

FP-直接驱动套筒内爆技术研究

杨礼兵 孙承纬 丰树平 胡熙静

(中物院流体物理研究所 成都 523信箱 610003)

摘要 在 FP-装置上已成功地进行了 3 94g 固体铝套筒的内爆实验, 加载电流达 2 3M A, 理论预估内爆速度最大可达 2 0km /s 同时, 具备了相对应的零维、一维流体力学模拟计算能力, 可以有效地配合实验工作的开展。

关键词 电磁内爆 固体套筒 电流 数值模拟

中图法分类号 O 361*

1 引言

FP-装置是我们最近组建的、用于电磁内爆技术研究的国内首创实验装置。作为一种流体动力学实验室模拟手段, 电磁内爆包括实验模拟技术和数值模拟技术两个方面, 在发展过程中二者相互作用, 共同促进, 为有关物理问题的研究发挥着重要的作用。电磁内爆技术是利用大于兆安培量级的脉冲电流流经圆柱或球形壳体时产生的内聚电磁箍缩力, 驱动固体套筒(或等离子体衬套)内爆, 在大于立方厘米的体积空间内形成高能密度区域而开展流体动力学和辐射输运规律研究。有关工作在美国称为 AGEX II (Above-G round Experiment for the High-energy-density Regime of Weapons Physics)^[1]。由于它具备实验时空尺度大 ($> 1000\text{mm}^3$)、能量密度高 ($> 1\text{MJ}/1000\text{mm}^3$)、内爆速度和压力高 ($10\sim 50\text{km/s}$, 1TPa)、内爆对称性和均匀性好以及实验技术的通用性等特点, 因而颇受重视。美国、俄罗斯、英国、德国、日本等国家都开展了这方面的工作。

电磁内爆能源有爆炸磁压缩发生器 (MFCG) 和电容器组两种。MFCG 可以产生非常大的电流 (最大可达几百兆安), 但它是一次性使用装置, 对开展初期的研究工作有一定的困难。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 的 Procyon 装置以及俄罗斯的圆盘发生器 (DISK) 就属于这一类。电容器组能源可重复使用, 特点适合于在室内进行关键技术和有关物理规律的研究。LANL 的 Pegasus II 装置^[2-3]最大储能达 4 3M J 由 144 台 50-24 型脉冲电容器组成, 输出的最大实验电流达 15M A, 固体套筒内爆压力达 0 1TPa, 内爆速度可达 13km /s。美国空军菲利普实验室的 Shiva Star 装置^[4]最大储能达 9 5M J 由 864 台 60-6 0 型脉冲电容器组成, 输出的最大实验电流可达 40M A, 内爆压力可达 1TPa, 内爆速度可达 20km /s 以上。

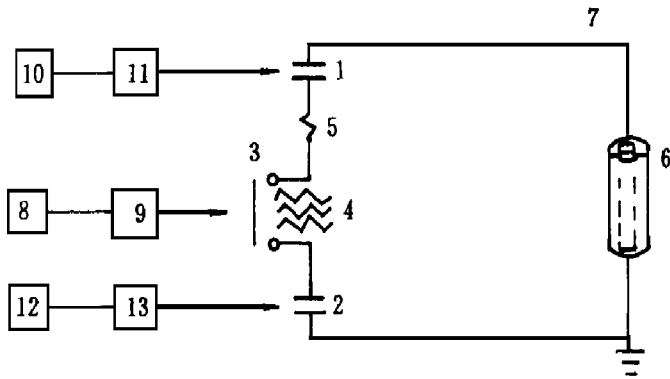
* 杨礼兵: 男, 1968年9月生, 硕士, 助理研究员。
1997-11-20收到原稿, 1998-03-17收到修改稿。

2 FP-装置

2.1 概述

FP-装置由 216 台 MCF50-4 型脉冲电容器组成 (每台电容器额定电压 50kV, 额定容量 4F), 最大储能 1.08MJ (工作电压 100kV), 总的系统电感 100nH, 输出电流能力 3~5MA。电容器允许直接短路放电, 寿命可达 1 万次。

能源系统主要由电容器组、充电系统、开关系统、绝缘结构、汇流器件等单元构成。其原理性框图如图 1。



1 Top half of bank (-50kV); 2 Bottom half of bank (+50kV); 3 Close switches; 4 Insulator; 5 Series fuse; 6 Line; 7 Aluminum transmission plates; 8 Pulsed generator; 9 Isolated transformer; 10, 12 Charging facility; 1, 2, 11, 13 High voltage transformer; 1, 2

图 1 能源系统示意框图

Fig. 1 Sketch of energy system

2.2 电容器组

一般来说, 对于 RLC 放电回路, 当 $R \ll \sqrt{L/C}$ 很小时, 脉冲电流的峰值 $I_{max} = V_0 \sqrt{C/L}$ 。其中 V_0 是充电电压, C 是总的电容量, L 是总的回路电感, R 是回路电阻。初始电压直接决定了输出电流的大小。但在实验室空气环境的具体条件下, 高压运行对相应元件性能要求较高; 而在大气环境中, 当电压高于 25kV 时, 电晕过程发展很快, 容易引起能量泄漏、表面闪络而发生电击穿现象。为了取得高电压的优势, 又能克服高电压的弊端, 我们采用了并联充电串联放电技术。即整个电容器组分成两个部分, 一部分充正电压 (如 +50kV), 另一部分充负电压 (如 -50kV), 充电时相互电隔离, 放电时由闭合开关导通, 使得工作电压翻倍。在实际工作中, 电容器组分成了上下两层 (各含 108 台脉冲电容器), 上半组充负电, 下半组充正电, 最大标称电压可达 100kV, 电容器组最大储能达 1.08MJ。一般的实验电压在 60~80kV 之间。

为了有效地减小电感, 我们采用了分组并联技术。将电容器组分成四个大单元呈正四边形分布 (上下两层), 工作负载位于正中心, 四大单元并联向中心输出加载电流。在各大单元中, 电容器又分三小组, 每小组有九台电容器并联, 上下两小组之间连结一个闭合开关, 因而 FP-1 共有 12 个闭合开关 (3×4)。

在电容器组中, 还使用一种铝膜熔断器结构, 用以限制放电过程中的反向电压并吸收实验后的剩余能量。熔断器串接在开关和上层电容器组正极之间。

2.3 闭合开关及充电系统

闭合开关系统由开关器件本身、高压隔离变压器、脉冲发生器 (开关触发器) 三部分构成。闭合开关系统是整个能源系统的一项关键技术, 要求具备绝缘性能良好、导通电阻和电感小、携带电流能力强、抖动小、多路同步性能良好等特点。在脉冲功率技术中, 可供选择的开关类型有轨道间隙开关、固体介质开关、场畸变开关等。目前使用的是爆炸闭合开关。

爆炸开关工作的基本原理是用雷管(视情况也可使用炸药)驱动金属器件形成射流,射流在定向运动中刺穿绝缘介质而达到导通两汇流板并携带回路电流的目的^[5]。在 FP-1 中,选用了 LD-10A 雷管,绝缘层采用聚脂薄膜,膜的厚度选择与充电电压有关(但开关无工作电压限制,在任何初始条件下均能正常工作)。射流器件是环形的金属铝罩。整体采用 40mm 厚的环氧玻璃布板夹固,用于防护工作时的电动力以及雷管引爆时的冲击力。爆炸开关应用到电爆装置中,通过的最大电流达到了 450kA(单个)。在能源调试中,12 路开关的同步分散性约 2 μ s。

在工作状态下,雷管引脚上的电压与工作电压一致。因而在实验中使用了高压隔离变压器,防止高压(30~40kV)串入测试间,危及人身和设备安全。

充电系统包括恒流充电机、高压变压器、充电水电阻以及接地装置等。根据设备能力,装置的大小,采用了两组完全相同的充电设备,各自独立分管 108 台电容器,充电机采用 LC 恒流输出方式,输出电流 ± 175 mA,变压器高压端输出 ± 50 kV。

3 数值模拟

内爆过程的数值模拟在 LANL 有零维(Slug 模型)计算,一维、二维磁流体力学计算。我们已完成的有零维计算和一维单温磁流体力学计算^[6]。

磁流体力学方程组包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、磁扩散方程分别如下

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \nabla \cdot (d\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$d \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla (p + q) - \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$e_T \frac{dT}{dt} + (q + T p_T) \frac{dv}{dt} - e_D + \frac{1}{d} \nabla \cdot \mathbf{F} + Q_{\text{rad}} = 0 \quad (3)$$

$$d \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{B}}{d} \right) - (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{u} = - \nabla \times \left(\frac{Z}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \right) \quad (4)$$

式中: d 是密度, \mathbf{u} 是速度, t 是时间, p 是标量压强, q 是人为粘性, \mathbf{J} 是电流密度, \mathbf{B} 是磁场, T 是温度, v 是比容, e_T 是定容比热, e 是比内能, e_D 是单位质量焦耳热, \mathbf{F} 是热流矢量, Q_{rad} 是单位质量的韧致辐射损失, μ_0 是真空磁导率, Z 是电阻率。状态方程采用 Sesame 库数据,电流回路方程由装置电工线路决定。方程组通过柱坐标和拉格朗日变化,最后形成差分格式的方程组。再通过三次分裂后,采用 Newton-Raphson 方法求解就可以得到有关物理量的结果。该项工作将有专门论文发表,此处从略。

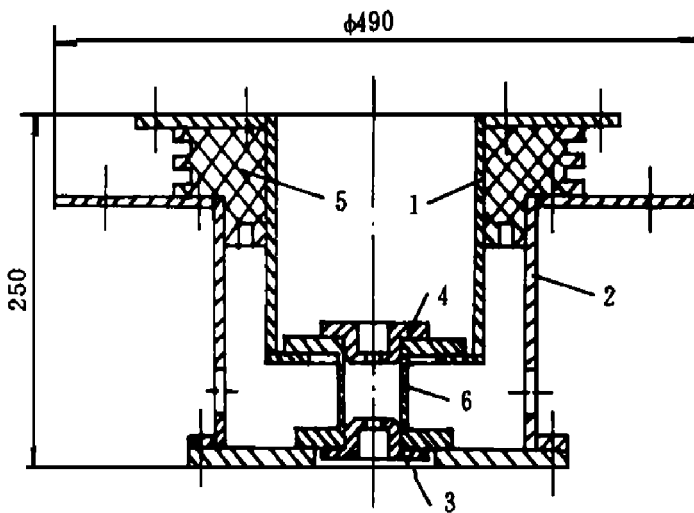
4 结果及分析

4.1 实验结果

图 2 是内爆靶室和固体套筒的装置示意图。在套筒设计中,为了制造和装配上的方便,套筒圆柱体高度大于所需尺寸,同时两端各设计了一个法兰盘作为大电流接触体。在套筒空腔的每一端都插入一个空心圆柱体铜滑动环提供套筒运动中所需的环形电接触面(目前设计宽度为 10mm),套筒实际高度由铜滑动环间的距离决定。每个铜滑动环接触表面倾斜 8°,以确保套筒加速时保持接触。铜滑动环接触表面外径上设计了一个矩形凹槽,在放电开始时切割套筒成形,并在铜滑动环的接触表面之间保持良好的初始弹性。套筒直径 38mm,高度 20mm,厚度

0.6 mm, 重量 3.929 g, 空腔 (内为空气) 体积 $22.6 \times 10^3 \text{ mm}^3$, 材料有 LY12, L4, L5

图 3 是一次内爆实验结果。工作电压 $\pm 30 \text{ kV}$, 材料为 L4。电流采用 Rogowski 的 RL 积分线圈测量, TDS744A 数字化示波器记录。



- 1 Positive plate
- 2 Negative plate
- 3, 4 Bottom and top copper glide planes
- 5 Insulator; 6 Liner

图 2 FP-1 装置内爆靶室

Fig. 2 Implosion target chamber of FP-1 facility

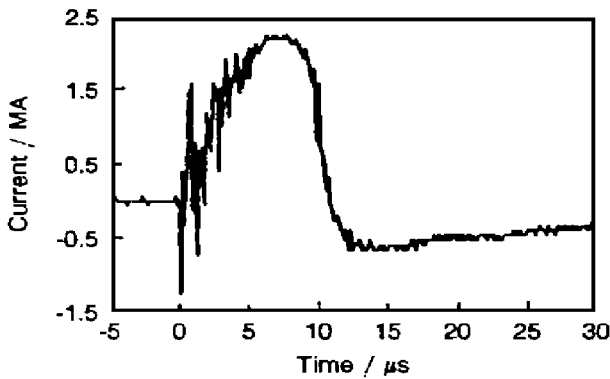


图 3 实验电流波形

Fig. 3 Experimental current wave

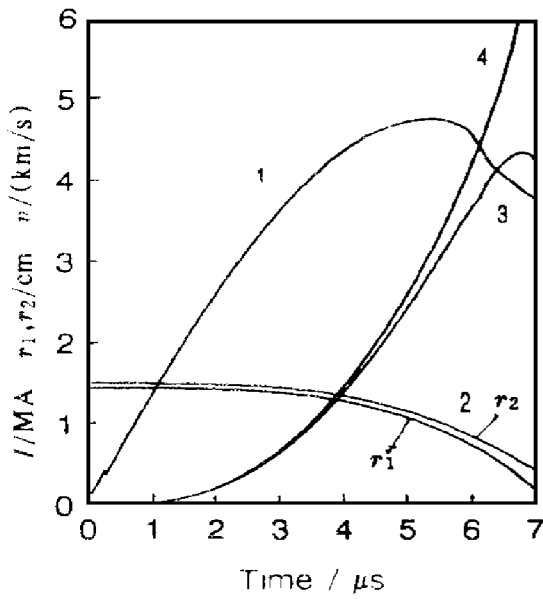
4.2 计算结果

表 1 是几种不同工作条件下的计算结果, 图 4~5 是一维单温磁流体力学一个较理想的参数计算结果, 计算参数选择如下: 电容器组电容量 $216 \mu\text{F}$, 电阻 $50 \text{ m}\Omega$, 工作电压 100 kV ($\pm 50 \text{ kV}$), 回路电感 70 nH , 总储能 1.08 MJ 。套筒半径 15 mm , 厚度 0.6 mm , 高度 20 mm , 重量 3.05 g , 熔丝面积 340 mm^2 , 长度 400 mm , 厚度 0.05 mm , 材料为纯铝, 状态方程用 Sesame 库数据。

表 1 FP-1 运行的参数预估

Table 1 Prediction of FP-1 facility running parameters

序号	初始条件						预估结果				
	充电电压 / kV	储能 / kJ	套筒直径 / mm	套筒高度 / mm	套筒厚度 / mm	套筒重量 / g	电流峰值 / MA	离开滑动面速度 / (km/s)	离开滑动面加速度 / (cm/s ²)	对碰时速度 / (km/s)	能量转换效率 / (%)
1	± 30	388.8	38	20	0.6	3.929	2.7	1.1	$\times 10^4$	1.4	0.50
2	± 40	691.2	38	20	0.6	3.290	3.4	1.5	$\times 10^4$	2.6	0.55
3	± 45	874.8	38	20	0.6	3.929	3.7	2.2	$\times 10^5$	4.0	0.95
4	± 40	691.2	38	20	0.3	1.949	3.4	3.0	$\times 10^5$	6.0	1.40
5	± 40	691.2	30	20	0.3	1.542	3.4	4.0	$\times 10^6$	10.0	3.00



1 Current(I); 2 Liner's inner(r_1),
outer surface position(r_2);
3 4 Outer, inner surface velocity(v)

图 4 一维计算中一些参数随时间的变化
Fig. 4 One-dimensional computing results

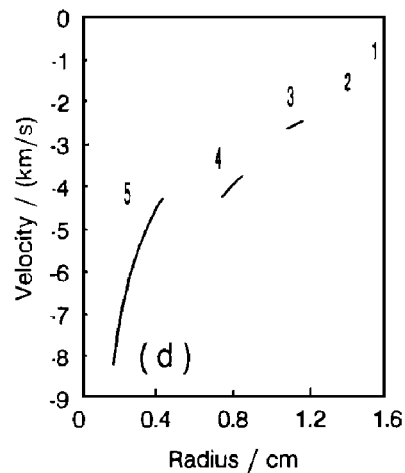
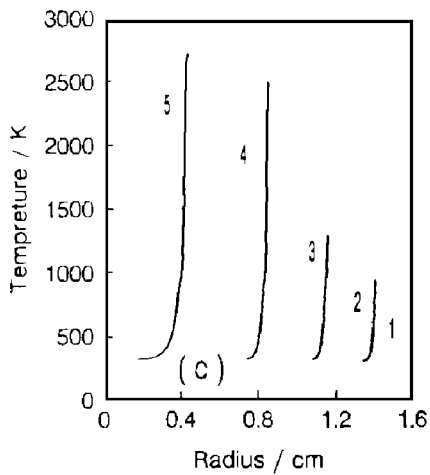
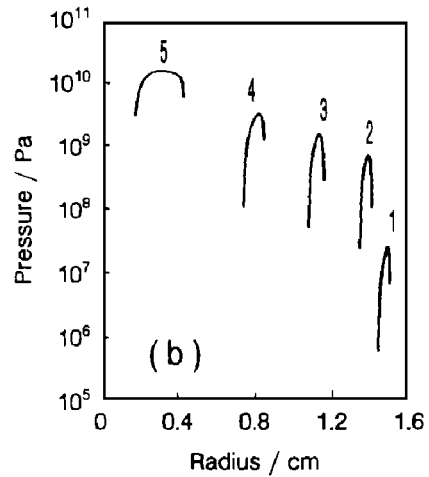
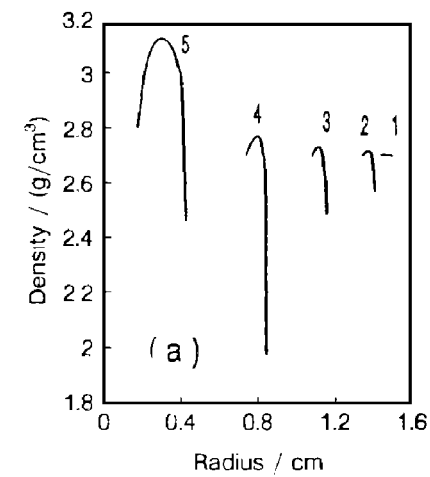


图 5 MHD 计算的密度、压力、温度、速度五个不同时刻的分布
(1 = 0 μ s, 2 = 2 μ s, 3 = 5 μ s, 4 = 6 μ s, 5 = 7 μ s)

Fig. 5 Computing results of density, pressure, temperature, velocity
(1 = 0 μ s, 2 = 2 μ s, 3 = 5 μ s, 4 = 6 μ s, 5 = 7 μ s)

5 结论与讨论

FP-1是国内最先用于圆柱形内爆规律研究的电磁脉冲能源装置,其规模和水平目前来说也是国内最大、最先进的。但由于实验条件和时间进程的限制,此项研究工作刚刚起步,目前只进行了电流和电压的测试工作,其余工作如高速摄影技术、X光照相技术、断路器技术、等离子体内爆技术等将在下一步进行。在目前的状态下,FP-1装置的输出能力还大有潜力可挖(如提高工作电压、改变负载参数)。

在能源的短路放电(无工作套筒,套筒安装处直接连接短路)实验中。相同工作条件下($\pm 30\text{kV}$),电流峰值 3.2MA ,四分之一周期约 $5.0\mu\text{s}$, 12路开关抖动约 $2.0\mu\text{s}$ 。在图3中,电流峰值 2.3MA ,四分之一周期约 $7.0\mu\text{s}$,电流波形 $0\sim 4.0\mu\text{s}$ 时有振荡,这种振荡的原因是由于12路爆炸开关的抖动以及铜滑动环接触表面矩形凹槽切割套筒动作所为,此外还可能与回路器件接触性的好坏(如套筒与靶室、汇流板之间以及套筒聚心运动过程中与铜滑动表面间的接触)有关,可以通过合理设计和精心装配解决一些问题。当然最好的办法是利用断路器来消除内爆初期的不良因素,减小加载电流的上升沿。

从图5可以看到,在套筒的飞行阶段,其状态变化不大,但是运动到轴线附近时,内边界附近的密度、压力、速度都变得很大。从温度曲线可以看到,由于没有发生对碰,中心温度仍很低,因为温度取决于焦耳热,由于趋肤效应,电流集中在外表面,外表面温度高于内表面。这说明在内爆过程中套筒处于固体状态,到达中心后应是固体间的对碰。

在能源建设中,与冷观松、高顺受、龚兴根等老同志进行了非常有益的探讨,参加本工作的还有戴英民、廖海东、欧阳凯、赵淑兰、姚斌等,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Philip D G, Young S M. An Expanding Role for AGEX. Los Alamos Science, 1993 (21): 52~ 69
- 2 Parker J. A Primer on Liner Implosions with Particular Application to the Pegasus II Capacitor Bank. Athena Technical Report, 1993 (1)
- 3 Cochrane J C, et al Direct Drive Foil Implosion Experiments on Pegasus II. LA-UR-93-1448, 1993
- 4 Degnan J H, et al Imploding Liner Research at the Weapons Laboratory. AIP Conference Proceeding 195, 1989, 34~ 54
- 5 Parker J V, et al An Improved Explosively Actuated Closing Switch for Pulsed Power Applications. LA-UR-93-2279, 1993
- 6 胡熙静,刘桂贤,高党中,等. MJ电容器组能源的电磁内爆方案评估. 爆轰波与冲击波, 1996 (3): 37~ 46

STUDY ON DIRECT DRIVE LINER IMPLOSION ON FP-1

Yang Libing, Sun Chengwei, Feng Shuping, Hu Xijing

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, 610003)

ABSTRACT Our studying work on electromagnetic implosion is introduced in this paper. We succeeded in imploding 3.94g solid aluminum liner; peak current 2.3MA , implosion velocity of numerical simulation is about 2.0km/s . We have the capability of zero-dimensional and one-dimensional simulation of magnetic fluid dynamics for liner implosion, they can support effectively the development of the experiment.

KEY WORDS electromagnetic implosion, solid liner, current, numerical simulation