

SSS 程序在电磁内爆中的数值模拟^{*}

刘启泰, 孙承纬, 胡熙静

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 对 SSS 程序的边界条件进行修改, 将修改后的 SSS 程序用于固体套筒内爆实验的数值模拟, 并与现有的一维磁流体力学程序的计算结果进行比较, 对比结果表明, 对 SSS 程序的改造是成功的, 也可以预见将 SSS 程序改造成一维磁流体力学计算程序是可行的。

关键词: 电磁内爆; 固体套筒; 磁流体力学

中图分类号: O361.3

文献标识码: A

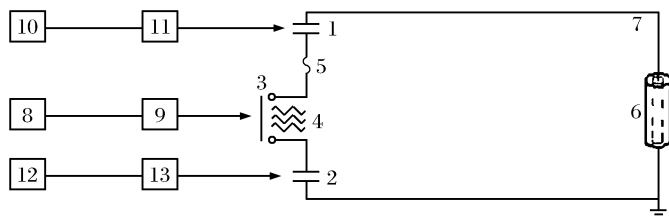
1 引言

高能量密度状态(极端高温高压的物质状态)一直是物理学感兴趣的领域之一, 它的温度从数十电子伏特到数千电子伏特, 压力范围为 $10^{-1} \sim 10^2$ TPa。高能量密度动力学主要研究高能量密度物理以及高温高压下材料的流体力学行为, 如冲击压缩、等熵压缩、内爆动力学、高速切向流和各种流体动力学不稳定性。在实验条件下达到这种高能量密度状态的主要加载手段有: 炸药爆轰、激光聚变、电磁内爆。

目前流体物理研究所已在 FP-1 装置上开展一些固体套筒内爆的研究, 包括相关的数值模拟, 固体套筒内爆技术应用范围很广泛, 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。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。在数值模拟方面, 固体套筒可用一维磁流体力学模型描述。SSS 程序^[1]本来是一个一维冲击波与爆轰波计算程序, 但是对 SSS 程序的压力脉冲边界条件进行修改: 认为在内爆过程中磁压始终作用在筒的外表面, 即不考虑磁扩散现象, 这样就将磁流体力学问题转化成 SSS 程序可以计算的流体动力学问题。

2 FP-1 装置

FP-1 是中国工程物理研究院流体物理研究所组建的用于固体套筒内爆的一个实验设施, 以电容器为脉冲功率源, 主要组成部分有: 脉冲功率源子系统、充电电子系统、电路闭合子系统、熔断器、汇流板。其额定电压为 100 kV, 总容量 216 μ F, 最大贮能 1.08 MJ, 加载电流可达 4 MA。装置示意图如图 1 所示。



1. The upper part of capacitors; 2. The lower part of capacitors; 3. Implosive switch;
4. The insulating section; 5. The fusion; 6. Load; 7. The junction station;
8. The impulse generation; 9. The insulating high voltage transformer;
10. The No. 1 charger; 11. The No. 1 high voltage transformer;
12. The No. 2 charger; 13. The No. 2 high voltage transformer

图 1 FP-1 装置原理性示意图

Fig. 1 Apparatus diagram of FP-1

^{*} 收稿日期: 2003-02-08; 修回日期: 2003-12-01

作者简介: 刘启泰(1978—), 男, 硕士。

3 SSS 程序介绍

SSS 程序是一个一维反应流体动力学程序,介质采用流体弹塑性模型。爆轰反应有四种可选方式: Arrhenius 律、C-J 比容法、方波法、Forest Fire 方程。物态方程可选 HOM 或 JWL。程序由主程序及 14 个子程序组成,主程序读入数据文件、建立格点、赋初值,实现主计算循环。只在最外部两端设立边界条件,计有连续面、自由面、压力脉冲边界、速度活塞(阶跃变化及线性变化)、定态反应活塞等类型。

SSS 程序中 Lagrange 坐标下的流动方程组为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -R^{\alpha-1} \frac{\partial \sigma}{\partial M} - (\alpha - 1) \frac{V\varphi}{R} \quad (1)$$

$$V = R^{\alpha-1} \frac{\partial R}{\partial M} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\partial(\sigma u R^{\alpha-1})}{\partial M} + \lambda \frac{\partial}{\partial M} \left(R^{\alpha-1} \frac{\partial T}{\partial R} \right) \quad (3)$$

式中:

$$\text{总压力} \quad \sigma = p + q \quad (4)$$

$$\text{总比能} \quad e = I + 0.5u^2 \quad (5)$$

$$\varphi \text{ 是应力偏量的函数} \quad \varphi = S_x + S_y \quad (6)$$

$$\text{对于球面流动} \quad \varphi = -0.5S_x \quad (7)$$

约定压力和应力都以压缩为正,拉伸为负号。固态介质在屈服之前满足线性弹性的本构关系

$$\frac{\partial S_x}{\partial t} = 2G \left(-\frac{\partial u}{\partial R} + \frac{1}{3V} \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial S_z}{\partial t} = \frac{2G}{3V} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (9)$$

记 Δu 为波传播方向相邻各点粒子速度差, ΔM 为质量差。人为粘性采用以下三种方式

$$\text{PIC 粘性} \quad q = -K |u| \frac{\Delta u}{V} \quad (10)$$

$$\text{Landshoff 粘性} \quad q = -K \frac{\Delta u}{V} \quad (11)$$

$$\text{指数律粘性} \quad q = -K |u|^n \frac{\Delta u}{V} \quad (12)$$

人为粘性约定:当 $\Delta u \geq 0$ 时, $q=0$, 真实粘性是 $q = -1.333(K/V)(\Delta u/\Delta M)$, 这相当于只有剪切粘性的流体,只用于平面一维流动。

4 修改方案

电磁内爆的物理基础是磁场与等离子体中电流的相互作用,如图 2 所示。一个等离子体套筒通有轴向电流 I , 根据安培环路定律,环绕筒壁的外磁场强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (13)$$

式中: r 为圆筒半径, μ_0 为真空磁导率。在筒壁上电流与磁场相互作用,产生一个指向轴心的压力即磁压,其大小为

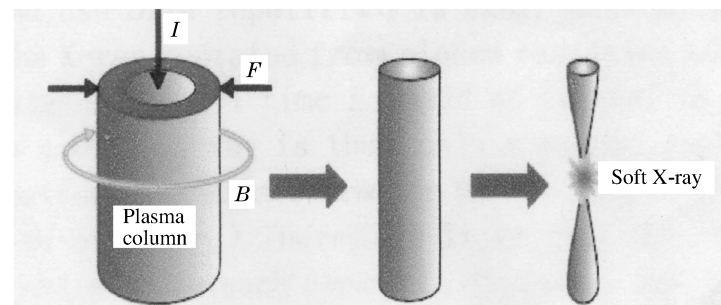


图 2 电磁内爆示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electro-magnetic implosion

$$F = p = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 r^2} \quad (14)$$

等离子体套筒就在这个磁压的作用下作内聚运动,从而实现高能量密度状态。(14)式表明了压力与电流的平方成正比,压力随物体半径的减少而增大。而且在内爆的前一段时间内,磁压很小,但是当等离子体被压缩到一个很小的半径内时,压力增长很快。因此可以在相当长的时间内压缩物体,而且不会造成冲击破坏。一般的几十克质量固体套筒内爆速度可达 15 km/s,几毫克的等离子套筒内爆速度可达 500~1 000 km/s。而且增大电流强度,驱动物体的速度得到很大的提升。

因此对 SSS 程序中的压力脉冲边界条件进行修改,才能进行磁压驱动内爆的模拟计算。假设在筒外表面加载一个磁压力,由(14)式可知这个磁压力可以表示为 $p = \mu_0 I(t)^2 / (8\pi^2 r^2)$,近似认为电流是正弦变化的: $I(t) = I_0 \sin(2\pi t/T)$,这里 I_0 为电流峰值, T 为周期,因此这个压力边界条件可以表示为

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi^2 r^2} \sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (15)$$

同时假设在内爆过程中磁压始终作用在筒的外表面,也就是说没有磁扩散,这个模型类似电磁内爆中的零维模型^[2],但不同的是材料可压,并且材料内部有压力。方程组还是采用 SSS 程序的流动方程组,因此不能输出磁场 B 的空间分布曲线图。

5 计算结果比较及结论

下面是这个装置的一个实验模型,计算参数见表 1。套筒材料采用铝材料,模型如图 3,圆筒内半径为 1.44 cm,外半径为 1.5 cm,筒高为 2 cm,厚度为 0.06 cm。内爆驱动采用了直接驱动方式其等效电工线图如图 4,图中 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_1 是负载电感。在数值模拟中,根据电流波形拟合出总电感为 70 nH,总电阻为 5.0 mΩ。计算简化图如图 5 所示。

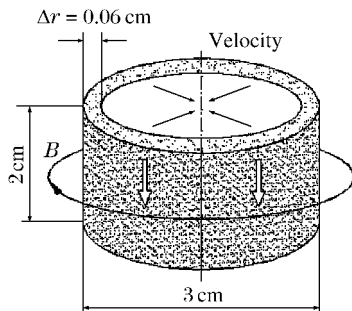


图 3 计算模型

Fig. 3 Configuration of the model

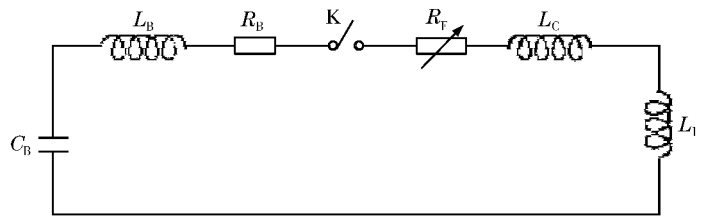


图 4 等效电工线图

Fig. 4 Schematic of capacitive pulse power system

由于目前 FP-1 装置的实验工作除了能测试电流外还不具备其他测试手段,因此还不能利用实验结果来检验改造后的 SSS 程序,所以采用现有的一维磁流体力学程序^[3](MHD)和改造后的 SSS 程序对上述实验装置进行数值模拟,来检验修改的成功与否。MHD 的计算简化图如图 6 所示。

从上述 SSS 与 MHD 的计算模型来看,两者还是有一定的差别,主要表现在 SSS 计算模型中筒的内部置有初始压力为一个大气压、初始温度为 300 K 的空气,在内爆过程中受到压缩,并在内爆后期提供使套筒反弹的恢复力,因此对于 SSS 是双区计算,即铝筒区和空气区;而 MHD 计算模型中套筒内部是真空,而且对真空区不作任何计算,因此对于 MHD 是单区计算,即只计算铝筒区。

表 1 计算参数

Table 1 Parameters for calculations

Parameters of circuit			Parameters of load				Parameters of fuse	
$C/(\mu F)$	$V/(kV)$	$L/(nH)$	$R/(m\Omega)$	$r/(cm)$	$\delta/(mm)$	$h/(cm)$	$s/(cm^2)$	$l/(cm)$
216	80	70	5.0	1.5	0.6	2.0	0.36	40

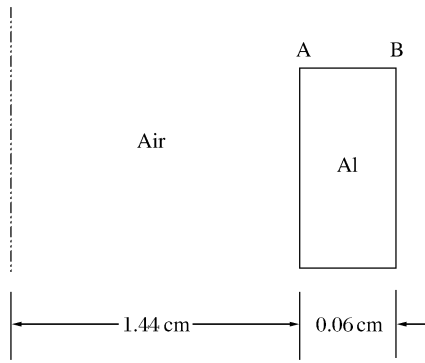


图 5 SSS 计算简化图

Fig. 5 SSS model configuration

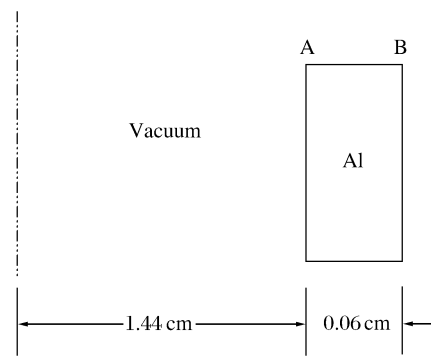


图 6 MHD 计算简化图

Fig. 6 MHD model configuration

对于修改后的 SSS 程序计算条件,由磁压计算公式 $p = B^2 / (2\mu_0) = [\mu_0 I_0^2 / (8\pi^2 r^2)] \sin^2(2\pi t / T)$ 可知,必须给出电流峰值和周期才能计算磁压,在这里采用的电流波形如图 7,即在 SSS 程序计算磁压力时电流峰值为 4 MA,半周期为 10 μs 。

通过上述的模型建立便可以进行计算,修改后的 SSS 程序计算结果与现有的一维磁流体力学程序(MHD)计算结果比较如图 8~图 11。

从内界面半径变化来看(图 8)SSS 与 MHD 的计算结果还是有一定差距,主要反映在 MHD 计算结果是内界面能够压到轴心,而且碰轴后不反弹;SSS 计算结果是内界面不能碰轴,而且压到极限后马上反弹。相比内界面,二者在外界面(图 9)上的计算结果差别则要小的多。出现上述情况的主要原因是二者在计算模型上的差别,如图 5、图 6 所示,SSS 程序认为在铝筒的内部充满初始压力为大气压的空气,而 MHD 程序则认为铝筒内部是真空,由于二者计算模型的差别,因此二者在处理边界条件时也不一样,SSS 是双区计算,只在套筒轴心处和套筒外界面设立边界条件,而对套筒内界面不设立边界条件;而对于 MHD 是单区计算,套筒内部为真空,因此碰轴后 MHD 计算结果是不反弹的,对于 SSS 程序由于计算考虑了材料的强度和内部气体压力,出现了反弹现象。因此二者出现上述差别是合理的。

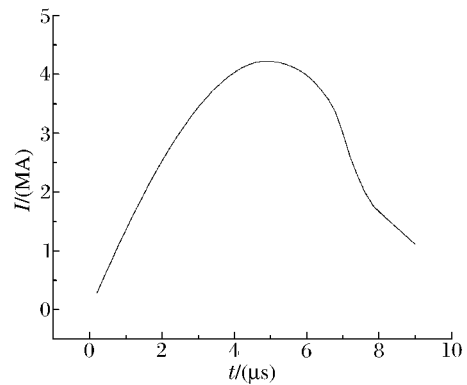


图 7 SSS 计算采用的电流波形

Fig. 7 The current wave for SSS calculation

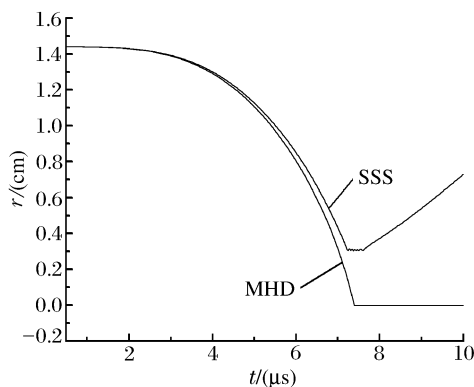


图 8 内界面(A)位置

Fig. 8 The liner radius vs time of inner surface

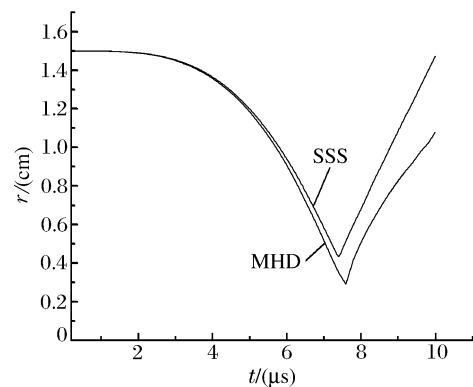


图 9 外界面(B)位置

Fig. 9 The liner radius vs time of outer surface

从内外界面速度变化来看(图10、图11)SSS与MHD的计算结果在 $R \rightarrow 0$ 的坍塌阶段有一些差别,主要反映在MHD计算的套筒内爆速度要大于SSS计算的套筒内爆速度,出现这种差别还是两个程序在计算区域分布和边界条件的不同所引起的。对于SSS,由于空气区的存在使得套筒内爆速度受到空气压力的影响,相比而言MHD没有这些影响,因此MHD计算的套筒内爆坍塌的速度大于SSS的计算结果也是合理的。

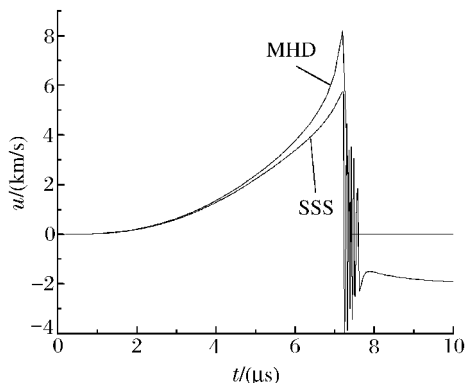


图10 内界面(A)速度

Fig. 10 The liner velocity vs time of inner surface

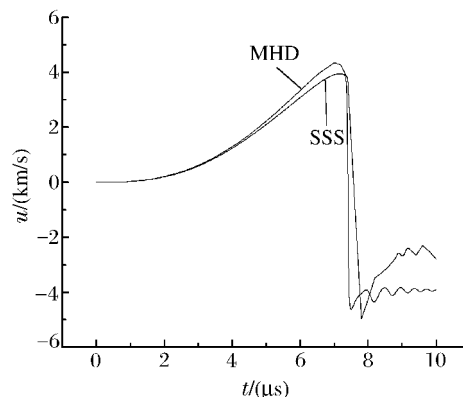


图11 外界面(B)速度

Fig. 11 The liner velocity vs time of outer surface

6 结束语

从计算结果来看,考虑到初始条件的差别,改造后的SSS程序与磁流体力学程序的计算结果基本上一致,然而在本文中只对SSS程序的边界条件进行了修改,模拟固体套筒内爆时的边界情况。因此实际上修改后的SSS程序仍然是一个反应流体动力学计算程序。但是从上述修改中可以设想将SSS程序改造成一维磁流体力学计算程序是可行的,这也是我们将要进行的工作。

References:

- [1] Sun C W. SSS: A Code for Computing One Dimensional Shock and Detonation Wave Propagation [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1986, 3: 143—145. (in Chinese)
孙承伟. 一维冲击波与爆轰波计算程序 SSS [J]. 计算物理, 1986, 3: 143—145.
- [2] Hu X J, Liu G X, Gao D Z. Zero-Dimensional Simulation of Liner Implosion Experiment [A]. Proceeding of the Fifth Domestic Symposium on Detonation and Shock Dynamics [C]. Xi'an, 1997. 95—101. (in Chinese)
胡熙静, 刘桂贤, 高党忠. 电磁内爆技术的零维模型计算 [A]. 第五次全国爆轰与冲击动力学学术会议论文集 [C]. 西安, 1997. 95—101.
- [3] Hu X J, Liu G X, Liao H D. One-Dimensional Simulation of Single Temperature Magnetic Field Dynamics for Liner Implosion Experiments [A]. Proceeding of the Fifth Domestic Symposium on Detonation and Shock Dynamics [C]. Xi'an, 1997. 411—419. (in Chinese)
胡熙静, 刘桂贤, 廖海东. 电磁内爆一维单温磁流体力学计算 [A]. 第五次全国爆轰与冲击动力学学术会议论文集 [C]. 西安, 1997. 411—419.

The Numerical Simulation of Solid Liner Implosion in SSS Code

LIU Qi-Tai, SUN Cheng-Wei, HU Xi-Jing

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

Abstract: The SSS code is an one dimensional code for shock and detonation propagations in which the elastic-plastic-hydrodynamic model is used. We modified the pressure boundary condition of SSS code and conducted some numerical simulations for liner implosion experiment. Meanwhile, using the one dimension MHD code, we also conducted the same numerical simulation for the same model. Thinking over the different initial conditions between the two codes, the results are basically consistent. And the consistence between the two codes shows that there is the probability to modify the SSS code as the SSS MHD code.

Key words: electro-magnetic implosion; solid liner; magneto hydrodynamics