

文章编号: 1001-1455 (2000)02-0156-04

电磁驱动固体套筒的内爆

杨礼兵, 孙承纬, 廖海东, 张希林, 欧阳凯

(中物院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 给出固体铝套筒在 FP-1 装置上的内爆实验结果, 包括加载电流、内爆速度、内爆形态等, 同时也给出高速摄影图象及实验与数值模拟的比较结果。

关键词: 电磁内爆; 固体套筒; 高速摄影

中图分类号: O361 文献标识码: A

1 引 言

根据内爆负载参数的不同, 电磁内爆技术分为固体套筒内爆及等离子内爆两大类^[1], 同时两者也有着各自不同的应用范围。等离子内爆也被称为 Z 箍缩 (Z-Pinch), 它是利用丝阵列、气流壳或薄衬套在快速大电流的作用下 (加载电流前沿一般在 100ns 左右), 产生高温、高密度等离子体, 进而因等离子体的向心运动内爆而产生强 X 射线, 其内爆速度可达几百公里每秒。如美国的 Z 装置利用丝阵列内爆产生了 2MJ, 290TW, 155 ~ 180eV 的软 X 射线辐射。等离子体内爆技术可应于等离子体界面不稳定性、强耦合等离子体特性、状态方程、辐射输运、辐射驱动压缩及核爆效应模拟等研究领域。相对而言, 固体套筒内爆所需的加载电流前沿要宽得多, 同时综合考虑电阻率与材料密度等总体参数, 内爆负载一般采用纯铝空腔套筒, 其质量从几克至几十克不等 (根据脉冲装置的驱动能力而定), 其内爆速度从几公里每秒至几十公里每秒。如美国的 Pegasus II 装置^[2] 驱动的固体套筒内爆速度达 13km/s, 内爆压力达 0.1TPa。固体套筒内爆技术应用范围也很广^[3], 如用于压缩工作流体、产生冲击波、研究材料应变率效应、材料冲击下的熔化以及内爆过程中不稳定性的增长等, 同时还可用于研究冲击波作用下自由表面的微喷射规律 (柱形几何)。在武器物理规律研究中, 固体套筒内爆可模拟初级组件内爆动力学的物理实验, 如材料强度及层裂的影响、非对称弹塑性变形或流动状态等; 也可模拟有缺陷组件的内爆动力学行为, 如裂缝、错位、表面氧化或腐蚀等。

FP-1 是我们最近组建的用于固体套筒内爆的一个实验设施^[4], 其额定电压为 100kV, 总容量 216μF, 最大贮能 1.08MJ, 加载电流可达 4MA, 同时还有助于一维磁流体力学的数值模拟^[5]。该装置适用于电磁内爆原理性实验, 以探索这种实验室模拟途径的可行性。

2 实验概况

内爆驱动的方式包括两种, 一种是直接驱动方式, 另一种是间接驱动方式。所谓直接驱动

* 收稿日期: 1999-09-01; 修订日期: 1999-11-01
基金项目: 中国工程物理研究院行业预研基金资助 (980104)。
作者简介: 杨礼兵 (1968—), 男, 硕士, 副研究员。

即电容器组通过汇流器件直接输出电流,加载于内爆负载的两端。而间接驱动则在电容器组和负载之间增加了断路开关,电流经断路开关调节后再加载于内爆负载上。间接驱动方式可以优化加载电流,减小电流波形的上升前沿,但断路开关要消耗一定的初始能量。根据我们的实际情况,采用了直接驱动方式,其等效电工线路如图1所示。其中 C_B 是电容器组, L_B 是电容器组的电感, R_B 是电容器组的电阻, K 是闭合开关, R_f 是熔断器的等效电阻, L_c 是连接电感, L_{load} 是负载电感。在数值模拟中,根据电流波形拟合出总电感为 100nH ,总电阻为 $50\text{m}\Omega$ 。

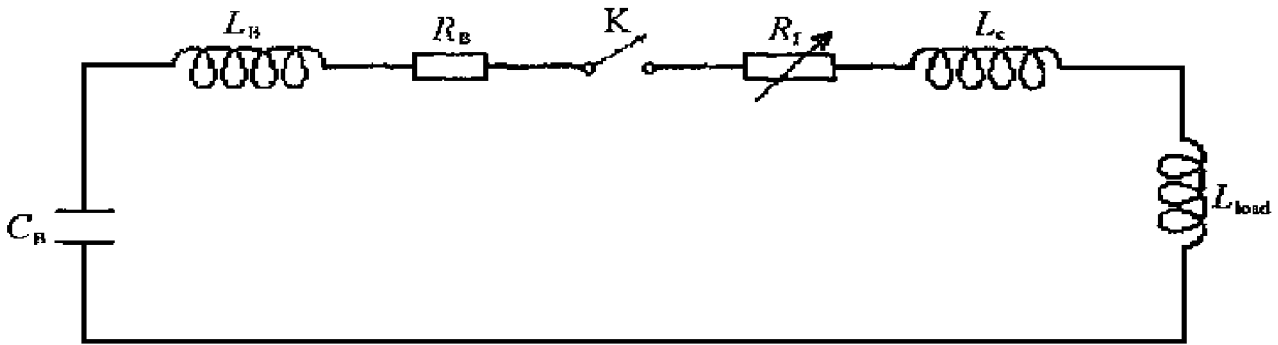
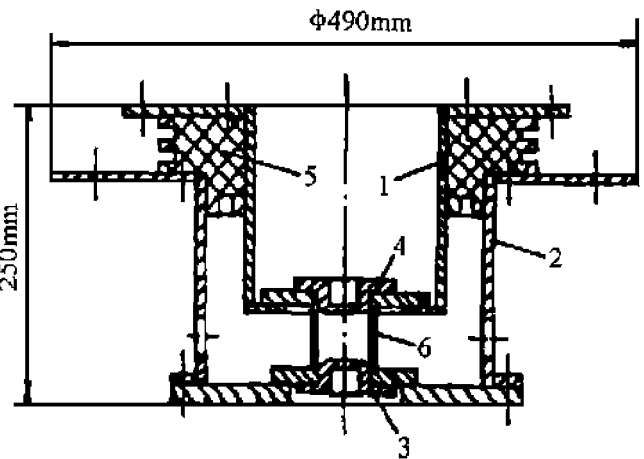


图1 直接驱动固体套筒内爆负载的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of direct drive liner implosion

固体套筒内爆实验的另一个关键是靶室中的负载和电极的结构及相互配合问题。图2是内爆靶室和固体套筒的装配示意图。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,它的作用是提供套筒运动过程中所需的环形电接触面(目前设计宽度 10mm),套筒靶的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,套筒直径 40mm ,高度 20mm ,厚度 0.6mm ,质量 3.9g ,空腔(内为空气)体积 22.6cm^3 ,材料有 LY12、L4、L5。

实验参数测试内容包括两个方面。一方面用 Rogowski 线圈测量加载于套筒上的电流, TDS744A 数字化示波器记录。另一方面是用 FJZ-250 高速分幅相机拍摄套筒内爆的外界面运动图像,拍摄帧频为 10^6 幅/s,实验中采用阴影-纹影技术排除了大电流产生的火花对底片的影响。由高速摄影的记录结果,可以得到套筒内爆的过程、内爆中半径-时间关系曲线、内爆速度曲线等。



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

3 实验结果分析及数值模拟结果的比较

对于固体套筒内爆本身而言,只采用一维单温磁流体力学模型及相应的计算方法就可以

进行所有参数的数值计算。下面给出与实验有关的参数比较曲线。

图3是电流的比较结果,图4是套筒外半径随时间变化的比较结果(实线为三次实验结果)。图5和图6是高速摄影的两次实验结果。FP-1工作电压±30kV,材料为L5。

从图3、图4可以看出,实验结果和数值模拟结果符合很好,误差很小。造成这种误差的主要原因在于数值模拟中未考虑一些分布参数的影响,此外对于熔断器中的铝箔热物理变化过程的参数均采用了较理想的经验值,可能与实际情况有些差别。内爆加载的电流达到了2.5MA,内爆速度达2.0km/s。从图5、图6可以看出,在内爆的前30μs内,套筒有着良好的内爆平直性和对称性,在后期因套筒的进一步压缩质量堆积及表面熔化等因素的影响,套筒形状发生了一定的形变。在图6中,我们可以看到,套筒在刚开始运动时,外表面有两个亮点,其亮度有增大的趋势。造成这种情况的原因可能是套筒本身存在缺陷,如夹杂或孔隙。当电流通过此处时,引起局部温升特别快,以至很早就达到熔化状态。在套筒内爆中就可能在此处产生

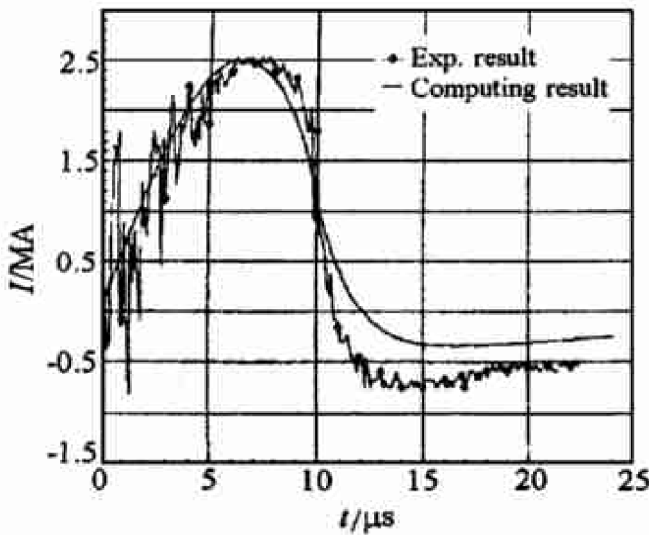


图3 实验电流与计算结果比较
Fig.3 Comparing of experimental current and computing's

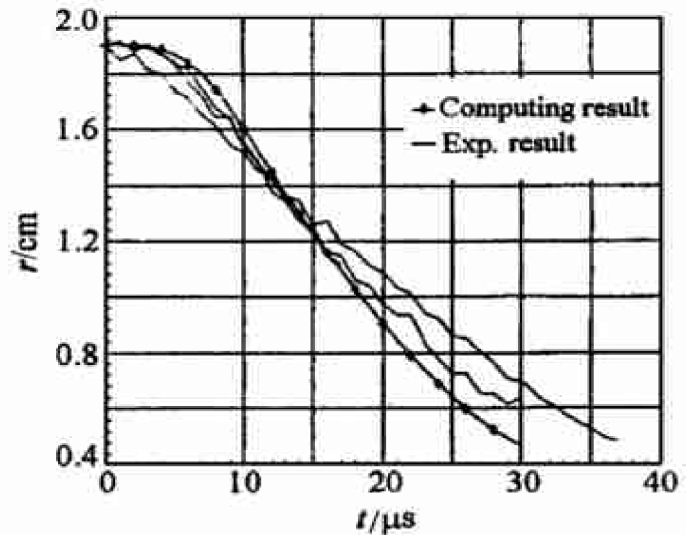


图4 套筒半径变化的实验结果与计算结果比较
Fig.4 Comparing of liner outer radius



图5 实验结果1
Fig.5 Experimental results (1)



图6 实验结果2
Fig.6 Experimental results (2)

喷射。从底片上来看,这种缺陷效应的结果首先只影响局部内爆的平直性,对套筒其它部分似乎影响不大。直到内爆后期压缩阶段才影响整体,使得套筒无法在轴线上形成对碰。实验后的样品形状也说明了这一点。此外,有缺陷的套筒内爆,其速度也有所降低。

4 结 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,目前只进行了电流和电压、高速摄影技术的测试工作,其余工作如 X 光照相技术、断路开关技术、等离子体内爆技术等将在下一步进行。从某种程度上来说,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)。

在图 3 中,电流峰值 2.5MA,四分之一周期约 7.0 μ s,电流波形在 0~4.0 μ s 内有振荡,这种振荡的原因可能是由于 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,通过合理设计和精心装配,可以解决其中的一些问题。

从实验结果可以看到,我们所设计的套筒及电极结构是合理的,特别是良好的内爆平直性和对称性的提高,使它可以作为一种柱形的固体驱动器进行冲击碰撞实验。在下一步工作中,我们计划在驱动套筒内部某处安置一个靶套筒,来进行柱形冲击微喷射实验。

参加本工作的还有胡熙静、李军、赵淑兰、丰树平、戴英敏、姚斌等,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Parker J. A Primer on Liner Implosions with Particular Application to the Pegasus II Capacitor Bank [R]. Athena Technical Report No. 1, LANL, 1993.
- [2] Cochrane J C, Hockaday R G, Bartsh R R, et al. Direct Drive Foil Implosion Experiments on Pegasus II [R]. LA-UR-93-1448, 1994.
- [3] Degnan J H, Baker W L, Alme M L. Multimegajoule Electromagnetic Implosion of Shaped Solid-density Lines [J]. Fusion Technology, 1995, 27: 115 ~ 122.
- [4] 杨礼兵, 孙承纬, 丰树平, 等. FP-1 直接驱动套筒内爆技术研究 [J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(4): 338 ~ 343.
- [5] 胡熙静, 刘桂贤, 廖海东, 等. 电磁内爆一维单温磁流体力学计算 [J]. 爆炸与冲击, 1997, 17 增刊: 411 ~ 419.

Implosion of Solid Liner Driven by Electro-magnetic Force

YANG Li-bing, SUN Cheng-wei, LIAO Hai-dong, ZHANG Xi-lin, OUYANG Kai

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: FP-1 Facility was used to study the implosion of aluminum liner experimentally. The current, liner implosion velocity and shape et al were monitored using several methods including high-speed photograph. The comparison between the experimental results and numerical results is also given.

Key words: electro-magnetic implosion; solid liner; high speed photograph