

文章编号: 1001-1455(2010)01-0070-05

金属桥箔电爆炸及飞片驱动过程的计算^{*}

李涛¹, 傅华¹, 谭多望¹, 李强², 卢敏²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 根据小尺寸铜桥箔电爆炸实验结果, 确定了桥箔欧姆电阻模型的计算参数。采用 Sesame 数据库, 建立了一种金属桥箔电爆炸及飞片驱动过程的计算方法。通过编制的 EDF1.0 程序, 给出的计算结果再现了桥箔电爆炸及飞片驱动全过程, 计算得到的飞片末速度与桥箔爆炸电流密度呈线性关系, 与经典的电格尼模型结论一致。

关键词: 流体力学; 电爆炸; Sesame 数据库; 金属桥箔; 飞片驱动

中图分类号: O353.4 **国标学科代码:** 130·2564 **文献标志码:** A

1 引言

金属桥箔电爆炸驱动飞片作为一种冲击波加载技术, 在冲击片雷管的设计、材料动力学响应等冲击波和爆轰物理实验研究中得到了广泛的应用。在桥箔电爆炸装置应用中, 需要准确预估桥箔电爆炸过程, 最终确定飞片击靶速度等关键参数。为此, 学者们开展了广泛的实验和数值模拟研究: 如 R. S. Lee 等^[1]、R. C. Weingart 等^[2] 对高能电炮装置的优化设计与测试技术进行了研究; C. M. Furnberg 等^[3]、J. D. Logan 等^[4]、J. M. Zentler 等^[5]、T. J. Tucker 等^[6]、S. C. Smidt 等^[7] 在实验研究的基础之上, 对金属桥箔电爆炸(电阻)模型、桥箔爆炸电压、电格尼公式以及飞片运动历程进行了数值计算; 耿春余^[8]、杨振英^[9]、梁龙河^[10]、袁士伟^[11] 也针对不同需求开展了大量的桥箔电爆炸实验与数值计算。

采用磁流体动力学数值模拟方法, 可以较准确地计算金属膨胀以及与周围介质的相互作用过程, 但由于磁流体力学计算中需要的物理参数较多, 方程的建立及解法较复杂, 难以推广应用。因此, 建立一种可计算电爆炸及飞片驱动过程的简化方法, 对于理解桥箔电爆炸物理过程和优化设计电爆炸物理装置都具有积极意义。

本文中根据小尺寸铜桥箔电爆炸的实验结果, 对实际问题进行合理简化, 确定桥箔欧姆电阻模型计算参数, 应用能反映金属物理状态的 Sesame 数据库, 建立一种金属桥箔电爆炸及飞片驱动过程的计算方法, 编制相应的 EDF1.0 程序, 并给出计算结果与实验波形比较结果。

2 电爆炸物理描述

电爆炸是当金属中流过高密度电流时, 自身物理状态发生急剧变化, 并迅速把储能器中的电能转化为其他形式能量(如热能、等离子体辐射能、冲击波能等)的一种物理现象。

金属桥箔电爆炸的发展可根据金属密度变化的剧烈程度分为 2 个阶段^[12]: 第 1 阶段, 包括固态金属的加热、熔化和液态金属加热到开始汽化前的时段, 这个阶段金属密度变化相对不大, 金属导体在焦耳热的作用下发生线性膨胀, 其速度值相对较小, 约 1~3 m/s; 第 2 阶段, 即本征爆炸阶段, 金属导体由于形成具有极高压力的气态或等离子态而产生爆炸, 这个阶段金属物质以 1~10 km/s 的速度膨胀, 并在周围介质中引起冲击波, 同时其欧姆电阻增长几个数量级。在本征爆炸阶段后期, 爆炸产物膨胀后密

* 收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2009-04-21

作者简介: 李涛(1978—), 男, 硕士, 助理研究员。

度减小,具备了有利于碰撞电离子开始的条件,金属逐渐转变为电阻率较低的等离子态。

在电爆炸过程中,金属导体具有与横截面积减少相关的电阻快速变化的特性,该特性对放电回路的电流脉冲有着重要的影响,要准确描述电爆炸及飞片驱动全过程必须建立合理的电阻模型。

3 桥箔电阻模型

借助 C. M. Furnberg 等^[3]采用的分段函数,从实验结果可拟合得到桥箔电阻模型参数。分段函数在爆炸前为高斯函数,爆炸后为指数衰减函数

$$R_1(g) = R_0 + A_1 \left\{ \exp \left[- \left(\frac{g - g_0}{A_2} \right)^2 \right] - B \right\} \quad (1)$$

$$R_2(g) = \left\{ R_0 + A_1 \left\{ \exp \left[- \left(\frac{A_3 - 1}{A_2} g_0 \right)^2 \right] - B + K \right\} \right\} \times \exp \left(\frac{A_3}{N} \right) \exp \left(\frac{-g}{N g_0} \right) + K \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_2 为桥箔分段拟合电阻参数, R_0 为桥箔初始电阻, g 为输入桥箔的能量, g_0 为桥箔爆炸时吸收的能量, A_1 、 A_2 、 A_3 、 K 、 N 、 B 为拟合参数。

根据 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.005 \text{ mm}$ 桥箔电爆炸实验结果获得的计算参数如下: $R_0 = 0.04$, $g_0 = 0.21$, $A_1 = 0.48$, $A_2 = 0.1$, $A_3 = 0.34$, $N = 0.9$, $K = 0.38$, $B = 0.012$ 。计算模型与实验波形基本吻合,如图 1 所示。

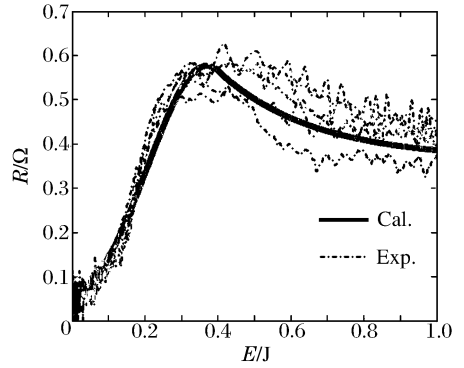


图 1 0.6 mm 桥箔欧姆计算模型与实验波形的比较
Fig. 1 Comparison between model and experimental data of 0.6 mm foil ohm resistance

4 计算方法

4.1 电爆炸过程

根据基尔霍夫定律,在主放电回路中,经过回路总电感(包括电容器本身的电感、传输线的电感、开关的电感和负载的电感等)、回路电阻(包括传输线的电阻、开关的电阻等)、桥箔电阻以及电容器的电压降为零,回路方程为

$$\frac{d^2U}{dt^2} = - \frac{1}{LC} \left[C \frac{dU}{dt} (R + R_f) + U \right] \quad (3)$$

$$\frac{dg}{dt} = I^2 R_f \quad (4)$$

式中: U 为电容器两端电压, L 为回路总电感, R 为回路总电阻, C 为电容器电容, R_f 为桥箔电阻, g 为桥箔吸收的能量, I 为回路电流。初始条件为: $U|_{t=0} = U_0$ 。

假定储能电容放电过程中不存在表面电弧,不考虑桥箔中的热传导、趋肤效应的影响,可认为流过桥箔的电流是均匀分布的,结合确定的电阻计算模型参数,通过龙格-库塔积分法即可求解公式(3)和(4),计算电爆炸过程中桥箔电流和电压波形。

4.2 飞片速度历程

电爆炸飞片驱动计算中的金属状态方程参数来自 Sesame 数据库。Sesame 是由美国 SNL 实验室建立的一个完全状态方程库,在给定密度和温度的条件下,可输出金属的压力、内能、比容等参数,数据库涵盖了金属从固态、液态到气态,以及等离子态时的状态方程参数,在计算中无需单独考虑由于相变对电爆炸驱动飞片的影响。利用该库可较为准确地计算飞片运动历程,不必人为给定飞片启动时刻。

在计算之前,需作以下假定:(1) 金属桥箔电爆炸驱动飞片是平面一维的;(2) 金属蒸汽在膨胀的过程中内部压力、质量均匀分布;(3) 陶瓷基板看作刚壁,飞片为不可压缩刚体。

金属桥箔的密度按下式计算

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{h}{s+h} \quad s = \int_0^t v_f(t) dt \quad (5)$$

金属桥箔的温度按下式计算

$$dT = \frac{dE - (p - \partial p / \partial T) dV}{\partial E / \partial T} \quad (6)$$

金属桥箔的压力由 Sesame 库给出

$$p = f(\rho, T) \quad (7)$$

由给出的压力即可计算飞片的运动速度

$$\frac{dv_f}{dt} = \frac{pS_f}{m_f} \quad (8)$$

式中: ρ 为金属桥箔密度, s 为飞片位移, h 为桥箔初始厚度, E 为桥箔内能, p 为桥箔压力, S_f 为飞片面积, m_f 为飞片质量, v_f 为飞片速度, T 为金属桥箔温度。

根据初始条件: $\rho|_{t=0} = \rho_0$, $T|_{t=0} = T_0$, 按公式(5)~(8)可差分求解桥箔飞片驱动过程。

5 计算结果与实验波形的比较

在上述计算方法的基础上编制了 EDF1.0 程序。为检验计算程序的合理性, 将计算结果与实验波形进行了比较。实验中采用的点火装置和桥箔飞片参数为: 储能电容 $C = 0.448 \mu\text{F}$, 不包括桥箔电阻的回路电阻 $R = 170 \text{ m}\Omega$, 回路电感 $L = 107 \text{ nH}$, 初始充电电压 $U_0 = 3.0 \text{ kV}$; 桥箔尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.005 \text{ mm}$, 初始密度 8.9 g/cm^3 , 飞片厚度 $50 \mu\text{m}$, 直径 0.7 mm , 密度 1.21 g/cm^3 。采用罗果夫斯基线圈和高压差分探头分别测量回路电流波形和桥箔两端电压波形, 采用 DISAR 激光测速仪测量桥箔电爆炸驱动的飞片速度历程^[10]。

5.1 电学量的比较

采用 EDF1.0 程序计算的电流、电压历史和实验波形较为吻合, 计算结果基本再现了电爆炸物理过程, 如图 2 所示: 当开关导通后, 回路电流随电容放电逐渐上升, 桥箔电阻在焦耳热作用下也开始升高, 当输入能量达到爆炸阈值时, 桥箔欧姆电阻达到最大值, 此时电流波形发生畸变, 随后由于桥箔欧姆电阻开始下降, 导致桥箔输入能量越来越少。

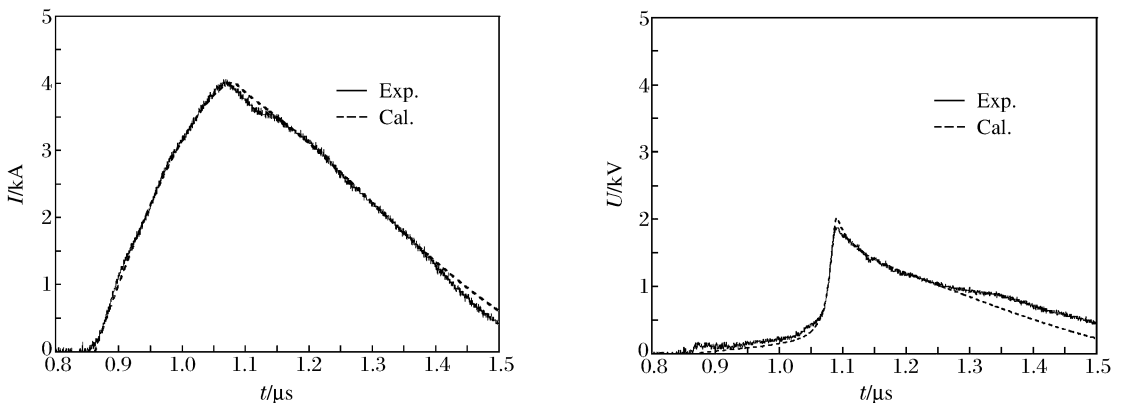


图 2 电学量计算与实验结果的比较

Fig. 2 Comparison between calculations and experimental results of electric parameters

桥箔电阻模型中未计及当桥箔本征爆炸后期密度减小到一定程度后金属电导率急剧下降的影响, 使得计算的电流、电压历史与实验波形有所差别。由于本征爆炸后期输入能量的变化较小, 对实际驱动飞片动能影响很小, 后期的桥箔电阻变化影响可以忽略。

5.2 速度的比较

EDF1.0 程序计算的压力、速度图像也与实验中飞片加速度变化趋势基本一致, 如图 3 所示: 在电

流加热初期,输入桥箔的能量较低,此时桥箔密度基本保持不变,因此由温度和密度决定的桥箔压力也近似为零;当电爆炸时,由于桥箔温度的急速升高和高密度蒸汽的形成,导致桥箔内部形成高达数吉帕的压力,在本征爆炸阶段后期由于金属蒸汽密度的急剧下降,内部压力迅速下降,导致飞片加速度减小。

在实际电爆炸过程中,存在桥箔不均匀加热导致的能量损耗现象,而且陶瓷基板和飞片的可压缩性以及飞片前方形成的冲击波会影响飞片的加速过程,因此计算得到的速度历程与实验波形存在一定偏差。

5.3 电格尼公式的比较

为进一步检验计算程序,将 EDF1.0 程序的计算结果与广泛应用的电格尼公式进行了比较。电格尼公式是 T. J. Tucker 等^[6]基于经典的 Gurney 分析方法并结合电爆炸导体特殊的实际情况作适当假设,导出的一个计算电爆炸桥箔推动薄绝缘飞片运动所达到的最大速度平面一维公式

$$u_f = \sqrt{2kJ_b^n \left(\frac{\rho_f \delta_f}{\rho_b \delta_b} + \frac{1}{3} \right)^{-1/2}} \quad (9)$$

式中: J_b 为桥箔的爆炸电流密度, ρ_f, ρ_b 为飞片和桥箔的初始密度, δ_f, δ_b 为飞片和桥箔的初始厚度, k, n 为实验拟合参数。公式(9)在较宽的爆炸电流密度范围内与实验测量值符合很好。

采用 EDF1.0 程序,对不同充电电压下的电爆炸参数进行计算,给出了爆炸电流与飞片末速度的关系(见图 4),由计算结果可知:在特定的距离处,飞片末速度与爆炸电流近似为线性,这与电格尼公式中的常数 $n=2$ 的结果基本一致,从而再次证明了计算程序的合理性。

6 结 论

(1) 通过开展小尺寸铜桥箔电爆炸实验获得了电流、电压波形与飞片速度历程,确定了桥箔欧姆电阻模型参数,模型能较好地描述桥箔电爆炸过程中的欧姆电阻变化规律;

(2) 采用反映桥箔物理状态的 Sesame 数据库,建立了一种金属桥箔电爆炸及飞片驱动全过程的简化计算方法,并编制了相应的 EDF1.0 程序;

(3) 采用 EDF1.0 程序计算得到的电流、电压及速度历程再现了小尺寸铜桥箔电爆炸及飞片驱动过程,计算给出的飞片末速度与爆炸电流密度线性关系和经典的电格尼模型基本一致,证明了计算方法的合理性。

参考文献:

[1] Lee R S, Osher J E. 1 MJ electric gun facility at LLNL[R]. UCRL-JC-108503, 1992.
 [2] Weignart R C, Lee R S. Acceleration of thin flyer by exploding metal foils: Application to initiation studies[C]//

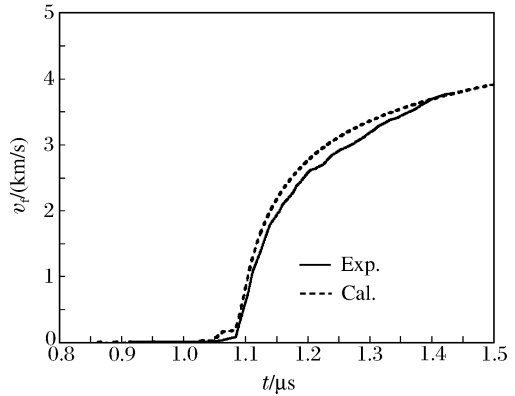


图 3 速度历程计算与实验结果的比较
 Fig. 3 Comparison between calculations and experimental results of velocity

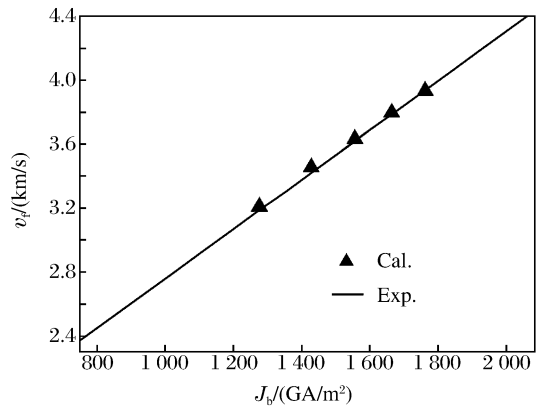


图 4 计算的爆炸电流密度与飞片速度的关系
 Fig. 4 Relation between explosion current and flyer velocity

- Proceedings of the 6th Symposium on Detonation. Washington D C: Office of the Chief of Naval Operations, 1976.
- [3] Furnberg C M, Peevy G R, Brigham W P. Computer modeling of electrical performance of detonators[R]. SAND94-2814C, 1994.
- [4] Logan J D, Lee R S. Calculation of heating and burst phenomena in electrically exploded foils[R]. UCRL-77764, 1976.
- [5] Zentler J M. Fuse: A simple simulation model for a flyer-plate detonator system[R]. UCRL-53260, 1982.
- [6] Tucker T J, Stanton P L. Electrical Gurney energy: A new concept in modeling of energy transfer from electrically exploded conductors[R]. SAND75-0244, 1975.
- [7] Smidt S C, Seitz W L. An empirical model to compute the velocity histories of flyer driven by electrically exploding foils[R]. LA-6809, 1977.
- [8] 耿春余. 电爆炸箔加速塑料片速度分析[J]. 含能材料, 1995, 3(2):37-42.
GENG Chun-yu. Velocity analysis of a plastic flyer accelerated by an electrically exploded metal foil[J]. Energetic Material, 1995, 3(2):37-42.
- [9] 杨振英. 冲击片雷管的参数设计[J]. 火工品, 1996(1):31-35.
YANG Zhen-ying. Parameter design of slapper detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1996(1):31-35.
- [10] 梁龙河. 电爆炸箔加速飞片的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 1999, 20(2):102-107.
LIANG Long-he. Research on flyer accelerated by electrically exploded metal foil by means of numerical simulation[J]. Acta Armamentarii, 1999, 20(2):102-107.
- [11] 袁士伟. 新型冲击片雷管设计研究[J]. 火工品, 2005(2):5-7.
YUAN Shi-wei. Design of a new kind of slapper detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2005(2):5-7.
- [12] 布勒采夫. 导体电爆炸及其在电物理装置中的应用[M]. 肖泽梅, 译. 1999.

Calculations of electrically exploded metal foil and driven flyer^{*}

LI Tao¹, FU Hua¹, TAN Duo-wang¹, LI Qiang², LU Min²

- (1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*
2. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The parameters of the ohm resistance model were determined from electric explosion experiments of small copper foil according to the experimental results. By referring to the Sesame EOS data base, a calculation method for process of foil electric explosion and flyer driving was established, with which EDF1.0 program was accomplished. The calculated profiles of current, voltage and flyer velocity reproduced the process of foil electric explosion and flyer driving, and the calculated linear relation between flyer velocities and exploding current densities was in accordance with the electric Gurney model.

Key words: fluid mechanics; electric explosion; Sesame data base; metal foil; driven flyer

* Received 8 September 2008; Revised 21 April 2009

Corresponding author: LI Tao, tedleus@hotmail.com