

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0453

## 内爆磁压缩准等熵加载过程分析与实验验证\*

陆禹<sup>1,2</sup>, 谷卓伟<sup>2</sup>, 周中玉<sup>2</sup>, 孙承伟<sup>3</sup>

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要:** 利用磁流体力学程序 SSS-MHD 模拟了炸药柱面内爆磁通量压缩发生器 CJ-100 装置的加载过程, 讨论了各项装置参数的影响, 结果表明装置可达到的峰值磁场值与初始磁场值成反比关系。设计了铁/铜夹层结构的样品靶, 在该型装置上开展纯铁的准等熵加载实验。利用光子多普勒测速探头测量到 6.43 km/s 的样品靶自由面速度, 在 DT4 铁中获得 206 GPa 的准等熵加载压力。铁材料的压力-比容曲线与理论等熵线基本重合, 表明内爆磁压缩加载过程具有较高的等熵程度。

**关键词:** 磁流体力学; 内爆磁压缩装置; 准等熵压缩; CJ-100 发生器

中图分类号: O361.3 国标学科代码: 13025 文献标志码: A

## Analysis and experimental verification of quasi-isentropic loading process in explosive-driven magnetic flux compression

LU Yu<sup>1,2</sup>, GU Zhuowei<sup>2</sup>, ZHOU Zhongyu<sup>2</sup>, SUN Chengwei<sup>3</sup>

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

3. Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Explosive-driven magnetic flux compression generator is a device that converts the chemical energy of explosives into electromagnetic energy. It has attracted great attention in the field of high energy density physics due to its wide application and important development prospect in magnetic field compression and material high pressure loading. CAEP has conducted a lot of research on CJ-100 device, which can stably generate an axial magnetic field of about 700 T. In order to investigate the loading capacity of CJ-100 device, the loading process and the effects of various device parameters are discussed by using the one-dimensional magnetohydrodynamics program SSS-MHD. The results show that the peak magnetic field that can be reached by the device is inversely proportional to the initial magnetic field, and the size of sample target has a great influence on the loading pressure. A sample target of iron/copper layered structure was designed for quasi-isentropic loading experiment of pure iron. The initial inner radius of the sample target was 3 mm, and the thickness of both iron and copper layer was 1 mm. The experiment was carried out on CJ-100 device with an initial magnetic field of 5.5 T, atmospheric pressure of several hundred Pa and ambient temperature. The free surface velocity of the sample target of about 6.43 km/s was measured with Photonic Doppler Velocimetry probes. SSS-MHD program with proper material models provided curve of velocity versus time that agree well with the experimental measurement. Simulation then shows that a quasi-isentropic loading

\* 收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11672276)

第一作者: 陆禹(1992—), 男, 博士研究生, [luyuustc@mail.ustc.edu.cn](mailto:luyuustc@mail.ustc.edu.cn)

通信作者: 谷卓伟(1969—), 男, 博士, 研究员, [guzhw1969@126.com](mailto:guzhw1969@126.com)

pressure of 206 GPa is obtained in DT4 iron. The  $p$ - $v$  curve of iron material is basically coincided with the theoretical isentropic line, indicating that the loading process of CJ-100 has a high isentropic degree.

**Keywords:** magneto-hydrodynamics; explosive-driven magnetic flux compression generator; quasi-isentropic compression; CJ-100 device

爆炸磁通量压缩发生器是一种将炸药爆轰能量通过压缩种子磁通量的途径转变为电磁能量的装置<sup>[1]</sup>。依据装置的输出特性,可将其笼统的分为 MC-1 型和 MC-2 型两类,其中 MC-1 型装置以产生强磁场以及相关的高磁压为目的,用以研究材料在极端条件下的力学、物理性态;MC-2 型装置以在很低电感负载中产生超大电流为目的,驱动负载实现相应功能。由于采用炸药作为初始能源,爆炸磁通量压缩发生器具有储能密度高、结构紧凑、便于运载、输出脉冲磁场及电流水平强等优点,受到了高能量密度物理研究领域的高度关注。

MC-1 型内爆磁通量压缩发生器(简称为 MC-1 装置)利用炸药内爆驱动金属套筒、压缩其内部预置的种子磁场,使磁通量随着金属套筒快速内爆会聚得到有效汇聚,最终形成超强磁场。若在套筒轴心处放置金属样品,则磁场与金属样品表面的感生电流相互作用产生的磁压力会对样品材料进行高压加载。这种以磁场作为工质的非接触加载,既可以充分利用内爆的柱面几何压缩的优点,又可避免套筒各种运动不稳定性的影响,确保样品受压均匀。在连续变化的磁场(磁压力)作用下,样品材料经历准等熵压缩过程,具有等熵性好、加载压力高、样品温升低等特点,且加载样品的材料类别不受局限,对轻、重材料均可实现有效的准等熵压缩,样品体积可达  $10^{-1} \sim 10^1 \text{ cm}^3$  量级,为强磁场物理、材料合成和高压相变等极端条件的研究提供了良好的实验途径<sup>[2]</sup>。1951 年, Sakharov 等<sup>[3]</sup>首先提出了内爆磁通量压缩的概念,此后全俄实验物理研究院<sup>[4]</sup>、美国洛斯阿拉莫斯实验室<sup>[5]</sup>和劳伦斯利弗莫尔实验室<sup>[6]</sup>、意大利气体电离实验室<sup>[7]</sup>等相继开展了相关的实验研究。20 世纪 60~70 年代发展的 MC-1 装置可通称为单级 MC-1 装置,即只使用一层金属套筒对磁通量进行压缩,可获得 1 000 T 量级的超强磁场<sup>[5]</sup>。1960 年, Fowler 等<sup>[8]</sup>利用单级 MC-1 装置获得约 1 400 T 的超强磁场。但对于单级装置,金属套筒的结构失稳问题严重限制了更高磁场的稳定获取。20 世纪 80 年代, Bykov 等<sup>[8]</sup>研制了多级 MC-1 装置,采用同轴多级套筒串联的技术路线,将整个压缩过程分为几个阶段逐级压缩,减缓了初级套筒结构失稳或解体带来的影响,使实验稳定性和重复性显著提高,将磁场压缩程度提高至 2 000 T 量级。1998 年, Boyko 等<sup>[4]</sup>利用多级 MC-1 装置获得了约 2 800 T 的超强磁场。

20 世纪 60 年代陈学印等<sup>[9]</sup>在我国就已对 MC-1 装置进行了探索,曾测量到约 245 T 的压缩磁场。2013 年, Zhou 等<sup>[10]</sup>研制了我国首个能够稳定产生约 700 T 轴向峰值磁场的单级 MC-1 型发生器 CJ-100 型装置。但是,在实验设备、诊断测试技术,数据处理方法等方面,我国与外国科研机构的差距还很大,需要在研究中不断地攻关和创新。

本文中以流体物理研究所的 CJ-100 型装置为实验平台,讨论内爆磁压缩过程中各项参数对实验结果的影响,设计铁/铜双层结构的夹层样品靶并开展纯铁(DT4)材料的准等熵压缩实验,对实验结果进行相应的分析和总结,以为装置优化及负载设计提供参考。

## 1 实验系统

实验系统由脉冲电源模块、控制触发模块、诊断测试模块以及 CJ-100 型装置组成,各模块间的关联如图 1 所示<sup>[10]</sup>。脉冲电源模块由电容器组、充电机和爆炸开关构成,电容器组通过励磁线圈放电,产生穿过套筒内部空间的初始种子磁场;控制触发模块用于控制电容器组的充放电,并提供时序和爆炸开关点火信号;诊断测试模块一般包括探针测量,主要有测量磁场的 B-dot 探针和测量样品速度的光子多普勒(photonic Doppler velocimetry, PDV)探针<sup>[11]</sup>和,以及用于拍摄金属套筒整体运动情况的高速摄影<sup>[12]</sup>。CJ-100 型装置是将炸药化学能转化为电磁能的核心分系统,主要由炸药、同步起爆网络、金属(不锈钢)套筒、励磁的亥姆霍兹线圈组、靶管及样品材料构成,结构示意图和实物照片如图 2 所示。

装置运行时, 首先启动电容器组产生脉冲电流激励励磁线圈, 形成金属套筒内部空腔中的初始种子磁场; 适当时刻在侧面同步引爆炸药圆柱筒, 使得当金属套筒内初始种子磁场值达到最大时, 炸药柱中的会聚爆轰波刚好驱动套筒开始运动; 套筒内爆实现对种子磁场的压缩, 内爆终结时套筒轴线附近小体积内将形成超强磁场。根据实验需求, 可选择在套筒轴心处放置磁探针或者样品靶, 以分别实现超强磁场的测量或样品材料的高压加载。CJ-100 型装置的主要结构参数如下: 套筒材料为 304 不锈钢, 外直径 100 mm, 厚度为 1.5 mm; 炸药种类为 RHT-901(40%TNT / 60%RDX), 内直径 100 mm、厚度 55 mm。

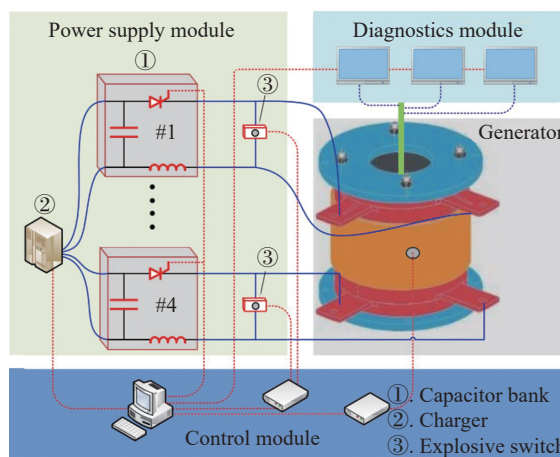


图 1 CJ-100 实验系统<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Experimental system of CJ-100

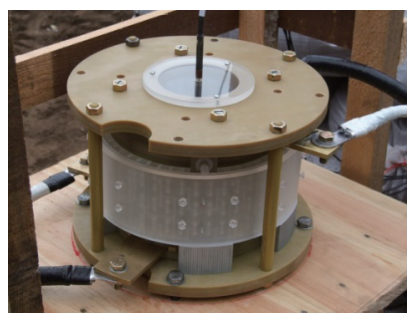
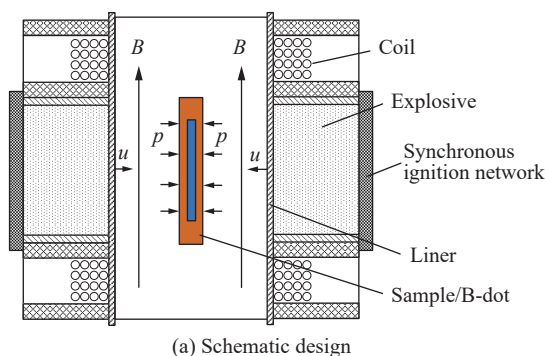


图 2 CJ-100 型装置的结构示意图和照片

Fig. 2 Schematic design and photo of CJ-100 device

## 2 内爆磁压缩加载过程分析

CJ-100 型装置的加载过程十分复杂, 涉及材料的力学和电磁学性质及其相互耦合关系。利用一维磁流体力学计算程序 SSS-MHD<sup>[13]</sup> 对装置加载过程中各项参数的影响进行分析。

### 2.1 磁流体力学计算模型

SSS-MHD 程序可对材料动力学、反应流体动力学和磁流体力学进行多物理场、多介质、多组分和多连通区的一体化计算, 可实现真实驱动电路与负载样品构型的耦合计算。采用拉氏一维方程组的形式。

连续性方程:

$$v = r^n \frac{\partial r}{\partial M} \tag{1}$$

$$u = \frac{\partial r}{\partial t} \tag{2}$$

$$dM = \frac{r^n}{v} dr \tag{3}$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -r^n \frac{\partial}{\partial M} \left( \sigma + q + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) - \frac{nv\xi}{r} \tag{4}$$

$$\sigma = p + S_r \quad (5)$$

$$\xi = 2S_r + S_z \quad (6)$$

能量方程:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial M} [(\sigma + q)ur^n] + \kappa \frac{\partial}{\partial M} \left( r^n \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \eta v J^2 - \frac{1}{2} \frac{\partial u^2}{\partial t} \quad (7)$$

磁扩散方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (vB) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial M} \left( \frac{\eta}{v} r^{2n} \frac{\partial B}{\partial M} \right) \quad (8)$$

式中:  $r$ 、 $t$ 、 $M$  分别为欧拉空间坐标、时间坐标和拉格朗日质量坐标,  $u$  为径向或纵向速度,  $v$  为比容,  $\sigma$  为径向或纵向应力,  $p$  为静水压力(压强),  $e$  为比内能,  $T$  为温度,  $q$  为人工黏性压力(压强),  $B$  为磁场(磁感应强度、磁通量密度),  $J$  为电流(面)密度,  $\eta$  为电阻率,  $S_r$  和  $S_z$  为弹性应力偏量(下标表示分量方向),  $\xi$  为应力偏量的函数,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\kappa$  为热传导系数,  $n$  为维度指数(取值为 0 和 1 时, 分别代表平面和柱面的一维几何情形)。

在模拟计算中, 金属等材料的状态方程采用列表式数据库; 炸药材料的状态方程采用 HOM 模型<sup>[14]</sup>、爆轰反应采用 Forest Fire 方程<sup>[15]</sup>; 材料的电阻率采用 Burgess 模型<sup>[16]</sup> 描述; 材料的强度采用 SCG 修正模型<sup>[17]</sup> 描述。CJ-100 型装置简化的 MHD 计算模型如图 3 所示。

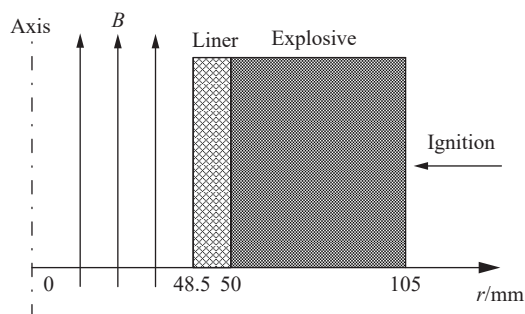


图 3 CJ-100 型装置的 MHD 计算模型

Fig. 3 MHD modeling of CJ-100 device

## 2.2 装置参数的影响

由于套筒的内爆时间显著小于磁场向套筒外的扩散时间, 因此套筒内部的磁通量  $\varphi = \pi r^2 B$  绝大部分能够被有效压缩, 磁场的放大系数为:

$$\gamma_M = \frac{B}{B_0} = \lambda \frac{r_0^2}{r^2} \quad (9)$$

式中:  $r$  是套筒内半径,  $\lambda = \varphi/\varphi_0$  是套筒内部剩余磁通量  $\varphi$  和初始的磁通量  $\varphi_0$  的比例系数。随着磁场不断增大, 套筒受到沿径向向外、阻碍其内爆收缩的磁压力  $p_B = B^2/(2\mu_0)$  也持续增强, 以至于套筒收缩到某个半径位置会停止向内收缩并开始回弹运动。这个特定的半径  $r_{\min}$  称为回转(反转)半径, 是 MC-1 装置的一项重要指标, 套筒内的磁场也在此处达到峰值。由式(9)可知, MC-1 装置能够获取的最终磁场值与初始磁场、磁通量系数和套筒最大面积压缩比  $\gamma_G = r_0^2/r_{\min}^2$  成正比例关系, 这 3 个参数各代表着一个 MC-1 装置主要的技术问题: 初始磁场值与脉冲电源及励磁线圈的参数相关; 磁通量系数与金属套筒的结构、材料以及内爆速度相关; 面积压缩比与炸药驱动能力、内爆对称性以及测试探针的尺寸相关。对于 CJ-100 型装置, 其炸药和套筒的参数均已固定, 因此讨论主要集中在初始磁场和样品靶构型上。

### 2.2.1 初始磁场的影响

图 4 是 SSS-MHD 程序计算的 CJ-100 型装置在不同初始磁场  $B_0$  下, 峰值压缩磁场  $B_p$  和回转半径  $r_{\min}$  的变化曲线。图 5 所示初始磁场  $B_0$  分别为 5、10 和 15 T 时的压缩磁场-时间曲线。从图 4 中可以看出, 峰值磁场大小与初始磁场成反比, 回转半径大小与初始磁场成正比。但需要指出的是, 虽然初始磁场越小得到的峰值磁场越大, 但磁场曲线的脉宽也越窄(如图 5); 同时, 套筒的回转半径也越小, 可能会干扰套筒轴心处的测量探针或样品靶, 因此实验中需要根据具体的指标要求进行全面考虑。

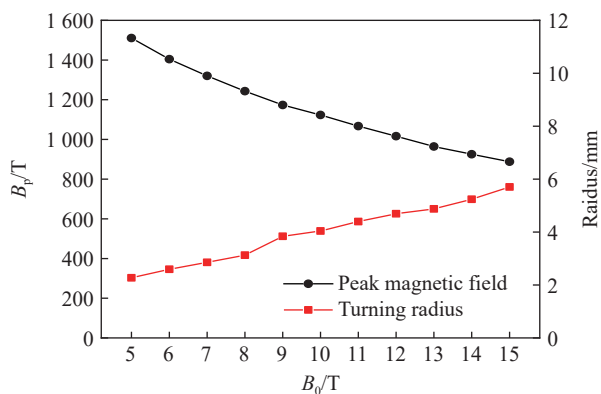


图 4 峰值压缩磁场和回转半径随初始磁场的变化曲线

Fig. 4 Peak magnetic field and turning radius curves with different initial magnetic fields

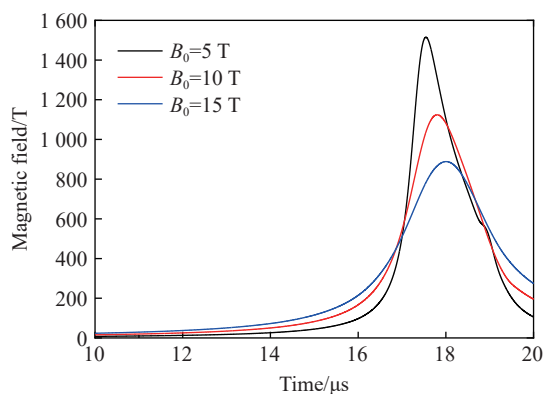


图 5 不同初始磁场情况下的磁场-时间曲线

Fig. 5 Magnetic field vs. time curves with different initial magnetic fields

### 2.2.2 样品靶构型的影响

装置的样品靶按照几何结构进行区分, 主要可分为实芯靶和夹层靶两类, 如图 6 所示。实芯靶一般分为内外两层, 内层为需要进行压缩加载的样品材料, 外层为驱动层。对于夹层靶, 若样品为初始气/液态的低密度材料, 则需采用 3 层结构。驱动层的设计是为了防止磁场在加载期间渗透进入样品层, 以保证样品加载始终处于相对纯粹的力学过程, 通常选用电阻率较低的铜作为驱动层材料。

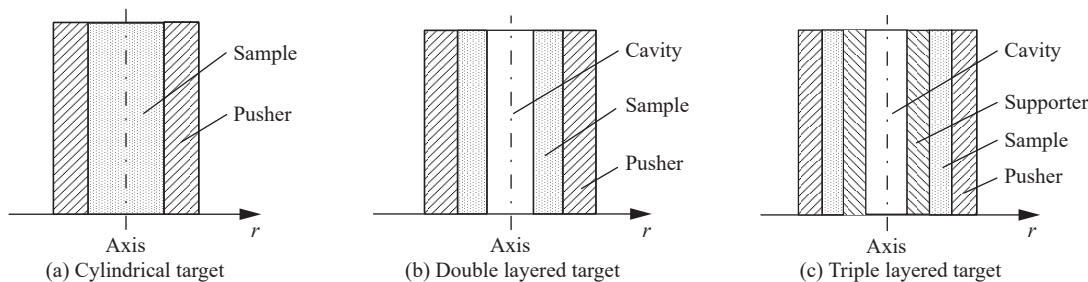


图 6 样品靶的结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of sample target

使用实芯靶需要配合闪光 X 射线照相等较为复杂的测量技术进行诊断, 方可获取相关实验数据, 而使用夹层靶则可采用 PDV 探针等光学测量方式, 获取样品靶内界面速度等信息, 进而反推样品中的压力值。使用 PDV 探针进行诊断的优势在于测量简单便捷、准确、成本低, 但放置在夹层样品靶轴心处的测速探针本身具有 1~2 mm 的半径, 导致样品靶内径小于此值后的数据无法获取。因此, 需要根据具体的实验需求, 设计符合条件的样品靶。

为了考察影响夹层靶中样品加载压力的主要参数, 对初始磁场值  $B_0$  分别为 5、10 T, 初始内半径  $r_{in}$  分别为 2、3 mm, 厚度  $H$  分别为 1、2 mm 的铜夹层靶(驱动层和样品材料均为铜)进行了计算, 夹层靶初始时刻厚度方向的中平面处的加载压力峰值如图 7 所示, 典型的样品靶各层面位置-时间曲线和加载压力-时间曲线如图 8 所示。为了体现测速探针的占位影响, 当样品靶的内半径缩小至 1 mm 时人为截止计算。

从图 7 可知, 在初始磁场  $B_0$ 、夹层靶初始内半径  $r_{in}$  和厚度  $H$  等 3 个参数的不同取值中,  $[B_0, r_{in}, H] = [5 \text{ T}, 3 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$  这一组参数求得的加载压力最大。从磁通量的角度来看, 相比于其他的参数组合, 该组参数对应初始条件下套筒空腔内的磁通量最小; 而当  $B_0$  相同时,  $[r_{in}, H] = [2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$  和  $[r_{in}, H] = [3 \text{ mm}, 1 \text{ mm}]$  对应的空腔磁通量相等, 它们的加载压力值也近似相等, 说明加载压力与初始空腔磁通量

在一定程度上也存在反比关系。这实际上是对前文中峰值磁场与初始磁场成反比这一结论的另一种表述: 初始磁场越小意味着初始磁通量也越小, 而相应的峰值磁场越高意味着磁压力也越高, 进而样品的加载压力越高。需说明的是, 过小的初始磁场/磁通量也会导致加载压力波形的脉宽变窄, 意味着压缩磁场进一步对靶管和样品材料的有效压缩时间越短、压缩不足, 并会导致样品材料的熵增/温升增大, 不利于提高准等熵压缩的压力和压缩度

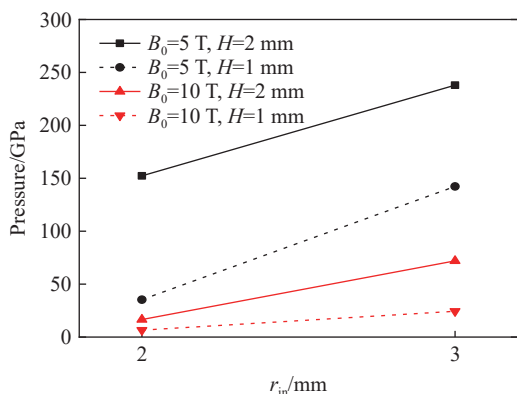


图 7 不同初始参数下铜夹层靶中的加载压力峰值  
Fig. 7 Peak loading pressure of Cu layered target with different initial parameters

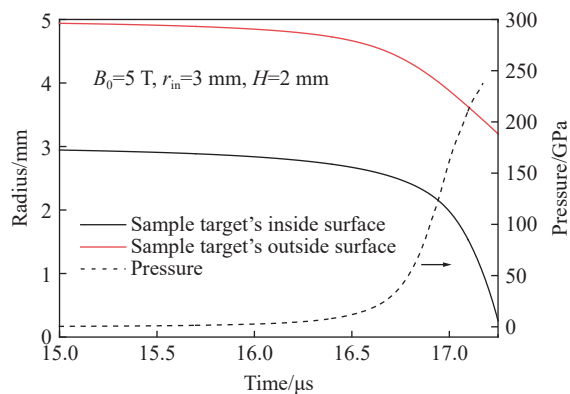


图 8 铜夹层靶的位置-时间曲线和压力-时间曲线  
Fig. 8 Position vs. time curve and loading pressure vs. time curve of Cu layered target

对于样品靶参数的设计, 除了要考虑前面讨论的磁通量问题, 还需要注意装置本身的一些限制, 如实验过程中套筒在内爆过程末期会因各种不稳定性发生结构失稳, 可能会导致套筒与样品靶之间的碰撞或磁击穿进而影响物理实验。因此应选取合适的样品靶各层的尺寸参数, 使压缩和诊断过程中尽量避免发生各种不稳定性现象, 或者使主要过程在这些现象之前完成。

### 3 纯铁的准等熵加载实验

为了开展纯铁材料的准等熵加载实验, 设计了图 9 所示的夹层样品靶: 初始内半径为 3 mm, 内侧样品层材料为 DT4 铁, 外侧驱动层材料为 TU1 铜, 铁和铜层的厚度均为 1 mm。CJ-100 型装置的初始磁场值设为 5.5 T, 空腔真空度为百 Pa 量级, 实验在常温状态下进行。

图 10 为样品靶自由面速度的实验测量曲线和模拟结果。其中实验速度是由 PDV 探针测量得到的, 速度峰值为 6.43 km/s。模拟速度与实测速度曲线的整体符合程度较好, 但在速度大于 5 km/s 的部分有所偏差(速度为 5 km/s 之前的平均相对误差为 2.95%, 之后的平均相对误差为 13.8%)。造成后期计算速度偏高的主要原因是模拟计算使用的材料物性参数与真实模型存在差异。在 16.75 μs 时速度曲线出现了台阶式波动, 结合下文 MHD 计算的结果分析可知, 此波动应是由铁材料的  $\alpha$ - $\varepsilon$  相变引起的。

图 11 所示为 17.1 μs(实验测量曲线的终时刻)时, 样品靶中静水压力、磁压力和材料密度在半径方向上的空间分布情况。铁样品中的静水压力从自由面位置向铁/铜界面位置逐渐升高, 在铁/铜界面处达到了 206 GPa 的准等熵加载

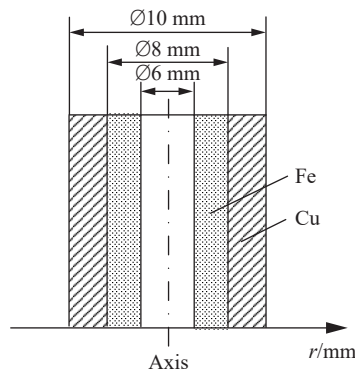


图 9 铁/铜夹层样品靶结构示意图  
Fig. 9 Structure diagram of Fe/Cu layered target

压力峰值。从磁压力的空间分布可以看出, 空腔磁场向样品靶中的扩散深度仅达到铜驱动层厚度的一半, 尚未进入到铁样品材料中, 表明铁样品未受到磁场和焦耳热的影响, 始终处于纯力学加载过程。

图 12 所示为实验测量时段内(0~17.1 μs), 样品靶中位于铁/铜界面位置附近的铁材料中的压力-比容曲线。图中同时绘制了铁的冲击雨贡钮数据和理论等熵线, 通过对比可知计算  $p-v$  曲线与理论等熵线整体上基本重合, 说明内爆磁压缩加载实验过程具有较高的等熵程度, 而且与冲击压缩有明显差异。

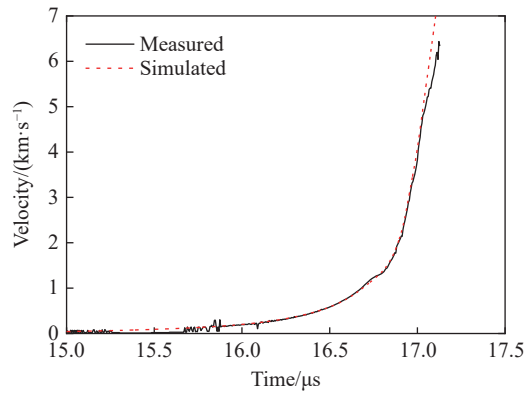


图 10 样品靶自由面速度的实验曲线和计算曲线  
Fig. 10 Measured and simulated free-surface velocity curves of sample target

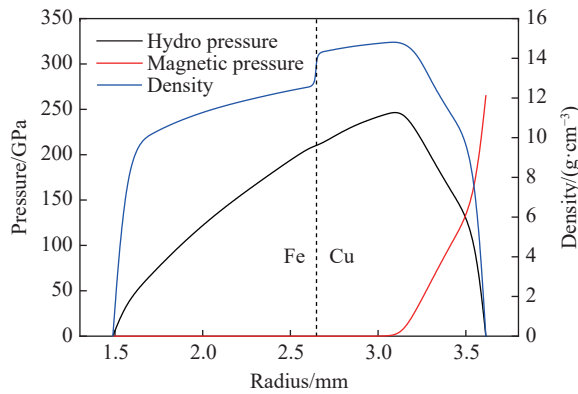


图 11 在 17.1 μs 时样品靶中静水压力、磁压力和材料密度的空间分布  
Fig. 11 Spatial distributions of hydro pressure, magnetic pressure and density in the sample target at 17.1 μs

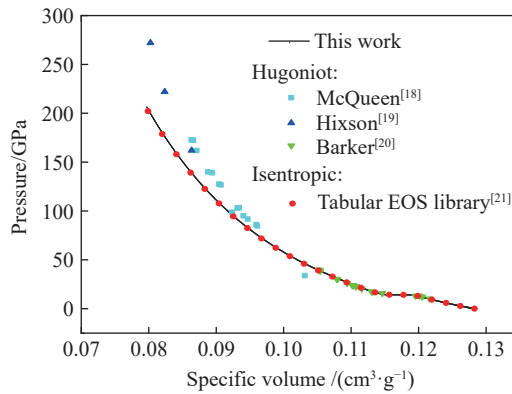


图 12 铁材料的压力-比容变化曲线  
Fig. 12 Pressure vs. specific volume curve in iron at Fe/Cu interface

图 12 中  $p-v$  曲线在压力为 14 GPa 附近出现明显的台阶, 结合图 13 所示的铁材料相图和 SSS-MHD 程序计算的铜/铁界面内侧铁材料的温度-压力 ( $T-p$ ) 曲线, 可知该  $p-v$  曲线的台阶是铁材料从体心立方 (bcc) $\alpha$  相向六角密排 (hcp) $\epsilon$  相转变的宏观反映。图 14 是铜/铁界面内侧铁材料中静水压力-时间计算曲线, 曲线在 16.56 μs 时因相变发生了转折。材料相变过程中比容变化较小, 压力基本保持不变, 因此会在压力-时间曲线中形成明显的台阶。以铁材料常态下 5.9 km/s 的纵波声速进行粗略估计, 铜/铁界面位置

处因相变引起的速度变化将在约  $\frac{1 \text{ mm}}{5.9 \text{ km/s}} = 0.17 \mu\text{s}$  后, 即约  $16.73 \mu\text{s}$  抵达样品靶自由面, 可见图 10 中样品自由面速度曲线在  $16.75 \mu\text{s}$  时的台阶, 应是铁材料  $\alpha$ - $\varepsilon$  相变的反映。需要说明的是, 图 10 和图 12 的曲线能够反映出铁材料的  $\alpha$ - $\varepsilon$  相变性质, 主要原因是计算中采用了描述该性质的列表式状态方程数据库。

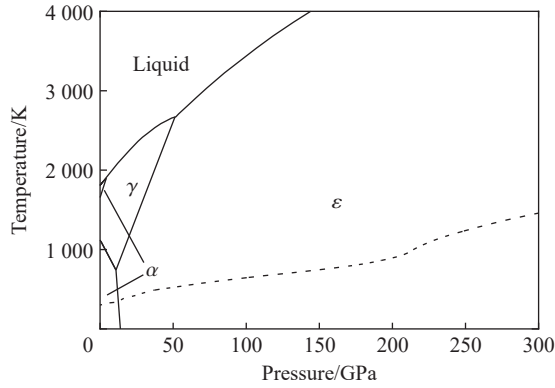


图 13 铁的相图<sup>[21]</sup>和 SSS-MHD 程序计算的  
温度-压力加载路径

Fig. 13 Phase diagram of iron<sup>[21]</sup> and temperature vs. pressure  
curve calculated by SSS-MHD

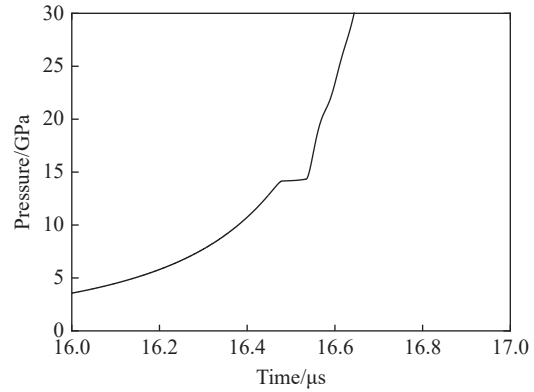


图 14 铜/铁界面内侧处铁材料的静水  
压力-时间曲线

Fig. 14 Hydrostatic pressure vs. time curve of iron  
at inner side of copper/iron interface

## 4 结 论

通过对 CJ-100 型装置内爆磁压缩过程进行的模拟和分析, 以及在 CJ-100 型装置上开展的准等熵加载验证实验, 获得了以下结论:

(1) 装置能获取的理想峰值磁场与初始磁场的数值成反比关系, 夹层靶构型的加载压力与套筒空腔的初始磁场/磁通量在一定程度上也成反比关系, 但过小的初始磁场/磁通量会缩短加载压力波形的脉宽, 不利于准等熵压缩的进行。

(2) 在 DT4 铁材料的准等熵加载实验中, 获得了  $6.43 \text{ km/s}$  的样品靶自由面速度和  $206 \text{ GPa}$  的准等熵加载压力。铁材料的计算压力-比容曲线与理论等熵线基本重合, 表明内爆磁压缩加载过程具有较高的等熵程度。

(3) 一维磁流体程序 SSS-MHD 的模拟结果与实验数据符合较好, 说明相关建模过程和材料参数的选取是合理的。

感谢全延锦、唐小松、李建明、医学武等老师在实验运行和测试工作中给予的巨大帮助!

## 参考文献:

- [1] ALTGILBERS L L, BROWN M D J, GRISHNAEV I, 等. 磁通量压缩发生器 [M]. 孙承纬, 周之奎, 译. 北京: 国防工业出版社, 2008: 1-5.
- [2] 谷卓伟, 罗浩, 张恒第, 等. 炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 170701. DOI: 10.7498/aps.62.170701.  
GU Z W, LUO H, ZHANG H D, et al. Experimental research on the technique of magnetic flux compression by explosive cylindrical implosion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(17): 170701. DOI: 10.7498/aps.62.170701.
- [3] SAKHAROV A D, LYUDAEV R Z, SMIRNOV E N, et al. Magnetic cumulation [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1991, 34(5): 385-386. DOI: 10.3367/UFNr.0161.199105f.0047.
- [4] BOYKO B A, BYKOV A I, DOLOTENKO M I, et al. More than 20 MG magnetic field generation in the cascade magnetocumulative MC-1 generator[M]// *Megagauss Magnetic Field Generation, its Application to Science and Ultra-High Pulsed-Power Technology*. Tallahassee: World Scientific Publishing, 2004: 61-66. DOI: 10.1142/9789812702517\_0009.



- [5] FOWLER C M, GARN W B, CAIRD R S. Production of very high magnetic fields by implosion [J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(3): 588–594. DOI: 10.1063/1.1735633.
- [6] HAWKE R S, DUERRE D E, HUEBEL J G, et al. Method of isentropically compressing materials to several megabars [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(6): 2734–2741. DOI: 10.1063/1.1661586.
- [7] HERLACH F, KNOEPFEL H. Megagauss fields generated in explosive - driven flux compression devices [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1965, 36(8): 1088–1095. DOI: 10.1063/1.1719809.
- [8] BYKOV A I, DOLOTENKO M I, KOLOKOL'CHIKOV N P, et al. The cascade magnetocumulative generator of ultrahigh magnetic fields: a reliable tool for megagauss physics [J]. *Physica B:Condensed Matter*, 1996, 216(3/4): 215–217. DOI: 10.1016/0921-4526(95)00475-0.
- [9] 陈学印, 龚兴根, 陈英石, 等. 爆炸磁通量压缩装置的实验研究 [A]. 王淦昌论文选集, 1987: 151–153.
- [10] ZHOU Z Y, GU Z W, LUO H, et al. A compact explosive-driven flux compression generator for reproducibly generating multimegagauss fields [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3279–3283. DOI: 10.1109/TPS.2018.2794761.
- [11] WENG J D, TAN H, HU S L, et al. New all-fiber velocimeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(9): 093301. DOI: 10.1063/1.2008989.
- [12] 畅里华, 汪伟, 谷卓伟, 等. 柱面内爆磁通量压缩超高速摄影技术研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1032001. DOI: 10.3788/AOS201535.1032001.
- CHANG L H, WANG W, GU Z W, et al. Study on magnetic flux compression by cylindrical implosion using ultrahigh-speed photography technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1032001. DOI: 10.3788/AOS201535.1032001.
- [13] 赵继波, 孙承伟, 谷卓伟, 等. 爆轰驱动固体套筒压缩磁场计算及准等熵过程分析 [J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 080701. DOI: 10.7498/aps.64.080701.
- ZHAO J B, SUN C W, GU Z W, et al. Magneto-hydrodynamic calculation of magnetic flux compression with explosion driven solid liners and analysis of quasi-isentropic process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 080701. DOI: 10.7498/aps.64.080701.
- [14] MADER C L. Numerical modeling of explosives and propellants [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008: 384–387.
- [15] 孙承伟. 一维冲击波和爆轰波计算程序 SSS [J]. *计算物理*, 1986, 3(2): 142–154. DOI: 10.19596/j.cnki.1001-246x.1986.02.002.
- SUN C W. SSS: a code for computing one dimensional shock and detonation wave propagation [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1986, 3(2): 142–154. DOI: 10.19596/j.cnki.1001-246x.1986.02.002.
- [16] BURGESS T J. Electrical resistivity model of metals [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Megagauss Magnetic-Field Generation and Related Topics. Santa: Plenum Press, 1986: 307–316.
- [17] 李茂生, 陈栋泉. 高温高压下材料的本构模型 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(1): 24–31. DOI: 10.11858/gywlb.2001.01.004.
- LI M S, CHEN D Q. A constitutive model for materials under high-temperature and pressure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(1): 24–31. DOI: 10.11858/gywlb.2001.01.004.
- [18] MCQUEEN R G, MARSH S P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock-wave measurements to two megabars [J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(7): 1253–1269. DOI: 10.1063/1.1735815.
- [19] HIXSON R S, FRITZ J N. Shock compression of iron [M]// SCHMIDT S C, DICK R D, FORBES J W, et al. Shock Compression of Condensed Matter, 1991. Amsterdam: North-Holland, 1992: 69–70.
- [20] BARKER L M, HOLLENBACH R E. Shock wave study of the  $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$  phase transition in iron [J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(11): 4872–4887. DOI: 10.1063/1.1663148.
- [21] SANO T, MORI H, SAKATA O, et al. Femtosecond laser driven shock synthesis of the high-pressure phase of iron [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 247: 571–576. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.050.

(责任编辑 王易难)