文章编号:1000-5773(2009)06-0476-05

电爆炸箔驱动绝缘飞片的一维数值模拟*

贺 佳,赵剑衡,谭福利,孙承纬

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621900)

摘要:在一维有限差分反应流体动力学程序 SSS 中引入电爆炸模型,在此基础上结合新引入的物态方程库,开展了电爆炸加载下飞片运动过程的数值模拟研究。计算结果与实验结果基本吻合,表明 SSS 对电爆炸驱动飞片的过程的模拟是可靠的,为电炮加载技术的优化设计和电爆炸驱动飞片物理过程的进一步研究提供了一套有效的计算方法和程序。

关键词:电爆炸箔;飞片;数值模拟;SSS 程序

中图分类号:TJ450.2 **文献标识码**:A

1 引 言

电炮是通过电爆炸金属桥箔推动绝缘飞片运动实现动态加载的一种实验装置,最早是 Keller[1] 等人在 1962 年左右提出来。电炮装置具有加载压力大、平面性好、加载压力和脉宽精确可调、结构简单、操作简便的优点,在高压物态方程、超高速碰撞材料动力学性能和炸药的冲击感度等方面展现出重要的应用前景[2]。

研究电爆炸加载下的飞片速度对于电爆炸物理过程的研究和电炮实验技术的研究和推广应用是极为重要的。Tucker 等[3]于 1975 年报道了模拟电爆炸导体能量转换的电格尼能模型,该方法用于估算电爆炸箔驱动飞片的终点速度。1977 年,Schmidt 等[4]在格尼公式的基础上,提出了用于计算飞片速度历史的经验模型,即 Schmidt 模型,该模型是用一个与时间相关的桥箔积存能量 $Q(t)$ 来代替桥箔瞬时吸收的电格尼能,由能量和动量守恒可得到一微分方程组,数值积分可求解飞片速度历史。计算的飞片速度历史与实验结果符合得比较好,但该模型需要用到实测的比功率曲线。上述两个基于能量转化基础上发展起来的经验模型虽然简单实用,但是对理解电爆炸的物理过程和等离子快速膨胀推动飞片的物理力学过程的研究没有太大的帮助。1977 年,Logan 等[5]报道了他们对电爆炸箔加热和爆炸现象的实验与计算研究结果,计算使用了有限差分算法。Stanton 报道了用于计算爆炸箔特性的一维流体动力学计算编码 CHART D 和研究材料边沿效应的二维流体动力学编码 CSQ。1990 年,Osher 等[6]利用 CONFUSE 编码计算了飞片速度、撞击产生的压力、电流时间曲线关系,利用二维有限元欧拉流体动力学 CALE 编码计算了弹丸或破片撞击形成凹坑的情形。1998 年,Mendes 等[7]对电炮装置中 Al 箔的电爆炸及其爆炸产物的特性进行了报道。上述工作基于较严格的物理模型,结合相关的流体动力学程序,开展对电爆炸加载下飞片运动规律的研究,对于认识电爆炸这一复杂物理过程是非常有帮助的。

随着国内电炮实验技术和相关的诊断测试技术的成熟,发展具有独立知识产权的流体动力学程序,开展相关的数值模拟研究,对于推动我国在电爆炸加载技术领域的深入研究是非常有意义的。本研究是在一维反应流体动力学计算程序 SSS 的基础之上,引入桥箔爆炸模型和适用于等离子体状态方程描述的物态方程数据库,使之适用于电爆炸过程和驱动飞片速度历史的数值模拟,并与已有的实验数据进行比较。

* **收稿日期**:2008-12-16;**修回日期**:2009-02-08

作者简介:贺 佳(1980—),女,硕士,研究实习员,主要从事超高速撞击方面的研究. E-mail:hejia113@126.com

2　电炮装置介绍

电炮装置主要由充电回路、放电回路、桥箔-飞片组件组成,图 1 为装置的放电回路示意图,图 2 为桥箔-飞片组件示意图。中国工程物理研究院流体物理研究所组建了一套储能 14.4 kJ、最大放电电流 790 kA 的紧凑高效的电炮装置[8],并在该装置上开展了大量的实验研究工作,本研究主要是模拟该装置加载下飞片的运动过程。

电炮装置的运行过程是充电到一定电压值的高压脉冲储能电容器经短路开关快速向串联在放电回路中的金属桥箔放电,瞬时通过的脉冲大电流使桥箔加热、熔化、汽化和爆炸(击穿),形成高温、高压等离子体。急骤膨胀的高压金属气和强大的磁力推动紧贴在桥箔上的绝缘飞片运动,刚刚起动的飞片被炮膛的锐利边缘剪切下来,在炮膛内经适当距离的加速飞行,最后以一定速度打在所研究的靶样品上,实现动态加载。

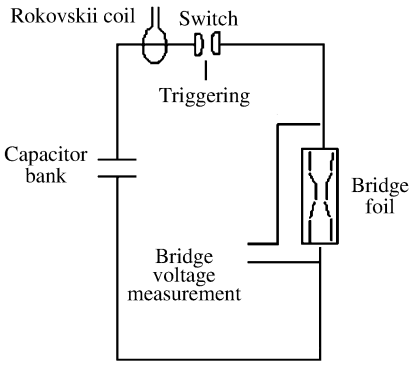


图 1　电炮装置的放电回路

Fig. 1　Schematic of capacitive pulse power system

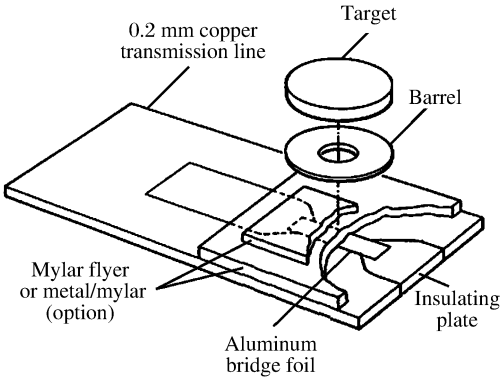


图 2　桥箔-飞片组合件

Fig. 2　The foil-flyer laminate

3　SSS 程序的改造方案

SSS 程序是一个一维反应流体动力学程序[9],介质采用流体弹塑性模型,物态方程采用 HOM 状态方程。本研究根据电爆炸驱动飞片的物理过程,以 SSS 程序为基本框架,改造流体力学方程组,加入磁压力边界条件,增加电流回路方程和电阻率方程,引入物态方程库,使之成为闭合方程组。改造后的程序可以用于电爆炸驱动飞片过程的研究,获得飞片运动的速度历史。

改造后的一维 Lagrange 坐标下的流动方程组如下

$$\frac{\partial U}{\partial t}=-\frac{\partial \sigma}{\partial M} \tag{1}$$

$$V=\frac{\partial X}{\partial M} \tag{2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t}=-\frac{\partial(\sigma U)}{\partial M}+\frac{\partial Q}{\partial M} \tag{3}$$

总压力　　$\sigma=p+q$

粒子总能量　　$E=I+0.5U^2$

采用真实粘性　　$q=-1.333\,\frac{K}{V}\,\frac{\Delta U}{\Delta M}$

Q 为作用在金属桥箔上的电功率，$Q=I_b^2R_b$。$p=p(I,\rho)$ 由状态方程或物态方程库得到。p_b 为作用在桥箔上的磁压力。不考虑磁扩散，假设磁场只存在于绝缘的桥箔基片中，则磁压作用在金属桥箔的内边界。$p_b=\mu_0 i^2/2$，i 为电流线密度。

金属桥箔的外接电路即电炮装置的放电回路可以简化为 *R-L-C* 串联回路，如图 3 所示。

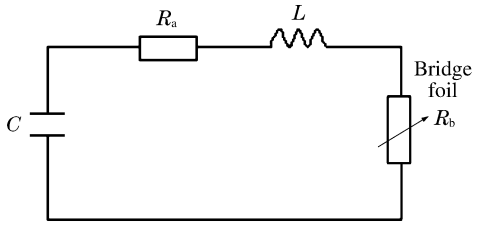


图 3 *RLC* 串联回路

Fig. 3 Diagram of the series *RLC* circuit

电流回路方程

$$\frac{1}{C}\int_0^t I_b(t)\mathrm{d}t+(R_a+R_b)I_b+L\frac{\mathrm{d}I_b}{\mathrm{d}t}=U_0 \quad (4)$$

式中：C 为电容器的电容，R_a 为装置的固定电阻，L 为回路电感，R_b 为金属桥箔电阻。

金属桥箔在爆炸过程中电阻率的变化情况是难点，Lee[10] 假设在铝桥箔电爆炸过程中，金属气不膨胀，电流均匀分布，根据实验数据得到了电阻率模型，对此电阻率模型进行修正，得到铝桥箔电阻率 η 对电作用量 g 的函数

当 $g\leqslant g_0$ 时

$$\frac{\eta_0}{\eta}=\frac{g_0}{g_0+86.03037g} \quad (5)$$

当 $g\geqslant g_0$ 时

$$\frac{\eta_0}{\eta}=0.42053-\frac{18.32342g_0}{g+43.73522g_0} \quad (6)$$

式中：$\eta_0=2.82\times10^{-8}\ \Omega\cdot\mathrm{m}$，爆炸作用量 $g_0=G_0(U_0/KLb)$，$G_0=9.31\times10^{16}\ \mathrm{A^2\cdot s/m^4}$，修正参数 $K=4.74\times10^{11}\ \mathrm{A\cdot m/s}$，$b$ 为桥箔宽度。

因此，铝桥箔（令桥箔为正方形）的总电阻 $R_b=\rho_0/\delta$，δ 为桥箔初始厚度。

4 数值计算结果及分析

本研究描述电爆炸驱动飞片过程的物理模型如图 4 所示。整个模型分为绝缘基板，金属桥箔和 Mylar 飞片 3 个区域。绝缘基板的下边界为固壁边界，飞片上端为自由边界，脉冲大电流流经中间的金属桥箔。绝缘基片和 Mylar 膜飞片区域采用固态 HOM 状态方程，金属桥箔区域的状态方程由物态方程库计算得到。

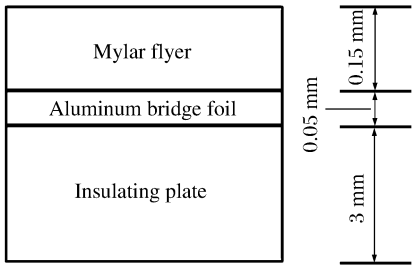


图 4 物理模型

Fig. 4 Configuration of model

数值计算中的放电回路参数：电容 $C_b=32\ \mu\mathrm{F}$，电感 $L=40$ nH，装置固定电阻 $R_a=15\ \mathrm{m\Omega}$，初始充电电压 $U_0=18$ kV。

表 1 HOM 状态方程主要参数

Table 1 Parameters of HOM equations of state

Material	c/(g/cm)	S	Γ	C_V/[Gm²/(s²·K)]	v_0/(cm³/g)
Mylar flyer	0.243	1.5758	2.157	0.035	0.847
Base plate	0.272	1.49	2.157	0.035	0.69

绝缘基板厚度为 3 mm，$\rho_0=1.34\ \mathrm{g/cm^3}$；铝桥箔厚度为 0.05 mm，$\rho_0=2.7\ \mathrm{g/cm^3}$；Mylar 飞片厚度为 0.15 mm，$\rho_0=1.39\ \mathrm{g/cm^3}$。

图 5 为回路的电流波形图，从图中可以看到实验测量结果和计算结果两者基本一致。回路的放电

周期约为 7 μs,爆炸发生在放电周期的前四分之一内。

从压力剖面图(图 6)可以看出,金属桥箔吸收回路提供的电能后,压力升高,并不断向 Mylar 膜飞片和基板中传入压缩波。在爆炸时刻附近,桥箔层中的压力达到最大约为 4.0 GPa,之后金属气迅速膨胀,推动 Mylar 飞片和基板中的粒子分别向右、左方向运动。随着金属气的膨胀,金属气中的压力迅速下降,由于稀疏效应,基板中的压力峰值也随时间下降。飞片外边界为自由边界,故压力始终为大气压值。

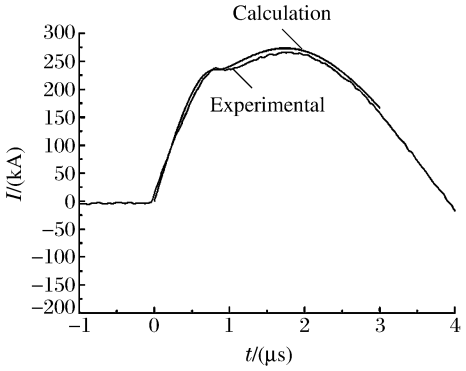


图 5　电流波形

Fig. 5　Current-time curves

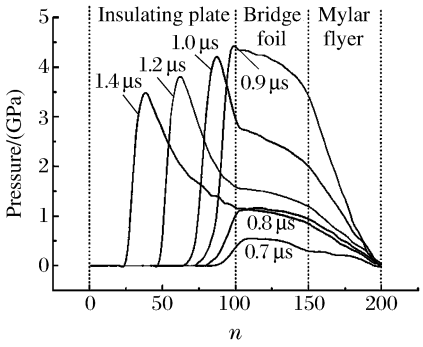


图 6　不同时刻的压力剖面(n 为网格数)

Fig. 6　Curves of pressure versus grids

随着电能作用时间的增加,飞片速度逐渐增大,在金属桥箔爆炸后飞片速度迅速增大。从图 7 可以看出,桥箔在爆炸以前,桥箔吸收的电能主要转化为内能,飞片有较小的速度上升;爆炸后,桥箔产生高温高压的等离子体伴随磁力推动飞片运动,飞片速度迅速增大,在 2 μs 以后,在实测曲线中飞片速度趋于稳定,而在计算的曲线中,飞片速度还在继续增加,这是因为飞片加速到一定距离后,电路提供的能量逐渐减少,空气阻力使得飞片速度上升幅度降低,而计算中没有考虑空气阻力。将计算与实测的飞片后自由面速度历史进行比较(图 8),可以看出计算值比实测值大约高出了 10%～20%。这是因为,在计算中没有考虑能量的损耗,假设外电路的电能全部都直接作用在了金属桥箔上,然而在实验过程中,存在着能量的损耗。

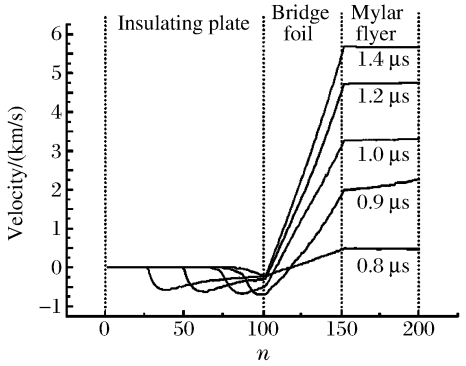


图 7　不同时刻的速度剖面(n 为网格数)

Fig. 7　Curves of velocity versus grids

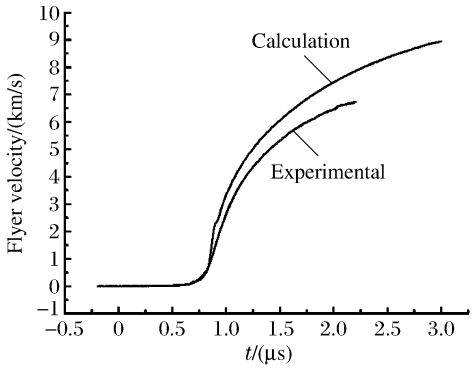


图 8　飞片速度历史

Fig. 8　Curves of flyer velocity versus time

5　结　论

计算的回路放电电流波形及飞片的速度历史与实验结果基本吻合,表明所引入的电爆炸模型及对程序的改动是可靠的。计算结果显示,桥箔区域内的压力近似为线性分布,与电格尼模型的假设吻合。

References:

[1] Keller D V, Penning R J. Exploding Foils—The Production of Plane Shock Waves and the Acceleration of Thin Plates [A]//Chase W G, Moore H K. Exploding Wires [C]. New York: Plenum Press, 1962: 263.

[2] Weingart R C. The Electric Gun: A Versatile Tool for Studying Explosive Initiation [R]. UCRL-52000-76-8, 1976.

[3] Tucker T J, Stanton P L. Electrical Gurney Energy: A New Concept in Modeling of Energy Transfer from Electrically Exploded Conductors [R]. SAND-75-0244, 1975.

[4] Schmidt S C, Seitz W L, Wackerle J. An Empirical Model to Compute the Velocity History of Flyers Driven by Electrically Exploding Foils [R]. LA-6809, 1977.

[5] Logan J D, Lee R S, Weingart R C, et al. Calculation of Heating and Burst Phenomena in Electrically Exploded Foils [J]. J Appl Phys, 1977, 48(2): 621-628.

[6] Osher J, Gthers R, Chau H, et al. Hypervelocity Acceleration and Impact Experiments with LLNL Electric Guns [R]. UCRL-100629, 1990.

[7] Mendes R, Plaksin I, Ribeiro J, et al. Electrical Explosion of an Aluminium Foil: Behaviour of the Explosion Products in the Process of Dielectric Flyer Plate Lauch [J]. Chem Phys Rep, 1998, 17(1-2): 267-273.

[8] Zhao J H, Sun C W, Tang X S, et al. Development of Electric Gun with High Performance [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3): 369-375. (in Chinese)
赵剑衡, 孙承纬, 唐小松, 等. 高效能电炮实验装置的研制 [J]. 实验力学, 2006, 21(3): 369-375.

[9] Sun C W. SSS: A Code for Computing One Dimension Shock and Detonation Wave Propagation [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1986, 3: 143-154. (in Chinese)
孙承纬. 一维冲击波与爆轰波计算程序 SSS [J]. 计算物理, 1986, 3: 143-145.

[10] Lee R S. Fireset [R]. UCID-21322, 1988.

One-Dimensional Numerical Simulation of a Flyer Accelerated by Electrically Exploded Metal Foil

HE Jia, ZHAO Jian-Heng, TAN Fu-Li, SUN Cheng-Wei

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

Abstract: We modified the one-dimensional hydrodynamic code named SSS for simulation of acceleration of Mylar flyer driven by electric explosion. Both simulated histories of discharging current and flyer are consistent with those of experimental results, which validates that the hydrodynamic code SSS with this new introduced model is reliable to simulate the electric explosion. The presented work will be much more helpful for understanding the physical process of electric explosion and optimization of the electric gun instrument itself.

Key words: electrically exploded metal foil; flyer; numerical simulation; SSS code