



磁驱动固体套筒内爆实验研究国内进展

孙奇志^{1,2,3}, 章征伟^{1,2}, 张绍龙¹, 贾月松^{1,2,3}, 沈慧婷^{1,2*}, 秦卫东¹, 张南川^{1,3}, 周荣国¹, 刘伟¹, 赵小明¹, 王贵林¹, 卫兵^{1,3}, 张朝辉^{1,3}

1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900

2. 冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室, 绵阳 621900

3. 中国工程物理研究院脉冲功率科学与技术重点实验室, 绵阳 621900

*联系人, E-mail: shenht163@163.com

收稿日期: 2025-06-26; 接受日期: 2025-09-19; 网络出版日期: 2025-11-07

冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室基金(编号: JCKYS2024212110, 2024CXPTGFJJ06410)和中国工程物理研究院创新发展基金(编号: CXKS20240003)资助

摘要 磁驱动固体套筒内爆是实验室内实现高能量密度状态的一种主要手段, 在流体动力学、武器物理、聚变能源等领域有重要应用. 中国工程物理研究院流体物理研究所建立了FP-1/2固体套筒内爆加载平台, 结合精密测试诊断系统, 开展了多种类复杂构型内爆实验研究, 在相关重大问题及应用研究方面发挥了重要作用. 本文回顾了磁驱动固体套筒内爆平台建设及现状, 重点综述了近几年基于FP-1/2装置开展的物理应用实验及取得的认识. 通过装置-负载靶匹配及优化设计, 在FP装置上实现了发次间电流波形分散性<1%, 内爆速度波形分散性<2%, 撞靶角向时间偏差小于20 ns, 证明加载平台具备良好的同步性、重复性和内爆对称性, 这是开展高精密物理实验的基础. 基于FP装置, 驱动数克至数十克的金属套筒分别实现1–7 km/s内爆速度, 并成功应用于复杂构型气区流场、柱面构型RM/RT界面不稳定性、柱面充气微喷混合及气粒两相流等实验研究, 获取了丰富的实验数据, 提升了对相关物理问题的深入认识. 展望未来, 需要以实际工程需求为牵引, 进一步提升加载及高精密诊断能力, 开发创新实验技术, 获取高精密批量化实验数据, 为物理模型及二维/三维代码校核提供数据支撑.

关键词 磁流体力学, 脉冲功率技术, 冲击动力学, 高能量密度物理, 固体套筒

PACS: 52.30.Cv, 84.70.+p, 47.80.Cb, 47.20.Ma, 47.40.-x

1 引言

磁驱动(也称电磁加载)是指利用高功率脉冲装置产生的强电流与其自身感应强磁场相互作用产生的电磁力, 强烈压缩或高速驱动载流金属(套筒/平板)样品,

在样品中产生高能量密度状态(高压、高温、高密度等), 用以研究样品的流体动力学现象或极端条件下材料物性的一种加载方式. 磁驱动与爆轰、激光驱动相互补充, 已经成为武器物理实验室研究的三大重要加载手段, 其中电磁驱动内爆(电磁内爆)是磁驱动的主

引用格式: 孙奇志, 章征伟, 张绍龙, 等. 磁驱动固体套筒内爆实验研究国内进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 104701

Sun Q Z, Zhang Z W, Zhang S L, et al. Research progress in experimental studies of magnetically driven solid liner implosion in China (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 104701, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0285](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0285)

要应用之一. 电磁内爆有两种主要类型: 一是较大质量(数十克至数千克)、较慢速度(数百米/秒至数十千米/秒)的固体套筒内爆, 这里“固体”是指内爆过程中样品仍能维持固体状态的密度; 二是较小质量(数毫克至数百毫克)、较快速度(数十至数百千米/秒)的等离子体内爆(比如金属丝阵Z箍缩内爆)^[1]. 这两种内爆形式的状态分别处于Rosen^[2]指出的两个高能量密度范围, 并对应于武器物理实验室分解模拟研究的两条主线. 通常, 对于上升沿在几十到几百纳秒的快脉冲装置, 负载构型多采用金属丝阵, 电流流经并烧蚀金属丝, 由丝阵汽化、等离子体化并箍缩内爆产生的强X射线辐射源, 主要用于辐射不透明度、辐射输运和烧蚀、高温稠密等离子体物理及天体物理等研究^[3]. 而在数微秒时间尺度的长脉冲装置加载下, 负载构型多采用尺寸(半径通常为厘米至分米, 厚度为数毫米)、质量更大的金属套筒, 由于线电流密度相对较小, 金属套筒在内爆过程中汽化、等离子体化并不完整, 大部分质量仍然接近固体状态密度, 主要用于开展内爆流体动力学、极端条件下材料动力学及物理性质、复杂构型气粒流场作用和强磁场物理等内爆物理研究^[4]. 两种加载类型及对应的典型负载构型见图1.

磁驱动固体套筒内爆实验的负载通常由两端与电

极相连的均匀金属套筒组成, 一般会在内部放置同轴的金属靶筒, 并填充气体等压缩介质. 当加载电流沿轴向流过金属套筒时, 电磁感应有角向磁场, 在洛伦兹力的作用下, 金属套筒将沿径向内爆. 通过冲击靶筒或准等熵压缩内部物质, 产生满足物理实验需要的加卸载条件和动力学过程. 相比于爆轰和激光驱动, 磁驱动固体套筒内爆具有鲜明的特色: (1) 高重复性、可靠性和对称性的柱形内爆, 有助于获得用于验证物理模型和代码的高精度数据; (2) 微秒时间尺度和分米空间尺度, 与实际工程应用相一致; (3) 由于电磁波以光速传播, 相比于爆轰驱动(其样品加载速度上限受限于爆轰波传播速度), 磁驱动方法可以实现更高的样品加载速度; (4) 通过改变脉冲电源充电电压, 可以非常方便地实现套筒内爆速度(即样品中冲击压力和温度)的可调可控. 正是由于上述特色, 磁驱动固体套筒内爆在流体动力学与材料高压物态方程研究方面, 日益显示出独特的、不可替代的作用, 在电磁驱动技术体系中已成为支撑基础科学探索和武器物理研究的重要技术方向. 事实上, Turchi等人^[5]在1973年首次提出电磁内爆的概念, 其目的就是利用金属套筒压缩等离子体产生聚变. 随着20世纪90年代实验室模拟兴起, 电磁内爆成为研究内爆动力学现象和材料动态特性的

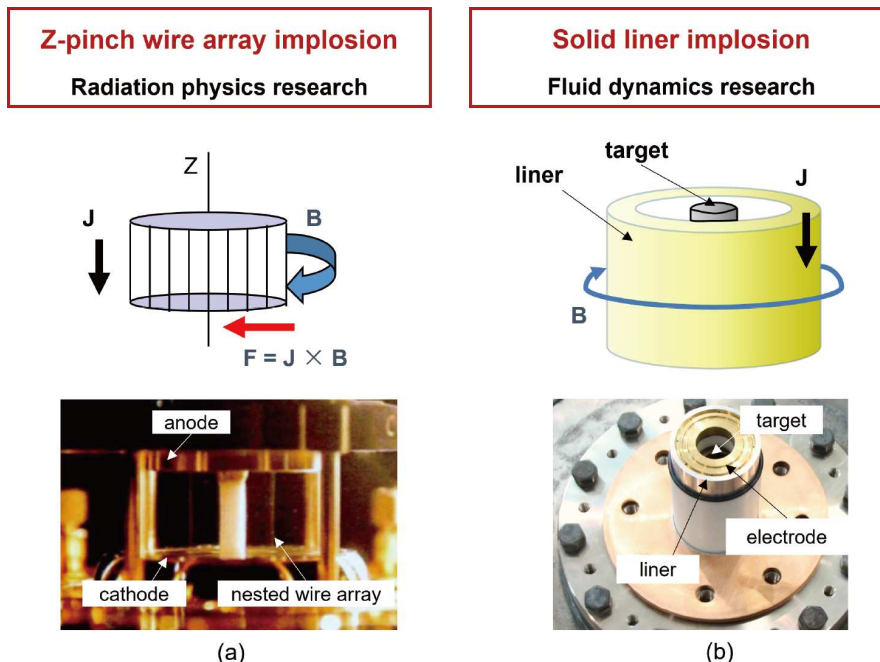


图 1 (网络版彩图)负载构型对比. (a) 丝阵内爆; (b) 固体套筒内爆

Figure 1 (Color online) The comparison of load configuration. (a) Wire array; (b) solid liner.

主要驱动方式之一^[6]. 时至今日, 电磁内爆仍是最有效的柱面套筒均匀汇聚加载手段, 美国三大核武器实验室, 即洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)、劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)、圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL), 与美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)、全俄实验物理研究院(All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, 俄文 VNIIEF)等研究单位均持续开展固体套筒内爆及相关技术应用研究.

根据所采用初级能源的不同, 用于固体套筒内爆的脉冲功率装置主要分为两种, 包括爆磁压缩发生器(Explosive Magnetic Generator, EMG)和电容器组脉冲功率装置. 前者利用炸药释放的能量压缩空腔中的初始磁通量, 通过磁场压缩及电磁感应原理把炸药化学能转换为电磁能, 以实现脉冲大电流输出. 爆磁压缩发生器的体积重量相对较小、储能密度高, 输出电流可达到百兆安量级^[7], 但单次实验成本较高且具有破坏性. 而后者主要以多路高功率电容器组储能, 由快速闭合开关导通放电, 经过快响应低电感传输线汇流至套筒负载. 由于其工作电压低、可重复使用、实验成本较低, 近年来各国持续投入相关研究, 电容器组脉冲功率装置的功率、能量不断得到提升, 并向紧

凑型、可移动式发展(图2).

自20世纪90年代以来, 美国、俄罗斯等主要国家实验室建设了一系列用于固体套筒内爆研究的电磁驱动装置, 发展了满足多物理需求的实验平台. LANL实验室首先建造了最大储能1.5 MJ、峰值电流5.8 MA的Pegasus I装置^[8], 在此基础上升级建成Pegasus II装置^[9], 其最大储能为4.3 MJ, 放电电流为12–15 MA. 2000年前后建造的Atlas装置储能为23 MJ, 峰值电流高达30 MA, 能够将10 cm直径的金属套筒加速至20 km/s, 其主要用于美国“地面模拟实验(Above Ground Experiments, AGEX)计划”中的重金属固体套筒电磁内爆实验^[10–12]. Phelix装置^[13]作为一种车载可移动式驱动器, 通过与质子照相(Proton Radiography, pRad)相结合^[14], 可在一次实验中获得多幅轴向高精度数据. 在爆炸磁压缩发生器方面, 俄罗斯VNIIEF研制的圆盘发生器(Disk Explosive Magnetic Generator, DEMG)的最大电流可达400 MA^[15], 可以把250和1 g柱形铝套筒分别加速到15和45 km/s, 其能量密度是高能炸药的200倍^[16], 这是目前非破坏性电容器组脉冲功率装置难以达到的极端加载条件. 国外武器实验室利用磁驱动固体套筒内爆开展了大量相关高能量密度物理实验研究. 在材料动态特性方面, 主要开展了单次、多次冲击压缩及等熵压缩条件下高压物态方程、大应变及高应变率下的本构关系测量、多界面动态摩擦、

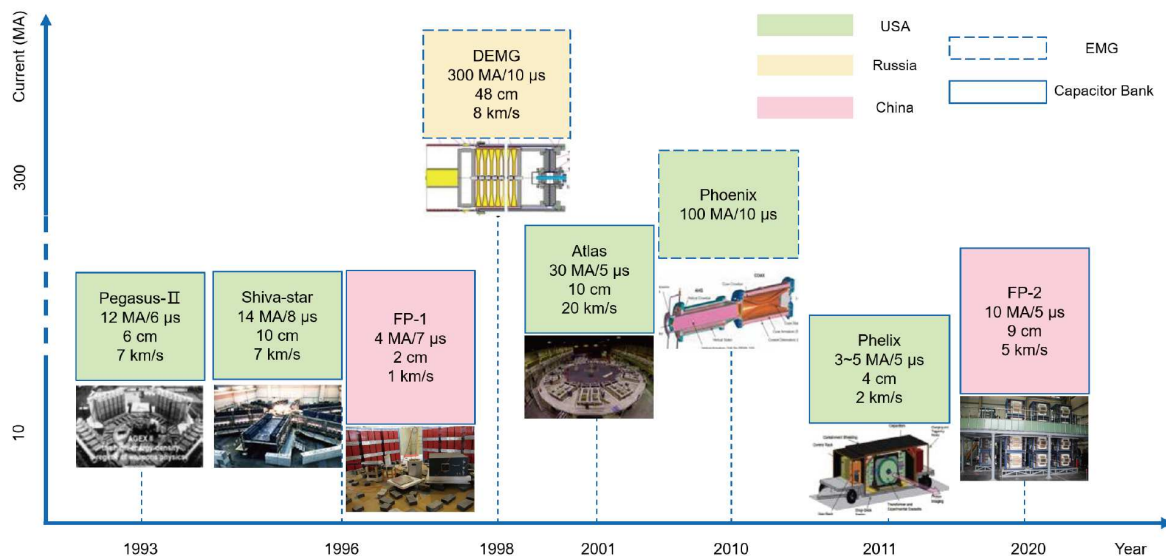


图 2 (网络版彩图)国内外用于固体套筒内爆的长脉冲装置

Figure 2 (Color online) The long pulsed power devices for solid liner implosion around the world.

材料损伤层裂及汇聚压缩愈合等研究^[17-19], 代表性实验包括LANL和VNIIEF联合开展的R-damage系列层裂实验和RHSR强度系列实验、PHELIX装置开展的CREN校核状态方程实验、Pegasus装置上进行的表面微喷射实验. 在复杂流体动力学实验方面, 主要开展了柱面汇聚冲击波传播、流体界面不稳定性、气粒两相流及混合、湍流混合等研究, 代表性实验有Pegasus装置上开展的RTMIX界面不稳定性系列实验^[20]、Atlas和PHELIX装置上开展的DSH系列实验^[21,22]、研究汇聚构型下气粒两相混合演化过程等. 在基础科学研究方面, 利用固体套筒内爆压缩, 主要开展了强耦合等离子体性质^[23,24]、强磁场物理、聚变新途径探索^[25-28]等研究.

国内开展磁驱动固体套筒内爆技术研究起步较晚. 在加载装置建设方面, 中国工程物理研究院流体物理研究所于1996年建成了FP-1装置, 是国内第一台专门用于磁驱动固体套筒内爆的脉冲功率装置^[29]. 为了提高第一代装置的驱动能力, 2019年Sun等人^[30]新建了电流峰值10 MA、上升沿约5.5 μs 的第二代电容器组长脉冲装置FP-2, 用于开展更高加载速度和压力范围的物理实验研究. FP-1装置建成后, 杨礼兵等人^[29,31]依托该装置开展了固体套筒内爆动力学的实验研究, 也发展了相应的内爆套筒负载结构设计和光学诊断方法. 同期, 廖海东等人^[32]、刘启泰等人^[33]建立了固体套筒内爆一维数值模拟方法, 基于SSS程序代码的相关方法在文献^[34]中得到了系统总结. 早期在FP-1装置上研究重点围绕套筒内爆行为特性、动力学屈曲问题展开, 宋盛义等人^[35,36]建立了电磁驱动套筒内爆屈曲的数值模拟方法并开展了初步实验, 观察总结了套筒内爆动力学屈曲现象. 在物理实验方面, 由于当时测试诊断手段欠缺, 仅在2002年杨礼兵等人^[37]通过可见光高速分幅成像观察了内爆冲击铝靶产生微喷射情况. 此后, 由于物理牵引不明确, 套筒内爆均匀性、重复性难以保障, 加之配套测试诊断手段与精密物理实验的要求存在较大差距, 固体套筒内爆研究曾经历一段沉寂期. 2016年章征伟等人^[38]分析了材料强度对套筒内爆过程的影响, 进一步提出了屈服线电流密度概念^[39], 建立了避免发生动力学屈曲的套筒设计方法. 2020年章征伟^[4]编制了一维弹塑性磁流体动力学程序代码SOL1D, 对固体套筒及靶结构进行了优化设计, 通过配套建立的轴向/径向X光、激光阴影/纹影

照相及光子多普勒测速(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)技术, 用大量实验证实了固体套筒内爆的高均匀性、高重复性和高可靠性. 随后Zhang等人^[40]开展了强度介质内爆Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性发展研究, 再次验证了套筒内爆的均匀性和对称性. 近年来, 在国内高能量密度物理研究需求的牵引下, 依托FP-1/2装置开展的精密物理实验研究, 主要涵盖复杂构型汇聚压缩及流场演化、气粒两相流、界面不稳定性等关键方向. 本文首先简要阐述FP-1/2装置的基本情况及配套测试诊断技术, 其次介绍内爆动力学实验的设计方法及定标结果, 最后综述近年来相关物理实验的研究进展, 并从加载平台升级、测试诊断完善及物理实验拓展等维度提出未来展望.

2 磁驱动固体套筒内爆实验平台

磁驱动固体套筒内爆实验平台通常由大电流脉冲功率装置及附属设施、配套的精密测试诊断系统构成, 能够为各类复杂构型内爆实验提供高可靠、高重复、高均匀加载手段与精密测试能力. 为了满足大尺寸套筒内爆需求, 脉冲功率装置的输出电流通常在数兆安至数十兆安之间, 其电流波形1/4周期一般需控制为数微秒, 套筒内爆速度可达到数千米/秒至数十千米/秒, 相应的加载压力为数十吉帕至数太帕. 针对上述超高能量密度状态与超快瞬态过程, 发展建立配套的多参量测试诊断系统, 对获取精密实验数据至关重要.

2.1 FP-1/2脉冲功率装置及放电特性

面向汇聚构型的高能量密度物理实验研究需求背景, 中国工程物理研究院流体物理研究所于1996年建成了国内第一台柱面套筒电磁内爆脉冲功率装置, 即FP-1装置(图3). 其由216台脉冲电容器串并混合连接构成一个单级Marx电容器组, 最大储能为1.08 MJ, 负载最大输出电流4 MA, 上升沿约7 μs ^[29,31,37]. 2012年底, 主回路放电开关系统由原来的12路爆炸开关升级成12路气体轨道开关, 导通状态用光纤探头及光电转换模块实时监控, 12路开关导通时间分散性由1.5 μs 提升到100 ns, 大幅度改善了装置放电重复性和可靠性. 为了进一步提高装置驱动能力, 实现更高速度和压力范围的加载条件以开展相应需求的物理实验, 流体物理研究所于2019年组建了电流峰值10 MA、上升沿约

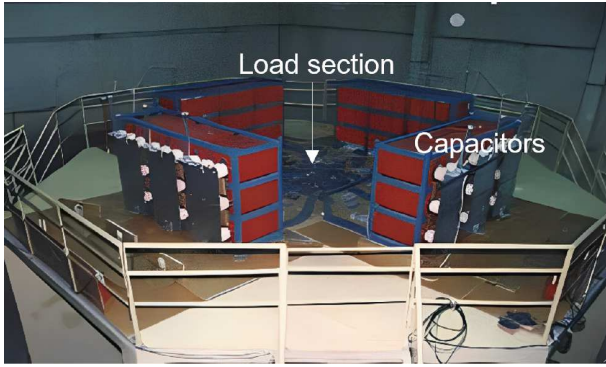


图 3 (网络版彩图) FP-1装置结构布局
Figure 3 (Color online) The layout of FP-1 facility.

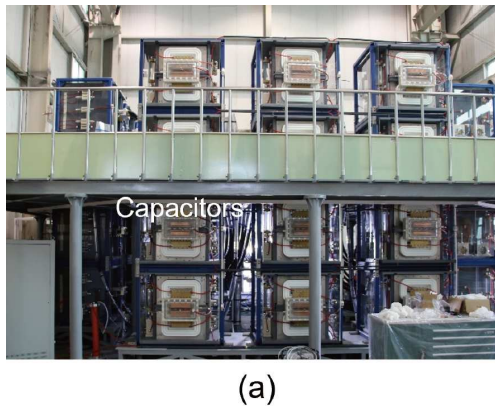
5.5 μs 的第二代电容器组长脉冲装置FP-2, 最大储能能达到3.46 MJ(图4)^[30].

FP-2装置主机采用48个模块(单级Marx模块)并联, 由192根低阻抗高压同轴电缆传输、经4块三角形传输板汇流至中心靶区. 整体采用模块化设计思路, 四个模块堆叠为一个主机分支, 靶区中心四周对称分布12个分支. 各模块之间实现独立安装与调试, 便于检修维护. FP-2装置采用的单路模块由2台额定电压60 kV、电容量20 μF 的电容器和1个大电流轨道开关组成, 并在模块内集成了接地开关、充电/触发电阻、单向导通二极管、支撑框架、绝缘垫层等附属配件. FP-2装置主机充电系统由两个双极性恒流充电装置组成, 额定充电电压 ± 60 kV, 额定充电电流500 mA, 两台总功率120 kW. 48个模块中的48个轨道开关采用一台多级Marx发生器进行触发, 其最大输出电压200 kV, 脉冲上升前沿20 ns. 多级Marx发生器共有6路高压脉冲输

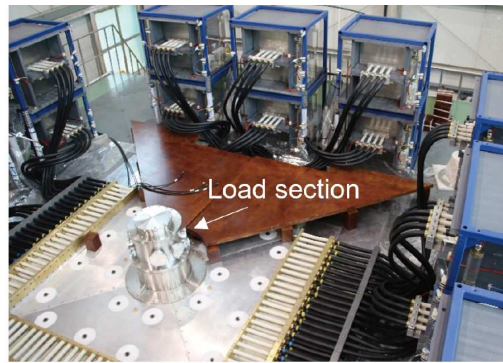
出, 每路输出通过并联高压电缆分别引至8个轨道开关的触发电极, 实现对8个轨道开关的同步触发. 当装置主机充电就绪, 触发系统通过延时同步机控制, 使48个轨道开关同步闭合导通, 以保障导通电流幅值、周期等参数的稳定性和可靠性. 图5展示了采用10 nH短路负载情况下, FP-2装置在不同的充电电压时放电电流定标结果及发次间电流波形分散性检测结果. 得益于触发系统良好的同步性与脉冲功率装置的可靠性, FP-2装置不同发次间放电电流波形的分散性(定义为不同发次电流的差值与其平均幅值的百分比)大部分时间可控制在1%以内, 而且随充电电压的变化, FP-2装置放电电流幅值可在3–10 MA之间调节, 高重复性和可控可调性便于开展后续的物理实验.

2.2 测试诊断布局

内爆过程需要直接测试诊断的基本参量通常包括内爆形貌及对称性、内爆速度、密度分布、气体激波过程等. 如前所述, 与传统流体力学、固体力学实验及测量相比, 磁驱动内爆过程能量密度更高, 破坏性更强, 需要在做好防护的基础上尽量提高精密诊断能力. 同时, 磁驱动内爆也是一个超快瞬态过程, 比如内爆时间同步性偏差大约在10 ns量级, 对诊断系统时序控制要求非常高. 根据物理实验需求, 结合装置的负载区设计, 在FP-1/2平台上建立了轴向/径向X光照相、轴向激光阴影/纹影成像及激光PDV测速等诊断系统. 利用这些诊断系统, 可开展序列化的冲击、准等熵压缩及内爆流体动力学实验研究. 此外, 当FP-1/2装置运行时, 固体套筒内爆聚心会在轴向两端产生高速、高密



(a)



(b)

图 4 (网络版彩图) (a) FP-2装置侧面照; (b) 汇流及负载区
Figure 4 (Color online) (a) The side photo of the FP-2 facility; (b) the transmitting and load region.

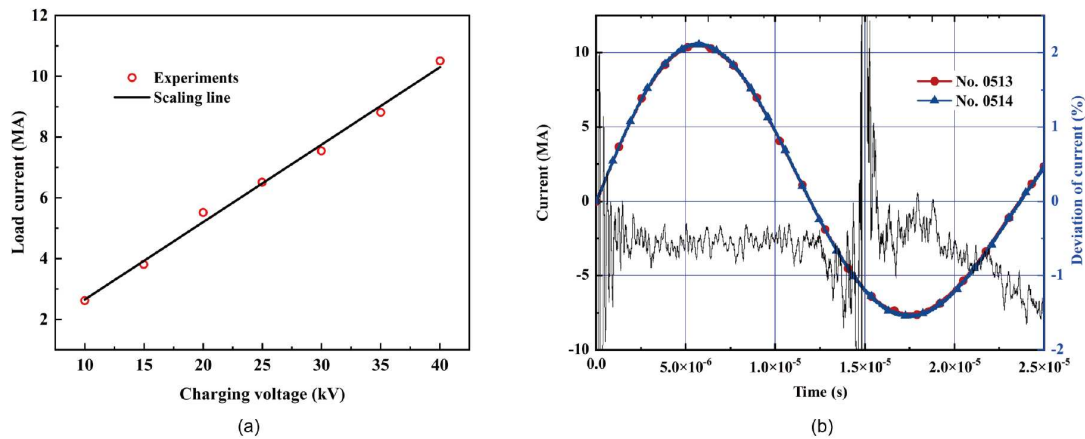


图 5 (网络版彩图) (a) FP-2装置不同充电电压下放电电流定标; (b) ± 40 kV下不同发次放电电流及其分散性
Figure 5 (Color online) (a) The scaling tests of current of the FP-2 facility at various charging voltages; (b) the comparison of current waveforms and the shot-to-shot deviation in case of charging voltage ± 40 kV.

度射流, 开展物理实验时需要在轴向对测试诊断设备进行加固防护, 以避免高速射流对设备造成的冲击破坏。

FP-1/2平台配置的X光机管电压为450 kV, 焦斑直径 ≤ 1 mm. 轴向两端用铝板防护, 总厚度21 mm(X光成像系统布局示意图见图6(a)). 采用转换屏和CCD相机构成的X光相机, 摄影视场 ≥ 150 mm $\times$ 150 mm, 空间分辨率 ≥ 1 lp/mm. X射线径向/轴向穿透套筒和负载靶, 可以获取不同时刻套筒和负载靶的内部结构图像, 清晰呈现套筒内爆时的变形、汇聚过程, 以及与靶碰撞瞬间及后期的状态(图6(b)). 通过对比不同时刻的图像, 测量分析套筒的位移、内爆速度以及与靶碰撞的时间范围, 可为研究套筒内爆动力学提供关键数据. 由于不同密度和原子序数的物质对X射线的吸收和散射程度不同, 通过X射线图像的灰度值变化能够应用于材料特性及界面不稳定性等物理实验研究中, 如分辨出材料内部产生层裂的位置及扩展方向; 以高时空分辨率捕捉到材料表面在冲击加载等作用下界面扰动、微喷产生的瞬间, 直观呈现不同时刻微喷的形态与混合层的形成, 并进一步结合图像处理分析技术计算出微喷的速度分布及扩展范围。

对于气区复杂流场结构及其与微喷物质相互作用问题, 由于激光具有高亮度、方向性好和相干性强的特点, 结合多分幅高速摄影技术, 可以获取连续的微喷物及气区流场随时间的演变过程, 有助于理解气区流场对微喷物速度的影响机制、气区流场因微喷引起

的密度扰动以及两者间相互作用的界面动态信息. 在FP-1/2装置上, 采用背光源成像方式搭建激光照相系统(系统布局见图7(a)). 通过两组45°平面光学反射镜, 将平台底端的平行背光源穿过靶内气区, 引入分幅相机中, 能够获得清晰且稳定的被测物图像. 其中激光光源为输出功率20 W的连续激光光源, 相机为时间间隔连续可调的8分幅可见光相机. 在分幅相机前端安置光学针孔(称为纹影成像), 系统对气体折射率, 即气体密度梯度敏感, 通常用于气体激波汇聚、反弹过程的连续测量; 移除针孔, 即为背光阴影成像, 主要用于套筒内爆时界面、微喷物质演化的连续测量. 通过分析不同时刻的图像(图7(b)), 可确定微喷物和气区流场在不同阶段的关键状态和变化节点, 例如气区流场因微喷物冲击产生最大扰动的时刻、微喷物在气区中达到特定扩散程度的时刻等. 这些关键时间点对于目前单轴仅能拍摄一幅图像的X光照相具有重要的指导意义. 基于这些时刻开展X光照相实验, 能够高效费比获取反映物理过程本质特征的内部结构信息。

X光、激光照相技术获取的图像可以直观展示内爆过程精细的变形特征, 而PDV获得的实验数据可从动力学角度提供定量信息, 二者相互验证和补充. 激光多普勒测速原理基于光的干涉和多普勒效应. 系统发射一束激光, 当激光遇到流体中移动的粒子时, 粒子会因相对运动而对光的频率产生多普勒频移. 系统接收到频移信号, 通过解析变化量, 即可计算出流体的速度. 利用激光PDV可实时精确测量内爆过程中套

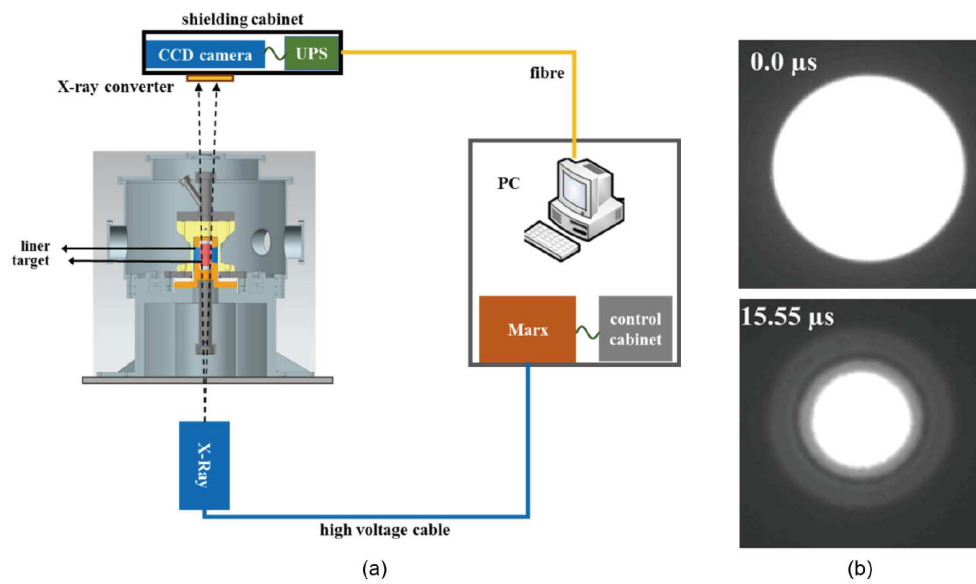


图 6 (网络版彩图) (a) FP-2 设施平台的 X 光系统示意图; (b) 典型静态及动态内爆 X 光图像

Figure 6 (Color online) (a) The schematic diagram of the X-ray imaging system on the FP-2 facility; (b) typical X-ray imaging of static and dynamic implosion.

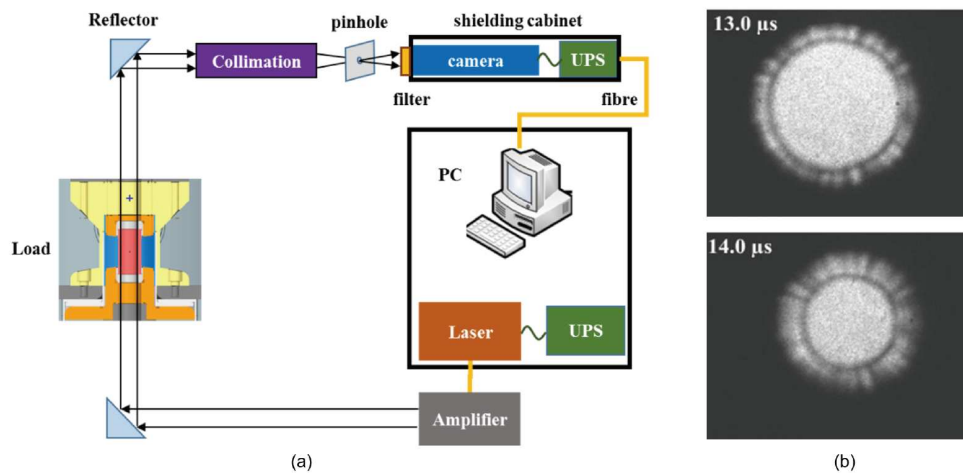


图 7 (网络版彩图) (a) FP-1/2 设施平台的激光纹影(有针孔)/阴影(无针孔)照相系统; (b) 典型激光纹影图像

Figure 7 (Color online) (a) The laser schlieren (with pinhole) and shadow (without pinhole) imaging systems on the FP-1/2 facility; (b) typical laser schlieren imaging.

筒、靶自由面和喷射物的速度随时间的变化。FP-1/2 装置上配套的 4 点 PDV 测速示意图及装配有测速探针的套筒负载见图 8。通过相互正交的 4 个 PDV 测速探头, 可以给出套筒或靶内 4 个不同角向位置的内爆速度历史, 且通过角向不同位置处内爆速度历史的比较, 可以检验套筒或靶的内爆均匀性。也可以同步测量固体套筒和靶的内界面速度, 从而给出加载过程的详细动力

学特征(图 8(c))。

综上所述, 在解决物理问题的需求背景与研究发展趋势的牵引下, FP 系列装置具备独特的加载条件, 并配备相应的诊断技术, 适用于开展极端条件下的流体动力学实验。测速系统和照相技术紧密关联, 为深入理解内爆过程中的动力学规律以及各种物理现象、理论模型的建立和程序代码的验证提供充分的实验依

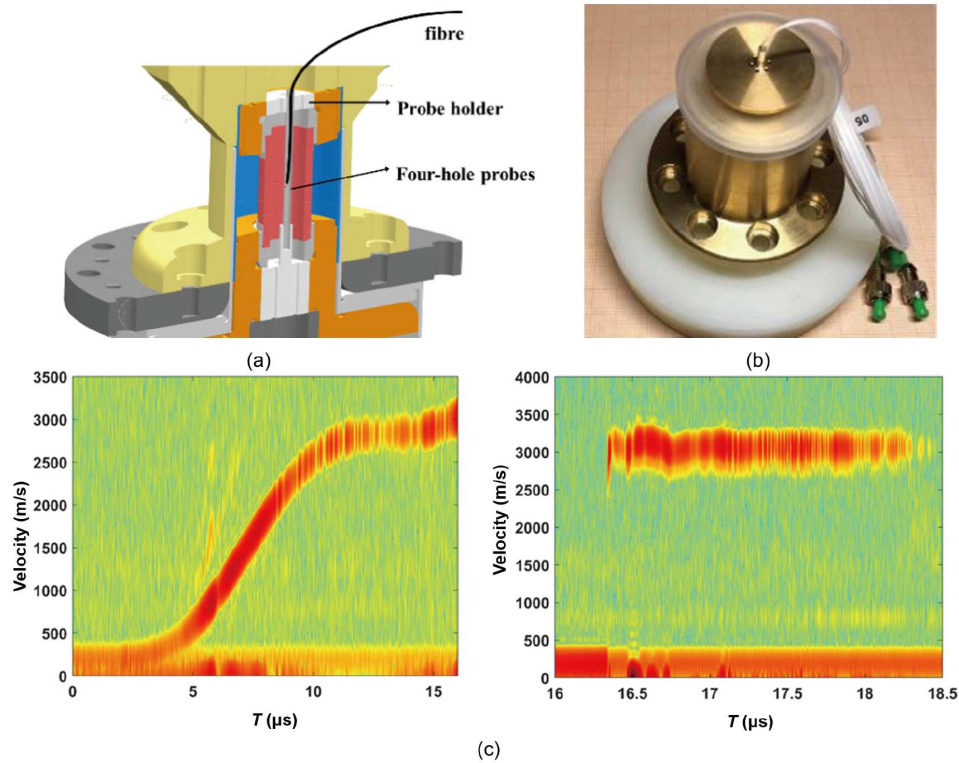


图 8 (网络版彩图) (a) 4点PDV测速示意图; (b) 装配有测速探针的套筒负载; (c) 套筒和靶典型PDV测速频谱
Figure 8 (Color online) (a) The schematic diagram of 4-point PDV; (b) the liner load with the probes assembled; (c) velocity history of liner and target.

据, 并为辅助实验设计提供支持.

3 固体套筒设计及内爆性能检测

3.1 固体套筒内爆理论设计方法

磁驱动固体套筒内爆涉及到磁扩散、焦耳热效应、材料屈服、剪切失稳、动力学失稳等多种复杂的电磁学、材料动力学和流体动力学现象, 且在绝大部分情况下可以不用考虑辐射的影响. 如果忽略失稳和材料动力学特性, 则使用简单模型就可以得到主要的内爆运动规律. 这类模型包括薄壳模型^[41–43]、广泛使用的不可压缩模型^[38,39,44]以及我们推导得到的电作用量-速度模型等. 作为一种粗估方法, 应用这些模型能够快速扫描计算得到需要的负载参数大致范围, 为进一步的一维/二维/三维详细模拟提供依据. 本节先简要介绍三种简化模型, 之后介绍我们发展的一维弹塑性磁流体动力学方法, 最后给出这些方法与实验测试的对比分析.

3.1.1 薄壳模型

薄壳模型是描述套筒内爆最简单的模型, 若套筒厚度与半径相比可忽略不计, 则薄壳假定即可适用. 由于套筒运动是轴对称的, 则可简化为一个质点的运动, 因此薄壳模型又被称为质点模型. 考虑半径为 r 的套筒单位长度质量为 m , 则在总电流 I 加载下, 其运动方程为

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -2\pi r P_M = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}, \quad (1)$$

其中, $P_M = B^2/2\mu_0$ 表示磁压力, μ_0 为真空磁导率, B 为轴向电流感应的环向磁场, 负号表示磁压方向指向轴线. 上式表明套筒的加速度与总电流的平方成正比, 而和半径成反比. 对于任意电流波形, 对式(1)进行积分, 即可获得套筒内爆半径及速度随时间的变化.

3.1.2 不可压缩模型

虽然薄壳模型可以给出套筒内爆早期的主要特征, 但是对于内爆后期, 实际情况与薄壳假设差异巨

大. 其一, 内爆汇聚压缩后期的套筒厚度和半径几乎相等, 薄壳假定已然不成立; 其二, 此阶段套筒内、外界面速度差异很大, 动力学量在套筒内的分布变得十分重要. 为此, 基于连续介质不可压缩假设, 建立了适用于内爆后期描述的不可压缩模型. 该模型基于如下假设: 套筒材料不可压缩; 套筒关于Z轴对称运动, 即只有径向运动; 不考虑导体中的磁扩散, 磁压只作用于套筒外表面; 磁场压缩做功全部转换为套筒动能.

若套筒外界面半径为 r_o , 内界面半径为 r_i , r 是套筒内某点位置($r_i \leq r \leq r_o$). 根据不可压缩假定我们得到 $A_0 = \pi(r_o^2 - r_i^2) = \text{const}$, 即 $r_i \dot{r}_i = r_o \dot{r}_o$. 同理, 套筒内任意一点的速度为 $v(r) = r \dot{r}_o / r$. 因此套筒总动能为 $E_k = \int_{r_i}^{r_o} \rho \pi r h r_o^2 v_o^2 / r^2 dr = \pi \rho h r_o^2 v_o^2 \ln(r_o / r_i)$, 其中 h 为套筒高度, ρ 为套筒密度, v_o 是套筒外界面速度. 假定动能的改变全部来自电磁力所做的功, 且电磁力作用于套筒外表面, 于是 $dE_k/dt = P_M S v_o = -\mu_0 h v_o I^2 / 4\pi r_o$, 式中 $P_M = B^2 / 2\mu_0 = \mu_0 I^2 / 8\pi^2 r_o^2$ 为磁压力, $S = 2\pi r_o h$ 为套筒外表面面积. 则套筒外界面速度为

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o^2}{r_o} - \frac{1}{\ln r_o - \ln r_i} \left[\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \rho r_o^3} + \frac{v_o^2}{2r_o} \left(1 - \frac{r_o^2}{r_i^2} \right) \right] \quad (2)$$

若以 r_i , v_i 代替, 则得套筒内界面速度:

$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{v_i^2}{r_i} - \frac{1}{\ln r_o - \ln r_i} \times \left[\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \rho r_i^3} - \frac{v_i^2}{2r_i} \left(r_o^2 - r_i^2 \right) \right] \quad (3)$$

在已知电流 I 的条件下, 可以通过式(2)和(3)对套筒内外界面速度进行计算, 亦可以获取套筒内任意位置的速度信息. 需要说明的是, 套筒不可压缩假定是有前提的, 即加载于套筒的线电流密度不能太大, 磁压不会使得金属套筒产生明显体积变化.

3.1.3 电作用量-速度模型

无论是薄壳模型还是不可压缩模型, 都没考虑套筒自身状态的变化. 由于金属套筒本身具有电阻, 当电流流经套筒时产生欧姆热效应, 电磁力做功(电磁能)会部分转化为套筒内能, 而不是全部转化为动能. 而且随欧姆热效应增加, 电阻率逐渐变大, 电磁能会更多地转化为套筒内能. 当内能逐步累积, 套筒则逐

步液化、汽化、电爆炸并快速等离子体化. 对于固体套筒内爆而言, 无论何种目的, 作为驱动器的套筒都必须保持相当的完整性, 也就是套筒不能被电流烧蚀作用贯穿. 在不涉及复杂的磁流体力学计算时, 一般可通过流经套筒的电作用量判断金属套筒材料的物理相态(即固态、液态、气态和等离子体态). 电作用量的概念最早是在电爆炸丝的研究中提出的, 其定义为 $Q = \int_0^t j^2 dt$, 其中 j 为流过金属丝的面电流密度. 圣地亚国家实验室的Tucker等人^[45]系统研究了包括铝和铜在内的20多种金属的电爆炸过程, 得到了金属电阻率随电作用量的变化关系, 其电阻率涵盖了固/液/气/等离子体态. 由于电作用量只涉及易于获取的电流波形和初始截面积, 因此常作为套筒完整性的佐证, 但电作用量的内涵不仅限于此.

假定 Δ 为套筒厚度, 套筒外半径 $r_o \gg \Delta$, 即满足薄套筒近似, 电流 I 沿轴向流过套筒外表面, 则套筒径向运动方程为 $\rho d^2 r_o / dt^2 = -\mu_0 I^2 / 8\pi^2 r_o^2 \Delta = -\mu_0 J^2 / 2\Delta$, 其中 $J = I / 2\pi r_o$ 是线电流密度. 对其积分得套筒外界面速度为

$$V = -\frac{\mu_0 \Delta}{2\rho} \int_0^t j^2 dt = -\frac{\mu_0 \Delta}{2\rho} Q(t), \quad (4)$$

其中, $j = J/\Delta$ 表示面电流密度(根据薄套筒假定, 电流很快扩散至整个截面). 而 $Q(t)$ 是电作用量的状态变量. 根据定义可知, 电作用量与力学中的冲量类似, 是动量变化的度量, 因此套筒速度可由电作用量表示. 可见电作用量不仅是表示导电金属物态变化的状态量, 还是低线电流密度下薄壁套筒动力学参数变化的内变量. 由式(4)可知, 内爆初期套筒外界面速度随 J^2 对时间的积分线性增长, 而和电流脉冲的具体形状无关; 套筒速度正比于其厚度和电作用量, 而反比于其密度. 图9所示为电作用量-速度模型与薄壳模型、不可压缩模型、一维SOLID代码计算结果的对比. 从图中可见, 考虑套筒自身状态变化后, 与实际过程更接近, 其预测结果更为准确.

3.1.4 一维弹塑性磁流体动力学程序

利用简化模型优化后, 便可将相应参数代入一维程序进行更为细致的计算. SOLID程序是根据固体套筒内爆特点自编的一维弹塑性磁流体力学拉氏程序, 有空腔打开/闭合功能, 可模拟套筒和靶的撞击过程以

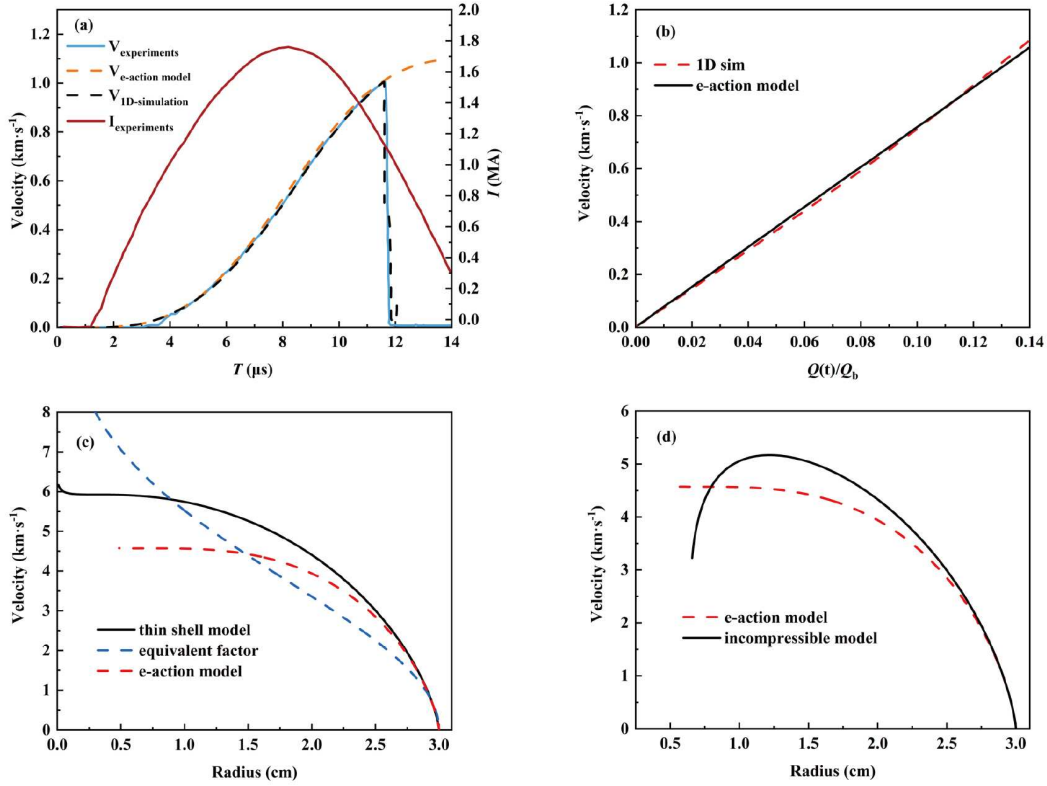


图 9 (网络版彩图)简化模型套筒内爆计算速度的对比. (a) 电作用量模型、SOL1D 计算结果与实验对比; (b) 不同电作用量下可达到的速度估算(Q_b 为电爆炸值); (c) 电作用量-速度模型与薄壳模型的对比; (d) 电作用量-速度模型和不可压缩模型的对比

Figure 9 (Color online) The comparison of calculated velocities for simplified model liner implosion. (a) Comparison of electrical action model, SOL1D calculation results and experiments; (b) velocity estimation under different electrical actions (Q_b is the electro-explosion value); (c) comparison between electrical action-velocity model and thin shell model; (d) comparison between electrical action-velocity model and incompressible model.

及材料的层裂和复合现象, 还可以对靶内充气/液体介质压缩情况进行计算, 磁扩散模块可模拟磁场在套筒内的扩散过程.

基于SOL1D程序可以模拟平面、柱面和球面对称构型的运动过程. 忽略黏性及热传导, 套筒动量方程为

$$\frac{\rho_0 \dot{u}}{v_s} = \frac{\partial \Sigma_r}{\partial r} + (d-1) \frac{\Sigma_r - \Sigma_\theta}{r}. \quad (5)$$

上式中 ρ_0 是初始密度, v_s 是相对体积即比容(其值等于 $1/\rho$), u 是粒子速度, d 是表征构型的参量, $d=1, 2, 3$ 分别表示平面、柱面和球面构型. Σ 是总应力, 下标 r 和 θ 分别表示径向和角向分量, 且 $\Sigma_r = s_1 - P - q$, $\Sigma_\theta = s_2 - P - q$. 其中, P 是流体静水压, q 是人工黏性, s 是应力偏量(下标1和2分别表示径向和角向分量). 对于拉氏格式而言, 质量守恒的形式非常简单, 即 $dM/dt = 0$. 简单而言, 即程序迭代时, 网格

内质量始终保持不变.

假设套筒为绝热过程, 流体单元内能变化只由临近单元压力做功大小所决定, 则套筒能量方程为

$$\dot{E} - v_s [s_1 \dot{\epsilon}_1 + (d-1) s_2 \dot{\epsilon}_2] + (P+q) \dot{v}_s = 0, \quad (6)$$

其中, E 为单位质量内能, 应变率 $\dot{\epsilon}_1 = \partial u / \partial r$, $\dot{\epsilon}_2 = u / r$, 应力偏量和应变率及比容的关系为 $s_1 = 2G(\dot{\epsilon}_1 - \dot{v}_s / 3v_s)$, $s_2 = 2G(\dot{\epsilon}_2 - \dot{v}_s / 3v_s)$, G 是剪切模量.

在上述动量、质量和能量守恒方程基础上, 引入磁扩散方程、Gruneisen状态方程、Steinberg-Cochran-Guinan本构模型及相关参数、Mises屈服准则, 并基于Von-Neumann有限差分格式, 编制了SOL1D程序. 该程序除了可以模拟简化模型所不能模拟的飞层撞靶、层断裂、应力波传播和反弹等物理过程和现象外, 还可以对套筒飞层中磁场的扩散过程进行细致评估, 是开展进一步物理实验研究必不可少的工具. 图10所示为

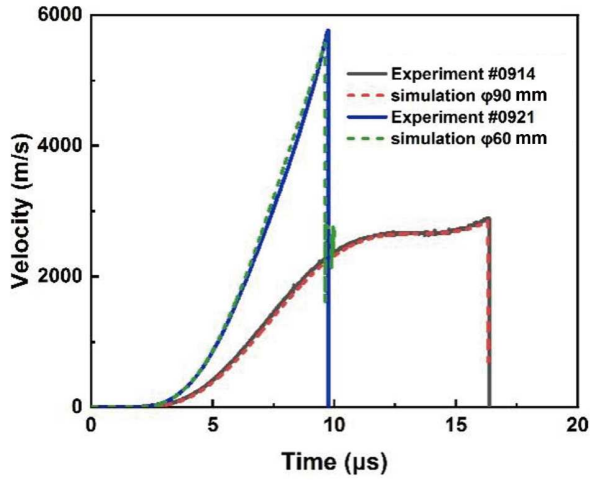


图 10 (网络版彩图) 飞层直径 90 和 60 mm 内爆速度实验与 SOL1D 计算结果

Figure 10 (Color online) The experiment and SOL1D calculation results of implosion velocity for liners with diameters of 90 and 60 mm.

SOL1D 代码计算结果与 FP-2 实验结果的比对, 其加载速度历史和峰值内爆速度预测均与实验结果吻合较好。相比考虑状态变化的电作用量-速度简化模型, SOL1D 能够给出套筒、靶内更多的力学状态参量, 更

有利于物理实验的设计和考核。

3.2 固体套筒内爆性能检测实验

依据上一节介绍的固体套筒理论设计方法及流程, 基于脉冲功率装置输出电参数, 可以对固体套筒参数进行优化设计。FP-1/2 装置上采用的套筒负载结构如图 11 所示, 针对不同的实验需求, 负载构型会略有区别。通过详细理论设计, FP-1 装置(峰值电流 2 MA, 1/4 周期 7 μs)采用铝套筒直径 30 mm、厚度 0.5 mm、高度 20 mm 为基准参数。对更大驱动能力的 FP-2 装置(峰值电流 10 MA, 1/4 周期 5 μs), 为了拓展能力和应用需求, 我们设计了两种基准套筒参数, 铝套筒直径分别为 60 和 90 mm, 其厚度和高度分别为 0.6 和 60 mm。固体套筒内爆的应用主要定位在流体动力学相关规律性实验研究, 能够高效费比获取批量化精密数据以支撑物理模型及程序代码的校核。为排除加载扰动对数据获取带来的干扰, 对套筒柱面内爆均匀性提出了较高要求; 同时, 由于驱动的靶负载通常带有一定构型, 且目前 X 光透射成像只能每次一幅图像, 为了保证序列化实验加载条件的一致性, 对装置及套筒内爆不同发次之间的重复性也提出

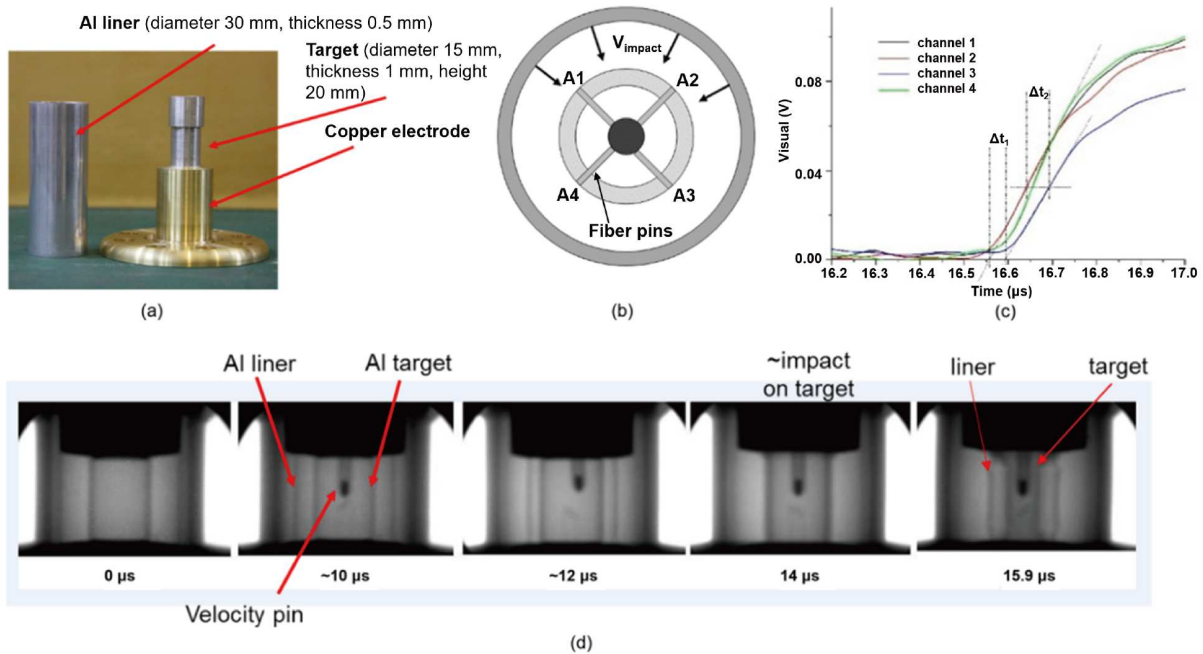


图 11 (网络版彩图) 基于 FP-1 装置的内爆均匀性试验检测结果. (a) 飞层和靶; (b) 四点正交 PDV 探头; (c) 撞靶起跳时间分散性; (d) 径向 X 光图像显示的内爆过程(单次实验单帧采集)

Figure 11 (Color online) The detection results of implosion uniformity test based on FP-1 facility. (a) Liner and target; (b) four perpendicular PDV probes; (c) impact time deviation; (d) implosion processes by radial X-ray (one frame one shot).

了较高要求. 基于不同脉冲功率装置的固体套筒负载基准参数设计完成后, 需要开展套筒内爆定标及性能检测实验, 验证内爆均匀性、重复性, 为后续的各类物理实验打下基础并提供加载状态定标的依据.

3.2.1 内爆均匀性检测

基于脉冲功率加载装置, 常采用X光径向成像及靶内多点PDV测速来验证、检测固体套筒内爆及撞靶的均匀性, 并根据相互正交的多点PDV测速给出固体套筒内爆撞靶时沿角向的时间分散性偏差, 同时也可以给出撞靶后靶内界面沿径向的位移分散性偏差. 在FP-1和FP-2装置上采用类似的检测方法, 图11为FP-1装置上固体套筒内爆及撞靶均匀性检测结果示例. 铝套筒直径为30 mm, 厚度为0.5 mm, 铝靶直径为15 mm, 厚度为1 mm, 套筒和靶高度均为20 mm. 由图9(a)可见, 理论计算和实验结果均表明, 在设计的套筒基准参数下, 撞靶速度接近1 km/s. 图11(a)为套筒和靶实物照片, 图11(b)为4个正交的PDV探头布置示意图, 用于测量套筒撞靶后靶内界面速度历史. 图11(c)为4点PDV测速信号起跳位置的放大图, 可以精确给出撞靶后沿角向速度起跳时间的分散性, 这个参数是套筒撞靶均匀性的重要表征. 由图11(c)可见, 4个PDV探头得到的起跳时间分散性偏差小于60 ns, 考虑到靶径向起跳速度峰值约为1 km/s, 可以估算出撞靶后沿径向的内界面位移分散性偏差约为60 μm . 图11(d)为不同时刻

径向X光照相图片, 展示了铝套筒及靶内爆过程. 由于套筒和靶采用了等质量(撞靶时等厚度)设计, 撞靶后套筒大部分动能转移到铝靶, 靶以近似套筒撞靶时速度汇聚压缩, 而套筒近似于停止在撞靶时的位置. 由序列X光图像可以看出, 套筒和靶沿轴向的平直性及对称性保持较好, 这也证实了套筒内爆的均匀性. 同时, 在整个内爆过程中, 套筒和靶的完整性也维持较好, 这对开展各类物理实验的精密测量是至关重要的.

3.2.2 内爆重复性检测

由图10可见, 基于FP-2平台, 分别以直径90和60 mm的基准参数铝套筒为负载, 理论计算和实验结果均表明其内爆速度(汇聚至测速探针直径10 mm处)可以分别达到4.5和7.5 km/s. 采用直径分别为42.4和30 mm(厚度均为1.2 mm)的铝靶, 撞靶速度分别为2.9和5.5 km/s, 对应的撞靶压力分别为29和69 GPa, 相比FP-1装置其加载能力得到大幅度提升. 为检测套筒内爆重复性, 我们采用相同充电电压、相同套筒负载及测试手段, 通过多次重复性实验, 比较得出不同发次间动态负载电流波形、套筒内爆速度历史的分散性, 并以发次间测量获得的幅值差值与多发次幅值平均值的百分比来度量内爆重复性优劣. 图12为采用直径90 mm套筒负载时不同发次实验结果比较示例. 重复性检测结果表明, 绝大多数电流和套筒速度历史的分散性极差均可以控制在1%以内.

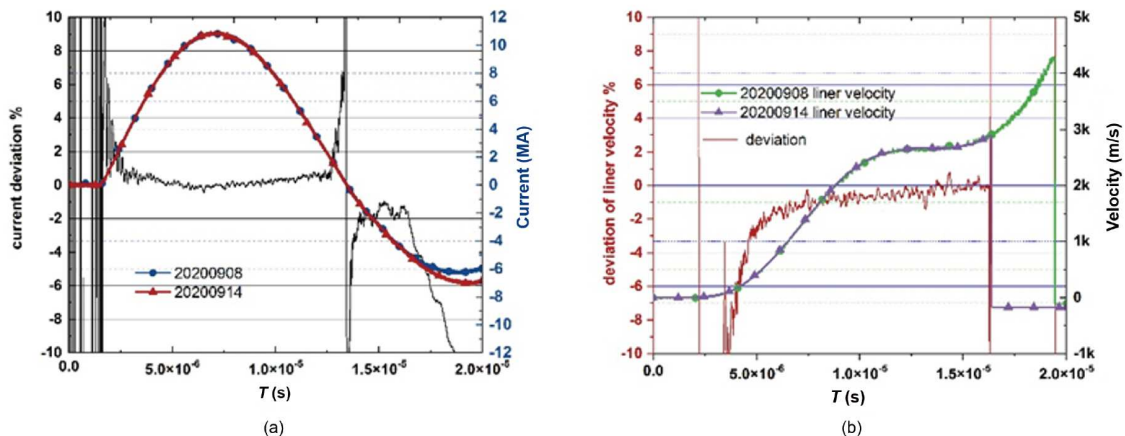


图 12 (网络版彩图)采用直径90 mm、厚度0.6 mm铝套筒负载时内爆重复性检测结果. (a) 加载电流和发次间偏差; (b) flyer速度和发次间偏差

Figure 12 (Color online) The detection results of implosion repeatability for 90 mm-diameter and 0.6 mm-thickness aluminum liner. (a) Load current and its percentage deviation; (b) liner velocity and its percentage deviation.

4 内爆流体动力学实验研究进展

采用磁驱动固体套筒内爆实验技术, 结合精密测试诊断系统, 可开展类型丰富的内爆物理实验研究. 按类型大致可分为四类: 一是内爆流体动力学实验, 包括Rayleigh-Taylor(RT)、RM不稳定性、微喷/湍流混合、界面高速摩擦、复杂构型气体激波、内爆(Bell-Plesset, BP)不稳定性等; 二是材料动力学与物理性质实验, 包括冲击绝热压缩、多次冲击物态方程、等熵压缩/稀疏线、大变形/高应变率下材料强度、材料冲击黏性等; 三是稠密/强耦合等离子体压缩实验, 包括稠密等离子体物态方程及输运、强耦合等离子体流体动力学、强耦合等离子体不稳定性、磁惯性约束聚变等; 四是基础前沿科学实验, 主要包括天体物理、强磁场物理等探索实验. 鉴于固体套筒实验的高均匀性、高重复性和高可靠性, 可以高效费比获取大批量的精密实验数据, 特别适合内爆现象规律性研究及模型、代码的考核, 在武器物理等高能密度研究领域具有非常重要的应用价值. 本节将综述近几年基于FP-1/2

装置开展的内爆流体动力学实验研究进展, 重点介绍柱面及复杂构型气体激波汇聚反弹、气固界面RM/RT不稳定性、强冲击作用下金属表面微喷射及充气混合实验研究的进展及认识.

4.1 柱面及复杂构型气体激波实验

气体激波及气区流场的确定, 是研究微喷颗粒与气体混合、气粒相互作用的基础和前提, 气粒混合层厚度及密度的变化、颗粒在气体中的破碎及气粒耦合等现象均与气区流场的演化密切相关. 结合激光阴影/纹影照相系统, 在FP系列装置上, 借助柱形的固体套筒, 冲击压缩带充气结构的复杂构型靶, 可以非常方便地研究各种构型气体激波的汇聚、反弹过程. 通过激波汇聚反弹理论计算与实验结果的比对, 结合数值模拟仿真技术, 可以进一步给出气区流场详细的参数分布(密度、压力、温度等).

图13为典型的固体套筒驱动柱面充气靶负载构型及采用激光纹影照相获得的柱面激波汇聚反弹过程的

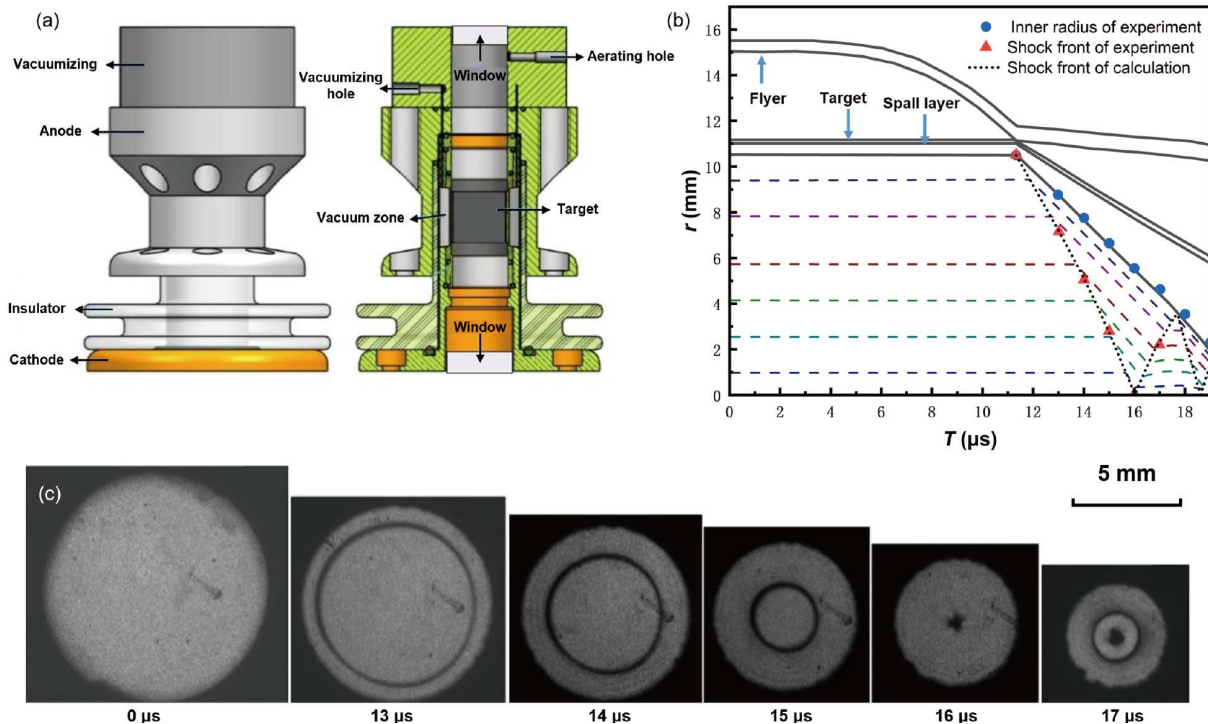


图 13 (网络版彩图)柱面气体激波实验与SOLID计算结果对比. (a) 柱面靶充气负载构型示意图; (b) SOLID程序模拟结果与实验结果对比; (c) 柱形充气靶气体激波汇聚反弹照相结果

Figure 13 (Color online) The comparison of cylindrical shock wave experiments and SOLID calculation results. (a) Schematic diagram of inflatable load configuration for cylindrical targets; (b) comparison between SOLID simulation results and experimental results; (c) imaging of shock wave convergence and rebound for cylindrical inflatable targets.

实验结果. 固体套筒和靶材料均为6061-T6铝, 固体套筒内直径为30 mm, 厚度为0.5 mm, 靶内直径为21 mm, 厚度为0.7 mm. 套筒和靶之间为真空状态, 靶内充有5.0 atm氦气, 靶负载两端密封气体的窗口为LiF玻璃(承受较高冲击压力下仍能保持较好的透光性). 激光纹影照相系统布局如图7所示, 光源为功率20 W的连续激光光源, 并采用时间间隔连续可调的8分幅可见光相机, 为排除负载区强放电带来的自发光干扰, 镜头前方放置了衰减片和滤光片. 从图13(b)可以看出, 气体激波汇聚反弹过程中对波阵面位置的SOL1D模拟结果与实验结果吻合较好. 图中虚线表征气体流场运动, 实线表示固体套筒或靶的内外界面运动过程. SOL1D一维模拟也给出了冲击撞靶速度约为1.04 km/s, 气体激波出靶内界面的时刻约为11.3 μs ($t = 0$ 表示放电开始, 下同), 激波聚心时刻约为16 μs , 上述结果与实验基本一致. 图13(c)显示, 当气体激波聚心反弹后, 在中轴线上留下一个黑点, 这是由激波汇聚的端部效应带来的. 当柱形套筒冲击靶时, 端部效应使得两端的气体激波比中心气体激波慢, 当中心激波聚心反弹后, 两端的拖尾激波仍不停在中轴线汇聚对碰, 形成图片上逐渐变大的中心黑点.

在柱形套筒均匀加载下, 除了采用上述典型圆形靶构型外, 还可设计变截面靶构型, 只需调整相应配套的汇流连接件, 就可以非常方便地实现非均匀碰撞压缩, 以获得复杂构型气区流场传播演化过程, 这对于校核二维/三维程序代码非常有用. 图14展示了我们在FP系列装置上开展的复杂构型非均匀气体激波汇聚反弹实验研究所采用的充气靶示意图. 套筒仍然采用前述尺寸参数, 只是充气铝靶界面构型更复杂. 为了保持冲击撞靶速度近似, 椭圆靶长轴外直径、外圆内方靶外直径与前述圆柱形靶外直径保持一致(22.4 mm). 采用激光纹影照相技术, 获得了靶内充5 atm氦气的复杂构型气体激波汇聚反弹实验图像, 也观察到了复杂流体现象演化的精细结构.

图15(a)为分幅相机拍摄的外圆内方靶气体激波传播演化过程图像, 图15(b)为14 μs 时刻的放大图像. 撞靶后汇聚初期, 气体激波以方形激波汇聚传播, 之后由于相邻方形激波碰撞、反射, 形成标准的马赫杆和附面激波, 并随方形激波共同汇聚. 图15(b)展示了方形激波、附面激波、马赫杆及铝靶拐角射流的清晰图像, 而图15(a)展示了它们的形成和演化过程. 大约

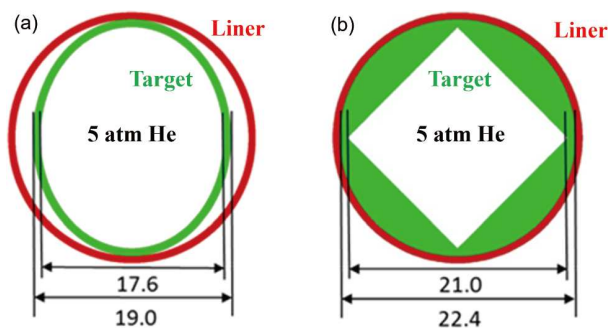


图14 (网络版彩图)柱面套筒冲击复杂构型靶碰撞时刻示意图. (a) 椭圆靶; (b) 外圆内方靶. 图中尺寸单位mm

Figure 14 (Color online) The schematic diagram of cylindrical liner impacting complex configuration targets as collision moment. (a) Elliptical target; (b) outer-circle inner-square target. Dimension unit in the figure: mm.

16 μs 时, 气体激波聚心与柱面靶结果近似. 但由于汇聚过程中复杂构型带来的各种激波相互作用, 气体激波聚心后再未观测到规则反弹激波.

图16为分幅相机拍摄的椭圆截面靶气体激波汇聚反弹演化过程图片. 实验观测发现, 椭圆形长轴最早受冲击波作用向内汇聚, 长轴处气体激波也更早离开靶的内界面, 在13 μs 时短轴处气体激波也开始向内汇聚. 之后椭圆形激波逐渐演化为类似长方形、方形激波, 直至17 μs 气体激波聚心. 18 μs 时刻的图片展示了气体激波聚心反弹后再次形成的椭圆形激波、由端部拖尾激波聚心带来的中心黑斑、短轴处由于对碰射流产生的靶面凸起等精细结构, 它们相互叠加构成了一张类似于眼睛的精美图像. 之后, 由于短轴对碰射流的快速发展, 反弹激波消散, 靶体迅速向中心坍塌, 并最终将靶内气腔切割成两个对称等大的区域. 在此过程中, 激波反弹与汇聚效应下的气粒混合共同作用, 使气区流场行为变得极其复杂.

4.2 界面不稳定性实验

流体动力学中的界面不稳定性是指在两种或多种具有不同物理性质(如密度、速度、压力等)的流体界面上, 受到外界微小扰动后, 界面形态随时间发生复杂变化, 甚至失稳的现象, 如加速度场引起的RT不稳定性、冲击不同物质界面引起的RM不稳定性和由速度剪切引起的Kelvin-Helmholtz(KH)不稳定性^[46]. RT不稳定性是当轻流体支撑重流体时, 受扰动后的重流体倾向于“尖钉状”侵入轻流体, 轻流体则“气泡状”凸起.

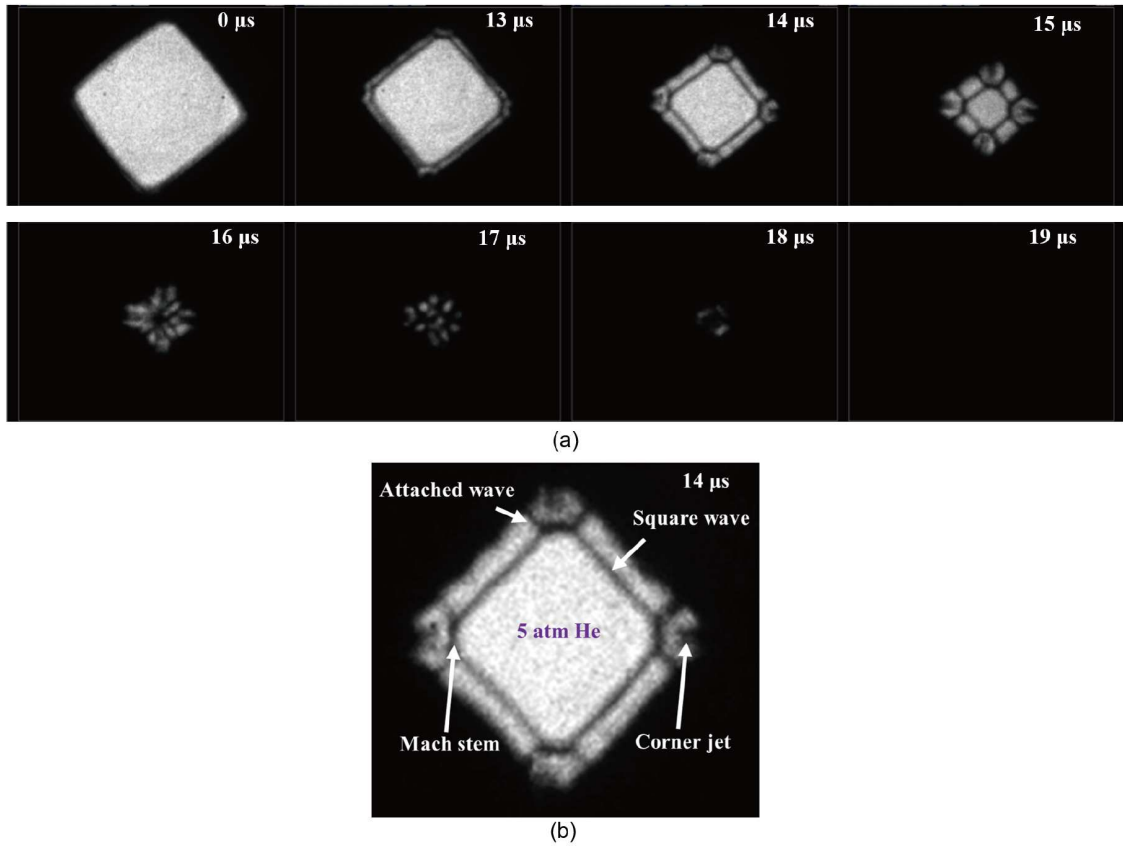


图 15 (网络版彩图)外圆内方铝靶(充5 atm氦气)实验图片. (a) 激光纹影8分幅照相; (b) 方形激波、附面激波、马赫杆、拐角射流示意图

Figure 15 (Color online) The experimental imaging of outer-circle inner-square aluminum target (filled with 5 atm helium). (a) The laser schlieren 8-frame imaging; (b) the schematic diagram of square shock wave, attached shock wave, Mach stem and corner jet.

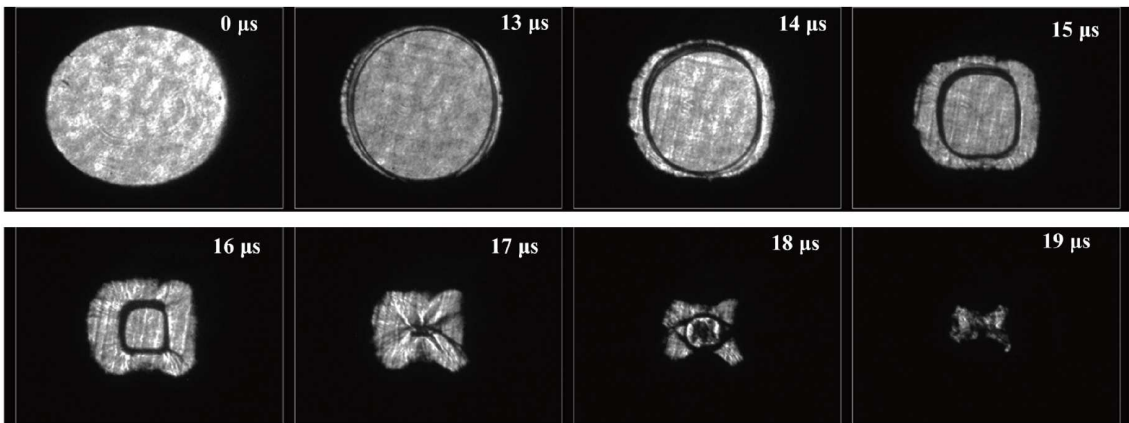


图 16 椭圆截面靶(充5 atm氦气)激光纹影8分幅照相实验图像

Figure 16 The laser schlieren 8-frame experimental imaging of elliptical cross-section target (filled with 5 atm helium).

在磁驱动柱面套筒内爆中, 轻流体的磁压力推动类似于重流体的套筒加速运动, 这种由磁场驱动作用产生的RT不稳定性也叫做Magnetorayleigh-Taylor(MRT)

不稳定性. 扰动使得界面处压力分布不均匀, 产生的压力差驱动流体运动, 随着时间推移, 界面变形越来越大, 最终导致不稳定性加剧.

在界面不稳定性实验中常通过预置初始扰动并测量其界面速度历史与扰动幅度来分析其增长过程. FP装置上的MRT实验采用初始扰动幅值为0.2 mm, 波长为2 mm的铝靶, 获得不同时刻下靶的径向X光照相结果(图17). 在汇聚后期, 可清晰观察到靶外表面出现显著的尖钉状凸起, 而与之相连的靶面区域, 即尖钉根部所在位置呈现内凹形态.

章征伟^[4]根据套筒不可压缩动力学模型和小扰动增长理论, 假设其厚度远小于半径(薄壁套筒), 并假设套筒线电流密度不足以使套筒发生汽化, 推导得到磁场驱动的有限厚度柱面套筒内爆MRT不稳定性扰动增长式(7), 这里 ξ 为扰动增长幅值, 其中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, 厚度 $\Delta = r_o - r_i$, r_o 和 r_i 分别表示外界面和内界面的半径. 进一步通过把材料强度带来的塑性耗散加入薄壁运动方程, 推导得到考虑材料强度的薄壁套筒扰动增长式(8), 其中 Y 表示屈服强度. 利用考虑强度效应的不可压缩模型, 在电流已知的条件下求解套筒内爆轨迹和内爆速度, 并根据式(7)和(8)给出的有限厚度套筒不稳定性增长公式, 结合内爆过程分别求解扰动增长幅值. 计算结果和实验结果的对比如图18所示. 可以看出由未考虑强度效应的式(7)计算出的结果大幅超过实验值, 这表明在FP装置加载磁压力较低条件下, 固体套筒内爆的强度效应不可忽略. 考虑强度效应的有限厚度套筒MRT不稳定性增长式(8)在前期与实验结果符合较好, 而在内爆中晚期偏离逐步增大. 式(7)和(8)的推导过程恰好体现了这个事实: 采用零维的不可压缩运动方程进行推导, 可以非常方便地把材料强

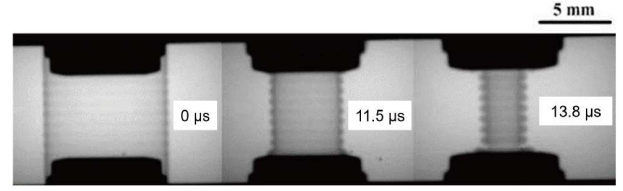


图 17 MRT不稳定性实验的径向X光照片
Figure 17 The radial X-ray imaging of MRT instability experiment.

度以塑性功耗散的形式加入到运动方程中. 由于不考虑汇聚效应, 在薄壁套筒汇聚早期, 扰动增长较小、汇聚效应还不明显时, 该方法较为合理. 但当中晚期汇聚效应不可忽略时, 解析结果与实验结果的偏差会逐渐增大:

$$\xi^*(t) = \frac{k^2 \mu I^2}{4\pi^2 r_o^2 \rho (k\Delta + kr_i - kr_i e^{-k\Delta} - 1 + e^{-k\Delta})} \xi^*(t), \quad (7)$$

$$\xi^*(t) = k \frac{k\mu I^2 - 4\pi^2 r_o^2 Y(1 - e^{-k\Delta})}{4\pi^2 r_o^2 \rho (k\Delta + kr_i - kr_i e^{-k\Delta} - 1 + e^{-k\Delta})} \xi^*(t). \quad (8)$$

当激波冲击不同密度的物质界面时, 会引发复杂的波系和旋涡, 进而导致界面失稳和湍流混合, 这种不稳定性增长现象即为RM不稳定性. 不同于RT不稳定性的是, 其加载方向不受限制, 无论是轻介质推动重介质, 还是相反, 都可以产生RM不稳定性. 基于FP装置我们开展了柱面铝套筒冲击锡靶的RM不稳定性增长实验. 铝套筒内直径为30 mm, 厚度为0.5 mm, 锡靶内直径为21 mm, 厚度为0.7 mm. 锡靶内界面预置正弦扰动, 波数21, 扰动幅值(波峰-波谷)为0.5 mm, 扰动表达式为 $R(\theta) = 10.25 + 0.25\sin 21\theta$. 实验得到不同时

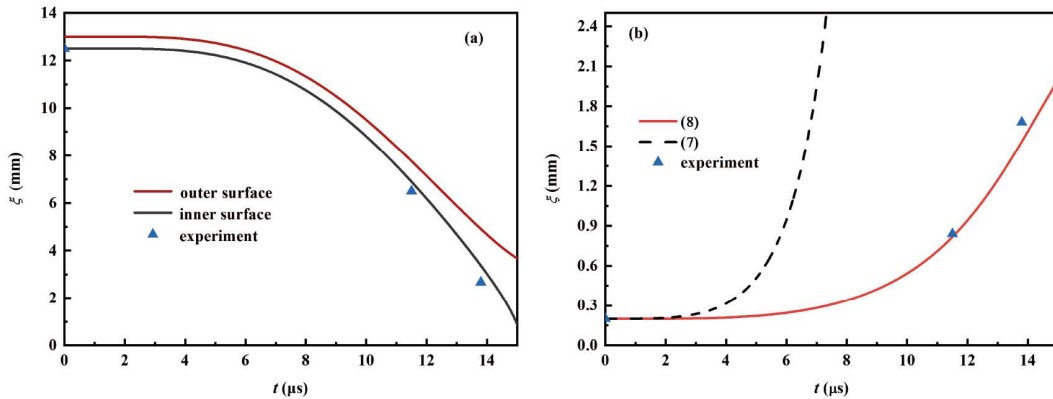


图 18 (网络版彩图)实验与计算结果对比. (a) 内界面运动位置; (b) 扰动幅值

Figure 18 (Color online) The comparison of experimental and calculated results. (a) The position of the inner interface; (b) the amplitude of the disturbance.

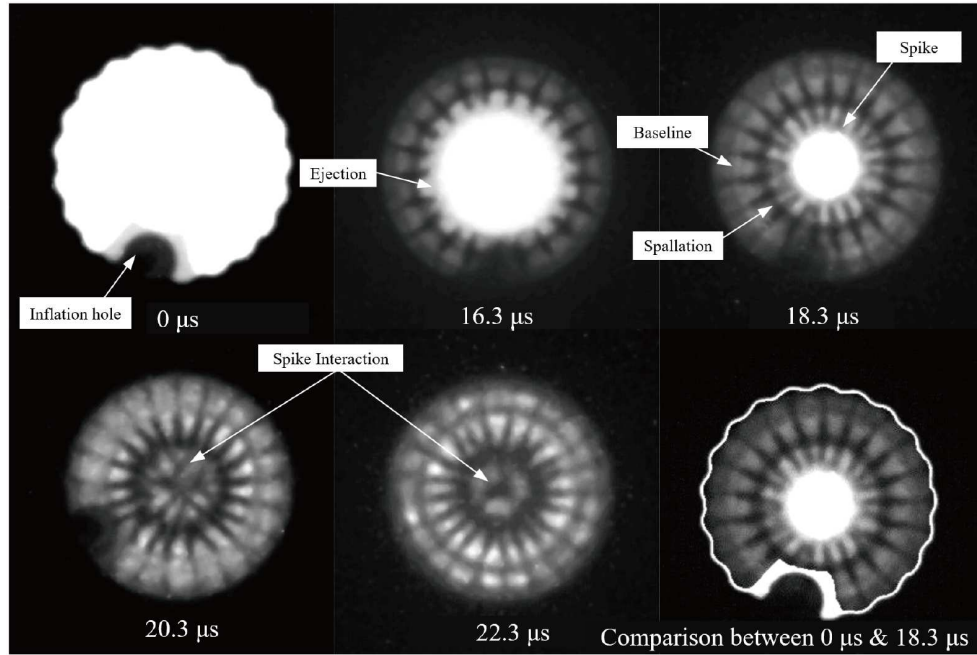


图 19 RM不稳定性实验的X光图像

Figure 19 The X-ray imaging of RM instability experiment.

刻下RM不稳定性增长演化的X光图像(图19)^[40]. 图19中标注的时间零点为电流起始时刻, 右下角图像展示了静态图像与18.3 μs时刻动态图像的对比, 白线代表初始扰动剖面, 可见扰动尖钉由初始扰动的波谷位置演化而来, 这表明在18.3 μs之前, 波峰-波谷的反转过程已经完成. 虽然预制的初始扰动位于靶内界面, 但是靶外界面亦产生了相同相位的扰动增长. 这是由于冲击加载下锡靶内部发生层裂, 在薄层裂片内扰动急剧发展引起界面穿透所带来的. 由于采用粗糙锡靶, 在扰动剖面附近可以看到明显的喷射颗粒物质, 并随扰动一起汇聚压缩. 最后两个时刻的图像展示了尖钉和喷射物汇聚时相互挤压并聚心的过程.

由于RM增长幅值大、汇聚效应明显, 不能采用前述基于零维不可压缩运动方程及小扰动增长理论的推导方法. 考虑到材料动态强度和黏性对扰动增长的抑制作用具有相似性^[47], 即 $Y = 2\eta_0 k \mu_f / 3$ (Y 是材料动态屈服强度, μ_f 是流体黏性, k 是波数, η_0 是激波扫过后扰动的瞬时增长率), Zhang等人^[40]以柱面汇聚无强度的Mikealian方程^[48]为基础, 并认为屈服强度是材料的内变量, 和构型无关, 经改进得到考虑强度效应的柱面构型RM扰动增长方程式(9), 这里 R 是柱壳半径, n 是扰动

的模数, $A_T = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ 是Atwood数, 对气-固界面可认为是1, Δv 为冲击波出界面起跳速度. 无强度Mikealian公式、考虑强度的式(9)及基于Margolin表面积守恒模型^[49]的计算结果及与实验结果的对比见图20^[40], 图中 $t = 0$ 表示冲击波出自由面时刻. 从图中可见, Mikealian解和式(9)在早期是吻合的, 只是到汇聚中后期偏离越来越大, 而Margolin表面积守恒模型低估了扰动增长幅度, 且不能反映出RM特有的波峰-波谷反转过程. 因此, 考虑强度效应的扰动增长式(9)与实验数据的吻合最好:

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} + \left(\frac{3Y}{\eta_0 \Delta v \rho_0} + 2\frac{\dot{R}}{R} \right) \frac{d\eta}{dt} - (nA - 1) \frac{\ddot{R}}{R} \eta = 0. \quad (9)$$

4.3 微喷混合实验

当冲击波到达自由面反射卸载时, 通常会引起材料表面的损伤破坏, 产生微米尺度的颗粒态物质以高于基体的速度向外飞散, 该现象被称为冲击作用下界面的微喷射^[50]. 微喷射主要包括基于界面扰动增长形成的高速微射流以及近表面熔化物质动态拉伸破坏引起的微层裂两种产生机制. 前者形成的颗粒产物速度高、尺度小并以熔化液滴为主; 后者速度较低、尺度

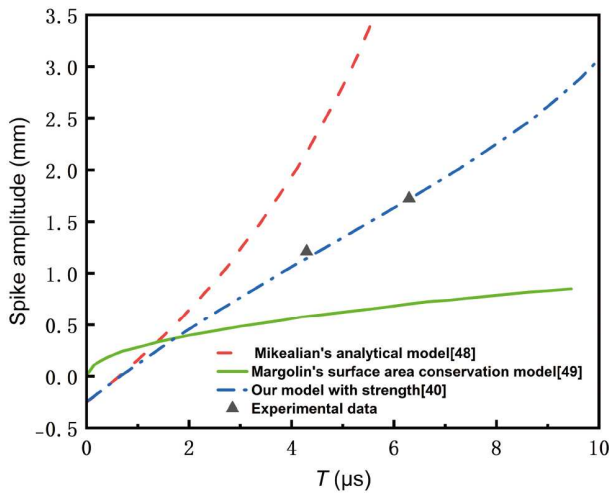


图 20 (网络版彩图)扰动增长幅值的实验值与计算结果
Figure 20 (Color online) The experimental and calculated results of perturbation growth amplitude.

更大、以近自由面富含空穴的网状破碎结构为主。微喷颗粒与气体的混合(气-粒混合)过程在许多工程领域均有重要科学研究和应用价值,比如内燃机中油滴喷射雾化混合、惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)及磁惯性约束聚变(Magneto-inertial Fusion, MIF)内爆压缩中微喷射颗粒与聚变等离子体的混合等。颗粒与气体混合过程的物理机制复杂,通过磁驱固体套筒内爆平台提供汇聚加载实验条件,结合高速分幅摄影及X光照相等诊断手段,可以高效费比获取微喷颗粒及气粒混合的流动特征,为微喷混合建模及校验提供数据支撑。

基于FP装置,采用内直径30 mm、厚度0.5 mm的铝套筒及内直径20.5 mm、厚度0.95 mm的锡靶,分别利用可见光照相和轴向X光照相开展序列实验。锡靶内充有3 atm氢气,内表面粗糙度 $Ra = 3.2 \mu\text{m}$,波长 $80 \mu\text{m}$,可见光和X光照相实验结果如图21和22所示。从图21可以看出,锡靶内爆过程中,气体激波最快,喷

射物前端和气体激波之间存在零散的超快喷射物质,速度与气体激波近似(氢气激波速度约2 km/s,锡靶内界面平均速度约为0.8 km/s)。值得注意的是,超快喷射物质的前端一直跟随激波界面运动,而没有穿透激波界面,同时能被可见光穿透,说明其量很少。图22所示X光照相结果只显示出喷射物主体,而超快喷射物被X光穿透了,这进一步验证了可见光图像中超快喷射物量很少的结论。喷射物主体前端位置可以从X光照片中读取,但后界面位置由于离锡靶太近较难分辨。图23展示了章征伟^[4]根据实验图像,提取出颗粒群位置、靶内界面和气体激波位置等信息,并和SOLID程序计算结果进行的对比结果。从图23可以看出,可见光照相对应的颗粒群前界面位置和X光照相结果基本一致,气体激波位置和计算结果吻合很好。气体激波在16 μs 处聚心反弹,大约在18 μs 时反弹激波到达喷射物前端位置,受反弹激波作用,混合层宽度受压缩减小,同时X光图片显示19.2 μs 时混合层前端变得更黑,表明受反弹激波压缩,混合层前端颗粒密度更大。

在FP装置上发展建立的另一类标准混合实验即所谓的粘粉靶充气混合实验。目前基于冲击诱导的表面微喷射混合,对喷射颗粒尺度大小及其分布尚缺乏直接观测手段,而颗粒尺度对气-粒两相流、颗粒输运及破碎等问题研究有重要影响。借助粘粉靶实验技术,可以在超光洁靶内表面粘接颗粒度大小、总质量已知的预制粉层,当冲击波出自由面时,预制颗粒层喷射进入中心气区形成混合。该方法的好处在于颗粒材质、大小、总质量已知,特别适合于开展颗粒输运、气动破碎及气粒耦合等问题研究。基于FP装置,仍然采用内直径为30 mm、厚度为0.5 mm的铝套筒,超光洁铝靶内直径为21 mm、厚度为0.7 mm,在铝靶内表面通过真空硅脂粘接平均尺度为10 μm 的钨粉。6个靶样品真空硅脂层平均质量为6.65 mg,发次间极差小于3.8%,通过硅脂粘接的钨粉平均质量为120.4 mg,发次

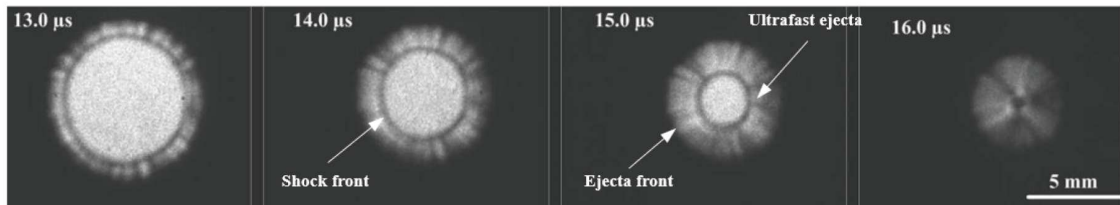


图 21 粗糙锡靶可见光照相序列实验图像
Figure 21 The visible light imaging of sequential experiments on rough tin target.

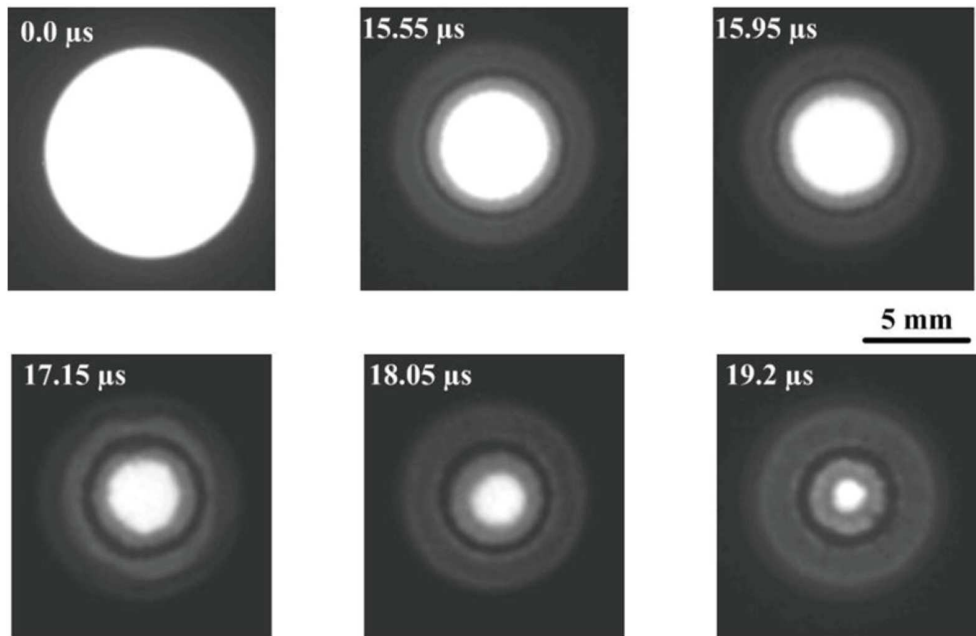


图 22 粗糙锡靶X光照相序列实验图像

Figure 22 The X-ray imaging of sequential experiments on rough tin target.

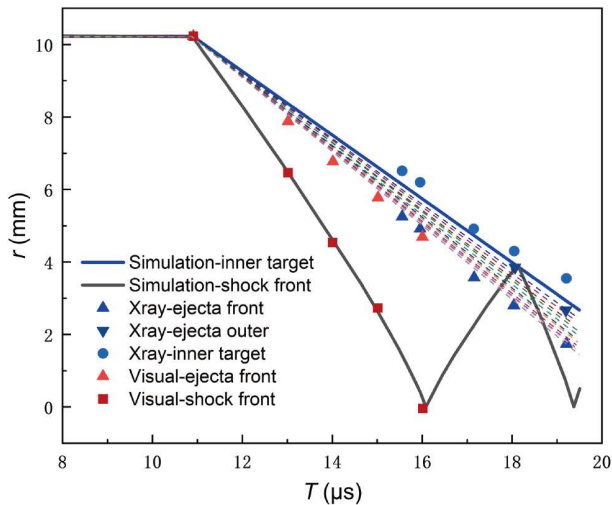


图 23 (网络版彩图)典型时刻气体激波、混合层演化模拟与实验结果对比

Figure 23 (Color online) The comparison of simulation and experimental results for shock wave and mixed layer evolution at typical moments.

间极差小于3%。套筒和靶之间为真空, 铝靶内为1 atm 空气. 采用上述6个样品靶首次获得的充气流程中预制钨粉动力学过程X光精密图像见图24. 序列实验表明, 在1 km/s撞击速度下, 钨粉颗粒由靶内界面飞出, 经过一定时间即完全分离, 粉层具有周期性调制结构, 可能

和粘粉工艺有关; 粉层随着内爆汇聚过程变得厚而密实, 且内爆聚心时靶未能追赶上钨粉层.

图25(a)为钨粉混合层厚度随内爆时间的变化. 由图可见, 靶-粉完全分离时(15.5 μs)初始混合层厚度约为0.75 mm, 随着靶向内汇聚, 混合层厚度持续增加, 这表明颗粒尺度大, 内充1 atm空气的气体阻滞作用并不明显. 当汇聚至轴线时, 混合层厚度最大达到1.35 mm. 图25(b)和(c)分别为10和1 μm粒径粘粉靶不同时刻混合层演化图像对比, 其他条件完全相同. 对比实验结果显示, 10 μm粘粉靶在15.5 μs时靶-粉已完全分离, 而对于1 μm粒径的粘粉靶, 16.5 μs时靶-粉尚未完全分离, 这表明颗粒度越大, 惯性越大, 气体阻滞作用越小, 钨粉与基体分离越早. 对比10 μm粘粉靶(17 μs)及1 μm粘粉靶(18.5 μs)图像可见, 小颗粒度粘粉靶实验在钨粉层与基体间弥漫的颗粒物更多, 同时脱离基体的1 μm粒径钨粉与基体之间的速度差值也小于10 μm粒径钨粉对应的差值, 这也是颗粒越小气动阻滞效应越明显所导致的.

5 总结与展望

高性能磁驱动固体套筒内爆加载及诊断系统是观

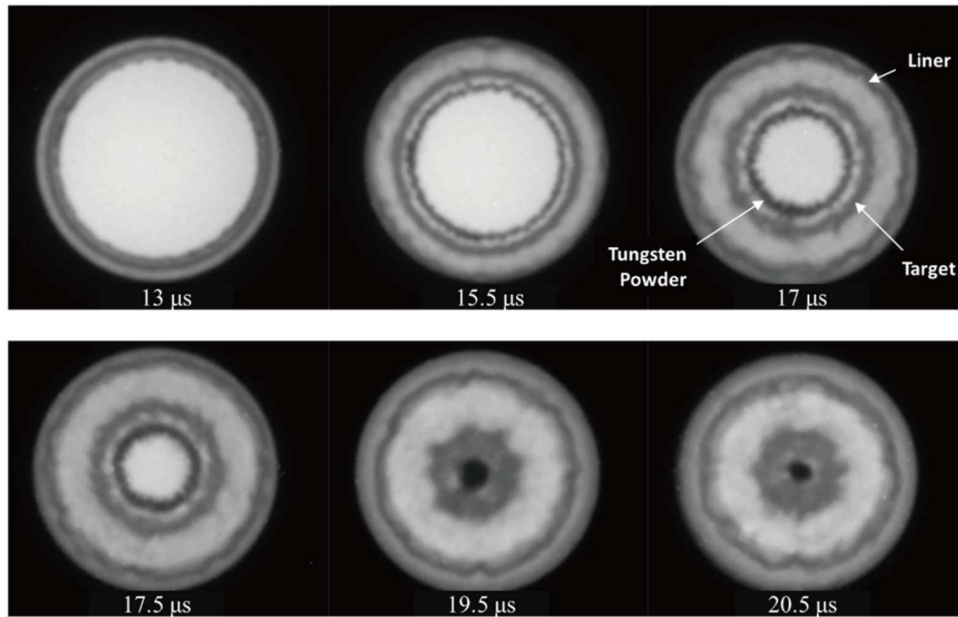


图 24 预制钨粉充气靶的混合演化图像

Figure 24 The imaging of the mixing evolution for gas-filled target with prefabricated tungsten powder on the inner wall.

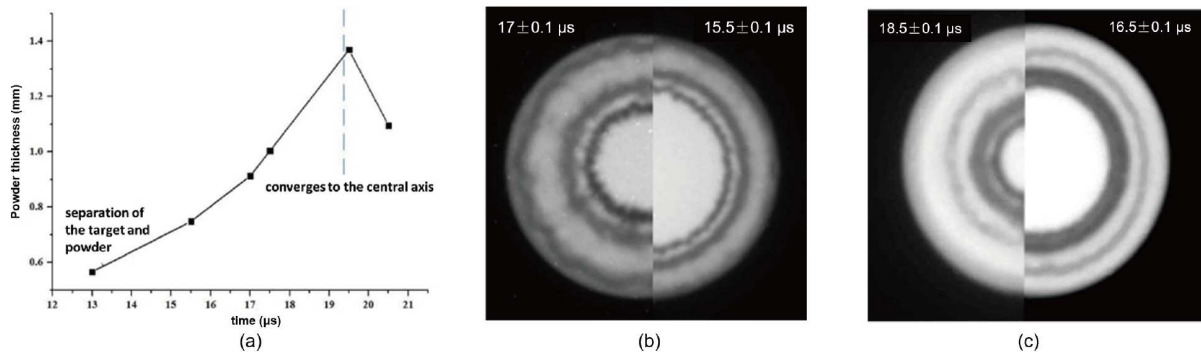


图 25 粘粉靶内爆演化及不同粒径钨粉对比. (a) 混合层演化; (b) 10 μm 粒径; (c) 1 μm 粒径

Figure 25 The implosion evolution of the targets and comparison of tungsten powders with different particle sizes. (a) Evolution of mixed layer; (b) particle size of 10 μm ; (c) particle size of 1 μm .

测极端条件下材料物性、复杂流体动力学行为和高能量密度物理过程的重要手段, 是推动脉冲功率大科学装置建设、聚变能源和国防装备发展的核心技术. 鉴于磁驱动套筒内爆的高重复性、高可靠性、高效费比及便于防护和可抵近观测等独特优点, 其在武器物理实验研究中有不可替代作用, 并与炸药、激光和气炮等加载手段相互补充, 共同构建实验室内爆动力学精密实验体系. 从第一代FP-1装置的探索建设到升级为储能3.456 MJ、电流峰值10 MA的FP-2长脉冲大电流

装置, 我们通过长期的工程技术攻关及基础科学研究, 建立了从脉冲功率器件研制到模块化集成应用的全链条技术体系. 通过大量实验证实装置发次间电流波形分散性 $<1\%$, 内爆速度波形分散性 $<2\%$, 撞靶角向时间偏差小于20 ns, 这表明试验平台具备良好的同步性、重复性和内爆对称性. 基于FP-1/2装置, 针对不同的物理需求设计了多种构型负载, 驱动数克至数十克的金属套筒达到500 m/s–7 km/s速度, 并已成功应用于复杂构型气区流场、界面不稳定性、充气微喷混合及气粒两相流等

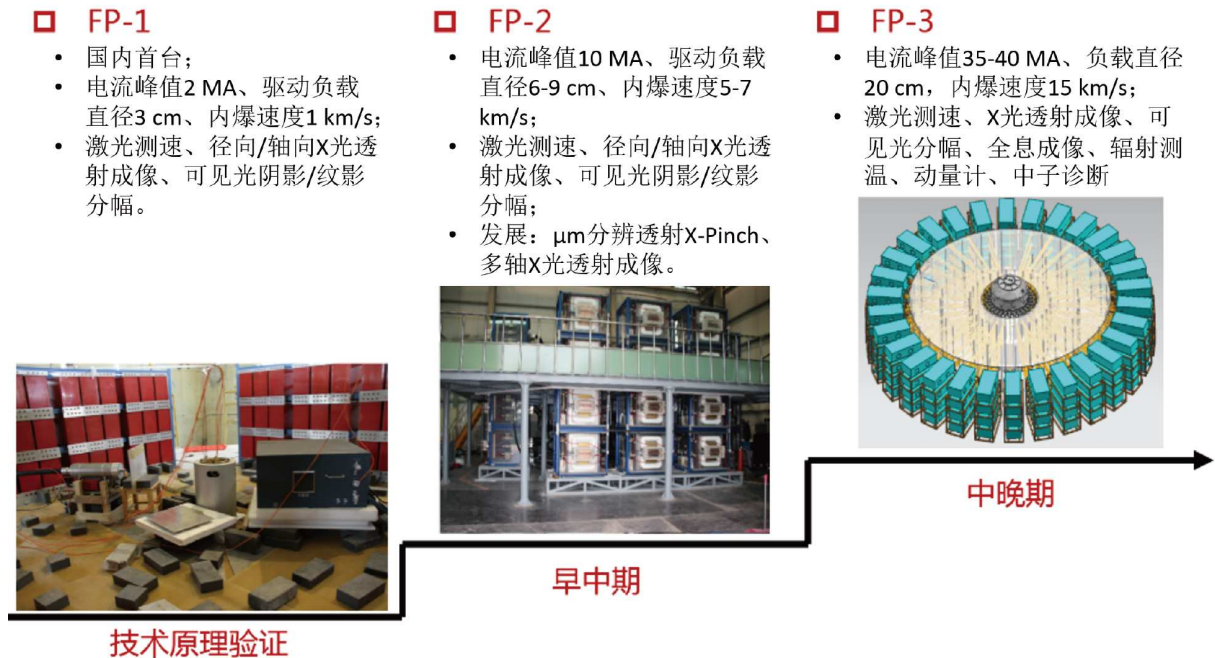


图 26 (网络版彩图)磁驱动固体套筒内爆现有能力及未来展望

Figure 26 (Color online) The current capability and future prospect of magnetically driven solid liner implosion.

实验研究, 为验证和改进复杂流体动力学模型与计算代码提供了实验数据支撑. 尽管近些年在磁驱动固体套筒内爆实验及应用方面取得了丰硕成果, 但应该看到现有能力离实际的工程需求还有不小差距, 开展的相关应用研究还不充分, 获取数据的手段还比较欠缺. 在加载能力方面, 建立了能够在实验室内分解模拟实际工程早、中期阶段的试验装置, 但对中、晚期过程的分解模拟还无能为力. 在测试诊断方面, 目前只有低能段X光测试手段, 穿透能力受限, 且由于光斑在1 mm左右, 其空间分辨率较差, 无法对微米级颗粒进行直接诊断, 气-粒输运、气动破碎问题还无法深入开展研究. 同时, 受加载能力限制, 内爆减速反弹过程还无法模拟. 展望未来, 需要以实际工程需求为牵引, 提升加载及高精密诊断能力, 以此为基础大力拓展应用实验研究.

在平台能力提升方面, 需要实现套筒直径20 cm、内爆速度15 km/s、压力大于2 TPa的加载能力, 相应的脉冲功率装置输出电流需要提升至35–40 MA(规划建设的FP-3装置). 图26所示FP系列装置建设完成后, 可以覆盖典型工程应用中分解流体动力学实验的早、中及晚期全过程. 要达到上述能力, 在脉冲功率装置建

设方面, 需要突破大库仑量($\sim 1000\text{ C}$)、大电流($\sim 1\text{ MA}$)闭合开关设计及大规模同步触发技术, 同时需要引领国内企业解决低电感($\sim 100\text{ nH/m}$)、高电压(400 kV)柔性传输电缆、高功率大电流可变电阻器等核心部组件的研制及大规模生产应用难题. 在内爆负载设计方面, 要突破二维/三维弹塑性磁流体动力学程序代码的编制与应用, 助力解决套筒与滑移电极大变形设计、靶区变形造成电回路电压突然抬升导致的装置意外击穿破坏等工程问题.

在测试诊断方面, 目前已建立PDV内爆速度测量、X光及多分幅可见光等基本测试手段. 未来, 用于透射成像的X光机电压等级需提升至1 MV以上, 以适应更高清晰度成像的需求. 同时, 需研制、建设X-pinch背光源照相平台和激光全息成像系统, 提升空间分辨率至微米量级. 以此为基础, 可在复杂构型内爆加载下开展气动破碎与气-粒耦合、柱面内爆减速反弹及湍流混合、多次冲击加卸载下内爆行为特性、高速冲击加载下多界面动态摩擦行为等复杂流体动力学研究, 开发建立创新加载与诊断手段, 获取高精密批量化实验数据, 为物理模型及代码校核提供技术支撑.

致谢 本文作者首先感谢磁驱动固体套筒内爆研究方向的开拓者孙承伟院士一直以来对本研究工作的长期指导. 感谢杨礼兵研究员、宋盛义研究员早期在固体套筒内爆研究中所作出的贡献, 特别是在FP-1装置论证与建设、套筒内爆动力学屈曲研究方面的创造性工作. 感谢张扬博士、王裴研究员在固体套筒及负载靶设计、数据解读与实验方案讨论等方面的帮助与支持.

参考文献

- 1 Sun C W. Research on high energy density physics problems under electromagnetic loading (in Chinese). *High Energ Dens Phys*, 2007, 3: 41–46 [孙承伟. 电磁加载下的高能量密度物理问题研究. *高能量密度物理*, 2007, 3: 41–46]
- 2 Rosen M D. The science applications of the high-energy density plasmas created on the Nova laser. *Phys Plasmas*, 1996, 3: 1803–1812
- 3 Huang X B, Xu Q, Wang K L, et al. Progress on high energy density physics experiments with pinch devices (in Chinese). *Laser Part Beams*, 2021, 33: 65–80 [黄显宾, 徐强, 王昆仑, 等. 基于箍缩装置的高能量密度物理实验研究进展. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 65–80]
- 4 Zhang Z W. Theoretic and experimental study on magnetically driven solid liner implosion (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Mianyang: China Academy of Engineering Physics. 2020 [章征伟. 磁驱动固体套筒内爆理论与实验研究. 博士学位论文. 绵阳: 中国工程物理研究院. 2020]
- 5 Turchi P J, Baker W L. Generation of high-energy plasmas by electromagnetic implosion. *J Appl Phys*, 1973, 44: 4936–4945
- 6 Yang L B. Research on the dynamic behavior of magnetically driven liner implosion (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Mianyang: China Academy of Engineering Physics. 2008 [杨礼兵. 电磁驱动套筒内爆动力学研究. 博士学位论文. 绵阳: 中国工程物理研究院. 2008]
- 7 Chernyshev V K. The main types of explosive magnetic generators, their application. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics*. 1996. 235–240
- 8 Peterson D L, Bowers R L, Lebeda C F, et al. Comparison and analysis of 2-D simulation results with two implosion capacitor banks radiation experiments on the Los Alamos PEGASUS I and PEGASUS II capacitor banks. In: *Proceedings of the Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*. 1995. 118–123
- 9 Cochrane J C, Hockaday R G, Bartsch R R, et al. Direct drive foil implosion experiments on Pegasus II. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Dense Z-Pinches*. 1993. 381–387
- 10 Wurden G A, Davis H A, Taylor A, et al. Atlas chamber, power flow channel, and diagnostic interface design. In: *Proceedings of the IEEE International Pulsed Power Conference*. 1997. 1291–1296
- 11 Davis H A, Ballard E O, Elizondo J M, et al. The Atlas power-flow system—a status report. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, 28: 1405–1413
- 12 Miller E O, Ballard G W, Barr D W, et al. The ATLAS pulsed power facility for high energy density physics experiments. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Pulsed Power Conference*. 1999. 484–488
- 13 Turchi P J, Reass W A, Rousculp C L, et al. PHELIX: Design and analysis of a transformer-driven liner implosion system. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39: 2006–2013
- 14 Rousculp C L, Oro D M, Reass W A, et al. The PHELIX liner demonstration experiment (PLD-1). In: *Proceedings of the IEEE Pulsed Power Conference*. 2011. 1282–1287
- 15 Selemir V D. Pulsed power explosive generators for physical study. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*. 2004. 161–168
- 16 Buyko A M. Basic directions of EMG-assisted research. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*. 2004. 126–134
- 17 Reinovsky R E, Anderson W, Atchison W, et al. Pulsed power hydrodynamics: A new application of high magnetic fields. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*. 2002. 696–705
- 18 Faehl R J, Hammerberg J. Design and MHD modeling of atlas experiments to study friction. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*. 2002. 772–778
- 19 Sorenson D S, Carpenter B, King N S P, et al. Ejecta experiments at the pegasus pulsed power facility. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Pulsed Power*. 1997. 1387–1392
- 20 Sheppard M G, Atchison W L, Anderson W E, et al. Rayleigh-Taylor mix experiment on Pegasus. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference*. 1997. 1399–1404

- 21 Rousculp C L, Oro D M, Morris C, et al. Damaged surface hydrodynamics (DSH) flash report. 2015
- 22 Rousculp C L, Reass W A, Oro D M, et al. The PHELIX pulsed power project: Bringing portable magnetic drive to proton radiography. In: Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. 2012. 1–5
- 23 Reinovsky R E. Pulsed power experiments in hydrodynamics and material properties. In: Proceedings of the 12th IEEE Pulsed Power International Conference. 1999. 38–43
- 24 Younger S M. AGEX II-the high-energy-density regime of weapon physics. Los Alamos Sci, 1993, 21: 63–69
- 25 Buyko A M, Garanin S F, Ivanova G G, et al. Modeling of MAGO plasma compression by imploding liner. In: Proceedings of the 12th IEEE Pulsed Power International Conference. 1999. 1052–1055
- 26 Tuszewski M. Field reversed configurations. *Nucl Fusion*, 1988, 28: 2033–2092
- 27 Sshoenberg K F. Magnetized target fusion. In: Proceedings of the Current Trends in International Fusion Research. 1998. 319–332
- 28 Lindemuth I R. Joint US/Russia plasma formation experiments for magnetic compression/magnetized target fusion (MAGO/MTH). In: Proceedings of the Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. 1995. 601–606
- 29 Yang L B, Sun C W, Feng S P, et al. Study on direct drive liner implosion on FP-1 (in Chinese). *Combust Explos Shock Waves*, 1998, 18: 338–343 [杨礼兵, 孙承伟, 丰树平, 等. FP-1直接驱动套筒内爆技术研究. *爆炸与冲击*, 1998, 18: 338–343]
- 30 Sun Q, Jia Y, Zhang Z, et al. Cylindrical metal liner implosion at extremes of pressure and material velocity on an intense pulsed power facility-FP-2. *Rev Sci Instruments*, 2022, 93: 013904
- 31 Yang L B, Sun C W, Liao H D, et al. Implosion of solid liner driven by electro-magnetic force (in Chinese). *Combust Explos Shock Waves*, 2000, 20: 156–159 [杨礼兵, 孙承伟, 廖海东, 等. 电磁驱动固体套筒的内爆. *爆炸与冲击*, 2000, 20: 156–159]
- 32 Liao H D, Hu X J, Yang L B, et al. A one dimensional explicit magnetic hydro-dynamic model of electro-magnetic implosion (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 1998, 12: 174–180 [廖海东, 胡熙静, 杨礼兵, 等. 电磁内爆的一维显式数值模拟. *高压物理学报*, 1998, 12: 174–180]
- 33 Liu Q T, Sun C W, Hu X J. The numerical simulation of solid liner implosion in SSS code (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2004, 18: 183–187 [刘启泰, 孙承伟, 胡熙静. SSS程序在电磁内爆中的数值模拟. *高压物理学报*, 2004, 18: 183–187]
- 34 Sun C W, Lu Y, Zhao J B, et al. SSS-MHD: A one-dimensional magneto-hydrodynamics multi-physics simulation platform for magnetically-driven high-energy-density dynamics experiments (in Chinese). *Combust Explos Shock Waves*, 2023, 43: 104201 [孙承伟, 陆禹, 赵继波, 等. 电磁驱动高能密度动力学实验的一维磁流体力学多物理场数值模拟平台: SSS-MHD. *爆炸与冲击*, 2023, 43: 104201]
- 35 Song S Y, Chen G. A numerical simulation to dynamic buckling of magnetically imploding liner (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2005, 19: 325–330 [宋盛义, 陈刚. 电磁内爆套筒屈曲的数值模拟. *高压物理学报*, 2005, 19: 325–330]
- 36 Song S Y, Yang L B, Chen G, et al. Experiments and numerically modeling of dynamic buckling of magnetically imploding metallic liner (in Chinese). *Combust Explos Shock Waves*, 2005, 25: 423–429 [宋盛义, 杨礼兵, 陈刚, 等. 电磁内爆套筒动力屈曲的实验和数值模拟. *爆炸与冲击*, 2005, 25: 423–429]
- 37 Yang L B, Sun C W, Liao H D, et al. High energy density physics facility FP-1 and its applications (in Chinese). *Laser Part Beams*, 2002, 14: 767–770 [杨礼兵, 孙承伟, 廖海东, 等. 高能密度物理实验装置FP-1及其应用. *强激光与粒子束*, 2002, 14: 767–770]
- 38 Zhang Z W, Wei Y, Sun Q Z, et al. Effect of material strength on electromagnetic driven solid liner implosion (in Chinese). *Laser Part Beams*, 2016, 28: 045017 [章征伟, 魏懿, 孙奇志, 等. 材料强度对电磁驱动固体套筒内爆过程的影响. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 045017]
- 39 Zhang Z W, Wang G L, Zhang S L, et al. Application of electrical action to design and analysis of magnetically driven solid liner implosion (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 050701 [章征伟, 王贵林, 张绍龙, 等. 电作用量在磁驱动固体套筒内爆设计分析中的应用. *物理学报*, 2020, 69: 050701]
- 40 Zhang S, Liu W, Wang G, et al. Investigation of convergent Richtmyer-Meshkov instability at tin/xenon interface with pulsed magnetic driven imploding. *Chin Phys B*, 2019, 28: 044702
- 41 Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K. The physics of fast Z pinches. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 167–223
- 42 Ding N, Yang Z H, Ning C. Optimization design of a wire array load for Z-pinch plasma implosion experiments (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2004, 53: 808–817 [丁宁, 杨震华, 宁成. Z箍缩等离子体内爆实验金属丝阵列负载优化设计分析. *物理学报*, 2004, 53: 808–817]
- 43 Ding N, Zhang Y, Ning C, et al. Design and analysis of the Z-pinch loads on the PTS facility (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2008, 57: 3027–3037 [丁宁, 张扬, 宁成, 等. PTS装置Z箍缩负载设计分析. *物理学报*, 2008, 57: 3027–3037]
- 44 Zhang S L, Zhang Z W, Sun Q Z, et al. Effect of current rise time on electromagnetic driven solid liner implosion (in Chinese). *Laser Part Beams*, 2017, 29: 105002 [张绍龙, 章征伟, 孙奇志, 等. 电流脉冲前沿对电磁驱动固体套筒内爆的影响. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 105002]

- 45 Tucker T J, Toth R P. EBW1: A computer code for the prediction of the behavior of electrical circuits containing exploding wire elements. 1975
- 46 Liu C W, Xiao Z L, Zhang Y S. A review of research progresses on potential flow theory of single-mode fluid interfacial instabilities (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2024, 54: 6–33 [刘昌文, 肖左利, 张又升. 单模流体界面不稳定性势流理论研究进展综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 6–33]
- 47 Mikaelian K O. Shock-induced interface instability in viscous fluids and metals. *Phys Rev E*, 2013, 87: 031003
- 48 Mikaelian K O. Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities and mixing in stratified cylindrical shells. *Phys Fluids*, 2005, 17: 094105
- 49 Holder D A, Smith A V, Barton C J, et al. Shock-tube experiments on Richtmyer-Meshkov instability growth using an enlarged double-bump perturbation. *Laser Part Beams*, 2003, 21: 411–418
- 50 Wang P, He A M, Shao J L, et al. Numerical and theoretical investigations of shock-induced material ejection and ejecta-gas mixing (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 106–116 [王裴, 何安民, 邵建立, 等. 强冲击作用下金属界面物质喷射与混合问题数值模拟和理论研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 106–116]

Research progress in experimental studies of magnetically driven solid liner implosion in China

SUN QiZhi^{1,2,3}, ZHANG ZhengWei^{1,2}, ZHANG ShaoLong¹, JIA YueSong^{1,2,3},
SHEN HuiTing^{1,2*}, QIN WeiDong¹, ZHANG NanChuan^{1,3}, ZHOU RongGuo¹, LIU Wei¹,
ZHAO XiaoMing¹, WANG GuiLin¹, WEI Bing^{1,3} & ZHANG ZhaoHui^{1,3}

¹*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

²*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Mianyang 621900, China*

³*Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

**Corresponding author (email: shenht163@163.com)*

Magnetically driven solid liner implosion is widely used for achieving high energy density states in the laboratory, with important applications in hydrodynamics, weapon physics, fusion energy and other fields. The FP-1/2 solid liner implosion loading platform was developed by the Institute of Fluid Physics of the Chinese Academy of Engineering Physics. It has conducted experimental studies on various complicated configuration implosions, assisted by a precise testing and diagnostic system, and has played a vital role in associated major concerns and applied research. This paper reviews the development and present state of the magnetically driven solid liner implosion platform, as well as the physical application experiments based on FP-1/2 facility in recent years and the insights gained. The device-load target's matching and optimization design reduces the current waveform deviation between shots to less than 1%, the implosion velocity waveform deviation to less than 2%, and the maximum time deviation as the liner impacts on the target to less than 20 ns. It demonstrates that the driven platform has good synchronization, repeatability and implosion symmetry, which are the foundations of high-precision physical experiments. Based on the FP facility, metal liners weighing several grams to tens of grams are driven to achieve implosion velocities ranging 1–7 km/s, and have been successfully applied in flow field studies in complex-configuration gas regions, cylindrical RM/RT interface instability, cylindrical gas-filled ejecta mixing and gas-particle two-phase flow, among other experimental studies. Rich experimental evidences have also been acquired, and it is critical that we enhance our understanding of the underlying physical difficulties. In the future, it will be necessary to improve loading and high-precision diagnosis capabilities in response to actual engineering needs, develop innovative experimental technologies, collect high-precision experimental data, and provide data support for the verification of physical models and 2D/3D codes.

magneto-hydrodynamic, pulsed power technology, shock dynamics, high energy density physics, solid liner

PACS: 52.30.Cv, 84.70.+p, 47.80.Cb, 47.20.Ma, 47.40.-x

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0285](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0285)