

FP-1 装置铝套筒内爆动力学过程的一维磁流体力学模拟

张扬 戴自换 孙奇志 章征伟 孙海权 王裴 丁宁 薛创 王冠琼 沈智军 李肖 王建国

One-dimensional magneto-hydrodynamics simulation of magnetically driven solid liner implosions on FP-1 facility

Zhang Yang Dai Zi-Huan Sun Qi-Zhi Zhang Zheng-Wei Sun Hai-Quan Wang Pei Ding Ning Xue Chuang Wang Guan-Qiong Shen Zhi-Jun Li Xiao Wang Jian-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 080701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172300

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172300>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[圆形复合式磁控溅射阴极设计及其放电特性模拟研究](#)

Design of circular composite sputtering cathode and simulation of its discharge characteristics

物理学报.2018, 67(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172576>

[爆轰驱动固体套筒压缩磁场计算及准等熵过程分析](#)

Magneto-hydrodynamic calculation of magnetic flux compression with explosion driven solid liners and analysis of quasi-isentropic process

物理学报.2015, 64(8): 080701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.080701>

[炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术研究](#)

Experimental research on the technique of magnetic flux compression by explosive cylindrical implosion

物理学报.2013, 62(17): 170701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170701>

FP-1 装置铝套筒内爆动力学过程的一维磁流体力学模拟*

张扬^{1)†} 戴自换¹⁾ 孙奇志²⁾ 章征伟²⁾ 孙海权¹⁾ 王斐¹⁾ 丁宁¹⁾
薛创¹⁾ 王冠琼¹⁾ 沈智军¹⁾ 李肖³⁾ 王建国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)

3)(中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

(2017年10月25日收到; 2018年1月23日收到修改稿)

作为一种重要的柱面会聚冲击和准等熵压缩加载源, 磁驱动固体套筒内爆技术已广泛应用于高能量密度物理实验研究. 针对 FP-1 装置驱动的固体套筒内爆动力学过程, 建立了含强度的一维磁流体力学模型, 并对典型实验进行了模拟. 计算获得的套筒内爆速度同实验结果较为相符. 模拟结果显示, 该装置在 40 kV 充电条件下, 可以将直径 3 cm, 厚 0.5 mm 的铝套筒加速至 1.1 km/s, 内壁速度超过 1.5 km/s, 同时保持大部分材料为固体状态. 内爆套筒与相同材料靶筒碰撞产生的冲击压力约 9 GPa. 改变靶筒内部填充气体的压力, 可以获得不同的靶筒运动速度、轨迹以及反弹半径, 以满足不同类型实验的研究需要.

关键词: 固体套筒, 磁流体力学模拟, FP-1 装置, 高能量密度物理

PACS: 07.55.Db, 52.30.Cv, 52.65.Kj, 75.40.Mg

DOI: 10.7498/aps.67.20172300

1 引言

利用脉冲功率装置产生的兆安级驱动电流, 可以将直径数厘米, 厚度约 1 mm 的金属套筒加速至每秒数公里的内爆速度. 通过与内部靶筒撞击, 产生满足不同类型物理研究需求的冲击加卸载条件、动力学过程、非对称弹塑性变形、或者高能量密度压缩状态等. 与气炮和炸药爆轰加载技术不同, 磁压力与电流密度平方成正比, 不存在驱动速度和压力上界的原理性限制. 此外, 电流通过柱形负载时产生的感应磁场具有天然角向对称性, 且不会有驱动装置和诊断设备防护的种种不便之处. 作为一种独特的柱面会聚动高压加载源, 电磁驱动的固体套筒内爆已被广泛应用于高能量密度物理、材料物

性、复杂流体动力学和内爆压缩科学与工程等领域.

近 20 年来, 美、俄、法国利用脉冲功率装置系统地开展了多种不同类型的固体套筒内爆实验. 根据工作原理不同, 这些驱动装置主要分为 3 类^[1]. 1) 多台高阻抗、上升沿为数十至数百纳秒的快脉冲功率发生器(含脉冲形成线和传输线)并联, 如美国 Sandia 实验室的 Z-Refurbishment (ZR), 储能约 22 MJ, 最大负载电流 26 MA (1 MA = 10^6 A), 最短上升时间约 75 ns^[2]. 该装置已成功应用于平面构型的准等熵压缩和冲击动力学实验, 准等熵压力约 500 GPa^[3], 固体金属飞片速度超过 43 km/s^[4]. 自 2012 年以来, Lemke 等^[5,6] 利用经过调节的 ZR 装置电流波形 (20 MA, 200 ns) 开展了固体金属套筒的内爆动力学实验, 并将其发展为一种研究物质偏离 Hugoniot (off-Hugoniot) 状态的无冲击加载手

* 国家自然科学基金(批准号: 11405012, 11675025, 11471048, U1630249)、科学挑战专题(批准号: JCKY2016212A502)和计算物理实验室基金资助的课题.

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

段. 但套由于筒尺寸较小(初始半径2—3 mm, 厚度 < 1 mm), 难以作为飞层开展冲击动力学实验研究. 2) 电流上升沿为数微秒的慢发生器(通常为电容器组), 如美国 Los Alamos 实验室的 Atlas 装置和美国空军实验室的 Shiva Star 装置等. 此类装置的电流脉冲时间较长, 负载尺寸多为厘米量级, 是目前固体套筒内爆动力学研究的主要实验平台. 关于此类装置及其取得的成果会在下文详细介绍. 3) 大型爆炸磁压缩电流发生器, 如美国的 Ranchero 装置和俄罗斯的圆盘爆磁发生器(disk explosive magnetic generator, DEMG), 输出电流已达数十至一百兆安, 可用于直接驱动半径 20 cm 以上、厚度数毫米的金属套筒实现约 10 km/s 的高速内爆. 作为一种单次使用的低阻抗、强电流爆炸脉冲电源, 此类装置的实验发次较少, 单次实验运行成本较高, 主要用于获得其他平台难以达到的极端加载条件, 开展更大驱动条件下的验证性实验研究^[7].

美国 Los Alamos 实验室在磁驱动固体套筒内爆技术的发展和和应用方面积累了丰富的成果和经验, 先后研制了 Pegasus I/II, Atlas 和 PHELIX 三代专用于磁驱动固体套筒加载实验的微秒脉冲功率装置(电容器组). Pegasus 装置兴建于 20 世纪 80 年代, 初代装置的峰值电流约 6.5 MA, 上升前沿 4 μ s. 后经扩容改造升级为 Pegasus II 装置, 储能由 1.5 MJ 扩容至 4.3 MJ, 电流增大至 12 MA, 可驱动固体套筒至 5—10 km/s^[8–10]. 开展的实验类型包括柱面收缩几何条件下的 Rayleigh-Taylor (RT) 和 Richtmyer-Meshkov (RM) 不稳定性实验、微喷射和微射流实验、不同材料的高速摩擦实验、材料的层裂和损伤实验以及率相关本构及强度实验等. 利用 Pegasus 装置, Los Alamos 实验室掌握了此类实验的优化设计方法, 推进了多种应用于不同物理研究的加载和诊断技术的发展, 奠定了磁驱动固体套筒内爆在高能量密度物理以及复杂流体力学实验研究中的应用基础. 于 2000 年前后建造的 Atlas 装置储能 23 MJ, 最大负载电流高达 32 MA, 上升沿 4—5 μ s, 具备将数十克重的金属套筒加速至 20 km/s 的驱动能力, 冲击压力为 2—5 TPa (1 TPa = 10^{12} Pa). Atlas 装置主要用于执行美国“地面模拟实验计划 (AGEX)” 中的重金属材料固体套筒电磁内爆实验, 研究高能量密度流体动力学问题, 包括以柱形内爆方式对材料进行冲击压缩、

等熵压缩实验和高压物态方程研究^[11–13]. 更强的驱动电流不仅有利于增加负载的几何尺寸和重量, 提高实验精度, 还为实现多次冲击等复杂加载过程创造了条件^[14]. 2001—2002 年, 建成不久的 Atlas 装置完成了 10 余次考核实验, 2004 年, 该装置搬迁至 Nevada 试验场开展污染性重金属样品的实验^[1]. PHELIX 装置是一种能够与质子照相装置 (pRad at LANL LANSCE) 集成的小型便携电容器组 (a portable capacitor bank), 也是 Los Alamos 实验室用于此类研究的最新一代驱动器, 充压 100 kV 时储能 340 kJ, 峰值电流约 5 MA^[15]. PHELIX 装置致力于在较小的驱动器储能和电流条件下, 通过适当减小负载重量和尺寸, 实现与大型装置实验类似的内爆速度和压力, 同时借助 pRad 光源获得 21 分幅高分辨质子照相的超强诊断能力. 在 2016 年完成的不稳定性实验中, PHELIX 装置驱动铝套筒以 3.6 km/s 的速度撞击锡靶, 其内表面卸载至完全熔化状态, 冲击压力超过 35 GPa, 为校验锡的 SESAME 库状态方程数据提供了参考^[16].

电磁驱动固体套筒内爆实验设计的重点在于通过驱动器、负载和电极三者之间的耦合优化, 获得满足物理研究需求的加载速度、压力、运动过程以及样品材料状态, 同时保证关键物理过程和物理量的诊断便利性. 为了模拟套筒的内爆动力学行为以及物质状态, 需要正确描述磁场的扩散行为以及材料强度的影响. 对于目前大多数实验而言, 套筒主体通常由密度较小且导电性好的铝/铝合金构成, 有时会根据实验需要在内表面增加重金属衬层以提高冲击压力. 在长达数微秒的内爆过程中, 金属套筒已充分磁化. 一方面, 磁场和电流密度的空间分布不仅直接影响套筒的受力、运动以及物质状态, 而且会改变应力波的传播行为. 另一方面, 内爆过程中大部分套筒仍处于固体状态, 材料的屈服、变形和失效等行为也是必须考虑的重要物理过程. 目前, 国际上主要采用含材料强度的电阻磁流体力学模型 (resistive MHD with strength) 模拟磁驱动固体套筒的内爆动力学行为. 该模型将磁场、流体和材料强度 3 种作用有机结合, 根据物质状态和所处的环境判断各项是否发挥作用. 例如, 应力作用和材料本构模型仅对固体有效, 材料熔化后, 运动仅满足流体方程. 类似地, 只有磁场存在时, 洛伦兹力和焦耳加热项才发挥作用. Los Alamos 实验室利用该模型先后建立了同驱动器集

总电路耦合的一维多介质 Raven 程序^[17]以及二维多介质欧拉程序^[8]. 通过大量的实验和模拟结果对比, 该模型能够统一地描述固体套筒内爆的典型动力学过程, 且避免了分区域独立建模带来的繁琐. Raven 程序主要通过模拟一维内爆动力学过程, 确定复合套筒的结构参数、靶筒设计和驱动条件等基本物理量, 同时给出实验预估结果^[8,18]. 该程序通过 Steinberg-Guinan 本构模型^[19]和 Lindemann 熔化模型^[20]获得必要的材料强度参数, 状态方程和电阻率由 SESAME 数据库提供. 采用正交四边形网格的二维多介质欧拉程序具有与 Raven 程序类似的物理建模, 其特点在于能够利用界面追踪技术处理套筒内爆过程可能涉及的多介质大变形问题. Bower 等^[8]利用欧拉程序详细分析了电极形状、坡度以及安装方式对套筒断裂行为和内爆过程的影响. Keinigs 等^[18]进一步讨论了内爆套筒的稳定性问题, 以及初始扰动对铝单层套筒和铝/钨复合套筒的影响. 近年来, 欧拉程序还被用于模拟更为复杂的“套筒-靶筒-电极”三者耦合问题, 评估边侧稀疏波引起的套筒变形及其对加载过程的影响. 这些研究通过更为全面充分的模拟分析, 提出合理的实验优化和改进方案, 为不断提高实验结果的可靠性提供了重要依据.

近年来, 中国脉冲功率技术发展取得了显著成就, 目前已拥有数台峰值电流 100 kA—10 MA, 上升前沿 70 ns—10 μ s, 可用于不同领域科学研究的脉冲功率驱动装置. 西北核技术研究所的低阻抗强流脉冲加速器“强光一号”装置(1—2 MA, 70 ns)^[21,22]、西安交通大学的双脉冲发生器“秦-1”装置(800 kA, 170 ns)^[23]以及清华大学的 400 kA 级 PPG-1 装置^[24]主要致力于开展与 Z 箍缩和 X 箍缩相关的内爆动力学和辐射物理研究, 揭示金属丝/丝阵负载的早期动力学行为, 深化对 Z 箍缩和 X 箍缩辐射特性的理解, 拓展其在辐射物理和诊断技术方面的应用. 中国工程物理研究院的 CQ-1.5 和 CQ-4 装置为上升时间 400—800 ns 的低电感电容器组, 峰值电流分别为 1.5 MA 和 4 MA, 具备了实现平面负载 110 GPa 的准等熵压缩和 15 km/s 的宏观金属飞片发射能力, 用于开展极端条件下的材料动力学特性和状态方程研究^[25-27]. 2013 年, 由中国工程物理研究院建成并投入使用的“聚龙一号”装置是我国首台多路并联超高功率脉冲装置,

由结构相同的 24 路模块组成, 可以根据研究需求调整模块之间的放电顺序, 以获得不同的电流波形. 在短脉冲工作模式下, 峰值电流 8—10 MA, 上升时间约 100 ns, 主要用于开展 Z 箍缩驱动惯性约束聚变(Z-pinch ICF)物理研究^[28]. 在分时放电工作模式下, 负载电流和上升时间分别在 4—6 MA 和 300—600 ns 可调, 主要用于材料的可控路径压缩以及超高速飞片发射实验研究, 最大准等熵压力约 140 GPa, 飞片速度超过 15 km/s^[29,30]. 与上述快脉冲驱动器不同, FP-1 装置是中国工程物理研究院建造的面向高能量密度物理实验研究的微秒级脉冲功率装置, 也是目前中国唯一可开展厘米级固体套筒内爆动力学实验研究的兆安级电容器组型驱动器. 储能单元由 216 台 MCF50-4 脉冲电容器构成, 额定电压 100 kV, 最大储能 1.08 MJ. 对圆柱形电感负载最大电流可达 4 MA, 上升前沿约 7 μ s. 该装置已被用于开展包括固体套筒内爆、微喷射和动力学屈曲等在内的多种问题研究^[31].

模拟程序的发展和应用是提高实验设计精度的重要保障. 对于 FP-1 这类中小型装置, 驱动电流相对较低, 可供选择的负载参数范围较为有限, 因此更加依赖可靠的数值模拟预估分析和物理设计. 章征伟等^[32]和张绍龙等^[33]利用考虑套筒厚度的不可压缩零维模型分别讨论了材料强度和电流前沿对电磁驱动固体套筒内爆过程的影响, 提供了非常有效的估算方法. 廖东海等^[34]进一步研究了用于电磁内爆过程数值模拟的一维磁流体力学显式模型, 并对 FP-1 装置的实验结果进行了模拟. 由于采用了显式差分格式, 程序具有编码简单、易于维护的特点, 且计算结果同隐式差分相当. 但由于没有考虑材料的强度作用, 该模型在描述固体套筒内爆行为时仍不够完善. 因此, 本文建立了基于拉格朗日有限差分方法的含强度一维磁流体力学程序——MADE1D. 该程序采用涵盖由常温常压到高温等离子体状态的宽区状态方程和电阻率模型, 能够对包含(复合)套筒和(复合)靶筒的多介质负载的一维内爆、冲击过程进行模拟, 并且获得了与实验结果较为相符的计算结果; 介绍了磁驱动固体套筒内爆的基本原理和 MADE1D 程序的物理建模; 围绕 FP-1 装置的实验结果, 分别讨论了电磁驱动单层铝套筒的内爆动力学过程, 以及套筒冲击靶筒, 并对内部填充气体的压缩过程.

2 物理模型

如图 1(a) 所示, 磁驱动固体套筒内爆实验的负载通常由外层套筒和内层靶筒组成. 靶筒内表面可根据需要刻槽或预制扰动, 内部可以填充气体或其他压缩材料. 负载的上下两端分别与驱动器的阴极和阳极相连. 电流 I 通过套筒时产生角向感应磁场 B . 在洛伦兹力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 的作用下 (\mathbf{J} 为电流密度), 套筒沿径向内爆. 典型的内爆过程持续数微秒, 除套筒外壁在趋肤电流的作用下气化电离外, 大部分材料温度仅为数百开尔文, 仍保持固体状态. 内爆过程中, 部分电磁能被用于压缩套筒产生塑性变形. 对于驱动电流较低的 FP-1 装置, 这种耗散机理对动力学过程造成的影响尤为明显, 不应被忽略. 因此在模拟上述过程时, 除采用电阻磁流体模型外, 还应考虑材料强度的影响.

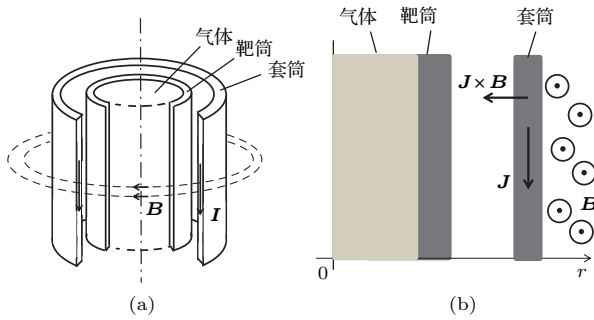


图 1 (a) 磁驱动固体套筒负载结构示意图和 (b) 负载一维计算模型

Fig. 1. (a) Schematic of a magnetically driven, liner-on-target experiment, and (b) load configuration used in the 1D simulation.

基于单温单流体假设, 忽略辐射和热传导, 建立与驱动器等效电路耦合的一维磁流体力学模型. 假设套筒的运动具有理想的柱对称性, 电流和磁场方向如图 1 所示. 微分形式的控制方程包括守恒形式的质量、动量和内能方程以及磁场扩散方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u^2) \\ &= -\frac{\partial}{\partial r} (p + p_B - s_r) + \frac{1}{r} \left(s_r - s_\theta - \frac{B^2}{\mu} \right), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho e u) \\ &= -p \frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} + (s_r \dot{\epsilon}_r + s_\theta \dot{\epsilon}_\theta) + \eta J^2, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} r B \right) - \frac{\partial}{\partial r} (u B), \quad (4)$$

式中 ρ , e , T , p , u 和 η 分别为质量密度、比内能、温度、热压、速度和电阻率; J , B 和 p_B 分别为电流密度、磁感应强度和磁压力, $\mu J = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B)$, $p_B = \frac{B^2}{2\mu}$; 偏应力 s_r 和 s_θ 同应变率 $\dot{\epsilon}_r$ 和 $\dot{\epsilon}_\theta$ 的关系为

$$\begin{aligned} \dot{s}_r &= 2G \left(\dot{\epsilon}_r - \frac{1}{3} \dot{V} \right) \\ &= 2G \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{3r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right), \\ \dot{s}_\theta &= 2G \left(\dot{\epsilon}_\theta - \frac{1}{3} \dot{V} \right) \\ &= 2G \left(\frac{u}{r} - \frac{1}{3r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right), \quad (5) \end{aligned}$$

其中 V 为比容, 剪切模量 G 与屈服强度 Y 一起反映了材料属性对加卸载过程的影响. 采用 Steinberg-Cochran-Guinan 本构模型^[35] 的剪切模量和屈服强度分别为

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

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

式中 ϵ^p 为等效塑性应变; G_0 , G'_P , G'_T , Y_0 , Y_{\max} , β 和 n 为与材料有关的常数; ρ_0 为常温常压下的材料密度. 对于铝材料: $G_0 = 27.6$ GPa, $G'_P/G_0 = 65.0$ TPa⁻¹, $G'_T/G_0 = -0.62$ kK⁻¹, $Y_0 = 0.29$ GPa, $Y_{\max} = 0.68$ GPa, $\beta = 125$, $n = 0.10$. 定义有效应力 $\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{1.5 \times (s_r^2 + s_\theta^2 + s_z^2)}$, 当 $\sigma_{\text{eff}} \geq Y$ 时, 材料发生屈服. 利用 Lindemann 模型^[20] 获得材料的熔化温度 T_{melt} , 当 $T > T_{\text{melt}}$ 时, $G = Y = 0$.

电阻率是影响电极和样品内部磁场以及受力分布的重要参数, 对保证计算结果的可靠性具有重要的意义. 本文基于 Lee-More 电子输运参数模型^[36] 建立了相应的程序模块, 利用原子参数、热力学状态以及所处环境的磁感应强度计算材料电阻率. 此外, 为使方程封闭, 本文采用了 Liu 等^[37] 研制的铝和氦的宽区状态方程 (the wide regime equation of state, WEOS).

作为模拟的输入条件, 负载的驱动电流既可以采用实验测量结果, 也可以根据驱动器简化电路模型计算获得. 如图 2 所示, FP-1 装置的电容器组、开关、传输线被集总为电容 C , 放电电压 U , 回路等效电感 L 和等效电阻 R . 负载电阻 R_{load} 和电感 L_{load} 与套筒的内爆动力学状态有关, 由程序实时计算给出. 根据驱动器初始充压条件, 以及 (8) 式可以获得随时间变化的负载电流 I .

$$I = -C \frac{dU}{dt},$$

$$U = (R + R_{load}) I + \frac{d(L + L_{load}) I}{dt}. \quad (8)$$

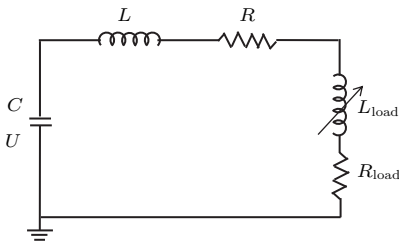


图 2 FP-1 装置等效电路模型
Fig. 2. Effective circuit model for the FP-1 facility.

3 单层套筒内爆过程模拟分析

图 3 给出了电容器充压为 40 kV 时 FP-1 装置单层铝套筒内爆实验的电流和速度测量结果. 负载内半径 $r_{in} = 15.0$ mm, 外半径 $r_{out} = 15.5$ mm, 高 $h = 20.0$ mm. 电流上升时间为 $6.8 \mu\text{s}$, 峰值为 2.06 MA. 需要说明的是, 由于罗氏线圈位置距离负载约 20 cm, 实际通过负载的电流同测量值相比有一定损失, 计算电流修正因子(负载电流/测量值)取值为 0.82. 套筒内壁速度由位于套筒轴线的多普勒探针 (photonic Doppler velocimetry, PDV) 测量. 当电流上升时间为 $19 \mu\text{s}$ 时, 套筒内壁运动到探针位置, 速度测量信号受到干扰. 利用修正后的实验负载电流计算获得的负载内爆轨迹、内壁速度和加速度曲线如图 3 虚线所示. 不难发现, 套筒的内爆动力学过程同电流变化息息相关. 初始 $7 \mu\text{s}$ 是电流的上升阶段, 在洛伦兹力的作用下套筒开始加速, 电流峰值时的运动速度约为 0.5 km/s. 之后, 随着驱动电流逐渐下降, 加速度减小. 当电流上升时间为 $14.6 \mu\text{s}$ 时, 电流完成反向, 负载再次开始加速. 值得注意的是, 随着套筒半径的逐渐减小, 套筒厚度不断增加. 内爆后期, 在柱面会聚几何效应

的作用下, 套筒内壁速度显著提高. 当电流上升时间为 $18.3 \mu\text{s}$ 时, 套筒到达 2.7 mm 位置, 内壁速度 1.44 km/s, 与实验测量结果相符.

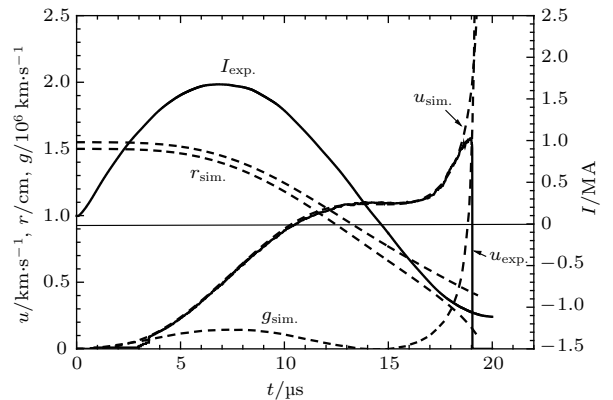


图 3 FP-1 装置铝套筒内爆实验的诊断和模拟结果: 电流 I_{exp} 和套筒内壁速度 u_{exp} (实线) 为实验测量值; 套筒内、外壁运动轨迹 r_{sim} 和内壁运动速度 u_{sim} 及加速度 g_{sim} (虚线) 为计算结果

Fig. 3. Measured current I_{exp} and inner surface velocity u_{exp} of an imploding aluminum liner on the FP-1 facility (solid lines). Simulated inner surface velocity u_{sim} , acceleration g_{sim} and radius r_{sim} of both surfaces are shown as well (dashed lines).

不同于均匀外力加载下的套筒压缩问题, 磁驱动固体套筒中的应力分布与屈服过程更为复杂. 为了便于说明, 本文讨论两种情况: 首先, 假设磁压力 $p_{B0} = \mu I^2 / (8\pi^2 r_{out}^2)$ 完全作用在套筒外表面, 计算结果如图 4 (a)—(c) 所示; 其次, 考虑磁扩散行为, 磁压力在电流趋肤层内自然分布, 见图 4 (d)—(f). 将磁压力作为均匀外力加载时, r 方向应力 σ_r 由套筒内部向外逐渐增大, 外表面位置的 $|\sigma_r| = p_{B0}$, 而有效应力 σ_{eff} 则由内向外逐渐减小. 当 p_{B0} 足够大时, 套筒内表面首先满足屈服条件, 其余位置仍为弹性区. 然而, 在真实情况下, 磁场的扩散行为改变了套筒外表面附近的应力分布. 如图 4 (d) 所示, 此时电流趋肤层内的应力 σ_r 逐渐减小, 有效应力 σ_{eff} 则迅速增加. 此外, 在电流引起的欧姆加热作用下, 该区域材料的屈服强度有所降低. 当 $t = 3.1 \mu\text{s}$ 时, 套筒外层区域首先满足屈服条件. 此后不久, 内表面也发生屈服, 套筒内部仅有很小一部分区域仍处于弹性阶段, 见图 4 (f).

图 5 (a) 和图 5 (b) 分别给出了 $18.8 \mu\text{s}$ 时内爆晚期套筒内部的密度、温度和熔点的径向分布, 以及体积压缩、变形和欧姆加热 3 种机理对内能增加

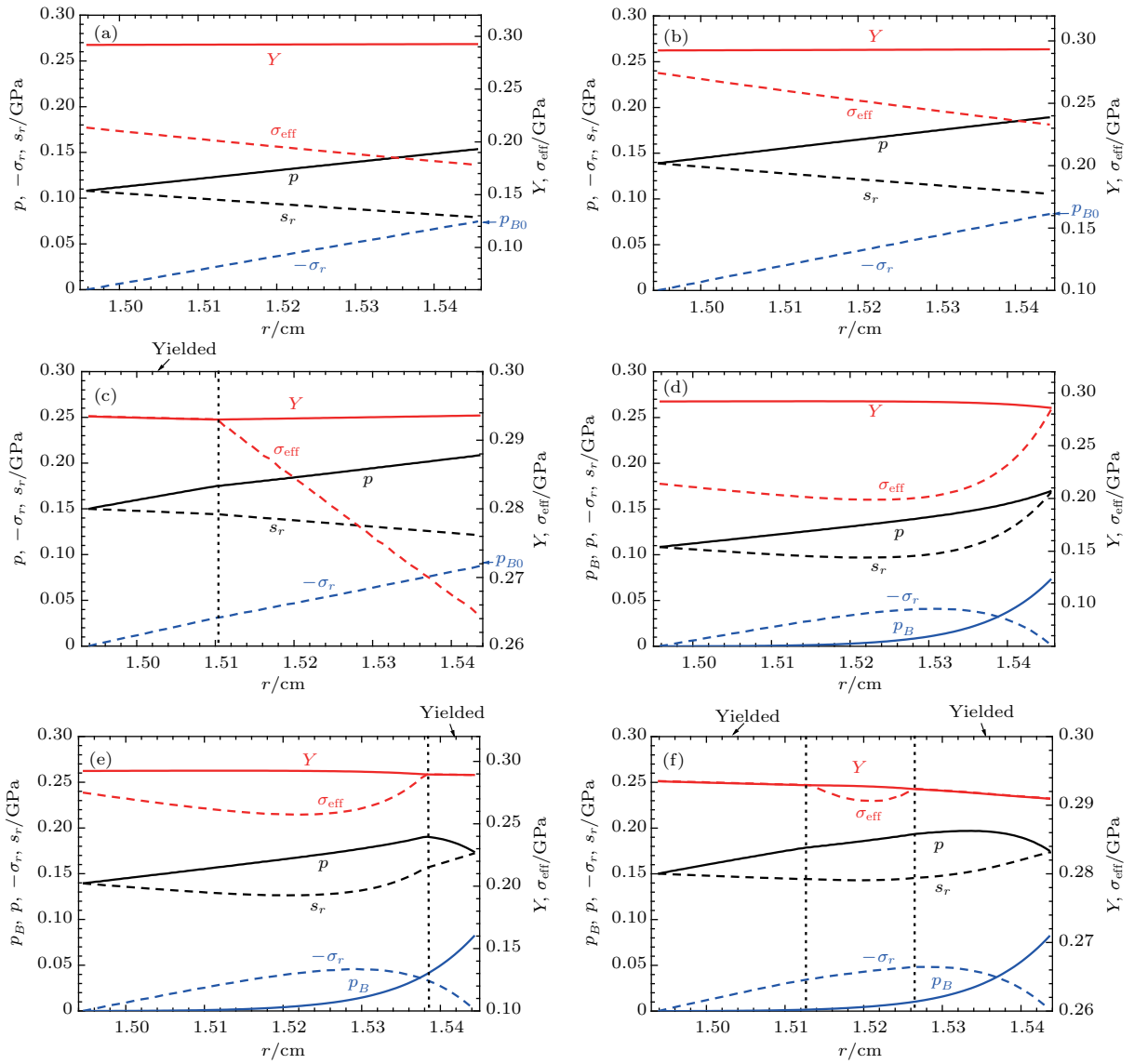


图4 将磁压力 p_{B0} 均匀加载在套筒外表面, 计算获得的 (a) $t = 2.9 \mu\text{s}$, (b) $t = 3.1 \mu\text{s}$ 和 (c) $t = 3.2 \mu\text{s}$ 时, 热压 p 、 r 方向应力 σ_r 、偏应力 s_r 、有效应力 σ_{eff} 和屈服强度 Y 的空间分布; 以及 (d)—(f) 相同时刻, 考虑磁扩散计算获得的结果

Fig. 4. Put magnetic pressure p_{B0} at the outer surface, the calculated distribution of the pressure p , stress σ_r , partial stress s_r in the r direction, effective stress σ_{eff} and yield strength at (a) $t = 2.9 \mu\text{s}$, (b) $t = 3.1 \mu\text{s}$, and (c) $t = 3.2 \mu\text{s}$ and (d)—(f) calculated results by taking magnetic field diffusion into consideration.

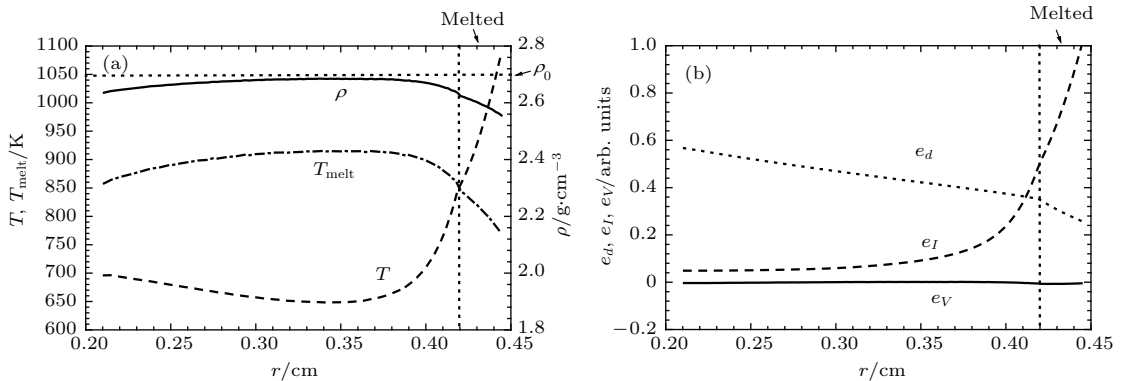


图5 模拟获得的 (a) 套筒密度 ρ 、温度 T 、熔点 T_{melt} 的径向分布; (b) 归一化体积压缩 (e_V)、变形 (e_d) 和欧姆加热 (e_I) 引起的内能变化

Fig. 5. Simulated (a) spatial distribution of mass density ρ , temperature T , and melt temperature T_{melt} ; (b) spatial distribution of initial energy increase caused by the compression (e_V), deformation (e_d), and Ohmic heating (e_I) in arbitrary unit.

的贡献. 可以看出, 内爆过程中材料体积压缩引起的内能改变很小, 可以忽略不计. 电流通过负载时引起的局部加热效应主要集中在套筒外层, 这部分物质温度已超过熔点成为液态. 柱面会聚引起的形状变化和畸变能增加是物质温度升高的另一重要原因, 且越靠近内表面越为明显. 但是在本算例中, 塑性变形引起的温升仍不足以使套筒内表面熔化. 18.8 μs 时, 接近 90% 的套筒厚度仍处于固体状态.

4 套筒冲击靶筒过程模拟分析

利用高速内爆的固体套筒碰撞靶筒, 可以产生会聚冲击, 为研究材料物性、表面损伤和不稳定性等问题提供所需的动高压加卸载条件. 根据物理实验要求, 靶筒内部既可以保持真空, 也可以填充不同材料的气体. 本节针对这两种情况分别进行讨论.

利用第 3 节使用的驱动电流和铝套筒, 在其内部增加初始半径 8 mm、厚 0.9 mm 的铝质靶筒, 计算获得的负载运动轨迹和速度如图 6 所示. 12.9 μs 时, 套筒与靶筒发生碰撞, 并将大部分能量传递给靶筒. 靶筒在经历了约 4.5 μs 的“匀速”飞行后, 内壁速度在收缩几何作用下迅速增加至 3.0 km/s 以上. 如图 6(b) 所示, 冲击作用下的靶筒速度曲线出现了周期为 0.25 μs 的振荡, 该现象反映了应力波到达靶筒内壁时产生的加卸载过程, 其幅度与材料本构和断裂模型有关. 随着应力波在靶筒内外表面之间多次反射, 能量通过塑性变形耗散为靶筒内能, 振荡逐渐消失.

图 7(a)–(c) 给出了套筒与靶筒相互作用过程中径向应力和速度的空间分布. 13.02 μs 时, “套筒-靶筒”界面碰撞产生的激波分别向两侧传播, 波后速度约为冲击速度的一半. 径向应力的大小随半径的增加而逐渐下降. 由于冲击较强, 材料在加载过程中很快屈服, 在厚度有限的靶筒和套筒内未能观察到明显的弹性波与塑性波分离. 13.16 μs 时, 自由面产生的稀疏波在靶筒外表面附近相遇. 需要注意的是, 尽管套筒和靶筒选用同种材料并进行了质量匹配, 但由于碰撞前套筒已完全磁化, 应力波在套筒中的传播速度较靶筒更快, 致使稀疏波相遇位置偏离了“套筒-靶筒”界面. 稀疏波交汇产生的反向加载拉伸应力超过铝材料的最大拉伸应力, 靶筒外层发生层裂. 13.28 μs 时, 断裂后产生的压缩

波跟随在反向加载稀疏波之后, 使应力再次释放, 套筒和靶筒也实现了分离. 如图 7(d) 所示, 冲击作用下靶筒的瞬时压力达到 8.8 GPa, 随后卸载. 聚心运动过程中, 应力波在靶筒内不断反射, 使压力产生小幅振荡. 与此同时, 塑性变形使得靶筒温度上升.

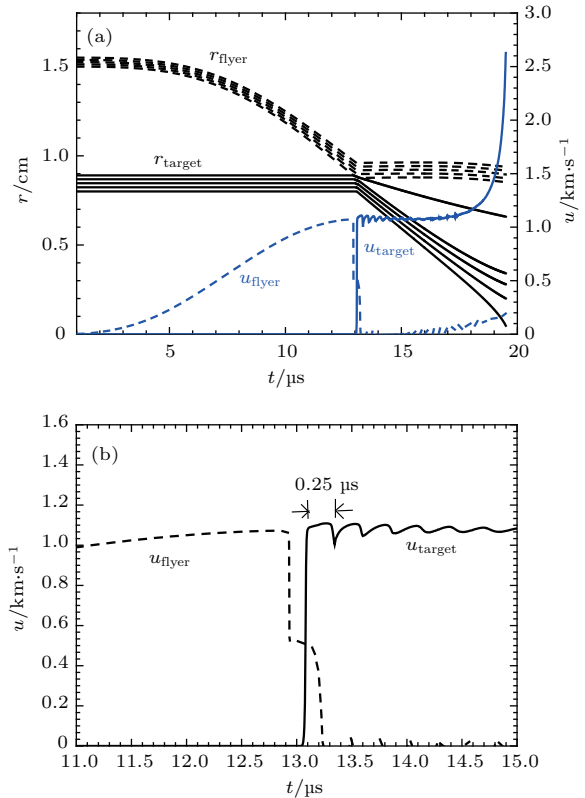


图 6 (a) 无填充气体时, 计算获得的套筒、靶筒内爆轨迹 r_{flyer} , r_{target} 和内壁速度 u_{flyer} , u_{target} 随时间变化; (b) $t = 11\text{--}15$ μs , 套筒和靶筒内壁速度曲线
Fig. 6. (a) Simulated imploding trajectory and inner surface velocity of both liner and target; (b) simulated inner surface velocity of both liner and target within time zone 11–15 μs .

柱面会聚运动的靶筒可用于压缩气体, 或在气体作用下实现反弹. 图 8 给出了靶筒内部填充 20 atm (1 atm = 101325 Pa) 氩气时负载的运动轨迹及套筒和靶筒内壁运动速度. 与图 6 比较不难发现, 此时靶筒通过碰撞获得的初始速度没有明显变化, 但在气体的作用下, 运动速度会不断降低. 18.8 μs 时, 透射激波在气体内部经轴线反射后再次到达靶筒内壁, 引起速度的显著降低. 经过压缩波的多次反射, 靶筒最终在距离轴线 1.4 mm 位置实现反弹. 图 9(a) 给出了不同充气压力条件下靶筒内壁的速度曲线. 模拟结果显示, 充气压

为5 atm时, 内爆后期仍可观察到收缩几何效应引起的内壁短暂加速过程. 进一步增加充气压力, 使得该现象逐渐弱化直至完全消失. 当充气压力由

5 atm增加至30 atm时, 靶筒反弹半径由0.6 mm增加至1.7 mm, 气体最大压力则由14.3 GPa下降至3.4 GPa.

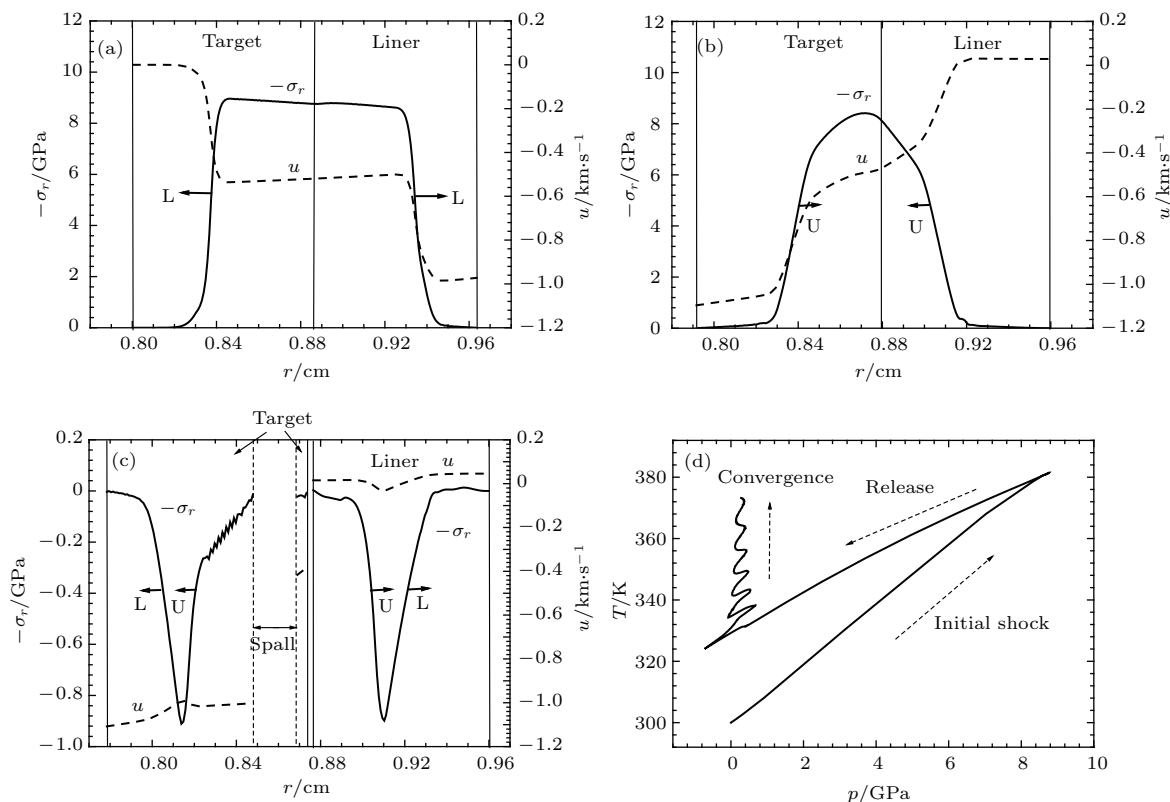


图7 (a) $t = 13.02 \mu s$, (b) $t = 13.16 \mu s$ 和 (c) $t = 13.28 \mu s$ 套筒与靶筒相互作用过程中, 不同时刻径向应力及速度的空间分布 (“L”表示加载过程, “U”表示卸载过程, 箭头表示波的传播方向); (d) 冲击、卸载和聚心运动过程中, 靶筒厚度中心位置的温度、压力变化

Fig. 7. (a) $t = 13.02 \mu s$, (b) $t = 13.16 \mu s$ and (c) $t = 13.28 \mu s$, calculated spatial distribution of the radial stress and velocity; (d) the change of temperature with pressure at the center of the target.

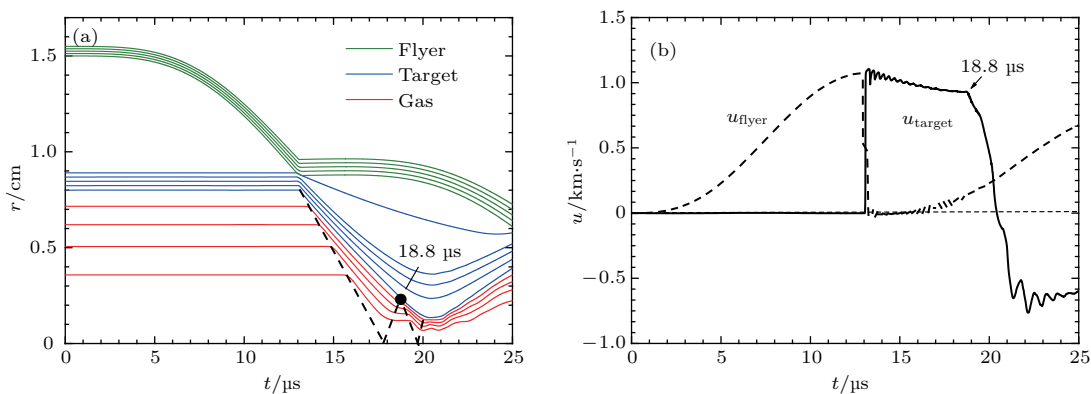


图8 靶筒充20 atm氩气条件下, 模拟获得的 (a) 负载的运动轨迹 (虚线表示激波在气体内部的传播轨迹) 和 (b) 套筒和靶筒内壁运动速度

Fig. 8. With 20 atm prefilled argon gas inside the target, (a) the calculated radius vs. time of the load (the dashed line indicates the shock path inside the gas) and (b) the calculated velocity vs. time at both the inner and outer surface of the target.

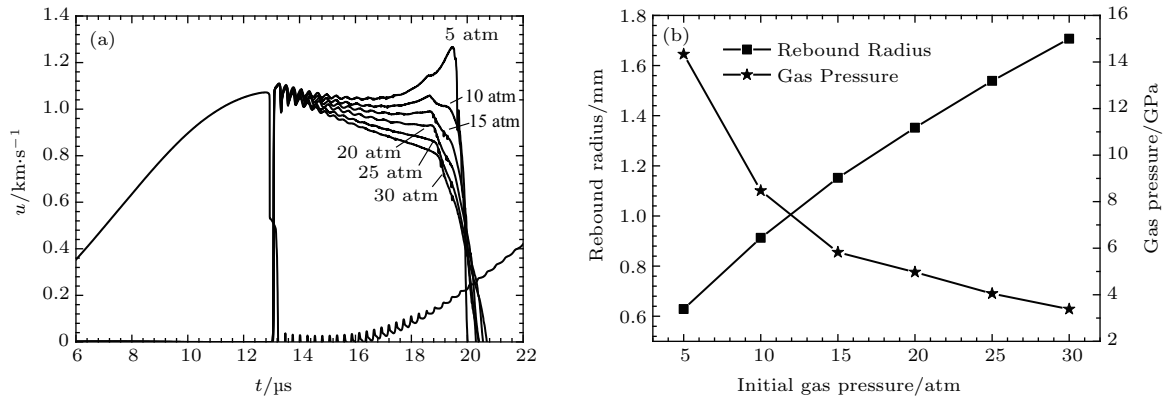


图9 (a) 不改变套筒和靶筒参数, 充气压力5—30 atm条件下, 靶筒内壁速度曲线; (b) 靶筒反弹半径和气体最大压力随充气压力的变化

Fig. 9. (a) With different pre-filled gas pressure 5–30 atm, the calculated inner surface velocity of each load; (b) the change of rebound radius and max gas pressure with the pre-filled gas pressure.

5 结 论

根据FP-1装置磁驱动固体套筒内爆动力学的特点, 建立了一维磁流体力学程序MADE1D. 考虑到该装置驱动能力有限, 不能忽略强度作用, 磁流体模型中增加了必要的强度计算和本构模型. 根据实验电流模拟了FP-1装置驱动铝套筒内爆的动力学过程, 获得的套筒内界面速度曲线与测量结果较为相符. 峰值2.0 MA、上升时间7 μs 的驱动电流可以将半径15 mm、厚0.5 mm的铝筒加速至1.1 km/s, 内壁速度超过1.5 km/s. 模拟结果显示, 在欧姆加热的作用下, 套筒外壁的温度超过熔点发生熔化. 虽然在塑性变形作用下内壁温度也有明显上升, 但仍保持固体状态.

利用高速内爆的套筒与初始半径8 mm的等质量铝靶筒发生碰撞, 可以产生强度约9 GPa的柱面会聚冲击波, 靶筒随后的运动过程与内部填充气体的压力有关. 充气压力不超过10 atm时, 仍可观察到收缩几何效应引起的靶筒内壁加速现象. 更大的充气压力, 会引起靶筒速度的迅速下降. 通过改变充气压力可以控制负载的内爆动力学过程, 获得适合的气体压缩状态和靶筒运动轨迹, 以满足不同物理实验的设计需要.

本工作得到北京应用物理与计算数学研究所王丽丽研究员、孙顺凯副研究员、刘海风研究员、张弓木研究员、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固体套筒实验团队提供, 在此表示由衷感谢.

参考文献

- [1] Sun C W 2007 *High Energ. Dens. Phys.* **1** 41 (in Chinese) [孙承伟 2007 高能量密度物理 **1** 41]
- [2] Savage M E, Bennett L F, Bliss D E, Clark W T, Coats R S, Elizondo J M, LeChien K R, Harjes H C, Lehr J M, Maenchen J E, McDaniel D H, Pasik M F, Pointon T D, Owen A C, Seidel D B, Smith D L, Stoltzfus B S, Struve K W, Stygar W A, Warne L K, Woodworth J R, Mendel C W, Prestwich K R, Shoup R W, Johnson D L, Corley J P, Hodge K C, Wagoner T C, Wakeland P E 2007 *Proceedings of the 2007 IEEE Pulsed Power Conference* **1–4** 979
- [3] Davis J, Knudson M D, Brown J L 2017 *AIP Conference Proceedings* **1793** 060015
- [4] Lemke R W, Knudson M D, Davis J 2011 *Int. J. Impact Eng.* **38** 480
- [5] Martin M R, Lemke R W, McBride R D, Davis J P, Dolan D H, Knudson M D, Cochrane K R, Sinars D B, Smith I C, Savage M, Stygar W A, Killebrew K, Flicker D G, Herrmann M C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 056310
- [6] Lemke R W, Dolan D H, Dalton D G, Brown J L, Tomlinson K, Robertson G R, Knudson M D, Harding E, Mattsson A E, Carpenter J H, Drake R R, Cochrane K, Blue B E, Robinson A C, Mattsson T R 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 015904
- [7] Faehl R J, Anderson B G, Clark D A, Ekdahl C A, Goforth J H, Lindemuth I R, Reinovsky R E, Sheehy P T, Peterson T, Tabaka L J, Chernyshev V K, Mokhov V N, Buzin V N, Burenkov O M, Buyko A M, Vakhrushev V V, Garanin S F, Grinevich B E, Ivanova G G, Demidov V A, Dudoladov V I, Zmushko V V, Kuzyaev A I, Kucherov A I, Lovyagin B M, Nizovtsev P N, Petrukhin A A, Pishurov A I, Sofronov V N, Sokolov S S, Solovyev V P, Startsev A I, Yakubov V B, Gubkov E V 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1972
- [8] Bowers R L, Brownell J H, Lee H, McLenithan K D, Scannapieco A J, Shanahan W R 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 4146

- [9] Chandler E, Egan P, Winer K, Stokes J, Douglas Fulton R, King N S P, Morgan D V, Obst A W, Oro D W 1997 *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-JC-127667*
- [10] Hammerberg J E, Kyrala G A, Ore D M, Fulton R D, Anderson W E, Obst A W, Oona H, Stokes J 1999 *Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-99-3378*
- [11] Bowman D W, Ballard E O, Barr G, Bennett G A, Cochrane J C, Davis H A, Davis T O, Dorr G, Gribble R F, Griego J R, Hood M, Kimerly H J, Martinez A, McCuistian T, Miller R B, Ney S, Nielsen K, Pankuch P, Parsons W M, Potter C, Ricketts R, Salazar H R, Scudder D W, Shapiro C, Thompson M C, Trainor R J, Valdez G A, Yonemoto W 1999 *IEEE Int. Pulsed Power Conf.* **2** 933
- [12] Parsons W M, Ballard E O, Barr G W, Bowman D W, Cochrane J C, Davis H A, Elizondo J M, Gribble R F, Griego J R, Hicks R D, Hinckley W B, Hosack K W, Miller R B, Nielsen K E, Parker J V, Ricketts R L, Salazar H R, Sanchez P G, Scudder D W, Thompson M C, Trainor R J, Valdez G A, Vigil B N, Waganaar W J, Watt R G, Wysocki F J 1999 *IEEE Int. Pulsed Power Conf.* **2** 976
- [13] Davis H A, Ballard E O, Elizondo J M, Gribble R F, Nielsen K E, Parker J V, Parsons W M 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 1405
- [14] Reinovsky R E 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 1563
- [15] Rousculp C L, Oro D M, Morris C, Saunders A, Reass W, Griego J R, Turchi P J, Reinovsky R E 2015 *Los Alamos Report LA-UR-15-22889*
- [16] Rousculp C L, Oro D M, Griego J R, Turchi P J, Reinovsky R E, Bradley J T III, Cheng B, Freeman M S, Patten A R 2016 *Los Alamos Report LA-UR-16-21901*
- [17] Oliphant T A, Witte K H 1987 *Los Alamos National Laboratory Report LA-10826*
- [18] Keinigs R K, Atchison W L, Faehl R J, Thomas V A, Mclenithan K D, Trainor R J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 7626
- [19] Steinberg D 1996 *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-MA106439*
- [20] Lindemann F A 1911 *Phys. Z* **11** 609
- [21] Qiu A C, Kuai B, Zeng Z Z, Wang W S, Qiu M T, Wang L P, Cong P T, Lü M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5917 (in Chinese) [邱爱慈, 蒯斌, 曾正中, 王文生, 邱孟通, 王亮平, 丛培天, 吕敏 2006 物理学报 **55** 5917]
- [22] Wu J, Wang L P, Li M, Wu G, Qiu M T, Yang H L, Li X W, Qiu A C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 035205 (in Chinese) [吴坚, 王亮平, 李沫, 吴刚, 邱孟通, 杨海亮, 李兴文, 邱爱慈 2014 物理学报 **63** 035205]
- [23] Wu J, Li X, Li M, Li Y, Qiu A 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 403002
- [24] Zhao S, Xue C, Zhu X L, Zhang R, Luo H Y, Zou X B, Wang X X, Ning C, Ding N, Shu X J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045205
- [25] 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]
- [26] 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 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **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]
- [27] Cai J T, Wang G J, Zhao J H, Mo J J, Weng J D, Wu G, Zhao F 2010 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **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]
- [28] 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
- [29] 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]
- [30] Kan M X, Zhang Z H, Duan S C, Wang G H, Yang L, Xiao B, Wang G L 2015 *High Power Laser and Particle Beams* **27** 125001 (in Chinese) [阚明先, 张朝辉, 段书超, 王刚华, 杨龙, 肖波, 王贵林 2015 强激光与粒子束 **27** 125001]
- [31] Yang L B, Sun C W, Liao H D, Hu X J 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 767 (in Chinese) [杨礼兵, 孙承纬, 廖海东, 胡熙静 2002 强激光与粒子束 **14** 767]
- [32] Zhang Z W, Wei Y, Sun Q Z, Liu W, Zhao X M, Zhang Z H, Wang G L, Guo S, Xie W P 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 045017 (in Chinese) [章征伟, 魏懿, 孙奇志, 刘伟, 赵小明, 张朝辉, 王贵林, 郭帅, 谢卫平 2016 强激光与粒子束 **28** 045017]
- [33] Zhang S L, Zhang Z W, Sun Q Z, Liu W, Zhao X M, Zhang Z H, Wang G L, Jia Y S 2017 *High Power Laser and Particle Beams* **29** 105002 (in Chinese) [张绍龙, 章征伟, 孙奇志, 刘伟, 赵小明, 张朝辉, 王贵林, 贾月松 2017 强激光与粒子束 **29** 105002]
- [34] Liao H D, Hu X J, Yang L B, Feng S P 1998 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **12** 174 (in Chinese) [廖海东, 胡熙静, 杨礼兵, 丰树平 1998 高压物理学报 **12** 174]
- [35] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498
- [36] Lee Y T, More R M 1984 *Phys. Fluids* **27** 1273
- [37] Liu H F, Song H F, Zhang Q L, Zhang G M, Zhao Y H 2016 *Matter and Radiation at Extremes* **1** 123

One-dimensional magneto-hydrodynamics simulation of magnetically driven solid liner implosions on FP-1 facility*

Zhang Yang^{1)†} Dai Zi-Huan¹⁾ Sun Qi-Zhi²⁾ Zhang Zheng-Wei²⁾ Sun Hai-Quan¹⁾
 Wang Pei¹⁾ Ding Ning¹⁾ Xue Chuang¹⁾ Wang Guan-Qiong¹⁾ Shen Zhi-Jun¹⁾
 Li Xiao³⁾ Wang Jian-Guo¹⁾

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

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

3) (*Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

(Received 25 October 2017; revised manuscript received 23 January 2018)

Abstract

As an important cylindrical-convergent drive technology, magnetically driven solid liner implosion has been widely used in the high energy density physics (HEDP) experiments for different researches, such as the properties of condensed matter at an extreme pressure, the hydrodynamic behaviors of imploding systems, and the properties and behaviors of dense plasmas. On the 2.2 MA FP-1 facility (with a rise time of 7 μ s), implosions of aluminum liners and their impact on target liners are studied experimentally for exploring the applications of instability and ejecta mixing. A one-dimensional Lagrangian code—MADEID is developed to study liner implosions numerically, which is based on magneto-hydrodynamics model with material strength, wide-range equation of state, Lee-More conductivity, and SCG (Steinberg, Cochran and Guinan) constitutive model. The code is based on the finite difference method. The finite difference equations are written in the covariant form for both Cartesian and cylindrical coordinates which enables the accurate simulation of different load geometries. Numerical results, such as the simulated velocity and radius at inner surface of the liner and target, agree well with the measurements. It shows that FP-1 has the ability to accelerate a 0.5 mm thick aluminum liner with an initial radius of 1.5 mm to a speed of more than 1.1 km/s, and the corresponding velocity of inner surface is more than 1.5 km/s due to the cylindrical convergence effect. In our calculation, most of the liner keeps solid throughout the implosion, though its outer surface is melted due to the Ohmic heating. A cylindrical converging shock about 8–10 GPa can be obtained by setting a target with an initial radius of 8–11 mm inside the liner coaxially. The numerical results show that since the imploding liner is fully magnetized when it impacts the target, the shock and the corresponding reflect release wave run faster than in the unmagnetized target. This means that the target will spall near the liner-target interface, though they are impedance-matched acoustically. The movement of the shocked target can be affected by the pre-filled gas inside. Increasing the gas pressure makes the target lose its velocity quickly, and the rebound radius increases as well. By adjusting the load design and gas pressure appropriately, we can obtain the right implosion process to meet the study requirement.

Keywords: solid liner, magneto-hydrodynamics simulation, FP-1 facility, high energy density physics

PACS: 07.55.Db, 52.30.Cv, 52.65.Kj, 75.40.Mg

DOI: 10.7498/aps.67.20172300

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11405012, 11675025, 11471048, U1630249), the Science Challenge Project, China (Grant No. JCKY2016212A502), and the Foundation of Laboratory of Computational Physics, China.

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