文章编号：1003-1480（2025）05-0062-08

基于相似性分析的爆炸箔起爆器飞片速度模型研究

雷 凡[1]，赵胜超[1]，王 强[2]，朴俊宇[1]，付秋菠[1]，韩冬冬[2]

（1. 中国工程物理研究院 化工材料研究所，四川 绵阳，621900；2. 吉林大学 电子科学与工程学院，吉林 长春，130012）

摘 要：为准确预测爆炸箔起爆器（EFI）的飞片速度，解决现有模型缺乏对 EFI 设计参数的全面考虑，且难以预测相邻参数域中的连续变化，无法支撑裕量建模中的性能敏感度分析和不确定性传递分析问题，本研究基于量纲分析和相似性原理，并结合试验数据，提出了一种新型的飞片速度模型，该模型将飞片速度特征参量与 EFI 的设计参量（如炮筒直径、飞片厚度、爆炸箔厚度和宽度等）关联起来。同时，进行了改变爆炸箔参数、飞片参数、炮筒参数以及起爆装置参数等验证试验，结果表明模型预测的飞片速度曲线与试验结果高度一致。本研究提出的飞片速度模型不仅能够服务于裕量建模，还为 EFI 的设计和优化提供了重要的理论依据。

关键词：爆炸箔起爆器；飞片速度；量纲分析；裕量建模

中图分类号：TJ450.1 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.008

Research on the Exploding Foil Initiator (EFI) Flyer Velocity Model Based on Similarity Analysis

LEI Fan[1]，ZHAO Sheng-chao[1]，WANG Qiang[2]，PIAO Jun-yu[1]，FU Qiu-bo[1]，HAN Dong-dong[2]

（1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900；2. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, 130012）

Abstract：In order to accurately predicate the flyer velocity of exploding foil initiators (EFI), and solve the problems that existing models often lack comprehensive consideration of EFI design parameters, making it difficult to predict continuous changes in adjacent parameter domains and unable to support performance sensitivity analysis and uncertainty propagation analysis in margin modeling, a novel flyer velocity model based on dimensional analysis and similarity principles, combined with test data was proposed in this paper, which correlates flyer velocity characteristic parameters with EFI design parameters (e.g., caliber diameter, flyer thickness, exploding foil thickness, and width). And verification tests were conducted, including changes in exploding foil parameters, flyer parameters, caliber parameters, and initiation device parameters. The results indicate that the predicted flyer velocity curves are in good agreement with the test results. The flyer velocity model proposed in this study not only serves margin modeling, but also provides a significant theoretical basis for the design and optimization of EFI.

Key words：Exploding foil initiator (EFI)；Flyer velocity；Dimensional analysis；Margin modeling

爆炸箔起爆器（EFI）在当代爆破技术中扮演着至关重要的角色，其性能直接影响到爆破作业的安全性和效率。飞片速度作为 EFI 性能的关键指标，其准确预测对于 EFI 的设计和优化至关重要。在已有的研究中，关于爆炸箔起爆器的作用机理和飞片速度的测试与评估已经取得了一定的进展。陈清畴等[1]对爆炸箔起爆器在分段式电阻率模型、先进飞片测速技术、基于能量转化系数的电爆炸驱动飞片速度计算模型和基于临界起爆判据的感度预测等方面的研究进展进行了梳理。Bowler[2]研究了爆炸箔起爆器的设计和

收稿日期：2024-09-23

作者简介：雷凡（1990-），男，助理研究员，主要从事电爆炸仿真研究。

通讯作者：付秋菠（1977-），女，副研究员，主要从事新型火工品开发技术研究。

基金项目：国家自然基金面上项目（No. 622275100）。

引用本文：雷凡,赵胜超,王强,等. 基于相似性分析的爆炸箔起爆器飞片速度模型研究[J]. 火工品, 2025(5):62-69.

性能，特别是其在军事应用中的重要性。Dewey[3]分析了爆炸箔起爆器在军事和商业应用中的应用，并探讨了如何提高其性能和可靠性。Chang 等[4]探讨了不同材料对爆炸箔起爆器性能的影响，以及如何通过材料选择来优化 EFI 的设计。Li 等[5]研究了爆炸箔起爆器在极端环境下的性能，特别是在高温高压条件下的表现。Huang 等[6]则从安全角度出发，分析了爆炸箔起爆器的潜在风险和预防措施。Borman 等[7]开发出分析和数值模型，经过验证可用于计算 EFI 中飞片-等离子体材料到达膛口顶部的速度和到达时间持续期（ToAD），这有助于系统设计者优化电容器放电电路（CDC）或 EFI 桥材料属性。何碧等[8]通过使用双灵敏度 VISAR 测试了 EFI 的飞片速度，提供了实验数据支持。郭俊峰等[9]则建立了一套基于压电薄膜估算飞片瞬时速度的实验方法，并与理论结果进行了对比分析。

然而，现有的飞片速度模型往往缺乏对 EFI 设计参数的全面考虑，导致在实际应用中存在较大的不确定性。为了解决这一问题，本研究基于量纲分析和相似性原理，结合实验数据，推导出了一种新型的飞片速度裕量模型。该模型不仅考虑了飞片速度特征参量与 EFI 设计参量的关联，还通过不确定性传递分析和参数敏感度分析，为 EFI 的设计和优化提供了重要的理论依据。

1　试验方法

本研究采用基于 FPC 技术（柔性印刷电路板技术）的集成换能元件来测试爆炸箔起爆器的输出性能。该集成换能元是通过多层聚酰亚胺和铜爆炸箔层压形成的，可以有效减少工程因素（如爆炸箔飞片间隙、爆炸箔偏心等）对飞片速度测试结果的干扰。试验系统如图 1 所示。由图 1 可见，该试验系统首先通过高压电源给电容器充电至指定电压，随后通过触发信号使触发开关闭合，在测试回路中形成脉冲大电流。爆炸箔起爆器的方形桥箔在脉冲大电流的作用下，形成高温高压等离子体，在炮筒内剪切飞片层（聚酰亚胺薄膜）并加速形成高速飞片。飞片速度信息通过激光多普勒测速系统进行采集和分析，从而得到飞片的速度曲线。测试回路中还安装了 1 个电流环用于同步测量测试回路中的脉冲电流曲线。

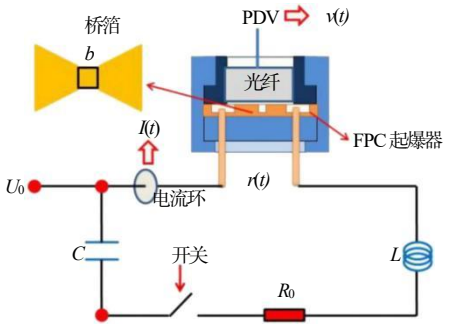

图 1　试验系统示意图

Fig.1　Schematic diagram of the test system

本研究通过调整装置参数（如电容 C 和电感 L）、加载电压以及爆炸箔起爆器的设计参数，研究了单一因素变化对回路电流和飞片速度特征的影响，进而验证本文提出的飞片速度模型的准确性。

2　理论分析

2.1　飞片速度相似性来源

爆炸箔起爆器是一个典型的 RLC 放电回路，其电路控制方程为：

$$L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}+(r+R_0)I=U_0-\frac{1}{C}\int I\mathrm{d}t \tag{1}$$

式（1）中：L 为回路电感；C 为回路电容；r 为桥箔的动态电阻；R_0 为回路初始电阻；U_0 为初始加载电压。令 $t=t'\sqrt{LC}$，$I=I'U_0\sqrt{C/L}$，则方程可以无量纲化为：

$$\frac{\mathrm{d}I'}{\mathrm{d}t'}+(r+R_0)\sqrt{C/L}I'=1-\int I'\mathrm{d}t' \tag{2}$$

上述方程的近似解析解为：

$$I'=\exp(-\frac{R_0}{2}\sqrt{\frac{C}{L}})\sin t'\exp(-\int\frac{r}{R_0}\mathrm{d}t'-t') \tag{3}$$

因此，无论电爆炸回路的负载曲线如何变化，回路中产生的电流始终与初始电压成正比，即：

$$I_m=U_0\sqrt{\frac{C}{L}}\exp(-\frac{R_0}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}) \tag{4}$$

在剪切产生飞片后，高温高压气体推动飞片加速，该过程涉及复杂的能量转化，包括电能、内能、冲击波能量、电离辐射能量和电磁辐射能量之间的相互转化。由于加速过程通常在 200 ns 以内完成，且以往研究表明电爆炸等离子体的温度约为 1 ev，为低温稠密等离子体，为简化模型可以忽略电爆炸等离子体与周围环境的热交换和辐射能量交换。对于由冲击波导致的能量损失，爆炸箔起爆器通常选用背板和飞片材料的声阻抗远大于铜蒸气，其能量损失已经降低到可以忽略的程度。因此，本文认为输入系统的电能主要被转化为飞片的动能和铜蒸气的内能。能量方程为：

$$I^2 r\mathrm{d}t = C_p m_b \mathrm{d}T + m_f a v \tag{5}$$

式（5）中：C_p 为气体热容；m_b 为所有参与电热转化的桥箔金属质量；m_f 为飞片质量；a 为飞片加速度；v 为飞片速度。另外气体状态方程以及飞片的加速方程为：

$$p\frac{1}{4}\pi D^2 s = n\mathrm{R}T \tag{6}$$

$$p\frac{1}{4}\pi D^2 = m_f a \tag{7}$$

式（6）~（7）中：D 为飞片直径；p 为气体压力；n 为参与推动飞片的气态金属的总物质的量。因此有：

$$\mathrm{d}T = \mathrm{d}\left(\frac{m_f a s}{n\mathrm{R}}\right) \tag{8}$$

带入能量方程可以得到：

$$I^2 r\mathrm{d}t = \frac{C_p m_b}{n\mathrm{R}} m_f s\dot{a} + \left(\frac{C_p m_b}{n\mathrm{R}} + 1\right) m_f a v \tag{9}$$

令

$$t = t'\sqrt{LC}, I = I' I_m,\ r = r' r_m, v = v' v_m, Q = \frac{nM}{m_b}$$

（实际参与推飞片与参与吸收电能的桥箔金属质量之比，M 为金属摩尔质量），则方程转化为：

$$I_m^2 r_m \sqrt{LC} I'^2 r' \mathrm{d}t' = \frac{C_p M}{Q\mathrm{R}} m_f v_m^2 s'\ddot{a}' + \left(\frac{C_p M}{Q\mathrm{R}} + 1\right) m_f v_m^2 a' v' \tag{10}$$

令：

$$I_m^2 r_m \sqrt{LC} = \frac{C_p M}{Q\mathrm{R}} m_f v_m^2 \tag{11}$$

则方程无量纲化为：

$$I'^2 r' \mathrm{d}t' = s'\ddot{a}' + \left(\frac{Q\mathrm{R}}{C_p M} + 1\right) a' v' \tag{12}$$

可以看到，经过无量纲化处理后，方程的解仅与无量纲参数 $\frac{Q\mathrm{R}}{C_p M}$ 相关，而 Q 值与爆炸箔起爆器炮筒与爆炸箔的偏心值、炮筒直径以及爆炸箔桥宽相关。在样品状态确定的情况下，Q 值不再变化。因此，可以确定飞片速度曲线满足以下关系：

$$v(t') = \left(\frac{Q\mathrm{R} I_m^2 r_m \sqrt{LC}}{C_p M m_f}\right)^{\frac{1}{2}} \times v'\left(t', \frac{Q\mathrm{R}}{C_p M}\right) \tag{13}$$

2.2 相似性验证

在上述理论分析的基础上开展了爆炸箔起爆器的飞片测速工作，通过改变测速的加载电压，获得了一系列飞片测速结果。样品 A 在某个装置（电流周期 T=1.8 μs）及不同电压下的测速结果如图 2 所示。

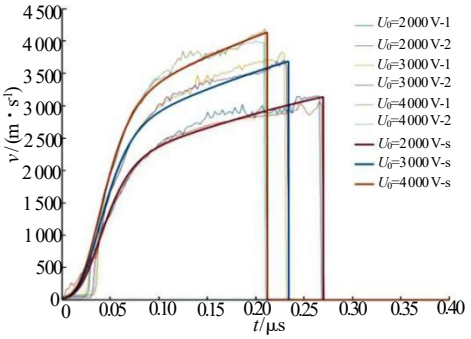

图 2 样品 A 不同初始电压下的飞片速度测速结果

Fig.2 Flyer velocity measurement results of sample A under different initial voltages

图 2 中“-s”后缀的飞片速度曲线是由以下函数生成的：

$$v = v_m\left[1 - 1/24(\tau^4 + 4\tau^3 + 12\tau^2 + 24\tau + 24)\exp(-\tau) + \frac{2t'}{\pi} - \frac{1}{8}\left(\frac{2t'}{\pi}\right)^2\right] \tag{14}$$

式（14）中：v_m 为特征速度，$\tau = t'/\beta$，对于同一样品 β 值不变。可以看到速度曲线主要包含两部分：一部分是以 $\beta\sqrt{LC}$ 为特征时间，最终收敛到 v_m；另一部分是以 $\sqrt{LC}$ 为特征时间的二次曲线加速（在 t=T_0 处 v 达到最大值）。可能的解释是：电爆炸时，桥箔的无量纲电阻曲线呈现脉冲波形，即：

$$r' = \delta\left(\frac{t'}{\beta} - t_x'\right) + r_0' \tag{15}$$

式（15）中脉冲部分积分得到速度曲线的第 1 部分，而恒定阻值部分对应了第 2 部分的二次曲线加速。

在不同装置（周期 T=1.12 μs）及不同样品（样品 B）的测速试验中还观察到：当 $v_m \sim U_0^{0.5}$，函数生成的飞片速度曲线可以很好地符合不同加载电压下飞片速度值，如图 3 所示。

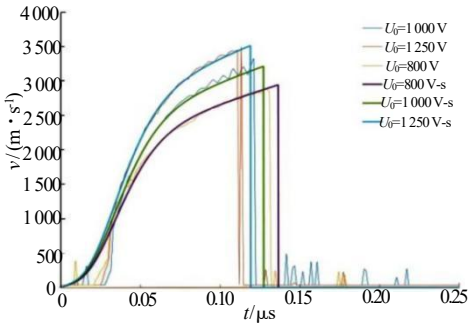

图 3　样品 B 不同初始电压下的飞片速度测速结果

Fig.3　Flyer velocity measurement results of sample B under different initial voltages

3　飞片特征速度模型推导

3.1　比作用量的相似性参数

根据试验结果得到$v_m \sim U_0^{0.5}$，根据前文分析，在r_m表达式未知的情况下，通过相似性推导得到$v_m \sim U_0$，为了符合试验观测，则r_m必然正比于包含U_0的一次方的无量纲参数φ，即：　　$r_m \sim \varphi(U_0)$

在爆炸箔起爆器产生飞片之前，均可认为飞片的形态未发生明显变化，其热容和电阻率均与体积无关，仅与桥箔温度相关。大量文献也证实，在飞片产生之前，桥箔的电阻是比作用量的双曲函数。因此，在飞片形成的时刻，电流的比作用量存在一个特征值g_0。该特征比作用量与飞片对电爆炸产生的高温高压气体的约束力相关，对于同一个样品，其值恒定。因此有如下特征比作用量方程：

$$\int_0^{t_0} I^2 \mathrm{d}t = g_0 \tag{16}$$

同样的，无量纲后有：

$$\int_0^{\frac{t_0}{\sqrt{LC}}} I'^2 \mathrm{d}t' = \frac{g_0}{I_m^2\sqrt{LC}} = a = \varphi^2 \tag{17}$$

这样就得到了比作用量无量纲参数φ的表达式。由于在飞片产生以前可以忽略体积效应，因此常见的方形桥箔的特征电阻表达式为：

$$r_m \sim \alpha^{\frac{1}{2}} \frac{\rho_0}{h}\frac{D^2}{b^2} \tag{18}$$

式（18）中：ρ_0为桥箔金属的初始电阻率；D 为炮筒直径；b 为爆炸箔桥宽。特征电阻包含无量纲参数$\frac{D^2}{b^2}$的原因是当桥箔处于过热液体状态并充满整个炮筒直径区域时，载流子密度会下降。

图 4 显示了飞片形成时刻的状态，高温高压气体在飞片和反射板的空隙中膨胀，推动炮筒中的飞片拉伸变形，当飞片的拉伸应力达到聚酰亚胺的断裂应力时，飞片从聚酰亚胺膜上剪切下来，进入快速加速阶段。

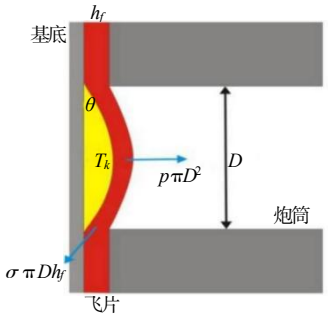

图 4　飞片形成时刻状态示意图

Fig.4　Schematic diagram of the flyer formation moment

飞片的断裂应变率ε_D与夹角θ之间的关系为：

$$\theta^2 D = \varepsilon_D D \tag{19}$$

假设此时的特征温度为 T_k，气体压力为 p，则有受力平衡方程以及状态方程：

$$\theta\sigma\pi D h_f = p\pi D^2 \tag{20}$$

$$\frac{\pi}{3}\theta D^3 p = n\mathrm{R}T_k \tag{21}$$

因此可以计算得到特征温度的表达式：

$$T_k = \frac{\varepsilon_D \sigma \pi D^2 h_f}{3n\mathrm{R}} \tag{22}$$

关于特征比作用量的方程为：

$$C_p m_b T_k = g_0 \alpha^{-1}\frac{\rho_0}{h}\frac{D^2}{b^2}\alpha^{\frac{1}{2}}\int_0^{(3\alpha)^{1/3}} I'^2 r' \mathrm{d}t' \tag{23}$$

最终得到特征比作用量的表达式：

$$g_0 = \frac{\pi\varepsilon_D M C_p \sigma h_f b^2 h}{3\rho_0 \mathrm{R}} \tag{24}$$

3.2　特征速度方程

在得到特征比作用量的表达式后，带入方程即可得到特征速度的表达式：

$$v_m = \eta\sqrt{\frac{Q\mathrm{R}}{C_p M}}\left(\frac{\pi M C_p \rho_0 \sigma \varepsilon_D}{b^2 h h_f \gamma_f^2}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{U_0^{\frac{1}{2}} C^{\frac{3}{8}}}{L^{\frac{1}{8}}} \exp\left(-\frac{R_0}{4}\sqrt{\frac{C}{L}}\right) \tag{25}$$

式（25）中：γ_f为飞片密度；η为试验标定系数。得到的特征速度表达式基本涵盖了炮筒、飞片、爆炸箔以及电爆炸回路的特征参数，预测了飞片特征速度与各个设计物理量的关联关系，例如，飞片速度随着

飞片厚度、爆炸箔厚度与宽度的增加而减小，飞片速度随着电压和电容的增加而增加等一般规律。还可以看到$v_m \sim (I_m T_0)^{0.5}$，因此当同一个爆炸箔起爆器匹配更短周期的装置时，其最小全发火电流会增加。

3.3 面积因子 Q

在特征速度的方程中，定义了无量纲因子 Q，它表示参与电热转化的桥箔金属质量与参与推动飞片的金属气体质量的比值。

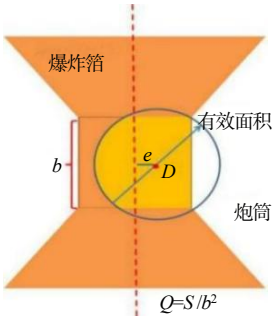

图 5 面积因子定义

Fig.5 Definition of area factor

如图 5 所示，从爆炸箔起爆器的设计角度，一般认为桥箔的方形桥区为设计的电爆炸区域，即参与电热转化的区域。参与推动飞片的区域一般认为是炮筒直径内区域与上述电爆炸区域的交集。因此，质量比 Q 实际上等价于爆炸箔初始有效面积与方形桥箔的面积比，因此将 Q 称为面积因子。根据对面积因子的定义可知，面积因子主要由桥宽、偏心、炮筒直径 3 个因素决定，具体的值可由不同参数的爆炸箔起爆器炮筒所包围的桥区面积与总桥区面积的比例来确定。如果不考虑偏心，仅考虑面积因子与炮筒直径及桥宽的关系，可以得到如图 6 所示的曲线。

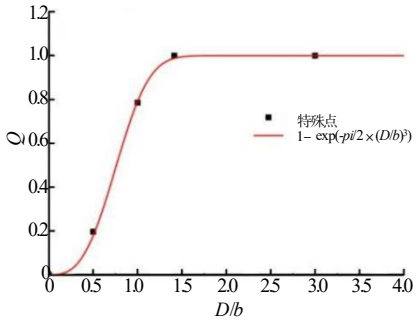

图 6 面积因子的近似函数描述

Fig.6 Approximate function description of the area factor

图 6 通过曲线拟合表达了面积因子与无量纲量 D/b 的关系，可以看出面积因子与炮筒直径与桥宽的比值相关：当该比值等于$\sqrt{2}$时，炮筒内径为方形桥箔的外接圆；当该比值大于$\sqrt{2}$时，有效面积等于方形桥箔面积；当该比值小于等于 1 时，有效面积为炮筒内圆的面积。

4 试验验证

4.1 爆炸箔参数

为了验证特征速度方程的准确性，首先需要去除考察因素以外因素的干扰。在研究桥宽 b 对飞片速度曲线的影响规律时，所使用的起爆装置及样品均完全一致，桥箔偏心控制在 0.02 mm 以内，炮筒直径为 0.48 mm。在加载电压 1 000 V 时，对桥宽 b=0.30 mm 的桥箔的速度曲线进行方程参数校正，本文使用的样品矫正后的系数η（$\pi MC_p\rho_0\varepsilon_D$）$^{1/4}$ 的数值为 4.5× 10^{-2}（其它参数均为标准单位制），随后修改方程参数为 b=0.40 mm，得到如图 7 所示结果。

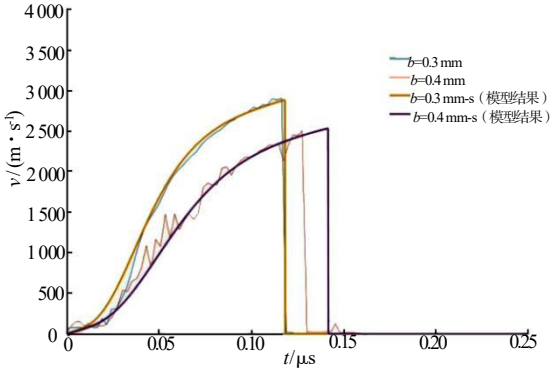

图 7 1 000 V 不同桥宽样品飞片速度曲线以及模型结果

Fig.7 Flyer velocity curves and model results for samples with different bridge widths at 1 000 V

由图 7 可以看到，模型较好地复现了桥宽对飞片速度的影响。同时还测试了 1 200，1 400 V 下两种桥宽的样品的飞片速度曲线，并与模型结果进行对比，如图 8~9 所示。

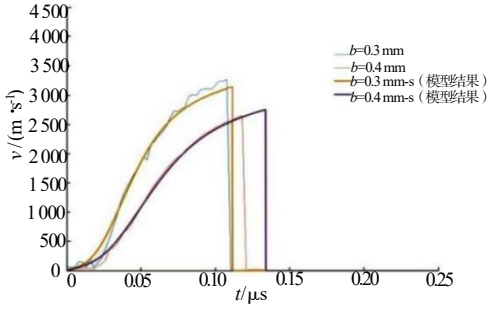

图 8 1 200 V 不同桥宽样品飞片速度曲线以及模型结果

Fig.8 Flyer velocity curves and model results for samples with different bridge widths at 1 200 V

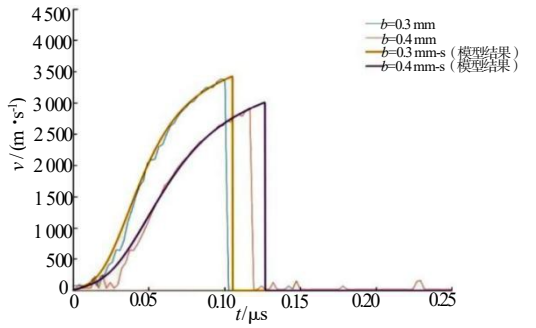

图 9　1 400 V 不同桥宽样品飞片速度曲线以及模型结果

Fig.9　Flyer velocity curves and model results for samples with different bridge widths at 1 400 V

由图 8~9 可知，在进行一次校正后，飞片速度随桥宽以及加载电压的变化规律均与飞片速度模型预测结果高度一致。在仿真中还发现特征时间因子β反比于桥宽 b。桥宽 b 对于飞片特征速度的影响主要体现在两个方面：一是方程中 v_m~$b^{-0.5}$ 部分，另一个是 v_m~$Q^{0.5}$ 部分。当桥宽增加到 0.4 mm 时，D/b已经小于$\sqrt{2}$，导致 Q 的取值由 1 下降到 0.93。试验结果充分验证了飞片特征速度与桥箔宽度 b 之间的函数关系。

由于特征速度的方程基于比作用量方程，另一种验证模型的方法是验证特征比作用量与桥箔宽度 b 的关系。因此，在飞片速度测试的同时，对其电流曲线进行了测试，通过分析电流曲线来大致确认特征比作用量与设计参数之间的关系。图 10 为在 1 000 V 的相同起爆回路中，两种不同桥宽样品的电流曲线与定电阻 RLC 回路仿真得到的电流曲线。

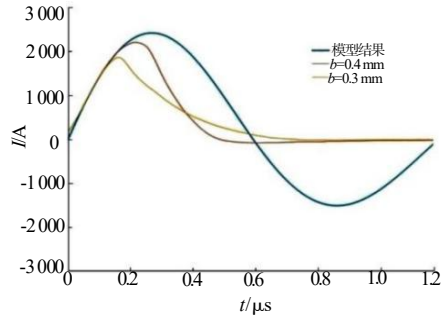

图 10　1 000 V 不同桥宽样品电流曲线分析

Fig.10　Analysis of current curves for samples with different bridge widths at 1 000 V

初始电阻通过短路电流曲线分析得到（此处为 0.11 Ω），回路电容为 0.56 μF，回路电感为 62 nH。由图 10 可以看到 b=0.4 mm 和 b=0.3 mm 两种样品的电流曲线分别在 t=0.134 μs（g_0=0.165 A^{2}s）处、t=0.169 μs（g_0=0.294 A^2 s）处与短路电流仿真曲线发生分离。飞片形成时，桥箔开始加速气化，桥箔电阻急剧上升导致电流增长率急速下降。因此，该分离点处的作用量大小可以粗略描述特征比作用量大小。根据上述结果，特征比作用量的比值为 1.782，非常接近（4/3）^{2}。因此，基于特征比作用量的无量纲数推导特征速度的过程是十分合理的。

4.2　炮筒参数

两种炮筒直径样品（0.38，0.48 mm）的飞片速度测试结果如图 11 所示。样品爆炸箔桥宽 b=0.3 mm，测试装置以及其他参数均完全保持一致。

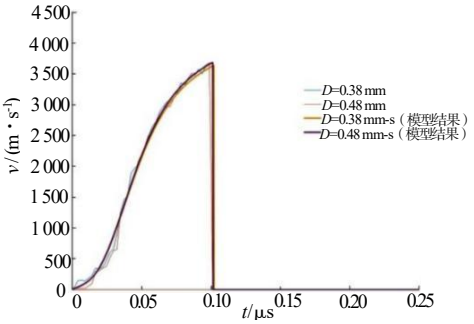

图 11　不同炮筒直径样品飞片速度曲线以及模型结果

Fig.11　Flyer velocity curves and model results for samples with different caliber diameters

由图 11 可以看到，试验结果与模型预测结果基本一致，样品直径由 0.48 mm 减小到 0.38 mm，导致面积因子 Q 由 1 减小到 0.96，由于v_m~$Q^{0.5}$，因此特征速度的减小量约为 2%。由于v_m不显含 D，因此当 $D/b \geqslant \sqrt{2}$ 时，飞片速度几乎与炮筒直径无关。不过由于试验条件有限，该结论仍然待验证。

同样的，对电流曲线进行了分析，结果如图 12 所示。由图 12 可见不同直径的炮筒电流几乎完全重合，两条曲线与短路仿真电流均在 t=0.243 μs（g_0=0.305 A^{2}s）处发生分离，因此特征比作用量与炮筒直径无关。上述结论与特征比作用量的理论推导结果一致。

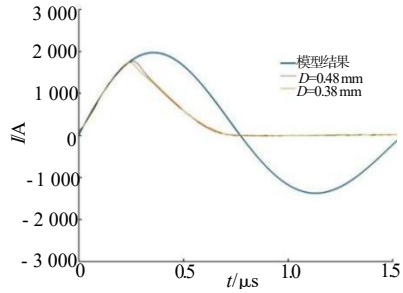

图 12　不同炮筒直径样品电流曲线分析

Fig.12　Analysis of current curves for samples with different caliber diameters

4.3 飞片参数

为了验证模型关于特征速度与飞片厚度的预测，设计了厚度分别为 12.5，27.5 μm 的飞片样品，其余参数均保持不变。因制备工艺的原因，12.5 μm 飞片实际上是由 10 μm 的聚酰亚胺薄膜和 2.5 μm 的聚酰亚胺胶构成，而 27.5 μm 飞片实际上是由 25 μm 的聚酰亚胺薄膜和 2.5 μm 的聚酰亚胺胶构成。两种飞片厚度样品的飞片测速结果见图 13，由图 13 可见两种飞片厚度样品的特征速度差异并非模型预测的 $v_m \sim h_f^{-0.25}$。

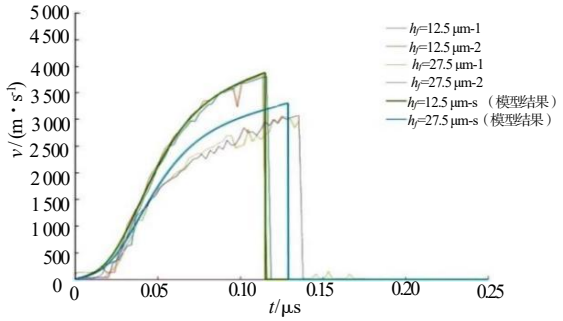

图 13 不同飞片厚度样品飞片速度曲线以及模型结果

Fig.13 Flyer velocity curves and model results for samples with different flyer thicknesses

两种飞片厚度的样品在相同的起爆回路中的电流曲线与短路仿真电流曲线如图 14 所示。

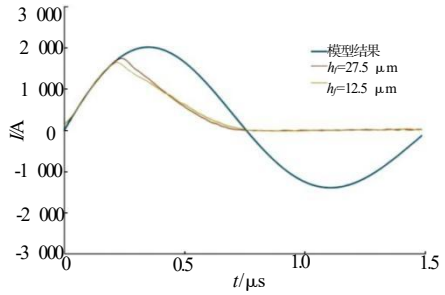

图 14 不同飞片厚度样品电流曲线分析

Fig.14 Analysis of current curves for samples with different flyer thicknesses

由图 14 可见h_f=27.5 mm、h_f=12.5 mm 两种样品的电流曲线分别在 t=0.185 μs(g_0=0.165 A^2s) 处、t=0.220 μs (g_0= 0.258 A^2s)处与短路电流仿真曲线发生分离。根据上述结果，特征比作用量的比值为 1.56，远小于比作用量模型预测的（27.5/12.5）。

导致上述现象的可能原因是：（1）前文中认为ε_D为常数，这在飞片厚度无变化时是成立的，实际上ε_D应为飞片厚度的函数；（2）在飞片膨胀拉伸时，飞片在厚度方向的应变率为ε_h，即不同厚度飞片在厚度方向的变化是不同的。如果该原因成立，则真实的飞片厚度之比应比（27.5/12.5）大才能使飞片速度的差异增加，相应的特征比作用量的差异也应该更大，但这与电流曲线的分析结果不符合。因此只有原因 1 成立，假设$\varepsilon_D = \omega h_f^{0.5}$, ω为常数（由于速度公式本身经过矫正，此处可以取$\omega = 1$）。那么修正后的特征比作用量公式为：

$$g_0 = \frac{\pi\omega M C_p \sigma h_f^{0.5} a^2 h}{\rho_0 \mathrm{R}} \tag{26}$$

并且修正后的飞片特征速度公式为：

$$v_m = \eta\sqrt{\frac{Q\mathrm{R}}{C_p M}}\left(\frac{\pi\omega M C_p \rho_0 \sigma}{b^2 h h_f^{1.5}\gamma_f^2}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{U_0^{\frac{1}{2}} C^{\frac{3}{8}}}{L^{\frac{1}{8}}} \exp\left(-\frac{R_0}{4}\sqrt{\frac{C}{L}}\right) \tag{27}$$

不同飞片厚度样品的飞片速度曲线以及校正后模型结果如图 15 所示。

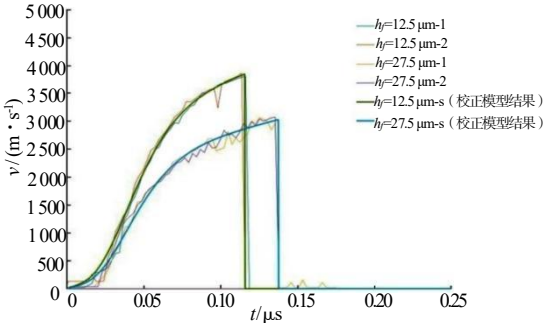

图 15 不同飞片厚度样品飞片速度曲线以及校正后模型结果

Fig.15 Flyer velocity curves and corrected model results for samples with different flyer thicknesses

由图 15 可见，经过校正后的模型可以得到较好的符合比作用量以及测速的结果。但拉伸应变率与飞片厚度关系的形成原因还需要后续试验观测，或由其他机制对应的无量纲量予以解释。

4.4 起爆装置参数

通过短路电流测试得到 3 种不同起爆装置的基本参数，见表 1。

表 1 3 种起爆装置短路测试参数

Tab.1 Short-circuit test parameters of 3 explosive initiation devices

装置	加载电压 /V	电容 /μF	总电感 /nH	电阻 /Ω
1	1 200	0.40	64	0.115
2	1 000	0.56	40	0.110
3	1 000	0.70	40	0.106

使用表 1 中 3 种装置对同一样品的飞片速度进行

测试，测试结果和模型计算结果见图 16。

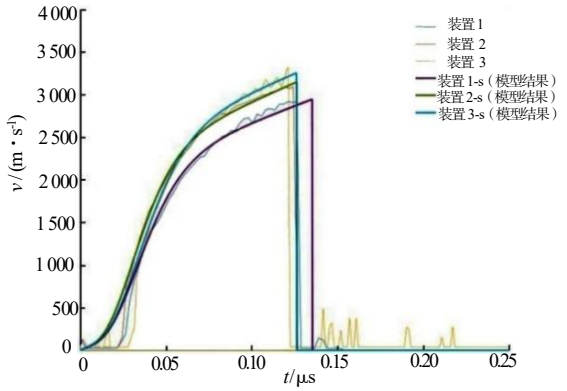

图 16　不同装置的样品飞片速度曲线以及模型结果

Fig.16　Flyer velocity curves and model results for samples with different initiation devices

由图 16 可见，尽管 3 种起爆装置回路参数各不相同，但模型计算得到的速度曲线与试验结果符合的很好，可见模型得到的关于特征速度与初始电流参数的关系是正确的。

5　结论

（1）本文对爆炸箔起爆器作用过程中的相似关系进行了论证，获得了飞片速度曲线的工程描述，定义并推导了飞片特征速度表达式。依据试验观测到的飞片特征速度与电容器初始加载电压的定量关系，定义了特征电阻并推导了其表达式。最终通过特征比作用量的表达式推导获得了完整的飞片特征速度表达式，将飞片特征速度与设计参量关联了起来。

（2）本文从爆炸箔参数、飞片参数、炮筒参数以及装置参数 4 个方面进行了验证试验，基本验证了模型的正确性。通过模型参数的确定，可有效减少爆炸箔起爆器设计过程中的试验数量，为爆炸箔起爆器的正向设计奠定了基础。模型给出了飞片特征速度与设计参量的定量函数关系，也为爆炸箔起爆器的性能敏感度分析和不确定性传递关系分析奠定了理论基础。

参考文献：

[1] 陈清畴, 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.

[2] Bowler, C. M. The design and performance of exploding foil initiators[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(1): 45-53.

[3] Dewey, J. A. Exploding foil initiators in military and commercial applications[J].Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(2): 135-142.

[4] Chang, C. H., Chen, H. M. Influence of material selection on the performance of exploding foil initiators[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(12): 1 937-1 944.

[5] Li, X., Wang, Y. Performance of exploding foil initiators under extreme conditions[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(11): 1 793-1 799.

[6] Huang, J., Zhang, L. Safety analysis and risk prevention of exploding foil initiators[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40(5): 475-482.

[7] Borman, A. J., Dowding, C. F., & Seddon, D. S. Modeling of the exploding foil initiator and related circuitry for the variable mode of operation[J]. Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2020 , 42(1): 135-142.

[8] 何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 测试爆炸箔起爆器的飞片速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 31-34.

[9] 郭俊峰, 曾庆轩, 李明愉, 王涛. 一种金属电爆炸驱动飞片的速度评估方法[J]. 北京理工大学学报自然版, 2018, 38(S2): 6-8.