):913-916 (in Chinese).
- [3] YE K F, LI X P, ZHENG W, *et al.* High-performance polarizing beam prism [J]. Optical Instruments, 2004, 26(2):55-59 (in Chinese).
- [4] JIA P, LI G H, PENG H D. Phenomena of frustrated total internal reflection in polarizing prism [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(8):712-715 (in Chinese).
- [5] ZHENG M M, WU F Q, BI J, *et al.* Design of polarizer which can scaling or blooming the parallel beam splitter's shear difference [J]. Laser Journal, 2007, 28(2):24-25 (in Chinese).
- [6] LI J Zh. Hand book of optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science Technology Press, 1980:258-271 (in Chinese).
- [7] LI G H, WU F Q. Splitting angle' asymmetric of beam splitting prism [J]. Journal of Applied Optics, 1991, 12(4):7-9 (in Chinese).
- [8] ZHANG X, WU F Q, HE J, *et al.* Modified symmetric beam splitting prism [J]. Laser Technology, 2007, 31(6):671-672 (in Chinese).
- [9] LIAO Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003:24-25 (in Chinese).
- [10] SHA D G. Measurement uncertainty and measurement error [J]. Optical Technique, 1995, 11(6):44-48 (in Chinese).
- [11] LORENZ K T, EDWARDS M J, JANKOWSKI A F, *et al.* High pressure, quasi-isentropic compression experiments on the omega laser [J]. High Energy Density Physics, 2006, 2(3/4):113-125.
- [12] SMITH R F, EGGERT J H, JANKOWSKI A, *et al.* Stiff response of aluminum under ultrafast shockless compression to 110GPa [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(6):065701.
- [13] SWIFT D C, JOHNSON R P. Quasi-isentropic compression by ablative laser loading; response of materials to dynamic loading on nano-second time scales [J]. Phys Rev, 2005, E71(6):066401/1-066401/5.
- [14] DING J L, ASAY J R. Material characterization with ramp wave experiments [J]. J A P, 2007, 101(7):073517/1-073517/19.
- [15] LI W X. One-dimensional nonsteady flow and shock waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003:130 (in Chinese).
- [16] SEAMAN L. Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuating waves [J]. J A P, 1974, 45(10):4303-4314.
- [17] HUA J S, JING F Q, GONG Z Zh, *et al.* Study of numerical simulation for quasi-isentropic compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3):195-202 (in Chinese).

(上接第180页)

pression techniques; applications to aluminum and tungsten [R]. Albuquerque, NM USA; Sandia Report, Sandia National Labs, Thermo-mechanical and Physical Div, 1986:1-26.

- [6] ASAY J R. The use of shock-structure methods for evaluating high-pressure material properties [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20(1):27-61.
- [7] BARNES J F, BLEWETT P J, McQUEEN R G, *et al.* Taylor instability in solids [J]. J A P, 1974, 45(2):727.
- [8] TASKER D G, GOFORTH J H, OONA H, *et al.* Advances in isentropic compression experiments (ICE) using high explosive pulsed power [J]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2004, 760:1239-1242.
- [9] YE Y D, LÜ B D, CAI B W. Temporal and spatial pulse shaping of high-power lasers—performance properties of a temporal-spatial pulse shaping system [J]. Laser Technology, 1996, 20(5):276-179 (in Chinese).
- [10] HUANG L, ZHANG Sh J, LI Y T. Design of a laser renovating pulses in time and space field [J]. Laser Technology, 2001, 25(3):206-208 (in Chinese).