

“聚龙一号”装置磁驱动准等熵压缩实验的一维磁流体力学模拟

张扬 薛创 丁宁 刘海风 宋海峰 张朝辉 王贵林 孙顺凯 宁成 戴自换 束小建

One-dimensional magneto-hydrodynamic simulation of the magnetic drive isentropic compression experiments on primary test stand

Zhang Yang Xue Chuang Ding Ning Liu Hai-Feng Song Hai-Feng Zhang Zhao-Hui Wang Gui-Lin Sun Shun-Kai Ning Cheng Dai Zi-Huan Shu Xiao-Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 030702 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171920

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171920>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

六面顶压机立方压腔内压强的定量测量及受力分析

Force analysis and pressure quantitative measurement for the high pressure cubic cell

物理学报.2017, 66(9): 090702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.090702>

高压下有机-无机杂化钙钛矿 $\text{H}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的结构及光学性质研究

High-pressure structural and optical properties of organic-inorganic hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

物理学报.2017, 66(3): 030701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.030701>

合成腔体尺寸对 Ib 型六面体金刚石单晶生长的影响

Effects of cavity size on the growth of hexahedral type-Ib gem-diamond single crystals

物理学报.2016, 65(7): 070705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070705>

B_2O_3 添加宝石级金刚石单晶的生长特性

Syntheses of B_2O_3 -doped gem-diamond single crystals

物理学报.2016, 65(5): 050701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.050701>

InSe 的高压电输运性质研究

Electrical transport properties of InSe under high pressure

物理学报.2013, 62(14): 140702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.140702>

“聚龙一号”装置磁驱动准等熵压缩实验的一维磁流体力学模拟*

张杨^{1)†} 薛创¹⁾ 丁宁¹⁾ 刘海风¹⁾ 宋海峰¹⁾ 张朝辉²⁾
王贵林²⁾ 孙顺凯¹⁾ 宁成¹⁾ 戴自换¹⁾ 束小建¹⁾

1) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

2) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2017年8月29日收到; 2017年10月20日收到修改稿)

国内首台多路并联超高功率脉冲装置“聚龙一号”(PTS)已被用于磁驱动准等熵实验研究,其分时分组放电特点为开展材料的动高压可控路径加载研究提供了便利.磁驱动准等熵实验的物理设计和结果分析需要依赖可靠的数值模拟平台.本文介绍了含强度计算的一维磁流体力学程序MADE1D的物理模型和程序特点,讨论了“聚龙一号”装置两种不同电流波形驱动条件下准等熵实验的模拟情况.结果显示,MADE1D程序能够较好地反映电磁力引起的压缩波在样品内部的产生、传播及发展过程,计算获得的“样品/窗口”界面速度同实验测量结果符合较好.分析发现,电流波形是影响加载过程的重要因素.对于目前使用的带状电极,电流上升率不宜超过40 kA/ns,否则可能在厚度1.2 mm以上的铝样品中产生冲击.

关键词: 准等熵压缩实验, “聚龙一号”装置, 磁流体力学模拟, MADE1D

PACS: 07.35.+k, 62.50.-p, 84.70.+p, 91.60.Gf

DOI: 10.7498/aps.67.20171920

1 引言

动高压加载下的材料动力学响应、高压相变和物态方程是目前高能量密度物理研究关注的前沿问题,其中高压高应变率加载手段和实验方法是这方面研究的重点和难点.相比冲击加载,等熵压缩是一个压力缓慢上升的过程,压缩过程中材料的温升较小,能够有效地解决冲击加载难以避免的伴随热软化问题,最大程度分离压力与温度对材料动力学特性的影响,为深化偏离雨贡纽状态的认识、校验和完善物态方程建模提供了依据^[1].

由于样品加载时必然伴随塑性变形、黏性流动等不可逆耗散过程,严格意义上的等熵压缩无法实现.当整个过程中耗散生成的热量比压缩能量小得多,且可忽略样品与外界的热交换时,称之为准

等熵过程^[2].几十年来,人们发展了包括斜波发生器^[3]、多层飞片^[4]、梯度飞片^[5]以及激光驱动^[6]等多种加载方式,设法在获得高压压缩度的同时控制熵的增加,实现准等熵压缩.

磁驱动准等熵压缩技术是近十年发展起来的一种新型实验技术,为研究动高压及高应变率加载条件下材料动力学特性和物态方程提供了新的手段^[7,8].此类实验通过精确控制脉冲功率驱动器的运行状态,产生满足物理研究需要的驱动电流波形,使加载过程远离冲击曲线,在使样品达到高压状态的同时保持较低的熵增.与冲击实验不同,此类实验确定的材料等熵线是一条过程线,原则上可以通过一次实验获得自最高压力至初态范围内的等熵压缩数据.此外,每次实验可以获得多个不同厚度样品的诊断数据,显著提高了实验效率和效费比,避免了多次实验之间的随机误差,实验数据更

* 国家自然科学基金(批准号: 11405012, 11675025, 91330107)和中国工程物理研究院院长基金(批准号: 2014-1-042)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhang_yang@iapcm.ac.cn

丰富, 可靠性更高^[7].

磁驱动准等熵实验技术的发展经历了两次重要突破. 2005年, 圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratory)的Davis等^[8]利用基于多路汇流技术的Z装置(Z machine), 通过精确调节电流波形, 合理优化加载波形, 显著推迟了压缩波锐化形成冲击的过程, 将样品最大厚度由0.8 mm提高至1.8 mm, 获得了超过240 GPa的6061-T6铝准等熵实验数据, 展示了电流波形调节与控制技术的重要意义. 另一方面, 电极结构的改变进一步提高了磁场压力, 扩大了样品的参数范围. 2009年, Seidel等^[9]详细讨论了利用带状电极开展磁驱动实验的技术可行性, 优化了加载的一致性和均匀性. 相较于以往同轴电极, 带状电极的电流密度更高、压力更强, 制备安装工艺也更为简单. Knudson^[10]利用带状电极获得了钽材料超过400 GPa的准等熵压缩参考线. 到目前为止, Z装置开展了数百发磁驱动准等熵压缩和超高速飞片实验, 其中包括电极材料(铝^[7,11]、铜^[12])和重金属材料(铅^[13]、钽^[14]、钼^[14])的高压物态方程研究, 铁^[15]、锡^[16]材料的相变和损伤特性研究, 未反应炸药^[17]的材料特性研究等. 利用准等熵压缩技术可以使样品获得高速的同时保持较低的温升, 形成超高速宏观固体飞片. 2011年, Lemke等^[18]报道的Z装置超高速飞片发射实验中, 1 mm厚铝飞片(长25 mm, 宽13 mm)最大飞行速度超过45 km/s, 对石英样品和蓝宝石样品的冲击压力分别达到1.6 TPa和2 TPa.

磁驱动准等熵压缩实验的物理设计和结果分析需要借助置信度高且功能完备的数值模拟平台. 通过十余年的发展, 圣地亚国家实验室形成了一套成熟的实验设计和优化方法: 首先, 通过三维电磁场模拟程序优化靶室结构, 提高加载过程的平面性和一致性; 然后, 使用一维磁流体力学(magneto-hydrodynamics, MHD)程序在较大参数范围内针对驱动板、样品以及窗口材料的加载动力学过程进行模拟, 确定样品的厚度和加载波形; 利用二维MHD程序获得相应的电流波形; 最后, 根据驱动器特点建立完善的电路模型, 论证实现上述电流波形的技术可行性, 并给出具体的驱动器参数^[10]. 作为其中的重要一环, 多维度多介质电阻磁流体力学程序——ALEGRA^[19]同时承担着最为关键的一维和二维模拟任务. 该程序基于任意拉格朗日欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian)方法,

磁流体方程包含强度计算, 导电材料的完全物态方程可以涵盖宽泛的温度、密度、压力范围. 早期的ALEGRA程序使用Lee-More-Desjarlais电阻率、热导率模型, 后利用量子分子动力学模型对熔点附近的数据进行了优化, 使计算结果更为合理. 实验设计过程中, ALEGRA程序与DAKOTA优化模块^[20], BERTHA驱动器电路程序^[21]耦合模拟, 获得优化可行的驱动器、负载设计参数.

2000年以来, 我国在磁驱动准等熵压缩技术领域开展了积极的探索和研究, 先后建成了可用于此类实验的CQ-1.5 (1.5 MA, 50 GPa)^[22,23]和CQ-4 (4 MA, 100 GPa)紧凑型脉冲功率装置, 具备了实现110 GPa的准等熵压缩和15 km/s的宏观金属飞片发射能力^[24]. 2013年建成并投入使用的“聚龙一号”(PTS)装置是我国首台多路并联超高功率脉冲装置, 峰值电流10 MA, 上升时间100—600 ns^[25]. 负载电流6 MA时的磁场强度约为400—600 T, 磁压力峰值接近140 GPa. “聚龙一号”装置独特的分时分组放电技术使其具有较为灵活的电流波形调节能力, 有利于实现加载路径的多样化和可控化. 目前, 该装置已用于磁驱动准等熵压缩实验, 为深入开展动高压加载条件下的材料动力学研究、积累偏离雨贡纽状态的认识提供了新的实验技术手段^[26].

本文介绍了用于模拟“聚龙一号”磁驱动准等熵压缩过程的一维含强度电阻MHD程序——MADE1D. 该程序基于拉格朗日网格, 采用宽区状态方程和电阻率、热导率模型, 能够对包含电极、样品、氟化锂(LiF)窗口在内的多介质负载的一维压缩过程进行模拟. 第二节介绍了磁驱动准等熵压缩实验的基本原理; 第三节给出了MADE1D程序的物理模型, 包括控制方程、参数模型以及边界条件等; 第四节围绕“聚龙一号”装置的早期实验结果, 较为详细地讨论了不同驱动电流波形条件下压缩波的产生和发展过程以及铝样品参数的变化.

2 基本原理

图1给出了“聚龙一号”装置磁驱动准等熵压缩实验的靶室照片以及负载结构示意图. 负载由两块内表面平行且相互靠近的带状金属电极板组成, 电极的一端由铜短路帽连接, 另一端同加速器

的阴、阳极相连形成回路. 当电流通过时, 极板间隙感应的磁场以磁压的形式压缩极板, 形成由内向外传播的压缩波.

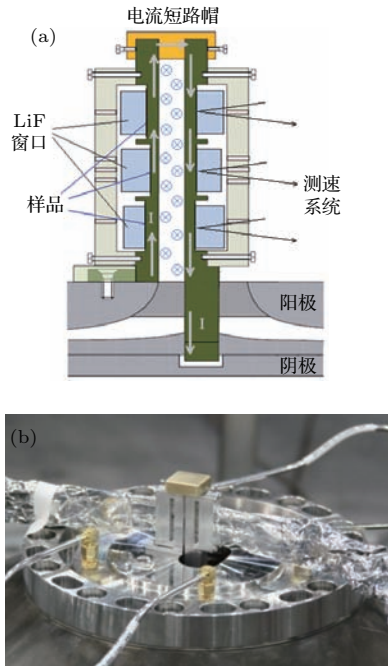


图1 “聚龙一号”装置磁驱动准等熵压缩实验的(a)电极结构示意图和(b)负载区照片

Fig. 1. (a) Electrode configuration and (b) load photo of an isentropic compression experiment on the Julong-1 facility.

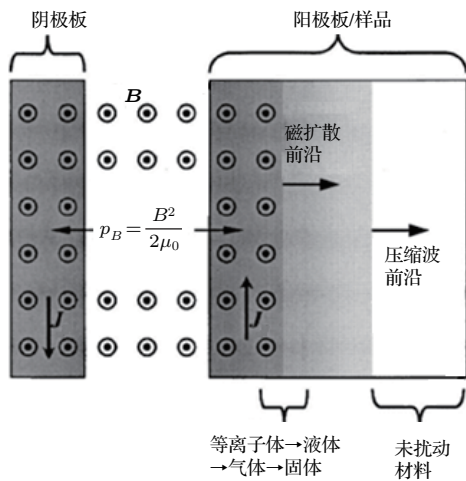


图2 磁驱动准等熵压缩过程中电流、磁场、压缩波影响区域的空间分布示意图 (J, B, p_B 分别表示电流, 磁场和磁压)

Fig. 2. Distribution of current, magnetic field, compression wave in the electrode and sample of an isentropic compression experiment. B, J, p_B are magnetic field, current density and magnetic pressure, respectively.

对于大多数极板和样品材料而言, 压缩波的传播速度大于磁扩散速度. 电流沿电极内表面有限深

度流过负载, 通过焦耳加热使材料熔化、气化、甚至形成等离子体. 在电流趋肤层以外, 磁场为零, 材料仅受到应力的作用, 以固态和液态为主. 图2给出了磁驱动准等熵压缩过程中电流、磁场、压缩波影响区域的空间分布示意图. 需要注意的是, 磁驱动准等熵压缩是一个连续的过程, 随着电流的升高, 压力不断上升且加载波前沿越来越陡, 在传播足够的距离后会形成冲击, 破坏加载过程的准等熵性. 因此, 在进行准等熵实验设计时, 要通过加载波形和样品厚度两方面设计尽量避免冲击的产生.

通过比较分析不同厚度样品自由面(或“样品/窗口”界面)的速度历史, 可以获得材料物态方程的准等熵压缩参考线. 磁驱动准等熵压缩实验的数据处理方法包括自由面速度近似和非简单波分析法. 此外, 美国圣地亚国家实验室和洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory) 的学者在处理此类实验数据时, 倾向采用反积分法以获得更高的精度 [2,27,28].

3 物理建模

设电流沿 z 方向流经负载, 并在极板间产生 y 方向感应磁场, 驱动物质沿 x 方向运动. 微分形式的一维平面 MHD 方程组包括质量、动量、能量守恒方程以及磁扩散方程:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{B^2}{2\mu} + p - s \right), \quad (2)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = (-p + s) \frac{\partial u}{\partial x} + \eta J^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\eta}{\mu} \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (uB), \quad (4)$$

式中, ρ, e, T, p, s, u 分别为密度、比内能、温度、静水压以及 x 方向的偏应力和速度; η 和 κ 为电阻率和热导率; J, B 为轴向电流密度和角向磁感应强度, 且 $\mu J = \partial B / \partial x$. 偏应力 s 同应变率 $\partial u / \partial x$ 的关系为

$$\frac{d}{dt} s = 2G \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (5)$$

式中 G 为剪切模量, 它与屈服强度 Y 一起反映了材料属性对加载、卸载过程的影响. 采用 Steinberg-

Guinan 本构模型 [29] 的剪切模量和屈服强度:

$$G = G_0 \left[1 + \frac{G'_P}{G_0} p \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/3} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right], \quad (6)$$

$$Y = \min[Y_0(1 + \beta \varepsilon^P)^n, Y_{\max}] \times \left[1 + \frac{G'_P}{G_0} p \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/3} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right], \quad (7)$$

其中, ε^P 为等效塑性应变, $G_0, G'_P, G'_T, Y_0, Y_{\max}, \beta, n$ 为与材料有关的常数, 均来自文献 [29]. 对于铝材料: $G_0 = 27.6 \text{ GPa}$, $G'_P/G_0 = 65.0 \text{ TPa}^{-1}$, $G'_T/G_0 = -0.62 \text{ kK}^{-1}$, $Y_0 = 0.29 \text{ GPa}$, $Y_{\max} = 0.68 \text{ GPa}$, $\beta = 125$, $n = 0.10$. 上述本构关系仅对固体有效, 当温度 $T > T_{\text{melt}}$ 时 $G = Y = 0$. 熔化温度 T_{melt} 采用 Lindemann 判据 [30].

除方程 (1)–(5) 以及安培定律外, 还利用状态方程提供的 $p(\rho, e)$ 和 $T(\rho, e)$ 关系使方程组封闭. MADE1D 主要采用 Liu 等 [31] 研制的宽区状态方程 WEOS, 同时利用 Kemp 和 Meyer-ter-Vehn [32] 发展的 MPQeos 做补充. 多数情况下, 两种状态方程获得的结果相互符合较好. 本文计算使用了 WEOS 提供的铝材料状态方程. 电阻率是影响磁场空间分布的重要参数, 对计算结果的可靠性具有重要的意义. 电阻率和热传导系数都与电子的输运过程有关, Lee 和 More [33] 建立了一套比较完整的电子输运参数模型, 模型中电阻率和热传导系数不仅同材料原子参数及热力学状态有关, 还强烈依赖

于所处环境的磁感应强度. 本文基于“Lee-More”模型建立了相应的程序模块, 用于计算材料的电阻率和热传导系数. 图 3 给出了计算获得的铝材料电阻率随温度、密度的变化关系, 同文献 [33] 给出的结果符合较好.

作为计算的输入条件, 负载电流波形可由实验测量直接获得. 此外, 我们还编写了可用于模拟“聚龙一号”装置电磁脉冲产生、压缩、输运过程的全电路模拟程序, 用于实验前电流波形的设计和驱动器参数的设置. 如图 4 所示, 该装置由 24 路结构和工作原理相同的模块并联组成. 每一路由 Marx 发生器、中储电容、激光触发气体开关、脉冲形成线、水开关、三板线和预脉冲开关等部件组成. 全电路模型将 Marx 发生器、开关元件以及负载作为集中参数处理. 而传输线组件, 如中储电容、脉冲形成线和三板线等, 采用分布参数模型描述. 关于全电路程序的详细介绍请参见文献 [34].

Lemke 等 [18] 指出, 当极板间隙远 g 小于宽度 w 且移动距离可忽略时, 磁场大小 $B = f \mu_0 I / (g + w)$, 其中, I 为随时间变化的负载电流, f 是考虑到电流空间分布而引入的唯象因子. 通常情况下 $f < 1$, 当电流全部由极板内表面流过时取 $f = 1$. 针对本文采用的两种负载, 利用似稳态分析方法 [35] 对电流、磁场、磁压在负载区域的空间分布进行了模拟, 通过电磁场计算得到了相应的有效因子数值: 1# 窄带电极宽 9 mm, 间隙 1.2 mm, $f = 0.84$; 2# 电极宽 17.5 mm, 间隙 1.5 mm, $f = 0.89$.

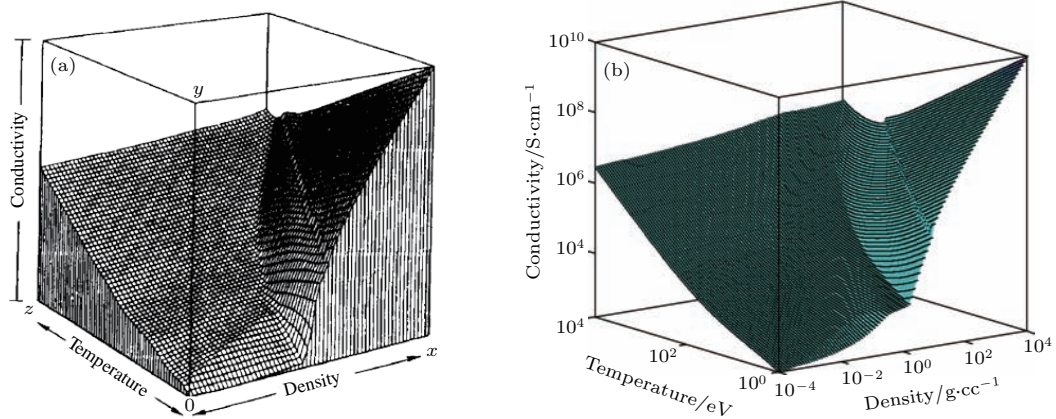


图 3 Lee-More 模型铝材料电阻率随温度、密度的变化关系 (a) 文献 [33] 发表结果; (b) 本文计算结果
Fig. 3. Calculated electric resistivity of aluminium based on the Lee-More model: (a) Result published on Ref. [33]; (b) result of this work.

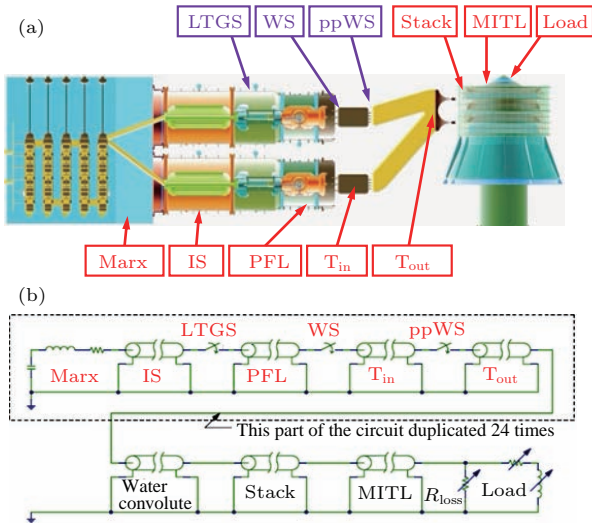


图4 (a)“聚龙一号”装置结构示意图(Marx, IS, PFL, T_{in} , T_{out} , Stack, MITL, Load 分别表示麦克斯发生器、中储电容、脉冲形成线、三板线入口、三板线出口, 绝缘堆, 磁绝缘传输线和负载; LTGS, WS, ppWS 分别为激光触发电体开关、水开关和预脉冲开关); (b) 驱动器模拟程序等效电路结构图, 虚线内部分为汇流前的单独一路结构, 实际模型中共有结构相同的24路

Fig. 4. (a) Configuration of the Julong-1 facility (Marx, IS, PFL, T_{in} , T_{out} represent the Marx generator, intermediate storage, pulse formation line, input end of the triple line and output end of the triple line, respectively. LTGS, WS, PPWS are laser triggered gas switch, water switch and pre-pulse water switch respectively); (b) configuration of the electro-circuit model.

4 实验结果模拟分析

实验和理论研究结果表明^[8], 电流波形是影响压缩过程的主要因素. 为了掌握“聚龙一号”装置的技术特点和驱动能力, 在早期研究中设计了两种电流波形, 如图5所示. 其中, 电流 I_1 波形平滑, 有利于形成相对均匀的压缩波和较高品质的准等熵加载过程, 上升率约为14.3 kA/ns. 相对而言, 电流 I_2 的上升过程可以分为前后两个阶段: 在前200 ns内(a段), 电流增长率较低, 约10 kA/ns, 加载压力上升缓慢; 随后增长率显著提高至40 kA/ns(b段). 人为设计的电流“拐点”, 可作为加载过程中的指示标记, 有利于加深物理过程的理解以及程序的校验.

图6(a)给出了电流 I_1 驱动条件下, 1#电极上厚度分别为995和1255 μm 的铝样品速度曲线, 其中模拟和实验结果符合较好. 平滑的电流使样品界面速度在约280 ns的时间范围内平缓上升至

3.4 km/s. 图6(c)—(d)给出了不同时刻物理量的空间分布. 其中, 图6(c)对应压缩波到达“样品/窗口”界面的时刻, 即速度测量曲线的起点时刻. 此时磁场趋肤深度约200 μm , 远小于样品厚度. 趋肤层内电阻加热导致的烧蚀作用明显, 样品温度显著升高且密度降低. 趋肤深度以外的加载过程可以视为纯粹的流体动力学行为. 该区域样品密度和压力平缓变化, 最大热压约为15 GPa, 压缩引起的温升很低, 样品温度不超过400 K. 图6(d)对应速度峰值时刻附近, 最大压力约87 GPa出现在 $x = 0.12 \text{ cm}$ 位置, 密度4.2 g/cm^3 , 压缩比1.55. 压缩引起的温升较上一时刻更为明显, 最高温度约660 K. 样品加载过程中的密度、压力变化曲线如图6(b)所示.

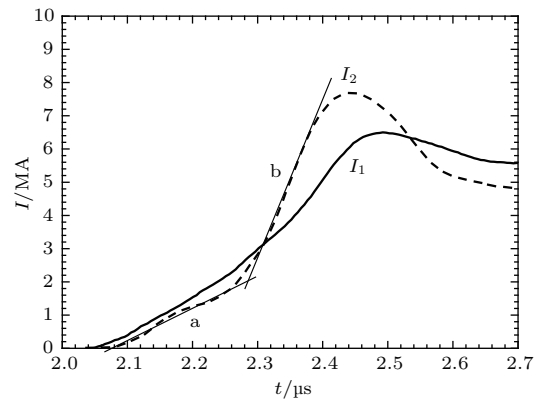


图5 “聚龙一号”磁驱动准等熵实验实测电流(B-dot探针测点位置距离负载6 cm), 其中, 电流 I_1 平滑上升, 上升率约14.3 kA/ns; 电流 I_2 具有两段式结构, a段增长率较低约10 kA/ns, b段增长率较高约40 kA/ns

I_2 的波形较 I_1 更复杂, 不同电流上升率引起的加载过程和速度曲线具有各自明显的特征. 图7(a)给出了 I_2 驱动下, 2#电极上厚度分别为813, 1045和1248 μm 铝样品的速度曲线. 对比发现, 速度模拟结果同实验值大体符合较好, 但速度峰值附近二者差别相对明显. 特别是厚度最大的1248 μm 样品, 2.5—2.54 μs 之间的速度模拟结果明显低于实验值, 其原因目前尚不明确, 仍有待从物理建模和实验诊断两方面深入分析和讨论. 同电流波形类似, 图7给出的速度曲线也呈现出明显的两段式特征. 电流上升率在2.28 μs 时发生变化, 由a段过渡到b段. 对于813 μm 样品, 此时压缩波头恰位于

“样品/窗口”界面位置, 样品内部变化完全来自一段电流加载作用的结果(见图 7(b)). 密度、压力平滑上升, 除内表面电流通过位置焦耳加热引起的温升外, 样品温度无明显变化, 表现出典型的斜波加载特征. 2.41 μs 时, 电流“b”段加载完成, “a”段引起的压缩波离开铝样品, 进入氟化锂窗口. 此时样品的密度和压力快速上升, 样品温度在压缩波作用下由 300 K 上升至 540 K. 2.46 μs 时, 电流由峰值开始下降, 样品内部最大压力超过 55 GPa. 由于铝

的声速随密度增大而升高, 压缩波在样品内部传播过程中会不断锐化, 表现为压力、密度、速度梯度的显著增加. 相同驱动条件下, 厚度越大的样品, 速度上升越快, 曲线斜率越大. 如图 7(a) 所示, 对于 1248 μm 的样品, “b”段电流对应的速度曲线已表现出较为明显的冲击特征. 该现象同实验设计时的理论预期符合很好, 反映了实验意图, 为检验物理认识提供了支持.

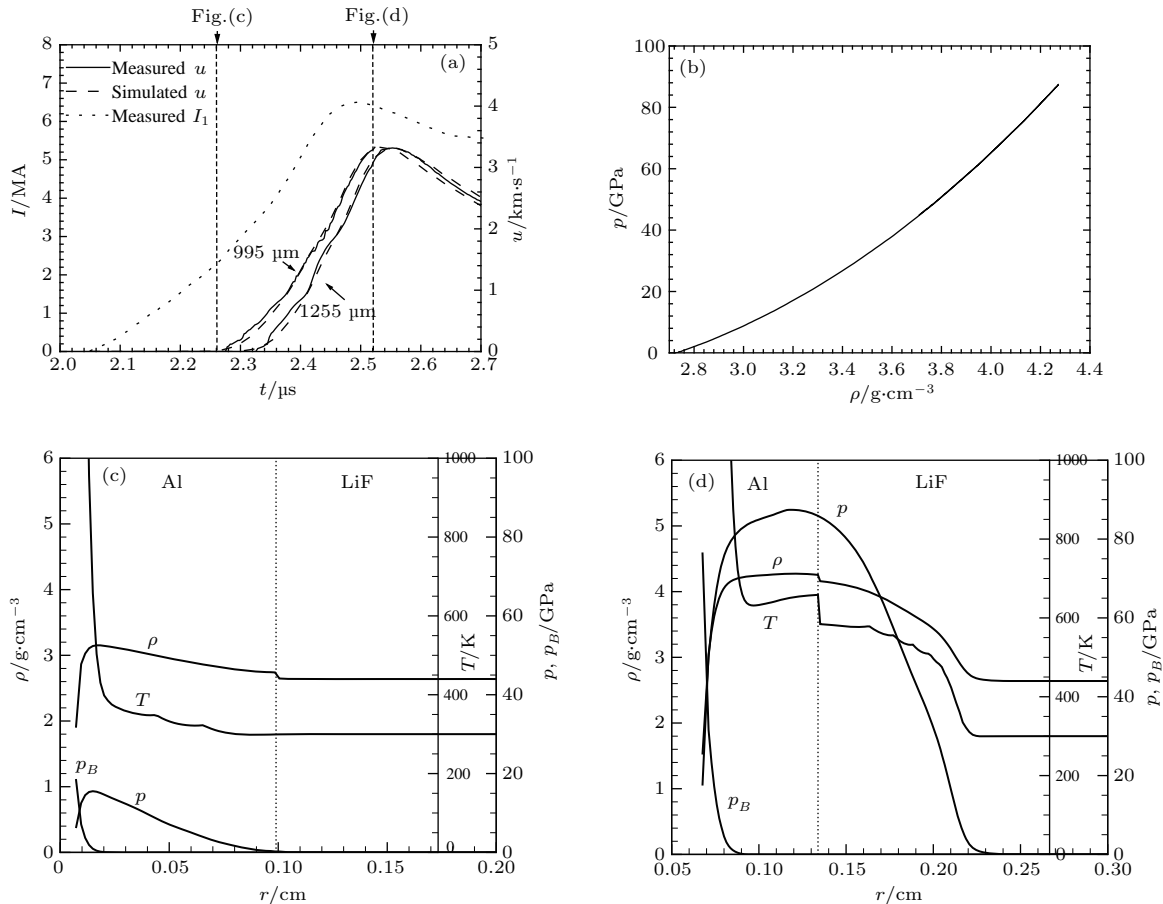


图 6 (a) 电流 I_1 驱动下, 计算和测量获得的厚度分别为 995 和 1255 μm 铝样品速度随时间的变化; (b) 压缩过程材料压力 p 随密度 ρ 的变化; (c) 2.26 μs 时, 995 μm 样品中计算获得的压力 p 、密度 ρ 、温度 T 以及磁压力 p_B 的空间分布; (d) 2.52 μs 时上述参数的空间分布

Fig. 6. (a) Using I_1 , measured and simulated time-dependent velocity for sample 995 and 1255 μm ; (b) the change of pressure p with density ρ during the compression; (c) 2.26 μs , calculated distribution of pressure p , density ρ , temperature T and magnetic pressure p_B in the 995 μm sample; (d) distribution of the above-mentioned parameters at 2.52 μs .

5 结 论

围绕“聚龙一号”磁驱动准等熵压缩实验的技术特点, 发展了同驱动器电路模块耦合的含强度计算的一维MHD程序——MADE1D. 计算结果显示, 该程序能够较好地反映电磁力引起的加载波在

样品内部的产生和传播过程, 模拟获得的“样品/窗口”界面速度同实验测量结果符合较好.

计算结果展示了不同电流波形对加载过程的影响. 对于本文采用的铝带状电极和上升率小于 15 kA/ns 的驱动电流, 样品压力上升平缓且温升不明显, 加载过程明显偏离雨贡纽曲线. 电流上升率超过 40 kA/ns 时, 加载过程引起较强烈的温升, 且

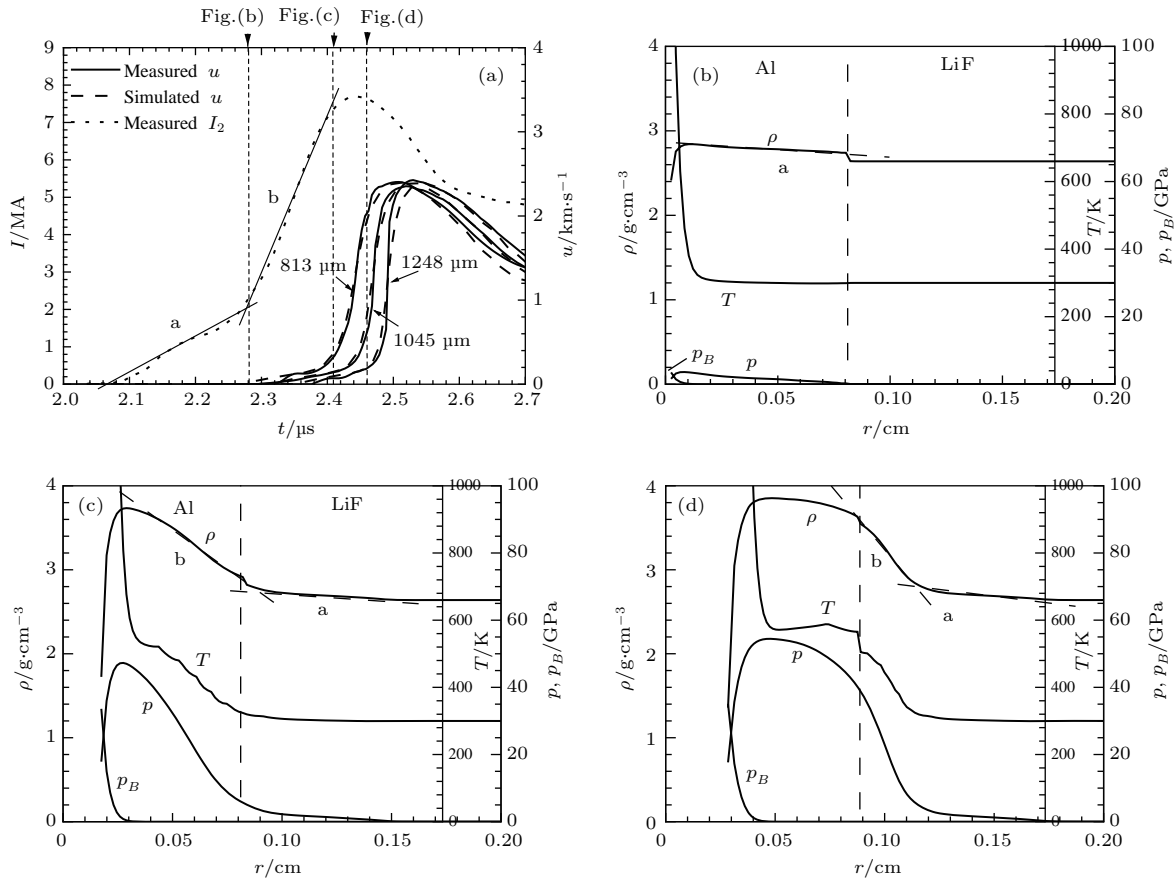


图7 (a) 电流 I_2 驱动下, 计算和测量获得的厚度分别为 813, 1045 和 1248 μm 铝样品速度随时间的变化; (b) 2.28 μs 时, 813 μm 样品中计算获得的压力 p 、密度 ρ 、温度 T 以及磁压力 p_B 的空间分布; (c) 2.41 μs 时, 上述参数空间分布; (d) 2.46 μs 时上述参数的空间分布

Fig. 7. (a) Using I_2 , measured and simulated time-dependent velocity for sample 813, 1045 s and 1248 μm ; (b) 2.28 μs , calculated distribution of pressure p , density ρ , temperature T and magnetic pressure p_B in the 813 μm sample; panels (c) and (d) show the distribution of the above-mentioned parameters at 2.41 μs and 2.46 μs , respectively.

随着压缩波的不断锐化, 在厚度超过 1.2 mm 的铝样品内形成冲击. 尽管实验中采用的两段式电流不是实现准等熵压缩的优化驱动条件, 但其加载结果充分展示了“聚龙一号”这类多路汇流时分组放电装置在电流波形调节方面具有的灵活性和可控性. 这些模拟和实验结果为进一步深入研究“聚龙一号”装置的驱动能力、掌握磁驱动准等熵实验的物理设计方法提供了有益的参考.

本工作得到北京应用物理与计算数学研究所沈智军研究员、张弓木副研究员、王帅副研究员的支持和帮助, 本文所采用的实验数据由中国工程物理研究院流体物理研究所磁驱动准等熵实验团队提供, 在此表示感谢.

参考文献

[1] Hua J S, Jing F Q, Gong Z Z, Tan H, Xu N X, Dong Y B, Chen D Q 2000 *Chin. J. High Pressure Phys.* **14** 195

(in Chinese) [华劲松, 经福谦, 龚自正, 谭华, 徐南仙, 董玉斌, 陈栋泉 2000 高压物理学报 **14** 195]

[2] Sun C W 2005 *Detonation Wave and Shock Wave* **2** 84 (in Chinese) [孙承伟 2005 爆轰波与冲击波 **2** 84]

[3] Barker L M, Hollenbach R E 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4208

[4] Ding F, Huang S H, Jing F Q, Dong Y B, Li Z R 1990 *Chin. J. High Pressure Phys.* **4** 150 (in Chinese) [丁峰, 黄士辉, 经福谦, 董玉斌, 李泽仁 1990 高压物理学报 **4** 150]

[5] 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]

[6] Shan L Q, Gao Y L, Xin J T, Wang F, Peng X S, Xu T, Zhou W M, Zhao Z Q, Cao L F, Wu Y C, Zhu B, Liu H J, Liu D X, Shui M, He Y L, Zhan X Y, Gu Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 135204 (in Chinese) [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 2012 物理学报 **61** 135204]

- [7] Hayes D B, Hall C A, Asay J R, Knudson M D 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5520
- [8] Davis J, Deeney C, Knudson M D, Lemke R W, Pointon T D, Bliss D E 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056310
- [9] Seidel D B, Langston W L, Coats R S, Knudson M D, Lemke R W, Davis J, Pointon T D 2009 *Proceeding of 17th IEEE International Pulsed Power Conference Washington, DC, USA, June 28–July 2, 2009* 1165
- [10] Knudson M D 2012 *AIP Conf. Proc.* **1426** 35
- [11] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, Stygar W A, Spielman R B, Pointon T D, Reisman D B, Toor A, Cauble R C 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 3587
- [12] Hall C A 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2069
- [13] Rothman S D, Parker K W, Davis J, Palmer J, Maw J 2004 *AIP Conf. Proc.* **706** 1235
- [14] Reisman D B, Torr A, Cauble R C 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1625
- [15] Asay J R, Hall C A, Holland K G 2000 *AIP Conf. Proc.* **505** 1151
- [16] Davis J, Hayes D B, Asay J R, Watts P W, Flores P A, Reisman D B 2002 *AIP Conf. Proc.* **620** 221
- [17] Reisman D B, Forbes J W, Tarver C M, Garcia F, Cauble R C, Hall C A, Asay J R 2002 *AIP Conf. Proc.* **620** 849
- [18] Lemke R W, Knudson M D, Davis J 2011 *Int. J. Impact Eng.* **38** 480
- [19] Robinson A C, Brunner T A, Carrol S 2008 *Proc. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, USA Janary 7–10, 2008* AIAA-2008-1235
- [20] Waanders B G B, Eldred M S, Giunta A A, Reese G M, Bhardwaj M K, Fulcher C W 2001 *Proc. 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference Seattle, USA April 16–19, 2001* AIAA-2001-1625
- [21] Struve K W 2008 *Proc. 2008 IEEE Int. Power Modulators and High Voltage Conference Las Vegas, USA, May 27–31, 2008* 94
- [22] Wang G J, Tan F L, Sun C W, Zhao J H, Wang G H, Mo J J, Zhang N, Wang X S, Wu G, Han M 2009 *Chin. J. High Pressure Phys.* **4** 266 (in Chinese) [王桂吉, 谭福利, 孙承纬, 赵剑衡, 王刚华, 莫建军, 张宁, 汪小松, 吴刚, 韩梅 2009 高压物理学报 **4** 266]
- [23] Cai J T, Wang G J, Zhao J H, Mo J J, Weng J D, Wu G, Zhao F 2010 *Chin. J. High Pressure Phys.* **6** 455 (in Chinese) [蔡进涛, 王桂吉, 赵剑衡, 莫建军, 翁继东, 吴刚, 赵峰 2010 高压物理学报 **6** 455]
- [24] Wang G J, Zhao J H, Sun C W, Liu C L, Tan F L, Luo B Q, Zhong T, Cai J T, Zhang X P, Chen X M, Wu G, Shui R J, Xu C, Ma X, Deng S Y, Tao Y H 2015 *J. Exp. Mech.* **30** 252 (in Chinese) [王桂吉, 赵剑衡, 孙承纬, 刘仓理, 谭福利, 罗斌强, 种涛, 蔡进涛, 张旭平, 陈学秒, 吴刚, 税荣杰, 胥超, 马骁, 邓顺义, 陶彦辉 2015 力学实验 **30** 252]
- [25] Deng J J, Xie W P, Feng S P, Wang M, Li H T, Song S Y, Xia M H, He A, Tian Q, Gu Y C, Guang Y C, Wei B, Zou W K, Huang X B, Wang L J, Zhang Z H, He Y, Yang L B 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** 2580
- [26] Wang G L, Guo S, Shen Z W, Zhang Z H, Liu C L, Li J, Zhang Z W, Jia Y S, Zhao X M, Chen H, Feng S P, Ji C, Xia M H, Wei B, Tian Q, Li Y, Ding Y, Guo F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 196201 (in Chinese) [王贵林, 郭帅, 沈兆武, 张朝辉, 刘仓理, 李军, 章征伟, 贾月松, 赵小明, 陈宏, 丰树平, 计策, 夏明鹤, 卫兵, 田青, 李勇, 丁瑜, 郭帆 2014 物理学报 **63** 196201]
- [27] Hayes D, Vorthman J, Fritz J 2001 *Las Alamos National Laboratory Report No. LA-13830-MS*
- [28] Hayes D 2001 *Sandia National Laboratory Report No. SAND 2001-1440*
- [29] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498
- [30] Lindemann F A 1911 *Physics Z* **11** 609
- [31] Liu H F, Song H F, Zhang Q L, Zhang G M, Zhao Y H 2016 *Matter and Radiation at Extremes* **1** 123
- [32] Kemp A J, Meyer-ter-Vehn J 1999 *MPQeos A New Equation of State Code for Hot, Dense Matter* (short documentation, version 20)
- [33] Lee Y T, More R M 1984 *Phys. Fluids* **27** 1273
- [34] Xue C, Ding N, Zhang Y, Xiao D L, Sun S K, Ning C, Shu X J 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 015014 (in Chinese) [薛创, 丁宁, 张扬, 肖德龙, 孙顺凯, 宁成, 束小建 2016 强激光与粒子束 **28** 015014]
- [35] Xue C, Ning C, Zhang Y, Xiao D L, Sun S K, Huang J, Ding N, Shu X J 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 2391 (in Chinese) [薛创, 宁成, 张扬, 肖德龙, 孙顺凯, 黄俊, 丁宁, 束小建 2011 强激光与粒子束 **23** 2391]

One-dimensional magneto-hydrodynamic simulation of the magnetic drive isentropic compression experiments on primary test stand*

Zhang Yang^{1)†} Xue Chuang¹⁾ Ding Ning¹⁾ Liu Hai-Feng¹⁾ Song Hai-Feng¹⁾
Zhang Zhao-Hui²⁾ Wang Gui-Lin²⁾ Sun Shun-Kai¹⁾ Ning Cheng¹⁾
Dai Zi-Huan¹⁾ Shu Xiao-Jian¹⁾

1) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

2) (*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 29 August 2017; revised manuscript received 20 October 2017)

Abstract

The 10 MA primary test stand (PTS), the most powerful pulse power generator in China, is used to obtain isentropic compression of Al samples under a pressure of about 100 GPa. The high performance of laser-triggered gas switches enables the precise synchronization of the 24 modules according to the required timing sequence. This advantage makes the PTS a very good platform for dynamic material compression with fundamental capability of pulse shaping. Tens of isentropic compression experiments have been conducted on the PTS, among which two distinct loading profiles were designed and used to obtain distinct compression processes. The first current, which is used to obtain a shockless compression, has a relatively smooth rise, and the rise-rate keeps almost constant during the 400 ns-long compression. The second current shape has a mild rise but a sharp ends, which is designed to make an artificial “turn-point” in the velocity history, which is helpful for the numerical code verification. The current profile, as well as the sample thickness, is optimized by a one-dimensional magneto-hydrodynamic (1D MHD) code MADE1D coupled with a full circuit model for the PTS. The equation of state and conductivity model used here have a wide coverage in the density, temperature and pressure range. The strength of material and its constitution model are also taken into consideration to simulate the elastic and plastic flow of metal at relatively low pressure and temperature. Compared with the experimental results, the simulated velocity at the sample/window interface is found to agree well with the measurement for most of the cases. This suggests that the MHD simulations with the circuit model are able to reflect the main process of the loading history, and help to analyze and elucidate the phenomena contributing to the compression. It shows that the current waveform is one of the most important factors that affect the loading process. For the PTS and strip-line electrodes it uses, a current rise ratio less than 15 kA/ns helps to obtain a smooth off-Hugoniot pressure rise. The temperature rise due to the $p dV$ work is very small, and most of the sample material, except those in the skin layer where current passes through, keeps solid during the compression. However, for a current rises at 40 kA/ns or more, the ramp loading wave could be sharpened into a shock within the sample thicker than 1.2 mm. Based on the PTS flexibility of pulse shaping, a wide range of desired load processes can be gained by designing and controlling the load current and sample thickness precisely.

Keywords: isentropic compression experiment, primary test stand, magneto-hydrodynamic, MADE1D

PACS: 07.35.+k, 62.50.-p, 84.70.+p, 91.60.Gf

DOI: 10.7498/aps.67.20171920

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11405012, 11675025, 91330107) and the Foundation of President of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2014-1-042).

† Corresponding author. E-mail: zhang_yang@iapcm.ac.cn