

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.001

考虑压缩空气边界的爆炸箔起爆器飞片运动模型^{*}

先明春^{①②} 谢浚尧^② 王成玲^② 陈云波^② 吴立志^① 沈瑞琪^①

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②四川航天川南火工技术有限公司(四川泸州,646000)

[摘要] 为了研究爆炸箔起爆器中的飞片运动规律,对爆炸桥箔蒸气驱动飞片的过程机理进行了研究。在假设爆炸箔电爆炸后形成的蒸气均匀膨胀以及飞片进行一维刚体运动的基础上,考虑桥箔蒸气内部的压力梯度,引入了压缩空气边界条件,进行飞片运动速度的计算,得到特定发火电路中以桥箔长度、桥箔厚度、飞片厚度以及发火电压为自变量的飞片运动速度模型。根据实测飞片速度的PDV(光子多普勒测速仪)测试结果,引入能量利用率对飞片运动速度曲线进行修正,并且拟合得到了能量利用率关于上述4种自变量的经验公式。结果表明:电爆炸推动飞片运动过程中,能量利用率与桥箔厚度和飞片厚度正相关,而与桥箔长度和发火电压负相关;初期,桥箔蒸气内部具有明显的压力梯度,最大压力可达10 GPa数量级;压缩空气段长度随着时间由0逐渐增大;在桥箔长度与加速腔厚度之比为0.4~1.2、桥箔厚度与加速腔厚度之比为0.002~0.010、飞片厚度与加速腔厚度之比为0.025~0.160的范围内,减小桥箔长度、桥箔厚度以及飞片厚度对提高加速腔出口飞片速度、降低爆炸箔起爆器的发火能量具有积极的作用。

[关键词] 爆炸箔;飞片运动模型;压缩空气边界

[分类号] TJ45;TQ565

A Motion Model of Flyer in Exploding Foil Initiator Considering Compressed Air Boundary

XIAN Mingchun^{①②}, XIE Junyao^②, WANG Chengling^②, CHEN Yunbo^②, WU Lizhi^①, SHEN Ruiqi^①

① School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnics Technology Co., Ltd. (Sichuan Luzhou, 646000)

[ABSTRACT] In order to study the motion law of flyer in exploding foil initiator (EFI), the process mechanism of flyer driven by exploding bridge foil steam was studied. Assuming the uniform expansion of the steam formed after the electric explosion of the exploding foil and the one-dimensional rigid body movement of the flyer, and considering the pressure gradient inside the bridge foil steam, the boundary condition of compressed air was introduced to calculate the velocity of the flyer. The flyer velocity model with the width of bridge foil, thickness of bridge foil, thickness of impactor and firing voltage as independent variables under a specific firing circuit was obtained. According to the PDV test results of the flyer velocity, the energy utilization rate was introduced to modify motion velocity curves of flyer, and the empirical formula of the energy utilization rate about the above four independent variables was obtained by fitting. Results indicate that the energy utilization rate is positively correlated with the thickness of bridge foil and the thickness of flyer, but inversely correlated with the length of bridge foil and the firing voltage during the process of electric explosion driving the flyer. There is a significant pressure gradient inside the bridge foil steam at the initial stage, and the maximum pressure peak can reach up to 10 GPa orders of magnitude. The length of compressed air section increases from 0 gradually with time. In the range of the ratio of bridge foil length to the thickness of accelerating chamber is 0.4-1.2, the ratio of bridge foil thickness to the thickness of accelerating chamber is 0.002-0.010, and the ratio of flyer thickness to the thickness of accelerating chamber is 0.025-0.160, reducing the length, thickness of bridge foil and the thickness of flyer has a positive effect on improving the velocity of flyer at the exit of accelerating chamber and reducing the ignition energy of EFI.

[KEYWORDS] exploding foil; a motion model of flyer; compressed air boundary

* 收稿日期:2022-06-24

第一作者:先明春(1982-),男,博士研究生,主要从事航天火工品、电子电路方面的研究。E-mail:380768767@qq.com

通信作者:谢浚尧(1990-),男,硕士,主要从事点火起爆、机械设计方面的研究。E-mail:xiejunyao@126.com

0 引言

爆炸箔起爆器是第三代航天火工技术的重点研究方向。它不使用起爆药,且换能元件与炸药不直接接触,对机械冲击、静电、杂散电流、射频等都有较强的抵抗能力,是一种极其安全可靠的起爆器,在钝感弹药中有着广阔的应用前景^[1]。

其中,电爆炸推动飞片运动的过程直接影响了飞片撞击药柱的速度,是爆炸箔起爆器作用的关键环节。对该过程的作用机理,国内外学者已经进行了大量研究。Tucker 等^[2]在格尼法的基础上提出了利用电格尼法计算飞片运动速度的公式。王治平^[3]对格尼公式中的常数和飞片直径之间的关系进行了研究。假设铜箔蒸气均匀膨胀且速度呈线性分布,研究者采用一维刚体平面运动方程对飞片运动过程进行模拟,得到了飞片运动的方程^[4-6]。曾庆轩等^[7]采用拉式一维平面不定常可压缩流体力学方程组对飞片运动过程进行计算,得到了非均匀膨胀的铜箔蒸气推动飞片运动的速度变化过程。贺佳等^[8]利用一维反应流体动力学(SSS)程序计算飞片运动过程中的速度变化情况,并且考虑了该过程中的磁压力边界条件。

在目前已知的几种计算过程中,电格尼法为经验公式;一维可压缩流体运动模型需要建立偏微分方程组进行求解,计算量较大^[9]。而一维刚体平面运动模型将铜箔蒸气膨胀过程经过合理的简化,可以减小模型的复杂程度和计算量,提高计算效率。然而现有的模型中,将膨胀过程中的铜箔蒸气内部压力视为处处均匀,与蒸气加速膨胀过程存在一定的矛盾^[5]。此外,现有模型中均采用自由边界条件,没有考虑飞片运动方向上由于压缩波形成的压缩空气段对飞片运动的影响。

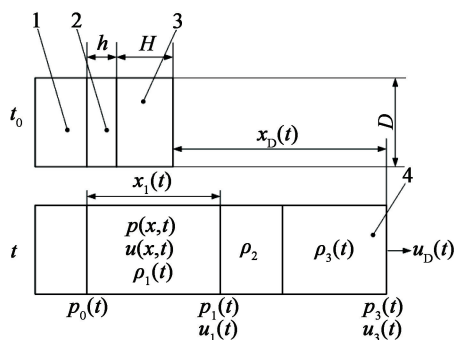
本文中,在假设桥箔蒸气均匀膨胀的基础上,考虑膨胀桥箔蒸气内部的压力梯度,引入了压缩空气段边界条件,对飞片的运动速度曲线进行了计算。根据光子多普勒测速仪(PDV)实测结果对模型进行修正。讨论了桥箔蒸气中的压力分布情况、压缩空气段长度的变化以及发火元件各参数对加速膛出口飞片速度的影响规律。

1 模型建立

针对电爆炸驱动飞片运动的模型,假设如下:

1) 反射片和飞片为刚体,且反射片静止不动,膨胀的桥箔蒸气进行一维膨胀运动,飞片进行一维刚体平动;2) 桥箔蒸气为理想气体,各时刻蒸气体点密度相等;3) 受飞片压缩波作用形成压缩空气段各质点的密度、速度处处相等,且质点速度等于飞片速度。

爆炸桥箔蒸气推动飞片运动的过程如图 1 所示。定义 l 为桥箔长度, h 为桥箔厚度, H 为飞片厚度, D 为加速膛孔径。 t_0 时刻即为桥箔电爆炸形成蒸气的时刻。 t 时刻, 飞片运动位移为 $x_1(t)$, 运动速度为 $u_1(t)$ 。此时: 反射片的表面压力为 $p_0(t)$; 桥箔蒸气内部任一质点压力为 $p(x, t)$, 速度为 $u(x, t)$, 密度为 $\rho_1(t)$; 桥箔蒸气与飞片接触面上的压力为 $p_1(t)$; 飞片以及飞片右端面受到压缩的空气质点速度为 $u_1(t)$; 飞片的密度为 ρ_2 ; 压缩空气密度为 $\rho_3(t)$; 压缩空气与未压缩空气的界限(即冲击波波阵面)的位移为 $x_D(t)$, 速度为 $u_D(t)$; 压缩空气质点速度为 $u_3(t)$; 空气在冲击波波阵面上的压力为 $p_3(t)$ 。



1 - 反射片; 2 - 桥箔蒸气; 3 - 飞片; 4 - 压缩空气。

图 1 桥箔蒸气推动飞片运动的过程

Fig. 1 Flyer motion process driven by bridge foil steam

根据质量守恒定律,桥箔蒸气任意时刻的质量与初始时刻相等,压缩空气段任意时刻的质量等于冲击波波阵面扫过的空气段总质量,则

$$\rho_1(t)x_1(t) = \rho_{10}l^2h; \quad (1)$$

$$\rho_3(t)[x_D(t) - x_1(t) + h] = \rho_{30}x_D(t). \quad (2)$$

式中: ρ_{10} 为桥箔的初始密度; ρ_{30} 为空气的初始密度。

根据运动方程,飞片运动位移 $x_1(t)$ 、运动速度 $u_1(t)$ 以及加速度 $a_1(t)$ 之间有如下关系:

$$u_1(t) = \frac{dx_1(t)}{dt}; \quad (3)$$

$$a_1(t) = \frac{du_1(t)}{dt}. \quad (4)$$

对桥箔电爆蒸气中某一微元进行受力分析,如图 2 所示。

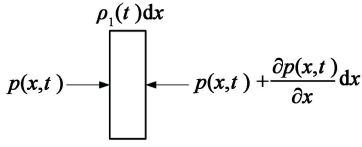


图2 桥箔蒸气微元的受力情况

Fig. 2 Stress on the element of the bridge foil steam

由动量定理可得

$$-\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = \rho_1(t) \frac{du(x, t)}{dt}. \quad (5)$$

因为桥箔蒸气中密度处处相等,得出各蒸气体点速度沿 x 方向线性变化:

$$u(x, t) = \frac{x}{x_1(t)} u_1(t). \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中,可以得到

$$-\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = \rho_1(t) \frac{d[xu_1(t)/x_1(t)]}{dt}. \quad (7)$$

式(7)两边同时在 0 到 $x(t)$ 进行积分,可以得到桥箔蒸气任意截面上的压力

$$p(x, t) = p_0(t) - \frac{\rho_1(t) d[u_1(t)x^2(t)/x_1(t)]}{2dt}. \quad (8)$$

在桥箔蒸气与飞片的分界面上,有

$$p_0(t) - p_1(t) = \frac{1}{2} \rho_1(t) [u_1^2(t) + x_1(t) a_1(t)]. \quad (9)$$

对飞片和压缩空气段整体进行受力分析,如图3所示。

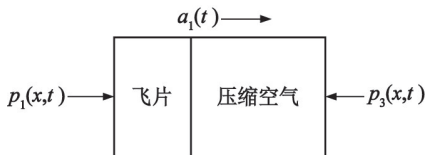


图3 飞片和压缩空气段的受力

Fig. 3 Force on flyer and compressed air section

由动量定理可以得到:

$$p_1(t) - p_3(t) = [\rho_2 H + \rho_{30} x_D(t)] a_1(t). \quad (10)$$

整个系统的动能由桥箔蒸气动能 E_{k1} 、飞片动能 E_{k2} 以及压缩空气段动能 E_{k3} 组成;内能由桥箔蒸气内能 E_{i1} 和压缩空气内能 E_{i3} 组成。不考虑过程中的热交换,根据能量定理可得

$$\frac{d(E_{i1} + E_{i3} + E_{k1} + E_{k2} + E_{k3})}{dt} = -p_3(t) S u_1(t) + P(t) \eta. \quad (11)$$

式中: S 为飞片面积; $P(t)$ 为桥箔吸收的电功率,可根据 Fireset 模型计算确定^[10]; η 为能量利用率^[11]。

由于视桥箔蒸气为理想气体,可得

$$E_{i1} = \frac{i}{2} S \int_0^{x_1(t)} p(x, t) dx. \quad (12)$$

式中: i 为气体常数,对于单原子分子取 3。

$$E_{k1} = \int_0^{x_1(t)} \frac{1}{2} \rho(t) S u^2(x, t) dx; \quad (13)$$

$$E_{k2} = \frac{1}{2} \rho_2 S H u_1^2(t). \quad (14)$$

因压缩空气段质点速度相等且等于飞片速度,

$$E_{k3} = \frac{1}{2} \rho_{30} x_D(t) S u_1^2(t). \quad (15)$$

冲击波波阵面上的压力 $p_3(t)$ 、单位质量内能 $e_3(t)$ 以及波阵面速度 $u_D(t)$ 均可表示为压缩空气质点速度 $u_3(t)$ 的函数。对文献中的数据进行拟合可得^[12]

$$p_3(t) = \begin{cases} 1.1554u_3^2(t) + 325.58u_3(t) + 100648, & u_3 < 700; \\ 1.5136u_3^2(t) - 322.07u_3(t) + 427799, & 700 \leq u_3 < 2385; \\ 1.3348u_3^2(t) - 337.34u_3(t) + 1000000, & u_3 \geq 2385. \end{cases} \quad (16)$$

$$e_3(t) = \begin{cases} 0.0002u_3^3(t) + 0.1533u_3^2(t) + 232.38u_3(t) + 206849, & u_3 < 700; \\ 2 \times 10^{-7}u_3^3(t) + 0.4965u_3^2(t) + 15.868u_3(t) + 259038, & u_3 \geq 700. \end{cases} \quad (17)$$

$$u_D(t) = \begin{cases} -5 \times 10^{-7}u_3^3(t) + 0.0009u_3^2(t) + 0.458u_3(t) + 359.7, & u_3 < 700; \\ 2 \times 10^{-6}u_3^2(t) + 1.0486u_3(t) + 239.87, & u_3 \geq 700. \end{cases} \quad (18)$$

根据假设, $u_3 = u_1$, 联立式(1)~式(18)可得

$$\begin{cases} x_1'(t) = u_1(t); \\ u_1'(t) = a_1(t); \\ a_1'(t) = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot \left\{ \left[\frac{i}{6} M_1 + \frac{i}{2} M_2 + \frac{i}{2} S \rho_{30} x_D(t) \right] x_1(t) \right\}^{-1}; \\ x_D'(t) = u_D(t). \end{cases} \quad (19)$$

$\theta_1 \sim \theta_4$ 的表达式为

$$\theta_1 = p(t) - p_3(t) S u_1(t); \quad (20)$$

$$\theta_2 = \frac{i}{2} S \{ p_3'(t) x_1(t) + p_3(t) u_1(t) + \rho_{30} a_1(t) \cdot$$

$$[u_D(t) x_1(t) + x_D(t) u_1(t)] \} - \frac{i}{2} M_2 u_1(t) a_1(t); \quad (21)$$

$$\theta_3 = \frac{i}{3} M_1 u_1(t) a_1(t) - \rho_{30} S [e_3'(t) x_D(t) + e_3(t) u_D(t)]; \quad (22)$$

$$\theta_4 = - \left(\frac{1}{3} M_1 + M_2 \right) u_1(t) a_1(t) - \frac{1}{2} \rho_{30} S [u_D(t) u_1^2(t) + 2u_1(t) a_1(t) x_D(t)]. \quad (23)$$

式中: $p_3'(t)$ 和 $e_3'(t)$ 分别为 $p_3(t)$ 和 $e_3(t)$ 的导数。

在 $t=0$ 时刻, 飞片位移 x_1 为桥箔厚度 h , 飞片速度 u_1 以及压缩空气波阵面位移 x_D 均为 0, 而飞片加速度 a_1 不为 0。此时, 由于各质点尚未运动, 飞片右端面没有产生压缩空气段, 飞片受力见图 4。

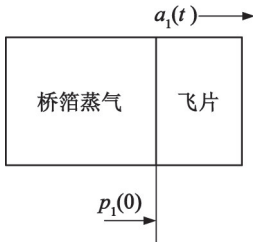


图 4 t_0 时刻飞片的受力

Fig. 4 Force on the flyer at t_0

根据牛顿第二定律, 求得飞片初始时刻加速度

$$a_1(0) = \frac{p_1(0)S}{M_2} = \frac{p_1(0)}{\rho_2 H}. \quad (24)$$

电爆炸发生瞬间, 桥箔由固体变为气体, 尚未发生膨胀, 内部压力处处相等, 均为 $p_1(0)$ 。对于理想气体, 内能 E_e 与压力之间的关系为

$$E_e = \frac{i}{2} S h p_1(0). \quad (25)$$

而电爆炸初始时刻, 桥箔蒸气的内能即为桥箔在电爆炸前所吸收的电能

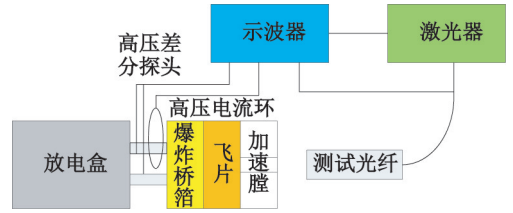
$$E_e = \int_0^{t_b} P(t) \eta dt. \quad (26)$$

综合式(24)~式(26)可以确定飞片初始时刻的加速度 $a_1(0)$ 。

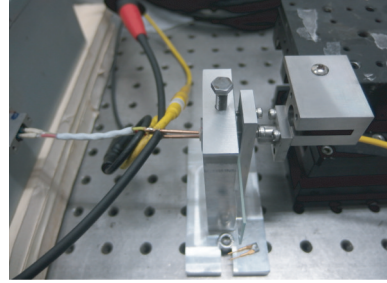
2 实验部分

2.1 系统装置

实验装置如图 5 所示。主要由放电盒、飞片产生实验件(含爆炸桥箔、飞片、加速膛)、测试光纤、激光器、示波器、高压差分探头、高压电流环组成。EFI-DY05 放电盒, 四川航天川南火工技术有限公司; PDV 测试系统(含测试光纤、激光器、示波器等), 南京理工大学。飞片产生实验件通过工装固定, 与放电盒之间通过高压导线相连。加速膛的轴线与测试光纤的轴向保证同轴布置。



(a) 示意图



(b) 实物

图 5 飞片运动测速系统

Fig. 5 Schematic diagram of measurement system of flyer motion velocity

实验时, 放电盒中的高压电容充至所需电压, 通过高压导线对爆炸桥箔放电。爆炸桥箔在大电流作用下发生瞬间汽化膨胀, 形成电爆炸, 驱动飞片在加速膛中加速运动。飞片运动过程中, 测试光纤发射的激光照射在飞片表面并反射, 由于多普勒效应, 使得激光的频率由 f_0 变化至 f_d , 二者有以下关系:

$$f_d = f_0 \left[1 + \frac{2v(t)}{c} \right]. \quad (27)$$

式中: $v(t)$ 为飞片运动速度; c 为光速。

由示波器记录初始光和反射光的频率差, 经过滤波计算可以求得飞片的运动速度。

2.2 测试参数

测试参数如表 1 所示。表 1 中: 加速膛孔径 D 大小取决于桥箔长度 l , 取 $D = 1.414l$; δ 为加速膛厚度; H 为飞片厚度; η 为根据各组实测结果获得的能量利用率。实际电爆炸过程中, 外界的电能 $P = UI$

表 1 各组测试参数及能量利用率

Tab. 1 Test parameters and energy utilization in each group

| 组号 | l/δ | h/δ | H/δ | D/δ | U_0/kV | η |
|----------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|--------|
| 1 [#] | 0.4 | 0.002 | 0.056 | 0.566 | 2.5 | 0.40 |
| 2 [#] | 0.4 | 0.004 | 0.100 | 0.566 | 1.0 | 0.80 |
| 3 [#] | 0.4 | 0.006 | 0.025 | 0.566 | 1.7 | 0.50 |
| 4 [#] | 0.6 | 0.002 | 0.100 | 0.848 | 1.7 | 0.40 |
| 5 [#] | 0.6 | 0.004 | 0.025 | 0.848 | 2.5 | 0.28 |
| 6 [#] | 0.6 | 0.006 | 0.056 | 0.848 | 1.0 | 0.54 |

并非完全转化为了系统的内能和动能,部分能量转化成了其他形式的能量,可根据实验数据得到 η 。

3 结果与分析

3.1 计算速度的修正

理论计算速度与实测速度的比较见图6。由于模型中没有考虑飞片剪切变形过程的影响,在飞片运动初期,计算速度与实测速度形态存在一定偏差。

令能量利用率 η 为 l/δ 、 h/δ 、 H/δ 和电压 U_0 的函数,有

$$\eta = \left(\frac{l}{\delta}\right)^{x_1} \left(\frac{h}{\delta}\right)^{x_2} \left(\frac{H}{\delta}\right)^{x_3} U_0^{x_4}. \quad (28)$$

可以得到如下的线性方程组:

$$AX = I. \quad (29)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} \ln \frac{l_1}{\delta} & \ln \frac{h_1}{\delta} & \ln \frac{H_1}{\delta} & \ln U_{01} \\ \ln \frac{l_2}{\delta} & \ln \frac{h_2}{\delta} & \ln \frac{H_2}{\delta} & \ln U_{02} \\ \ln \frac{l_3}{\delta} & \ln \frac{h_3}{\delta} & \ln \frac{H_3}{\delta} & \ln U_{03} \\ \ln \frac{l_4}{\delta} & \ln \frac{h_4}{\delta} & \ln \frac{H_4}{\delta} & \ln U_{04} \\ \ln \frac{l_5}{\delta} & \ln \frac{h_5}{\delta} & \ln \frac{H_5}{\delta} & \ln U_{05} \\ \ln \frac{l_6}{\delta} & \ln \frac{h_6}{\delta} & \ln \frac{H_6}{\delta} & \ln U_{06} \end{bmatrix}$$

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6]^T;$$

$$I = [\ln \eta_1 \quad \ln \eta_2 \quad \ln \eta_3 \quad \ln \eta_4 \quad \ln \eta_5 \quad \ln \eta_6]^T. \quad (30)$$

根据实验结果进行线性回归,可以确定 X ,最终得到的能量利用率 η 的表达式为

$$\eta = \left(\frac{l}{\delta}\right)^{-0.800} \left(\frac{h}{\delta}\right)^{0.109} \left(\frac{H}{\delta}\right)^{0.158} U_0^{-0.551}. \quad (31)$$

在该爆炸箔系统中,能量利用率 η 与桥箔厚度 h 和飞片厚度 H 正相关,与桥箔长度 l 和电压 U_0 负相关。线性回归残差 r 如表2所示。说明经过能量利用率 η 的修正后,该模型在一定范围内可以进行有效的预测。

表2 线性回归残差 r

Tab.2 Linear regression residual r

| 组号 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# |
|-----|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| r | -0.013 1 | 0.008 2 | 0.004 8 | 0.007 4 | 0.006 1 | -0.013 2 |

3.2 桥箔蒸气内部压力随时间和空间坐标的变化

典型的飞片运动过程中,桥箔蒸气内部的压力 p 随时间坐标 t 和空间坐标 x 变化情况如图7所示。

从图7可以看出,在桥箔蒸气加速膨胀的情况下,初始时刻,蒸气内部的压力梯度较为明显:靠近反射片($x=0$)处的压力极大,最高可达数十吉帕量级,具体数值与电爆炸发生时桥箔吸收的电能以及桥区参数相关;而对于远离反射片位置,由于压力波波阵面尚未传递至该点,压力接近大气压。随着电爆炸发生后时间的推移,靠近反射片处的桥箔蒸气的压力迅速下降,在不到 $0.1 \mu\text{s}$ 的时间内下降至2

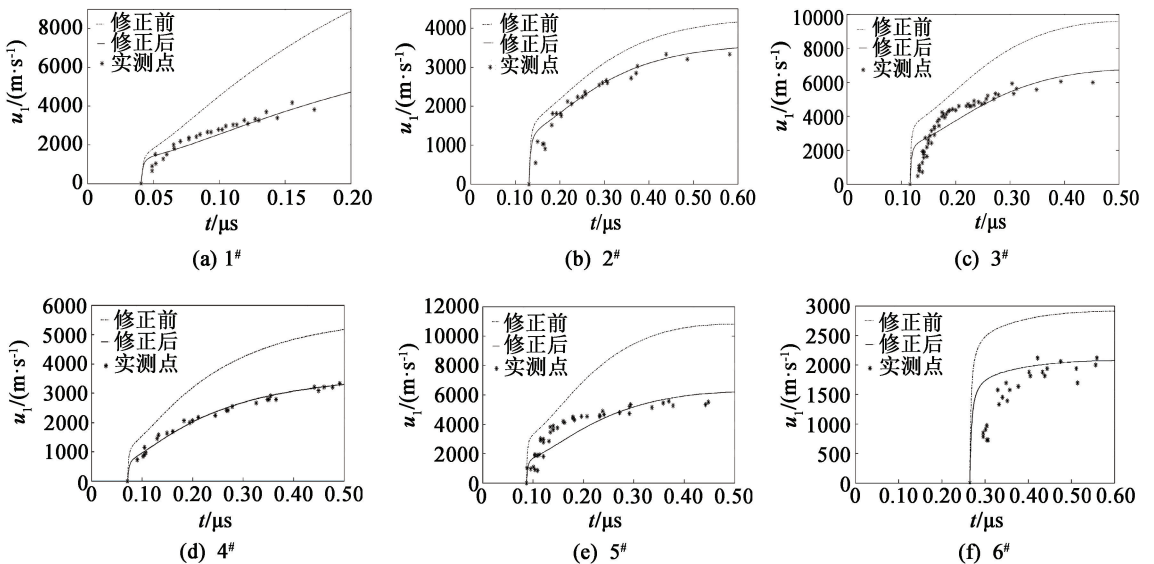


图6 理论飞片速度与实际飞片速度的比较

Fig. 6 Comparison between theoretical flyer velocity and measured flyer velocity

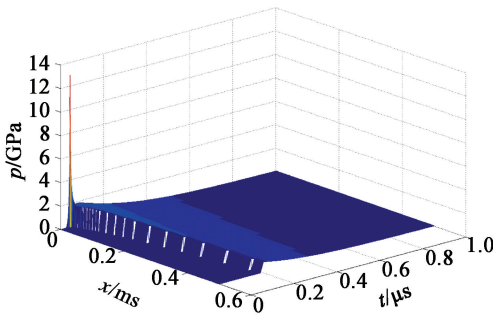


图 7 1#桥箔蒸气内部压力梯度

Fig. 7 Internal pressure gradient of copper foil steam of Group 1#

GPa 左右;随着压力波的传递和蒸气的膨胀,桥箔蒸气内的压力梯度也趋于平缓,整个蒸气区域内的压力均值在数吉帕的范围内。当时间超过 $0.5 \mu\text{s}$ 时,加速腔内桥箔蒸气压力降至 0.1 GPa 以下。

3.3 压缩空气段的变化

典型的飞片左端面位移、飞片右端面位移、压缩空气波阵面的位移的变化趋势如图 8 所示。

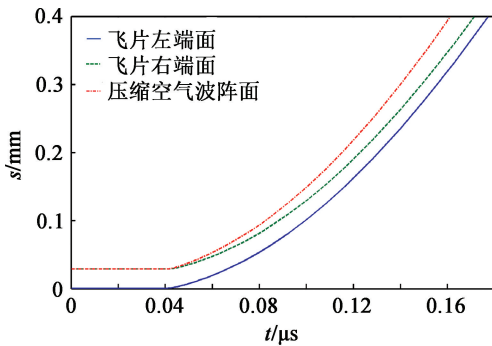


图 8 3 种位移随时间的变化

Fig. 8 Changes of three kinds of displacement with time

图 8 中,飞片左端面位移到 x 轴的距离为桥箔蒸气的膨胀长度;飞片右端面位移到实线的距离为飞片的厚度,由于假设飞片为刚体,整个过程中该距离不发生变化;压缩空气波阵面的位移到飞片右端

面位移的距离为压缩空气段的长度。从图 8 中可以看出,在飞片加速运动过程中,飞片的位移随着时间的延长逐渐增大,而压缩空气段的长度也从 0 开始有着不断增大的趋势。

3.4 爆炸箔发火元件参数对飞片运动速度的影响

根据得到的模型,在发火电压一定时,加速腔出口飞片速度 v_f 随各参数的变化如图 9 所示。

从计算结果来看,加速腔出口飞片速度 v_f 随着 l/δ (或 D/δ)、 h/δ 和 H/δ 的增加而减小。故减小桥箔长度 l 、桥箔厚度 h 或飞片厚度 H 与加速腔厚度 δ 之比,均可以提高飞片在加速腔出口处的速度。其中:当 h/δ 减小至 0.002 时,飞片速度 v_f 上升趋势有所减缓;而当 l/δ 减小至 0.4 或者 H/δ 减小至 0.025 时,飞片速度 v_f 仍然保持着明显的上升趋势。所以,减小桥箔长度 l 或飞片厚度 H ,能够更加显著地提升加速腔出口飞片速度 v_f 。

根据飞片冲击起爆的 p - τ 理论,在飞片厚度一致的情况下,增加加速腔出口飞片速度对起爆是有利的^[13]。而相关研究表明,减小飞片厚度对冲击起爆也有积极的作用^[14]。故综合来看,同时在一定程度上减小桥箔长度、桥箔厚度以及飞片厚度,能够增强飞片冲击起爆的效果,降低爆炸箔起爆器发火所需的能量。

4 结论

1) 提出了一种爆炸箔起爆器一维飞片运动模型。在假设桥箔蒸气等密度膨胀的基础上,考虑了桥箔蒸气内部压力梯度的变化以及飞片运动方向的压缩空气段的影响,通过实验结果对模型进行修正,可以保证模型在一定参数范围内具有较高的拟合精度。由于没有考虑飞片的剪切变形过程,部分参数下计算曲线与实测曲线在飞片运动初期存在一定偏差。

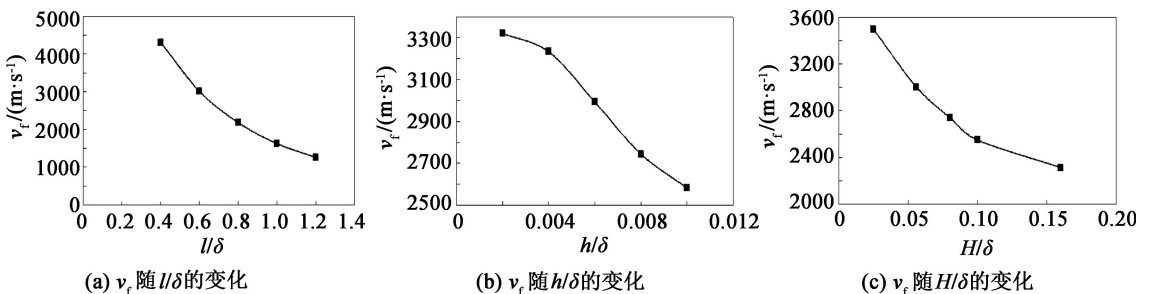


图 9 加速腔出口飞片速度随发火元件参数的变化

Fig. 9 Changes of flyer velocity at the exit of accelerating chamber with the parameters of ignition components

2) 根据得到的能量利用率的拟合公式, 实验中所采用的发火系统的能量利用率与发火电压和桥箔长度负相关, 与桥箔厚度以及飞片厚度正相关。

3) 通过计算得到桥箔蒸气在膨胀过程中内部的压力梯度随时间变化的分布情况。结果表明: 随着时间推移, 各位置处的压力呈现先增大后减小的趋势, 靠近反射片处的压力最大, 远离反射片处的压力逐渐减小。同时, 得到了压缩空气段的长度随着时间的推移由 0 逐渐增大的变化规律。

4) 在相同的电能输入以及加速膛厚度下, 减小桥箔长度、桥箔厚度以及飞片的厚度, 均能够在一定程度上增加飞片飞出加速膛孔的速度, 在一定程度上有利于降低爆炸箔起爆器的发火能量。

参 考 文 献

- [1] 陈清畴, 马弢, 李勇. 爆炸箔起爆器作用机理研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(1): 79-88.
CHEN Q C, MA T, LI Y. Research progress in the function mechanism of exploding foil initiator [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(1): 79-88.
- [2] TUCKER T J, STANTON P L. Electrically gurney energy: a new conception in modeling of energy transfer from electrically exploded conductors: SAND-75-0244 [R]. US Energy Research and Development Administration, 1975.
- [3] 王治平. 飞片雷管中飞片直径对飞片速度的影响[J]. 爆炸与冲击, 1983(2): 83-86.
WANG Z P. The effect of the diameter on the flyer velocity of a slapper detonator [J]. Explosion and Shock Waves, 1983(2): 83-86.
- [4] SCHMIDT S C, SEITZ W L, WACKERIE J. An empirical model to compute the velocity histories of flyers driven by electrically exploding foils: LA-6809 [R]. Los Alamos, NM, US: Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1977.
- [5] 耿春余. 电爆炸箔加速塑料飞片速度分析[J]. 含能材料, 1995, 3(2): 37-42.
GENG C Y. Velocity analysis of a plastic flyer accelerated by an electrically exploded metal foil [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 1995, 3(2): 37-42.
- [6] 胡晓棉, 冯长根, 曾庆轩, 等. 电爆炸箔加速飞片的动力学模型[J]. 火工品, 2003(1): 41-44.
HU X M, FENG C G, ZENG Q X, et al. Dynamic model of accelerating flyer with electric exploding foil [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(1): 41-44.
- [7] 曾庆轩, 赵彦, 梁琦, 等. 金属箔电爆炸驱动飞片模型的设计及应用[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 50-53.
ZENG Q X, ZHAO Y, LIANG Q, et al. Design and application of flyer velocity model accelerated by electric exploding foil [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2008, 31(6): 50-53.
- [8] 贺佳, 赵剑衡, 谭福利, 等. 电爆炸箔驱动绝缘飞片的一维数值模拟[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 476-480.
HE J, ZHAO J H, TAN F L, et al. One-dimensional numerical simulation of a flyer accelerated by electrically exploded metal foil [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6): 476-480.
- [9] 梁龙河, 范中波, 胡晓棉. 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 L H, FAN Z B, HU X M. Research on a flyer accelerated by electrically exploded metal foil by means of numerical simulation [J]. Acta Armamentarii, 1999, 20(2): 102-107.
- [10] 邱林俊, 胡云钦, 李东, 等. 基于电能的桥箔爆炸 FIRESET 模型修正[J]. 火工品, 2016(1): 6-10.
QIU L J, HU Y Q, LI D, et al. Modification of fireset model of exploding foil based on energy [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(1): 6-10.
- [11] 赵彦, 曾庆轩, 袁士伟. 爆炸箔起爆系统能量转换模型的研究[J]. 火工品, 2009(4): 5-8.
ZHAO Y, ZENG Q X, YUAN S W. Study of theoretical model for energy conversion of exploding foil initiation systems [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009(4): 5-8.
- [12] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [13] 钱石川, 甘强, 任志伟, 等. HNS-IV 炸药一维冲击起爆判据的研究[J]. 含能材料, 2018, 26(6): 495-501.
QIAN S C, GAN Q, REN Z W, et al. Study on one-dimensional shock initiation criterion of HNS-IV explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(6): 495-501.
- [14] 钱石川, 甘强, 任志伟, 等. 爆炸箔起爆器发火阈值影响因素的数值模拟[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 248-254.
QIAN S C, GAN Q, REN Z W, et al. Numerical simulation of the factors affection the ignition threshold of an exploding foil initiator [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(3): 248-254.