

激光驱动气库靶对铝的准等熵压缩实验研究*

单连强 高宇林 辛建婷 王峰 彭晓世 徐涛 周维民 赵宗清 曹磊峰
吴玉迟 朱斌 刘红杰 刘东晓 税敏 何颖玲 詹夏宇 谷渝秋†

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2011年12月12日收到; 2012年2月22日收到修改稿)

利用激光驱动气库材料形成的等离子体射流对材料进行斜波加载, 可以获得高应变率的准等熵压缩. 在神光 III 原型高功率激光装置上开展了激光驱动铝材料的准等熵压缩实验, 成像型速度干涉仪 VISAR 记录到样品自由面连续、光滑的速度历史, 采用反积分法得到 60 GPa 以上的峰值压强, 加载上升沿约 10 ns, 应变率可达 10^8 s^{-1} , 并且观察到了压缩波在样品后表面的反射效应.

关键词: 激光驱动, 准等熵, 气库靶, 反积分

PACS: 52.50.Jm, 52.50.Lp, 42.62.-b, 78.47.dc

1 引言

研究高压下材料的性质是物理学的前沿领域之一. 目前, 静高压最高可以达到 $\sim 550 \text{ GPa}$ ^[1], 更高的压强需要采用动高压技术^[2]. 动高压加载技术包括冲击压缩和准等熵压缩. 冲击压缩可以获得 TPa 以上的压强, 但冲击压缩使材料由初态“跃变”到终态, 不能描写材料连续变化的过程, 而且往往使材料的温升较高. 相比较而言, 等熵压缩能够使样品从初态连续变化到终态, 其应力增量是以当地声速传播的, 这就为研究材料的动态响应提供了一条非常好的“过程”途径, 而且使材料的温升较低. 实际上, 理想的等熵压缩过程是不存在的, 只能做到近似等熵或准等熵. 在 P - V 图上, 准等熵压缩线是介于冲击绝热线和理想等熵绝热线之间的一种过程曲线, 它与理论等熵线愈接近, 它的“准等熵”性就愈好. 准等熵压缩的方法包括阻抗梯度飞片加载^[3-7]、真空腔爆轰加载^[8]、磁压加载^[9]以及近期实现的激光加载^[10]. 激光加载的优点是压强高、应变率高、效率高、样品尺寸小. 这不仅扩展了人们在材料相图中高压、高密、低温区域的研究空间, 而且有助于解决天体物理、材料物

理等领域的很多热点前沿问题. 例如, 铁在 300 GPa 以上是否存在新的相, 液态氢是否存在一阶等离子体相变, 这对于研究地球等行星芯部的状态十分重要^[11,12]; 理论预言的固态氢从绝缘体到金属相的转变是否存在^[13]; 高应变率下固态材料的动力学响应、变形机制等问题^[14,15].

2004 年 Edwards 和 Lorenz 等人在 OMEGA 激光装置上采用激光驱动“有机材料-真空间隙-样品”的靶构型(以下简称“气库靶”)实现对铝材料的准等熵压缩, 峰值压强为 51 GPa^[10]; 2006 年他们采用相同的靶构型, 发现峰值压强随激光功率密度线性增加, 并在铝材料中实现了 200 GPa 的峰值压强^[16]. 2007 年 Smith 等人在 OMEGA 装置上采用激光烧蚀高 Z 金属黑腔产生的 X 射线驱动气库靶, 获得了高平面度的准等熵加载, 并在 110 GPa 压强下研究了铝的动力学响应^[17]; 他们发现在有机材料前加一层铍片会增加烧蚀速率, 明显提高峰值压强, 实现了 210 GPa 的峰值压强^[18], 并提出采用具有密度梯度的有机材料可以延长斜波加载的时间, 有助于提高峰值压强并放宽对样品厚度的限制^[19]. 2009 年 Bradley 等人在 OMEGA 装置上采用时间波形经过整形处理的激光脉冲与黑腔作用产生的 X 射线加载到金刚石样品上, 实

* 国家自然科学基金(批准号: 11175165, 10902101, 10905051)资助的课题.

† E-mail: yqgu@caep.ac.cn

现了峰值压强 1400 GPa 的准等熵压缩, 并发现至少在 800 GPa 压强下金刚石相是稳定的^[20]. 2010 年 Koenig 等^[21] 在 LULI 激光装置上利用整形激光脉冲直接加载到铁材料上, 准等熵压缩的峰值压强可达 250 GPa, 并观察到了铁的弹塑性变化和 α - ϵ 相变. 最近, 美国国家点火装置 (NIF) 报道了利用 176 束、750 kJ, 20 ns 的整形激光驱动金刚石材料, 实现了 5 TPa 的峰值压强^[22]. 此外, 利用激光加载的准等熵压缩方式, 人们还研究了材料在高压高应变率下的 RT 不稳定性^[23-25], 铋的多晶相变^[26], 标准材料的等熵线^[17,27] 等, 金属材料的屈服强度等问题^[28]. 国内在激光驱动准等熵压缩实验方面的报道还很少, 流体物理研究所在 100 J 钜玻璃激光器上进行了铝材料的准等熵压缩实验, 获得了 7 GPa 的峰值压强^[29], 上海神光 II 激光装置上正在开展激光驱动的准等熵实验.

采用激光驱动气库靶实现准等熵压缩最大的优势在于对激光整形能力、脉冲宽度要求低. 而且从国内外来看, 虽然激光驱动气库靶实现准等熵压缩取得了较大的进步, 但是仍需要系统、细致的实验研究. 例如, 整形激光脉冲方式的准等熵压缩已经达到 TPa 以上的压强, 而目前已报道的激光驱动气库靶方式最高压强为 200 GPa 左右, 如何通过优化激光参数和靶参数实现更高的峰值压强; 激光加载和磁压加载给出的材料的准等熵压缩线存在明显偏差^[17], 这与加载速率的关系是什么; 还有对样品温度、密度的原位测量手段的发展和实验精度等问题. 因此, 深入研究激光驱动气库靶构型实现准等熵压缩的实验规律和物理规律是十分重要的. 本文介绍了我们在神光 III 原型激光装置上开展的激光驱动气库靶对铝材料的准等熵压缩实验. 利用反积分方法分析实验测量的样品自由面速度历史, 得到了加载的峰值压强在 60 GPa 以上, 该压强是目前国内报道的采用激光加载手段实现准等熵压缩的最高压强, 显示了激光驱动准等熵压缩的巨大潜力; 还获得了铝样品中准等熵压缩波的剖面图, 并细致的分析了压缩波在样品中传播以及在后界面反射的物理过程.

2 基本原理与实验排布

激光驱动气库靶实现准等熵压缩的基本过程如下: 利用脉宽几 ns 的高功率激光脉冲烧蚀低 Z 有机气库材料并在其中驱动强冲击波, 冲击波在材料后表面卸载后使有机材料形成向外绝热膨胀的

等离子体, 等离子体穿过一定长度的真空间隙形成空间尺度拉长、密度分布前低后高的等离子体射流, 其在样品表面不断堆积将自身动能转化成压缩势能, 从而实现对样品的斜波准等熵加载^[10]. 这种气库靶构型可以实现十几 ns 甚至更长时间的加载过程, 而且不要求激光脉冲具有时间波形整形能力.

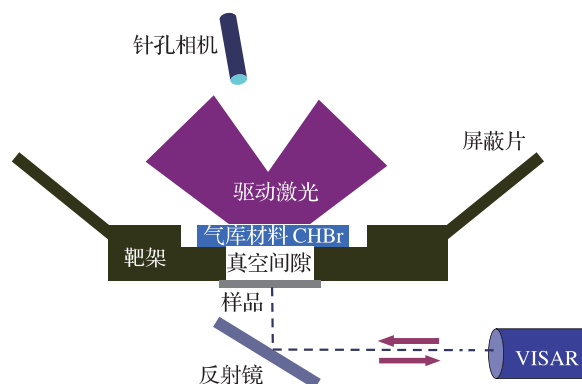


图 1 实验排布示意图

实验在神光 III 原型激光装置上进行, 实验排布剖面示意图见图 1. 利用两束三倍频波长 351 nm, 脉宽 3 ns 平顶脉冲激光作为加载激光, 激光打到气库材料上的焦斑直径为 2 mm, 功率密度 $\sim 10^{13}$ W/cm². 利用连续相位板 (CPP) 对激光束进行空间整形匀滑. 两束激光都以 45° 斜入射到气库材料上, 气库材料选用密度 1.236 g/cm³ 的溴化聚苯乙烯 (CHBr), 厚度为 197 μ m, 真空间隙为 400 μ m, 铝样品厚度为 34.5 μ m. 样品自由面速度采用成像型速度干涉仪 VISAR 记录^[30], 探测光经过铝平面镜反射到样品自由面, VISAR 监测的横向空间尺寸约为 500 μ m, 速度分辨率为 2.4 km/s/fringe. X 射线针孔相机位于靶的斜上方, 用来监测激光与气库靶前表面作用发射 X 射线的空间分布情况, 针孔相机前放置 40 μ m 铍用来过滤杂散光, 同时还起到阻挡低能 X 射线防止 CCD 计数饱和的作用. 实验采用三倍频激光打靶, 但实际上基频、二倍频光也同时存在. 而且焦斑相对三倍频光更大, 我们在铜靶架上粘贴一定尺寸的铜屏蔽片来屏蔽基频和二倍频光.

3 实验结果

选取激光总能量为 1.7 kJ, 平均激光强度约为 1.84×10^{13} W/cm² 的发次进行分析. 其针孔相机图像如图 2(a) 所示, 可见 X 光发射区的空间对称性较好, 图 2(b) 给出了图 2(a) 中沿虚线区域的强度分

布,可见在实际 VISAR 监测的范围内(中心位置附近 $500\ \mu\text{m}$) X 射线发射强度不均匀性小于 10%. 这些都定性说明,经 CPP 匀滑后激光强度的空间均匀性较好.

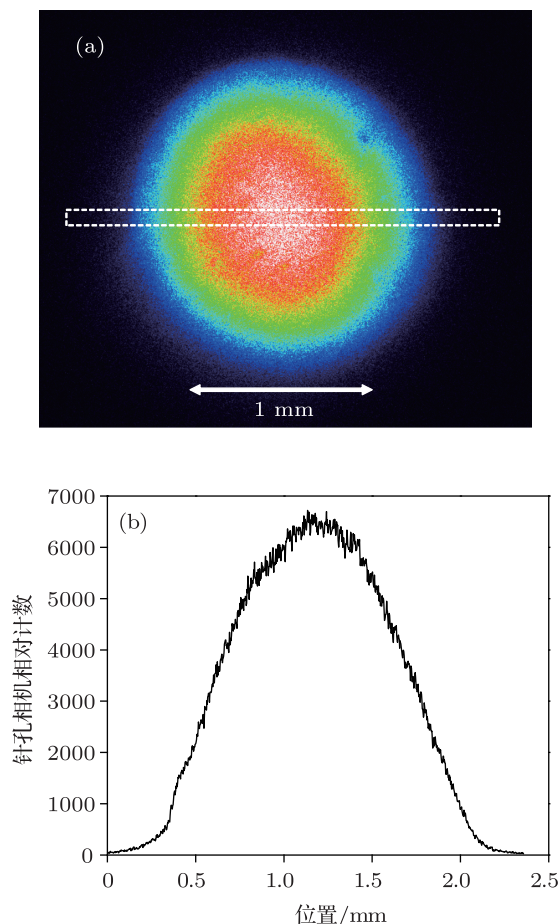


图 2 X 射线针孔相机的实验结果 (a) 二维图像; (b) 沿 (a) 图中虚线区域的相对计数分布

铝样品后界面为自由面,其速度历史由成像型速度干涉仪 VISAR 测量,图 3(a) 给出了与图 2 同一发次的 VISAR 条纹图像,横轴为时间轴,探针光的时间窗口为 $15\ \text{ns}$,纵轴是空间尺寸.条纹光滑、连续变化定性说明压缩状态是准等熵压缩.图 3(b) 给出了与条纹变化对应的速度历史,激光脉冲与 CHBr 开始作用的时刻定为时间零点. $28\ \text{ns}$ 之前样品自由面保持静止,条纹是平直的静态条纹; $28\ \text{ns}$ 之后压缩波到达自由面,自由面开始加速,当速度达到 $3\ \text{km/s}$ 左右,开始出现一个缓慢上升的台阶区; $36\ \text{ns}$ 左右自由面速度又开始快速提高,在探针光的时间窗口内达到的最高速度约 $7\ \text{km/s}$. Edwards 等人采用密度较低的泡沫 ($0.1\ \text{g/cm}^3$) 作为气库材料也发现了自由面速度历史有台阶的特点,并认为这主要是由于压缩波在样品中来回反射的结

果^[10];同时他们也发现采用密度相对较高的溴化聚苯乙烯作为气库材料(密度 $1.23\ \text{g/cm}^3$),会减缓对样品 ($24\ \mu\text{m}$ 铝) 的斜波加载,速度台阶消失,另外样品后面加窗口材料也会抑制速度台阶的出现. DeMange 等人发现采用聚酰亚胺作为气库材料(密度 $1.60\ \text{g/cm}^3$),相同的加载条件下,薄样品 ($20\ \mu\text{m}$ 铝) 没有观察到速度台阶,而厚样品 ($60\ \mu\text{m}$ 铝) 则明显观察到自由面速度多台阶特点^[28]. 所以是否出现速度台阶和加载快慢、样品厚度、是否加窗口材料等多种因素有关,我们本次实验虽然也采用了与 Edwards 实验类似的气库材料,但是由于我们的斜波加载更陡而且样品厚度相对较厚 ($34.5\ \mu\text{m}$ 铝),所以也观察到了明显速度台阶特点.

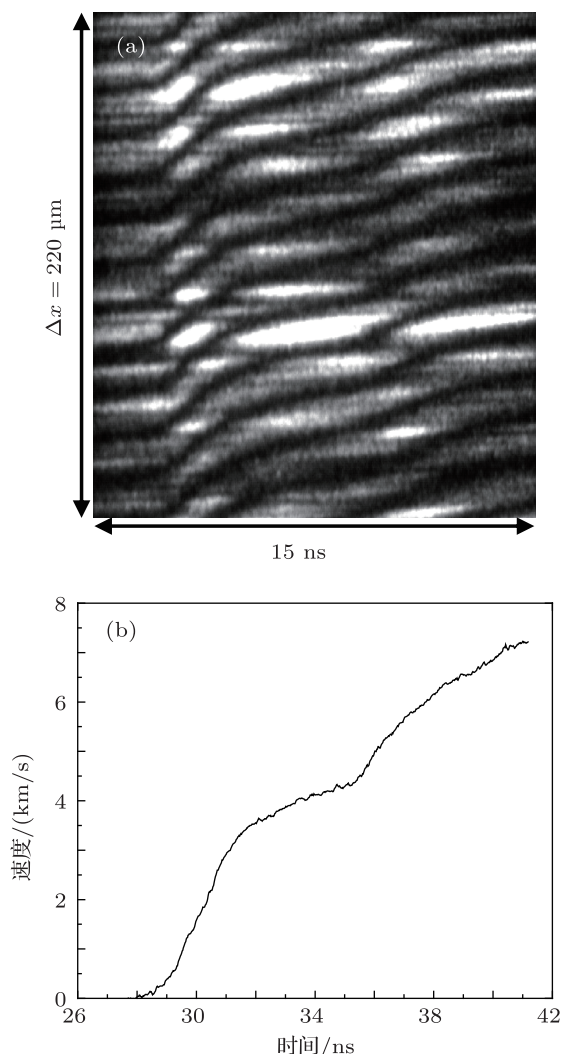


图 3 VISAR 实验结果 (a) 自由面 VISAR 条纹图; (b) 从 (a) 图提取的速度历史

4 分析与讨论

如果样品是单层,一般采用所谓“反积分”

法^[31]从样品后界面的速度历史推断样品内部的加载历史,这种方法需要事先假设状态方程^[10,16,23].在拉格朗日表达下,平面一维等熵运动中介质的质量、动量和能量守恒方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma}{\partial h} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial h}, \\ \rho_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\sigma \frac{\partial u}{\partial h}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $h, t, \sigma, u, \varepsilon, E$ 分别为拉格朗日坐标、时间、应力、粒子速度、体应变和比内能. 体应变 $\varepsilon = 1 - v/v_0$; $v = 1/\rho, v, \rho$ 分别为比体积和密度. 将方程组 (1) 中的第三式能量方程替换为材料的本构关系 $\varepsilon = F(\sigma)$, 在不考虑弹塑性效应时,

差分格式的反积分方程组为:

$$\begin{cases} p(h - \Delta h, t) = p(h, t) + \rho_0 [u(h, t + \Delta t) \\ - u(h, t - \Delta t)] \Delta h / (2\Delta t), \\ u(h - \Delta h, t) = u(h, t) + [\eta(h, t + \Delta t) \\ - \eta(h, t - \Delta t)] \Delta h / (2\Delta t), \\ \varepsilon(h - \Delta h, t) = F[p(h - \Delta h, t)]. \end{cases} \quad (2)$$

我们采用 Sesame 库表 3700 中铝的状态方程作为本构方程^[17,32] (见图 4(c) 实线). 假设样品自由面的压强始终为零, 以图 3(b) 给出的速度历史作为输入条件, 利用方程 (2) 可以计算得到样品内不同位置的压强、密度、粒子速度等物理量. 处理时需注意, 压缩波从样品加载面传播到自由面需要一定的时间, 所以利用方程 (2) 计算样品中不同位置的物理量, 对时间积分的区间是不相同的^[33,34].

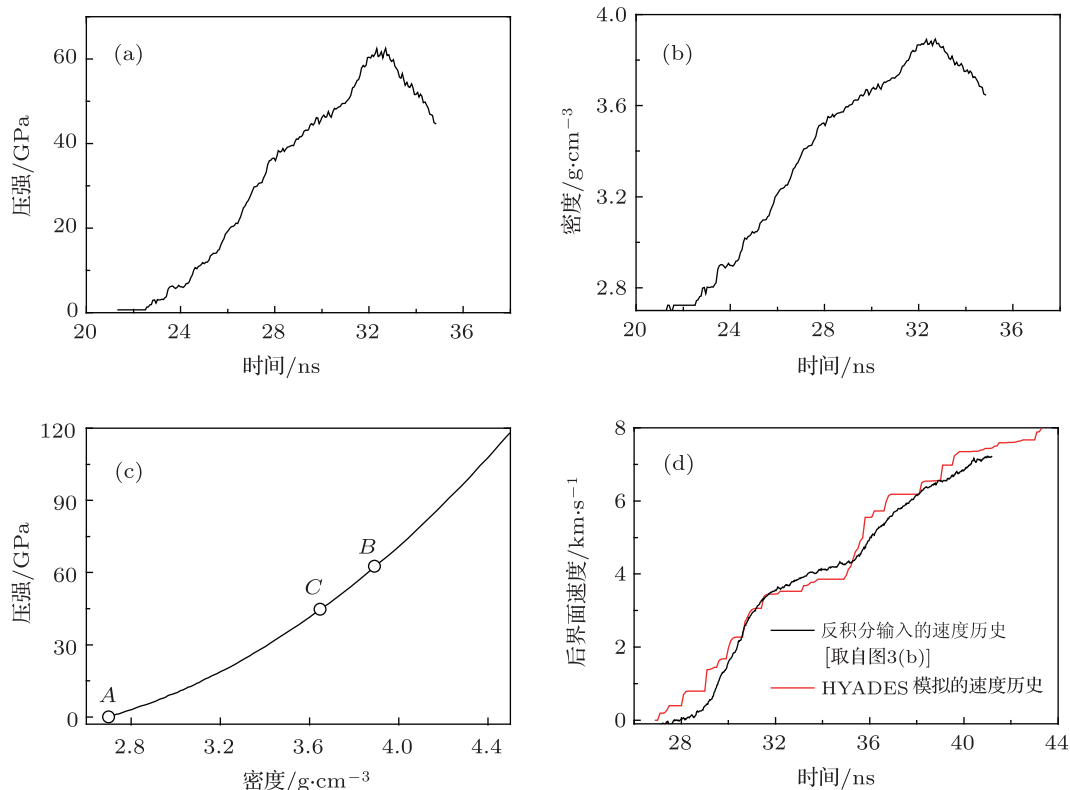


图 4 反积分结果 (a) 加载面压强随时间的关系; (b) 加载面密度随时间的关系; (c) Sesame 库表 3700 铝的理论等熵线 (实线) 和铝样品加载面压强: A (初态), B (峰值), C (实验观测末态); (d) HYADES 模拟的后界面速度历史 (红色细线) 和反积分输入的速度历史 (黑色粗线)

图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了样品前表面 (加载面) 的压强和密度随时间的变化关系, 峰值位置出现在 32.5 ns, 压强和密度峰值分别约为 62.5 GPa 和 3.9 g/cm^3 . 由图 4(a) 可见, 压强的上升沿约 10 ns, 也就是说从气库材料等离子体射流到达样品表面到其对样品施加最大压强的时间间隔约 10 ns. 该

数值明显大于驱动激光的脉宽 (3 ns 平顶脉冲), 这就说明了采用激光驱动气库靶构型不仅实现了对样品的斜波加载, 而且延长了加载时间; 尤其在激光脉冲宽度短、整形能力差的情况下, 这种加载方式是获得材料准等熵压缩的重要手段. 目前, 国外采用激光直接驱动气库靶加载铝材料, 获得的准

等熵压缩最高压强约 200 GPa, 压强上升沿约 4—5 ns^[16], 与我们的实验条件相比, 其采用了更高的激光功率密度 ($7.88 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$) 和更短的真空间隙 (300 μm), 这两方面因素都会提高加载的峰值压强并缩短加载上升前沿^[35].

从图 4(b) 可以得到最大压缩率 $\rho_{\text{max}}/\rho_0 \approx 1.44$ 和最大应变率 $1/3(\partial \ln \rho / \partial t)$. 为了避免局部波动的影响, 首先对图 4(b) 中的曲线进行分段多项式拟合, 再利用拟合曲线计算出最大应变率约为 $7.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$. 目前我们在实验中采用的是单一厚度的样品, 还不能像其它台阶靶样品实验可以从实验上给出准等熵压缩线^[17,20], 所以压强和密度随着时间是沿着理论等熵线变化的. 如图 4(c) 所示, 实线给出了 Sesame 库理论等熵线, 反积分得到的铝样品加载面压强和密度值从初态 (A 点) 沿着等熵线上升到峰值压强 (B 点); 随后压强开始下降, 从 B 点降到 C 点.

反积分法的输入量是后界面的速度历史, 输出量是前表面的压强历史, 这种由后到前的过程即为“反积分”. 为了验证反积分过程的可靠性, 我们将反积分法得到的压强历史 (图 4(a)) 作为输入量作用在铝样品的前表面上, 利用一维流体程序 HYADES^[36] 正向模拟铝的准等熵压缩过程. 如图 4(d) 所示, HYADES 模拟得到的后界面速度历史 (红细线) 与反积分法输入的后界面速度历史 (黑粗线) 的整体变化趋势是一致的, 这定性说明了反积分法的有效性. 两个速度历史的局部差异主要是反积分采用的态方程与 HYADES 采用的态方程不

一致引起的.

为了更细致的观察样品中压强的变化, 研究波系反射效应, 图 5 给出了压强在时空平面的等高线分布图, 等高线的压强值在图上方标出, 横轴的距离代表拉格朗日坐标系中的距离. 如图 5 可见, 加载面位置的峰值压强最大, 越靠近样品后界面, 压强值越小. 30 ns 以前等压线的方向说明压缩波从样品加载面向样品后界面传播; 30 ns 左右等压线开始向样品内部弯曲, 这说明压缩波到达后界面并在后界面反射形成稀疏波, 稀疏波开始向靶内传播; 稀疏波在向样品内传播过程中与后面的压缩波作用, 叠加后的压缩波又向后界面传播, 导致压强等高线再次向后界面弯曲; 二次压缩波在 36 ns 左右到达后界面并再次反射. 图 5 右侧曲线给出了样品自由面的加速度历史, 即将图 3(b) 的自由面速度历史对时间求导. 压缩波在后界面反射的时刻与自由面加速度峰值位置对应的时刻是一致的. 从公式 (1) 中第一个式子可以看出, 界面加速度最大的时刻对应压强梯度最大的时刻或者受力最大的时刻, 从图 5 可以看出后界面压强梯度最大的时刻基本上就是压缩波反射的时刻. 压缩波在后界面反射形成稀疏波, 稀疏波向样品内部传播的过程导致自由面处的压强梯度减小, 即后界面受力减小, 因此自由面的膨胀加速度减小, 这就是图 3(b) 中出现速度平台区的原因. 另外, 压缩波两次到达后界面的时间间隔约为 6 ns, 这与激光强度、脉冲宽度、样品厚度等因素有关.

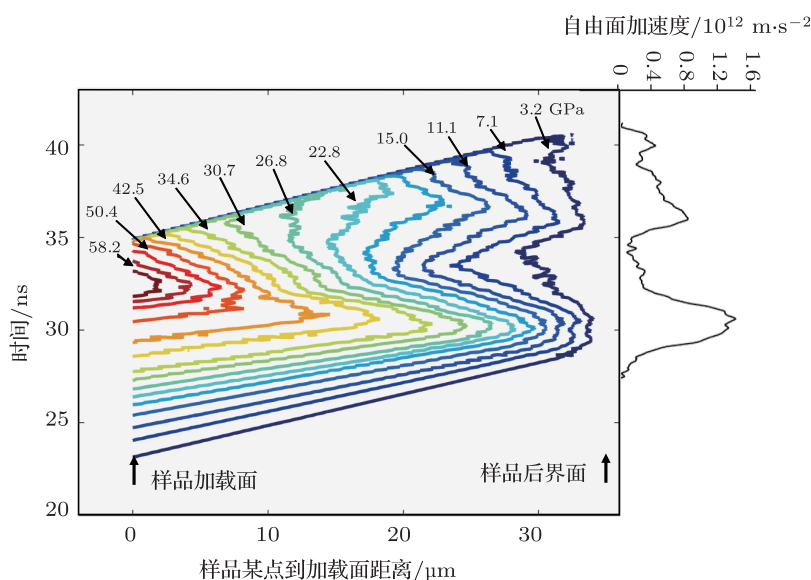


图 5 压强时空分布等高线与样品自由面加速度历史

铝作为高压物理中常用的标准材料,其状态方程、相变等一直是人们关注的热点问题^[37-42]. 静高压 X 射线衍射实验已经证实铝材料从面心立方晶格结构 (fcc) 到六角密堆积结构 (hcp) 的相变发生在 $217 \pm 10 \text{ GPa}$ ^[40], 这正是目前激光驱动气库靶获得的铝材料准等熵压缩的最高压强范围. 目前我们在神光 III 原型达到的峰值压强约 60 GPa , 通过优化设计气库靶结构、提高激光功率密度等手段可以实现 200 GPa 以上的压强. 这将为在动高压准等熵加载条件下研究铝、铁等金属材料的相变问题提供一条重要途径; 通过控制靶参数和激光参数还可以实现不同应变率的压缩过程, 从而可以研究不同应变率下材料的强度等性质.

5 结论

在神光 III 原型高功率激光装置上开展了激光驱动气库靶的铝材料准等熵压缩实验研究. 利用波

长 351 nm , 强度 $1.84 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, 3 ns 平顶激光驱动 CHBr 气库材料形成等离子体射流, 射流经过一定长度的真空间隙进而对铝样品进行斜波加载实现准等熵压缩. 实验采用成像型速度干涉仪 VISAR 记录样品自由面的速度历史, 光滑连续的 VISAR 条纹说明压缩过程为准等熵压缩, 在 15 ns 的探针光时间窗口内得到的最高速度约为 7 km/s , 采用理论等熵线, 利用反积分法得到 60 GPa 以上的峰值压强, 加载上升沿约 10 ns , 应变率接近 10^8 s^{-1} , 压缩率约为 1.44 . 自由面速度出现一个缓慢上升的平台, 这是由于压缩波在样品后表面反射形成的稀疏波向样品内部传播导致的. 这些实验结果的取得为进一步获得更高峰值压强的准等熵压缩, 研究高压、高应变率条件下材料的性质提供了一条很有前景的途径.

本实验得到了神光 III 原型激光装置运行人员以及靶制备部门同事的大力支持, 在此表示衷心的感谢.

- [1] Xu J A, Mao H K, Bell P M 1986 *Science* **232** 1404
- [2] Jing F Q, Chen J X 2006 *Dynamic High-Pressure Generation Principle and Related Technologies* (Beijing: National Defence Industry Press) p31 (in Chinese) [经福谦, 陈俊祥 2006 动高压原理与技术 (北京: 国防工业出版社) 第 31 页]
- [3] Nguyen J H, Orlikowski D, Streitz F H, Moriarty J A, Holmes N C 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 023508
- [4] Jarmakani H, McNaney J M, Kad B, Orlikowski D, Nguyen J H, Meyers M A 2007 *Mater. Sci. Eng. A* **463** 249
- [5] Mashimo T, Ozaki S, Nagayama K 1984 *Rev. Sci. Instrum.* **55** 226
- [6] Huang H J, Shen Q, Luo G Q, Zhang L M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1538 (in Chinese) [黄海军, 沈强, 罗国强, 张联盟 2007 物理学报 **56** 1538]
- [7] Shen Q, Wang C B, Zhang L M, Hua J S, Tan H, Jing F Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1759 (in Chinese) [沈强, 王传彬, 张联盟, 华劲松, 谭华, 经福谦 2002 物理学报 **51** 1759]
- [8] Barnes J F, Blewett P J, McQueen R G, Meyer K A, Venable D 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 727
- [9] Reisman D B, Toor A, Cauble R C, Hall C A, Asay J R, Knudson M D, Furnish M D 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1625
- [10] Edwards J, Lorenz K T, Remington B A, Pollaine S, Colvin J, Braun D, Lasinski B F, Reisman D, McNaney J M, Greenough J A, Wallace R, Louis H, Kalantar D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 075002
- [11] Guillot T 1999 *Science* **286** 72
- [12] Laio A, Bernard S, Chiarotti G L, Scandolo S, Tosatti E 2000 *Science* **287** 1027
- [13] Wigner E, Huntington H B 1935 *J. Chem. Phys.* **3** 764
- [14] O'Keefe J D, Ahrens T J 1993 *J. Geophys. Res.* **17** 011
- [15] Regazzoni G, Kocks U F, Follansbee P S 1987 *Acta Metall.* **35** 2865
- [16] Lorenz K T, Edwards M J, Jankowski A F, Pollaine S M, Smith R F, Remington B A 2006 *High Energ. Dens. Phys.* **2** 113
- [17] Smith R F, Eggert J H, Jankowski A, Celliers P M, Edwards M J, Gupta Y M, Asay J R, Collins G W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 065701
- [18] Smith R F, Pollaine S M, Moon S J, Lorenz K T, Celliers P M, Eggert J H, Park H-S, Collins G W 2007 *Phys. Plasmas* **14** 057105
- [19] Smith R, Lorenz K, Ho D, Remington B, Hamza A, Rogers J, Pollaine S, Jeon S, Nam Y S, Kilkenny J 2007 *Astrophys. Space Sci.* **307** 269
- [20] Bradley D K, Eggert J H, Smith R F, Prisbrey S T, Hicks D G, Braun D G, Biener J, Hamza A V, Rudd R E, Collins G W 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 075503
- [21] Koenig M, Benuzzi-Mounaix A, Brambrink E, Nourou A, Ravasio A, Wei H G, Vinci T, Mazevet S, Occelli F, Morard G, Guyot F, De Resseguier T, Lescoute E 2010 *High Energ. Dens. Phys.* **6** 210
- [22] Smith R 2011 *Bulletin of the American Physical Society, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Salt Lake City, Utah, November 14-18, 2011* Volume 56, Number 16
- [23] Lorenz K T, Edwards M J, Glendinning S G, Jankowski A F, McNaney J, Pollaine S M, Remington B A 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056309
- [24] Park H-S, Lorenz K T, Cavallo R M, Pollaine S M, Prisbrey S T, Rudd R E, Becker R C, Bernier J V, Remington B A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 135504
- [25] Park H, Remington B A, Becker R C, Bernier J V, Cavallo R M, Lorenz K T, Pollaine S M, Prisbrey S T, Rudd R E, Barton N R 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056314
- [26] Smith R F, Eggert J H, Saculla M D, Jankowski A F, Bastea M, Hicks D G, Collins G W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 065701
- [27] Miyanishi K, Ozaki N, Brambrink E, Wei H G, Benuzzi-Mounaix

- A, Ravasio A, Diziere A, Vinci T, Koenig M, Kodama R 2010 *J. Phys. Conf. Ser.* **215** 012199
- [28] DeMange P, Colvin J D, Park H S, Pollaine S M 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 083543
- [29] Li M, Zhao X J, Zhang H P, Yuan H, Zhao J H, Sun C W 2010 *Acta Armamentarii* **31** 1084 (in Chinese) [李牧, 赵祥杰, 张红平, 袁红, 赵剑衡, 孙承伟 2010 兵工学报 **31** 1084]
- [30] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Li Y S, Jiang X H, Ding Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025202 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 刘慎业, 李永升, 蒋小华, 丁永坤 2011 物理学报 **60** 025202]
- [31] Hayes D 2001 *Sandia Report* No. SND2001-1440
- [32] Kerley G I 1987 *Int. J. Impact Eng.* **5** 441
- [33] Wang G H, Bai J S, Sun C W, Mo J J, Wang G J, Zhao J H, Tan F L, Hu X J 2008 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **22** 149 (in Chinese) [王刚华, 柏劲松, 孙承伟, 莫建军, 王桂吉, 赵剑衡, 谭福利, 胡熙静 2008 高压物理学报 **22** 149]
- [34] Zhang H P, Sun C W, Li M, Zhao J H 2011 *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **43** 105 (in Chinese) [张红平, 孙承伟, 李牧, 赵剑衡 2011 力学学报 **43** 105]
- [35] Li M, Zhang H P, Sun C W, Zhao J H, Yuan H 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 093525
- [36] Larsen J T, Lane S M 1994 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **51** 179
- [37] Moriarty J A, McMahan A K 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 809
- [38] Lam P K, Cohen M L 1983 *Phys. Rev. B* **27** 5986
- [39] Boettger J C, Trickey S B 1996 *Phys. Rev. B* **53** 3007
- [40] Akahama Y, Nishimura M, Kinoshita K, Kawamura H 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 045505
- [41] Pickard C J, Needs R J 2010 *Nat. Mater.* **9** 624
- [42] Vailionis A, Gamaly E G, Mizeikis V, Yang W, Rode A V, Juodkazis S 2011 *Nat. Commun.* **2** 445

Laser-driven reservoir target for quasi-isentropic compression in aluminum*

Shan Lian-Qiang Gao Yu-Lin Xin Jian-Ting Wang Feng Peng Xiao-Shi
 Xu Tao Zhou Wei-Min Zhao Zong-Qing Cao Lei-Feng Wu Yu-Chi
 Zhu Bin Liu Hong-Jie Liu Dong-Xiao Shui Min He Ying-Ling
 Zhan Xia-Yu Gu Yu-Qiu[†]

(Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 12 December 2011; revised manuscript received 22 February 2012)

Abstract

The quasi-isentropic compression of material with high strain rate can be obtained by the ramp wave loading of plasma jet produced by laser-driven reservoir target. The quasi-isentropic compression experiments of aluminum are carried out on the high power laser facility of SG-III prototype. The smooth and continuous speed history of free surface of specimen is recorded with a line-imaging velocity interferometer (VISAR). The peak pressure (> 60 GPa), the rise time of the load (~ 10 ns) and the strain ($\sim 10^8$ s $^{-1}$) are derived by the back-integrating method, and the reverberation of compression wave at the rear surface of the sample is observed.

Keywords: laser-driven, quasi-isentropic, reservoir target, back-integrating

PACS: 52.50.Jm, 52.50.Lp, 42.62.-b, 78.47.dc

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11175165, 10902101, 10905051).

[†] E-mail: yqgu@caep.ac.cn