

# 电爆炸箔加速塑料片速度分析

耿春余

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 成都 610003)

**摘要** 本文分析了强电流脉冲引爆金属箔加速塑料飞片(冲击片)的物理过程, 给出了近似计算飞片速度的几种方法, 并与实测速度进行了比较。

**关键词** 爆炸箔 飞片 速度

## 1 引言

早在60年代, 人们就研究了给薄的金属箔快速施加强电流脉冲(在微秒内施加数千安培电流), 金属箔将迅速气化, 产生高温高压等离子体, 直接引爆与其接触的炸药。到了70年代中期, 在这种金属箔的下面依次放置薄塑料片、有小孔的炮筒及炸药片, 当金属箔爆炸时, 产生的高温高压等离子体将塑料片切出沿炮筒加速撞击炸药而发生爆炸。根据Walker和Wasley<sup>[1]</sup>提出的非均质炸药短脉冲起爆判据  $p^2\tau = \text{常数}$ , 炸药能否被引爆, 由压力  $p$  和压力持续时间  $\tau$  两个因素决定, 而  $p$  主要取决于飞片速度,  $\tau$  取决于飞片厚度, 此外还与飞片直径、炸药特性相关。因此, 在设计冲击片雷管中, 研究各参数之间的关系, 常以飞片速度作为主要特征参数。

## 2 电爆炸箔爆炸特性分析

### 2.1 热桥丝和爆炸丝特性

当恒定电流通过一段金属丝时, 金属丝将被加热, 假定忽略热损失, 金属丝从电源吸收的能量, 全部转化为热量使金属丝升温, 根据热平衡原理, 可计算出直径 0.04mm, 长 1.30mm 金丝, 通以 5A, 4ms 电流时, 其温度达 541.2°C。

对于同样参数的金丝, 如果以  $di/dt = 1.36 \times 10^9 \text{A/s}$  速率加电时, 金丝约经 0.27 $\mu\text{s}$  气化而爆炸, 产生高温高压等离子体<sup>[2]</sup>。根据 Scherrer<sup>[3]</sup> 给出金属丝爆炸时计算温度公式(1)可计算出金丝爆炸时的温度为 10912K。

$$T = (P/\sigma A)^{1/4} \quad (1)$$

式中,  $P$  为金丝爆炸时电功率,  $4 \times 10^6 \text{W}$ ;  $\sigma$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$ ;  $A$  为金丝爆炸时表面积,  $4.898 \times 10^{-7} \text{m}^2$ 。

由此可见: 对于同样参数的金丝, 由于加电方式不同, 产生的效果截然不同。金丝快速加电爆炸产生的高温是慢加电产生温度的 20 倍, 这是因为两种方式的引爆机理不同, 慢加电引爆炸药是毫秒级, 而快加电引爆炸药是微秒级。前者是焦耳热通过热传导到炸药

局部分解发生化学反应放热,由爆燃转爆轰;而后者是等离子体以冲击波和高温结合效应对炸药进行冲击压缩加热,使非均质炸药形成局部热点产生反应冲击波,再使炸药爆炸迅速转爆轰。

## 2.2 爆炸箔-飞片特性

当金丝换成爆炸箔,通以更强的电流时,其爆炸过程与金丝爆炸过程相同。爆炸箔背面也支持一个大质量背板,前边放一塑料片,塑料片下边放一炮筒,炮筒下边放置炸药片,这一起爆过程为冲击起爆,与传统的雷管起爆相比是一种新的概念。

## 3 爆炸箔加速飞片的物理过程分析与近似计算

### 3.1 基本假设

电爆炸金属箔蒸气驱动飞片运动的物理过程较为复杂,很难给出精确的解析解。为简化计算,作出如下基本假设,以建立其运动方程。

① 爆炸金属蒸气为理想气体,其质点速度随距离呈线性分布;

② 各处爆炸蒸气密度均匀;

③ 飞片、背板可视为刚体(见图1),飞片作一维运动;

④ 背板质量为  $N$ , 飞片质量为  $m$ , 爆炸箔质量为  $G$ ,  $N \gg m$ ,  $N \gg G$ , 令背板速度  $v_N = 0$ 。

### 3.2 飞片速度公式的推导

#### 3.2.1 数值法

飞片在爆炸箔蒸气驱动下的运动速度为

$$v_f(t) = \frac{dr_f(t)}{dt} \quad (2)$$

式中,  $r_f(t)$  为爆炸箔蒸气与飞片界面位置, mm。

根据假设①, 爆炸蒸气质点速度为

$$u(r, t) = \frac{r(t)}{r_f(t)} v_f(t) \quad (3)$$

式中,  $r(t)$  为爆炸蒸气质点位移, mm。根据能量守恒关系, 爆炸箔、飞片系统有如下方程:

$$m_e E(t) + \frac{1}{2} \rho(t) \int_0^{r_f(t)} u^2(r, t) dr + \frac{1}{2} m_f v_f^2(t) = m_e Q(t) \quad (4)$$

上式左边第一项为蒸气内能; 第二项为蒸气动能; 第三项为飞片动能; 右边为爆炸箔从电源吸收的总能。式中,  $m_e$  为爆炸箔单位面积质量,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $E(t)$  为单位质量蒸气内能,  $\text{J}/\text{mg}$ ;  $\rho(t)$  为蒸气密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $m_f$  为飞片单位面积质量,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $Q(t)$  为单位质量爆炸

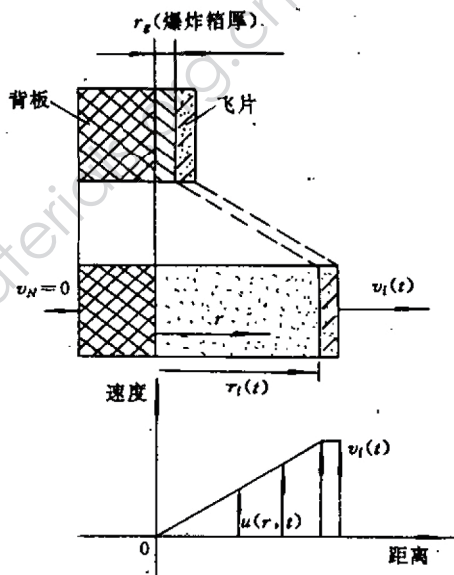


图1 爆炸箔、飞片位移及速度分布图

Fig. 1 Exploding foil, flyer migration distance and its velocity profile.

箔的吸收能, J/mg。

将(3)式代入(4)式得:

$$E(t) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} + \frac{m_i}{m_e} \right) v_i^2(t) = Q(t) \quad (5)$$

根据假设, 蒸气服从理想气体方程, 则:

$$E(t) = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho(t)} \quad (6)$$

式中,  $p$  为蒸气压力, GPa; 金属蒸气为单原子,  $\gamma = \frac{3}{5}$ 。

当把作用于飞片上压力  $p$  看成蒸气单位面积上加速力时, 根据牛顿第二定律得:

$$\dot{p} = m_i \frac{dv_i(t)}{dt} \quad (7)$$

联立(5)、(6)、(7)得:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \frac{1}{3Rr_i(t)} \left[ - \left( \frac{1}{3} + R \right) v_i^2(t) + 2Q(t) \right] \quad (8)$$

式中,  $R = \frac{m_i}{m_e}$  为无量纲质量比。

$$\begin{cases} \frac{dQ(t)}{dt} = P(t) \cdot \eta(t) \\ \text{初始条件 } t=0, v_i(0) = 0, r_i(0) = r_0, Q(0) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由(2)、(8)、(9)三式联立, 通过数值求解即可得飞片速度。式中,  $P(t)$  为实测功率曲线, 从  $t_0$  (箔爆炸时间,  $\mu\text{s}$ ) 开始计算,  $\eta(t)$  为与时间相关的修正因子。此法亦称 Schimide, Letize and Jerry Wackerle 方法<sup>[4]</sup>。

### 3.2.2 解析法

将(2)式改写成

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv_i^2(t)}{dr_i(t)} \quad (10)$$

将(10)代入(8)整理得:

$$\frac{dv_i^2(t)}{dr_i(t)} + \frac{2 \left( \frac{1}{3} + R \right) v_i^2(t)}{3Rr_i(t)} = \frac{4Q(t)}{3Rr_i(t)} \quad (11)$$

令  $v_i^2(t) = Y$ ,  $r_i(t) = X$ ,  $\frac{2 \left( \frac{1}{3} + R \right)}{3Rr_i(t)} = G(X)$ ,  $\frac{4Q(t)}{3Rr_i(t)} = H(X)$ , 并将其代入(11), 得:

$$\frac{dY}{dX} + G(X)Y = H(X) \quad (12)$$

其通解为:  $Y = e^{-\int G(X)d(X)} \left[ \int H(X)e^{\int G(X)d(X)} dX + Ce^{-\int G(X)d(X)} \right] \quad (13)$

解得:  $\int G(X)d(X) = \int \frac{2 \left( \frac{1}{3} + R \right)}{3Rr_i(t)} dr_i(t) = \frac{2(1+3R)}{9R} \ln r_i(t) \quad (14)$

将(14)式代入(13)并以  $Y = v_f^2(t)$  替换得下式:

$$v_f^2(t) = e^{-\frac{2(1+3R)}{9R} \ln r_f(t)} \int \frac{4Q(t)}{3Rr_f(t)} e^{\frac{2(1+3R)}{9R} \ln r_f(t)} dr_f(t) + Ce^{-\frac{2(1+3R)}{9R} \ln r_f(t)} \quad (15)$$

$$\text{化简(15)式得: } v_f^2(t) = \frac{6Q(t)}{1+3R} + C \frac{1}{r_f(t)^{\frac{2(1+3R)}{9R}}} \quad (16)$$

当  $t=t_b$  时,  $r_g=r_f, v_f(t_b) \doteq 0, Q(t)=Q(t_b)$  代入(16)式, 解得:

$$C = -\frac{6Q(t_b)}{1+3R} r_g^{\frac{2(1+3R)}{9R}} \quad (17)$$

将(17)式代入(16)式整理得:

$$v_f^2(t) = \frac{6}{1+3R} \left[ Q(t_f) - Q(t_b) \left( \frac{r_g}{r_f(t)} \right)^{\frac{2(1+3R)}{9R}} \right] \quad (18)$$

根据上式, 只要测到爆炸箱吸收能量和飞片飞行  $r_f(t)$  时吸收的能量就可计算出飞片速度。

### 3.2.3 格尼法

Tucker 和 Stanton 提出用格尼法(Gurney)计算飞片终态速度<sup>[5]</sup>。其假设条件与本文在推导飞片速度时假设的条件相同, 飞片终态速度的表达式为:

$$v_f(t) = \sqrt{2KJ_b^2 \left( \frac{1}{3} + \frac{m_f}{m_c} \right)^{-\frac{1}{2}}}$$

式中,  $J_b$  为箔爆炸电流密度, 即爆炸时实测电流除以箔初始截面积, 单位为  $A/cm^2 \cdot K$ ;  $a$  为实验确定的常数, 对于小铜箔  $K=2.36 \times 10^{-6}, a=0.85$ 。

应用上述三种方法, 对于相同起爆条件, 相同爆炸箱、飞片、炮筒、飞行距离计算的飞片速度与用有机玻璃台阶闭光、分光方法<sup>[6]</sup>实测的飞片速度比较, 结果见表 1。

表 1 不同计算方法得到的飞片速度

Table 1 Comparison of flyer velocities obtained from different calculation methods

试 验 条 件			飞 片 速 度 (mm/ $\mu$ s)				备 注
箱 尺 寸 长×宽×厚 (mm)	飞片/箔质量比	飞行距离 (mm)	数值法	解析法	格尼法	实测	
0.8×0.8×0.0050	2.16	0.17	2.760	2.886	3.640	2.870	加电条件相同 飞片为 0.07mm 聚酯薄膜。
0.8×0.8×0.0049	2.21	0.26	3.520	3.659	3.720	3.530	
0.8×0.8×0.0051	2.11	0.37	3.740	3.747	3.720	3.940	
0.8×0.8×0.0050	2.16	0.44	3.854	3.938	3.708	3.750	

由表 1 数据可绘制图 2。

## 4 讨论

4.1 前述三种计算方法都是以实验测试数据为前提的,其实测电流、电压、功率和能量随时间分布如图3所示。

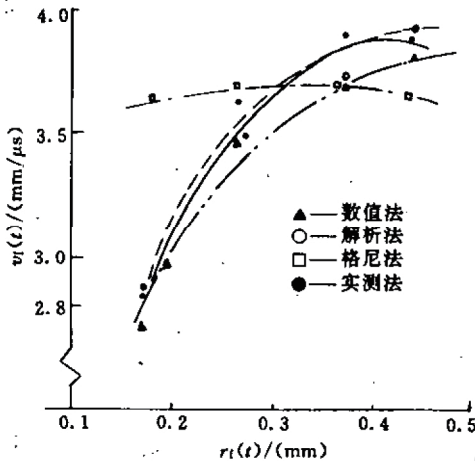


图2 飞片速度与飞行距离的图象

Fig. 2 Flyer velocity versus flying distance

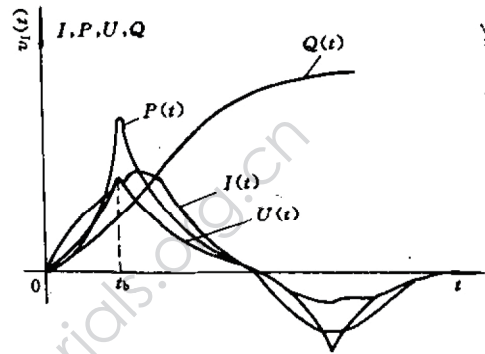


图3 爆炸箔电流、电压、功率和能量及飞片速度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of current, voltage, power and energy in exploded foil and flyer velocity.

4.2 在数值解法中,应用了实测功率曲线  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ ,从  $t = t_b$  开始计算能量到某一  $r_f(t)$  位置。计算中对功率曲线进行了修正,通过一组方程并利用初始条件的数值,解出飞片在不同时刻不同位置的飞行速度。

4.3 在解析法中,由于以下三种原因,在计算飞片能量时,对箔加电到箔爆炸以及飞行全程的实测功率曲线进行了修正。① 根据实测功率曲线计算的能量,包括箔爆炸前吸收的能量;② 电压探针多测了爆炸区与非爆炸区交界处能量;③ 背板速度为零不完全符合实际的附加能量。

以上两种方法计算结果很接近,但在 0.37mm 附近比实测速度略低。主要原因是实测飞片速度还包括了磁压力作用在内<sup>[7]</sup>,而计算磁压力加速分量比较复杂。本文未考虑这一因素,但不影响工程计算的精度。在接近 0.44mm 处实测飞片速度比 0.37mm 处低,这是因为飞片加速到一定距离后,电路提供能量逐渐减少,空气阻力使飞片减速。在 Schwarz<sup>[8]</sup> 研究中,小飞片最高速度位置为 0.38mm,我们测试得到最高速度范围也在 0.40mm 附近。

计算中,飞片飞行距离大于 0.40mm 以后,飞片速度继续加快,这与实际情况有矛盾,这是因为计算飞片速度时,认为飞片飞行距离大于 0.40mm 时,电路还在继续提供能量的缘故。

4.4 用格尼法计算的飞片速度是飞片的终态速度或者说是飞片最大速度。它由箔爆炸电流密度和飞片与爆炸箔质量比决定,而与箔吸收能量无关。因而它不能给出任意距离上的

速度。所以从计算速度对比图(图 2)可以看出,在近距离格尼方法和其它两种方法计算的速度相差较大。笔者认为这种方法可以和上述两种计算方法联合使用,具有实用价值。因为数值法、解析法不知道飞片飞行到什么位置速度最高(其原因在于飞片速度依赖于箔吸收的能量)。而实验中同时测量箔爆炸时间、爆炸电流,就能利用格尼法计算出飞片最高速度,用这个速度来确定其它两种计算方法中同一速度的飞行距离。可为设计冲击片雷管提供依据。

当然,更精确的测量飞片速度方法(如:激光速度干涉法 VISAR 等)可为设计提供更准确的参数。

4.5 上述计算方法适用于飞片与爆炸箔质量比为 1.0~3.0,爆炸箔加电的实验正弦电流周期为 1.40~2.00 $\mu$ s。给出计算式是半经验的,关于在更宽的范围内应用和精确计算的问题还有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Walker F E, Wasley R J. Explosivestoffe, 1969, 17(1): 9
- 2 耿春余. 无起爆药爆炸丝雷管实验研究. 电子技术参考, 1980(3):15~32
- 3 Scherrer V E. The NRL-AFSWP Exploded Wire Research Program. In: Chace W G and Moore H K, ed. Exploding Wires, New York: Plenum Press, 1959, 1: 118
- 4 Schmade S C, Leitz W L, et al. An Empirical Model to Compute the Velocity Histories of Flyers Driven Electrically Exploding Foils. LA-6809, 1977.
- 5 Tucker T J, Stanton P L. Electrical Gurney Energy: A New Conception Modeling of Energy Transfer from Electrically Exploded Conductors. SAND-75-0244, 1975.
- 6 耿春余. 一种简易测量小飞片速度的方法. 科技学报, 1984(1): 34~37
- 7 Weingart R C, Chan H H, et al. The Electric Gun: A New Tool for Ultrahigh-Pressure Research. UCRL-52752, 1979.
- 8 Schwarz A C. A New Technique for Characterizing an Explosive for Shock Initiation Sensitivity. SAND-75-0314, 1975.

## VELOCITY ANALYSIS OF A PLASTIC FLYER ACCELERATED BY AN ELECTRICALLY EXPLODED METAL FOIL

Geng Chunyu

*(Institute of Chemical Materials, CAEP, Chengdu 610003)*

**ABSTRACT** This paper described the physics process of a plastic flyer accelerated by an exploded metal foil, driven by a strong electric pulse.

Different calculation ways were given to approximately determine the velocity of the flyer and their results were compared with the practically measured velocity.

**KEYWORDS** exploded metal foil, flyer, velocity

www.energetic-materials.org.cn  
含能材料