

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-09

## 加速膛参数对换能元飞片速度的影响

王蔚,董晓芬,王端,李乾,李思宇,郭宇轩

(中北大学环境与安全工程学院, 山西太原 030051)

**摘要:** 飞片速度是冲击片雷管能否可靠起爆的一个关键因素,为了深入研究加速膛参数对飞片速度的影响,分别通过实验和数值模拟方法对飞片速度的影响因素进行分析。采用磁控溅射技术设计制备了一种膜层厚度为0.5/0.5/2  $\mu\text{m}$ ,尺寸为0.15 mm $\times$ 0.15 mm的TiW/Ni/Au复合薄膜爆炸箔。在激励条件为0.1  $\mu\text{F}$ 、1200 V下,选用密度为1.45  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,厚度为25  $\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺飞片,利用光子多普勒速度测试技术测量了不同加速膛参数的飞片速度。研究结果显示:在相同孔径条件下,当加速膛厚度分别为0.3,0.4,0.5,0.6 mm时,随着加速膛厚度的增加,飞片速度先增后减,在厚度为0.4 mm时达到最高值;在相同厚度条件下,当加速膛孔径分别为0.15,0.23,0.3,0.35,0.45 mm时,飞片速度随孔径增加而降低,其中孔径为0.15 mm时速度最高;此外,在相同孔径和厚度下,飞片经过聚酰亚胺和陶瓷两种材质的加速膛测试得到的速度变化趋势和数值相近,而聚酰亚胺具有较高的强度和韧性,成本更低,因此可替代陶瓷作为加速膛材料。同时采用数值模拟方法重新拟合了适用于TiW/Ni/Au复合薄膜的飞片速度经验公式,验证结果表明,计算结果与实验数据的偏差均在2.5%以内。

**关键词:** 爆炸箔;光子多普勒速度测试技术(PDV);飞片速度;加速膛;聚酰亚胺

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023254

## 0 引言

爆炸箔起爆器(exploding foil initiator, EFI)能够不受静电场、辐射场、杂散电流及振动、冲击等影响,在恶劣环境下可靠工作,是目前国内外公认的一种高安全性、高可靠性火工品<sup>[1]</sup>。其主要由基底、桥箔、飞片和加速膛作为其核心部件,飞片速度直接决定爆炸箔起爆器的最后输出性能。

加速膛作为爆炸箔起爆器的重要组成部分,是飞片加速的路径,起着剪切飞片的作用,同时约束等离子体侧向膨胀、限制稀疏波对等离子体的削弱作用<sup>[2-4]</sup>,从而获得更高的飞片速度。1996年,杨振英等<sup>[5]</sup>从工程设计的角度说明加速膛材料、直径、长度会影响飞片撞击在炸药上的动能,进而影响在炸药中产生的压力。

谭迎新等<sup>[6]</sup>认为加速膛的膛孔边缘应该具有良好的刀刃性能,以利于剪切飞片;Davies等<sup>[7]</sup>通过对比桥区宽度与加速膛孔径的大小,表明要实现加速膛剪切飞片的功能需要匹配合适的加速膛参数。虽然研究了加速膛孔径的性能要求,但二者都没有给出加速膛孔径的参数设计范围。黄娜<sup>[8]</sup>为了保证飞片能够加速到最大速度的90%以上,提出加速膛的最佳厚度应为桥箔厚度的50~100倍,但缺乏实验依据,有待进一步证明。陈楷等<sup>[9]</sup>发现发火电压一定时,复合飞片的速度随加速膛直径的增大而减小;陈清涛<sup>[10]</sup>在研究冲击片雷管的作用特征时,得出了加速膛长度对飞片速度并没有影响的结论。然而这些研究大多针对单一加速膛参数对飞片速度的影响,并未从加速膛长度、孔径和材料等不同参数角度对飞片速度影响的研究进行实验和参数分析。覃文志等<sup>[11]</sup>结合激光驱动飞片技术研究了不同厚度和不同孔径的加速膛条件下飞片速度成长历程和飞片形貌变化过程。

现阶段虽然爆炸箔电爆成为驱动飞片的主要方式,但基于电爆炸驱动飞片的实验方式分析飞片速度的变化规律还缺乏大量的实践探索。本研究主要以电

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-01-16

网络出版日期: 2024-06-04

作者简介: 王蔚(2000-),女,硕士研究生,主要从事先进火工品技术研究。e-mail:17835191702@163.com

通信联系人: 董晓芬(1993-),女,讲师,主要从事先进火工品技术研究。e-mail:18942274751@163.com

引用本文: 王蔚,董晓芬,王端,等. 加速膛参数对换能元飞片速度的影响[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2023254.

WANG Wei, DONG Xiao-fen, WANG Duan, et al. Influence of Barrel Parameters on the Velocity of the Transducer Flyer[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2023254.

压作为驱动条件,运用光子多普勒速度测试技术(PDV)<sup>[12]</sup>,全面地比较在不同加速膛条件下飞片速度的变化情况,以深入研究加速膛厚度、孔径、材料对飞片速度的影响,并通过数值模拟方法对飞片速度的影响因素进行分析。

## 1 实验及数值模拟

### 1.1 样品与装置

#### 1.1.1 实验样品

传统 Ag、Cu、Al、Au、Au-Pt 等材料制成的金属箔初始电阻率较大且升华热较低,导致爆炸箔起爆器点火能量较高且推动飞片能力较弱,为解决这一问题,选用了 TiW/Ni/Au 复合薄膜爆炸箔<sup>[13]</sup>。飞片选用密度为  $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、厚度为  $25 \mu\text{m}$  的聚酰亚胺飞片<sup>[14]</sup>。

根据加速膛在爆炸箔起爆器中的作用要求,需要加速膛材料具有足够的硬度<sup>[15]</sup>以确保飞片剪切均匀,保证飞片飞行平稳;由于高压起爆装置产生的高压可能影响加速膛,因此其材料需具有绝缘性能。可选的材料包括玻璃纤维、陶瓷、有机玻璃和蓝宝石等<sup>[16]</sup>。本研究选择氧化锆陶瓷,其莫氏硬度高达 9 级,化学性能稳定,绝缘性能良好,能均匀剪切飞片,保证起爆效果。同时,为了研究加速膛材料对飞片速度的影响,制备了材料为聚酰亚胺的加速膛进行对比实验。

加速膛长度影响飞片速度的获得范围,对于飞片的最大速度至关重要。过短的加速膛导致飞片速度过小而无法引爆炸药,过长的加速膛可提高速度但影响飞片飞行平稳性<sup>[17]</sup>。因此,选择适中长度的加速膛: 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm。为保证飞片均匀受力,加速膛直径需精确控制。过小的直径影响加速膛的加工工艺,过大的直径会导致受力不均<sup>[17]</sup>。因此,选取 0.15, 0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm 作为加速膛直径的大小。

#### 1.1.2 实验装置

实验部分主要包括电爆性能测试实验和飞片速度测试实验两部分。在电爆性能测试实验中,实验装置主要由 3 部分组成,第一部分是由  $0.1 \mu\text{F}$  储能电容、升压模块组成的高压起爆装置;第二部分是由 MSOX2024A 示波器、N2891A 高压探头、MIT30mini Rogowski 线圈作电流环组成的信号采集装置,第三部分是爆炸箔测试样品。连接实验装置搭建电爆性能测试电路,图 1 为电爆性能测试电路示意图。

在飞片速度测试实验中,采用四川物科光学精密

机械有限公司的光子多普勒测速(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)测试系统研究 TiW/Ni/Au 爆炸箔换能元在脉冲电流加载下飞片速度的演变历程。测试连接电路图如图 2 所示。测试装置由 3 部分组成,第一部分为高压起爆装置;第二部分是信号采集装置(PDV 测试仪主机、激光器、MSOX2024A 示波器);第三部分是爆炸箔换能元、光纤头、联接套组成的测试样品部分。

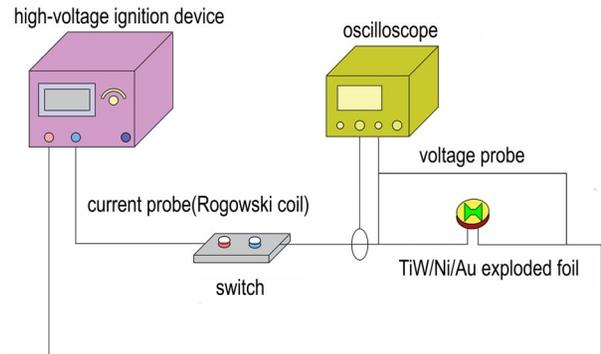


图 1 电爆性能测试电路示意图

Fig.1 Schematic diagram of electric explosion performance test circuit

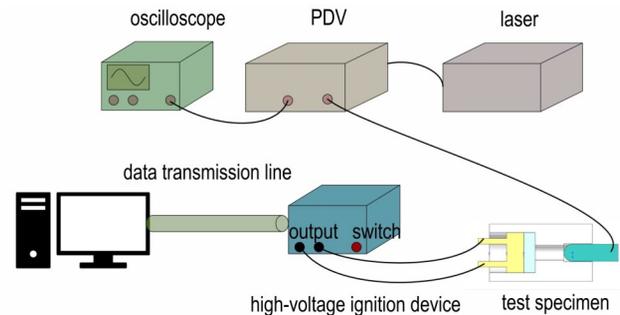


图 2 飞片速度测试连接电路图

Fig.2 Circuit diagram of flyer velocity test connection

### 1.2 样品制备

爆炸箔基板选择 Pyrex7740 玻璃,其具有良好的绝缘性、热稳定性和化学稳定性。TiW/Ni/Au 复合薄膜爆炸箔主要通过 TiW 合金、Ni 金属和 Au 金属进行制备,其箔层规格如表 1 所示,选用英国 KDF 公司的 KDF 904i 磁控多靶溅射机制备爆炸箔。经磁控多靶溅射机制备<sup>[18]</sup>得到尺寸为  $0.15 \text{ mm}\times 0.15 \text{ mm}$  的 TiW/Ni/Au 爆炸箔。采用集成工艺装配爆炸箔、聚酰亚胺飞片与加速膛得到爆炸箔换能元,其示意图如图 4 所示。

### 1.3 实验内容

#### 1.3.1 电爆性能测试

在电爆炸测试中,为确保实验的安全性以及避免

表 1 爆炸箔箔层规格

Table 1 Specification of exploding foil layer

foil layer	material	thickness / $\mu\text{m}$	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	material purity / %
first layer	TiW ( $v_w : v_{Ti} = 9 : 1$ )	0.5	17.82	$\geq 99.95$
second layer	Ni	0.5	8.908	$\geq 99.95$
third layer	Au	2	19.32	$\geq 99.95$



图 3 磁控溅射机

Fig.3 Magnetron sputtering machine

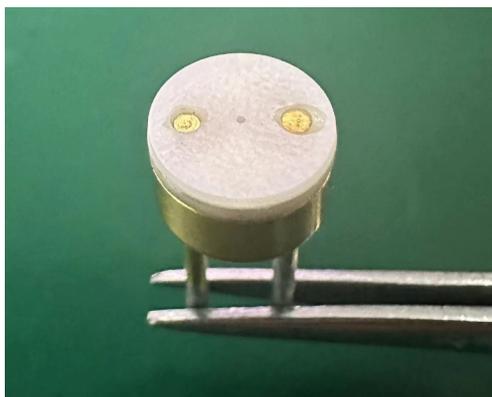


图 4 TiW/Ni/Au 爆炸箔换能元示意图

Fig.4 Schematic diagram of TiW/Ni/Au exploding foil transducer

仪器损坏,引出了部分电缆,但是外接电缆会增加回路电阻<sup>[19]</sup>及电感,使得输出能量部分消耗在起爆回路中,导致系统能量利用率降低。因此,需要测试激发回路的电阻和电感。

实验时,首先短接爆炸箔两端电缆,当充电电压达到 1200 V 时触发高压起爆装置,通过电流环测量回路电流,示波器记录回路电流随时间变化的曲线,如图 5 所示,可以看出电流随时间变化的曲线满足美军标 MIL-DTL-23659D 中指出的脉冲功率源在短路放电时,电流波形的振幅会随时间逐渐减小,这是由于短路形成后电容开始放电,电流随着电容电压的下降而减小<sup>[20]</sup>。

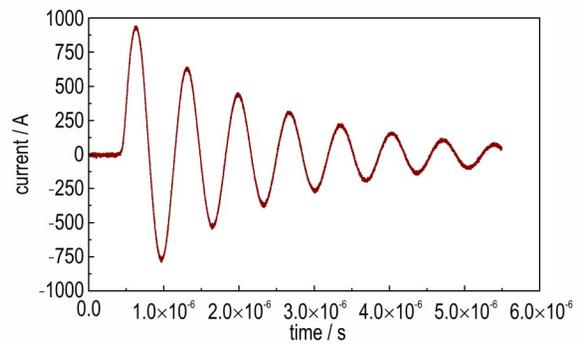


图 5 激发回路电流曲线图

Fig.5 Current curve of the excitation circuit

根据 R-L-C 电路放电理论推导出计算公式<sup>[21]</sup>:

$$L = \frac{T^2}{C} \times \left\{ 4\pi^2 + \left[ \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$R = \frac{2L}{T} \times \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (2)$$

式中,  $L$  是电感, nH,  $T$  是电流曲线震荡周期,  $0.76 \mu\text{s}$ ,  $C$  是充电电容,  $0.1 \mu\text{F}$ ,  $I_1, I_2$  是初始两个电流峰值,  $I_1 = 940 \text{ A}$ ,  $I_2 = 640 \text{ A}$ ,  $R$  是回路电阻, m $\Omega$ , 经计算, 得到回路总电感为 143.5 nH, 总电阻为 145.2 m $\Omega$ 。

其次, 将  $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$  TiW/Ni/Au 爆炸箔接入激发回路中, 当充电电压达到 1200 V 时触发高压起爆装置, 利用电流环测量桥箔爆发过程的回路电流, 通过 N2891A 高压探头测量桥箔桥区两端的爆发电压, 通过示波器记录爆炸箔两端电压电流变化情况, 变化曲线如图 6 所示。

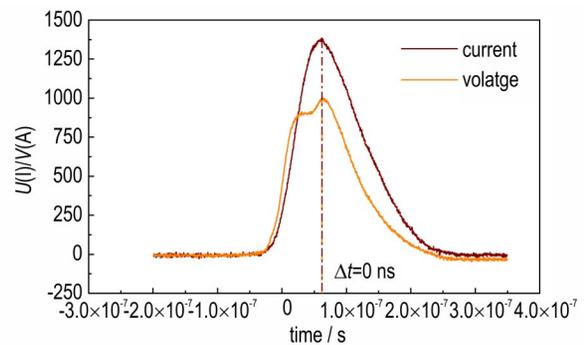


图 6 1200 V 下电爆曲线示意图

Fig.6 Schematic diagram of electric explosion curve at 1200 V

由图 6 可知, 在储能电容为  $0.1 \mu\text{F}$ , 充电电压为 1200 V 时, 爆炸箔在电爆过程中峰值电流与峰值电压出现时间一致, 峰值电流为 1386 A, 峰值电压为 1000 V。

### 1.3.2 飞片速度测试

飞片层在等离子体的驱动作用下沿着加速膛内径

剪切形成飞片,加速膛的直径直接影响飞片的大小,加速膛的厚度决定了飞片的加速位移。本研究设计桥箔参数、飞片参数、充电电容和起爆电压一定,测试加速膛参数变化时的飞片速度。

实验选用0.1  $\mu\text{F}$ 的充电电容,密度为 $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、厚度为25  $\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺飞片,尺寸为0.15 mm $\times$ 0.15 mm的TiW/Ni/Au复合薄膜爆炸箔,设计了孔径为0.15, 0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm,厚度分别为0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm的不同规格的陶瓷和聚酰亚胺两种加速膛。

通过远程控制计算机将高压起爆装置升压至1200 V,并发送点火指令。随后电容器放电产生强脉冲电流,作用于爆炸箔,引发电爆炸。连接光纤探头,利用测速装置和激光器采集飞片速度信号,并将其转换为电压信号。通过MSOX2024A示波器采集电压信号,采集到的信号经PDV数据处理程序分析后,可获取飞片速度信息。为了增加实验结论的可靠性,在每一种所选加速膛状态下测试15组飞片速度数据。利用实验获得的飞片速度,分别研究其在加速膛厚度、孔径、材料不同变量下的变化情况,从而获得不同加速膛参数下的飞片速度变化规律。

## 1.4 数值模拟

### 1.4.1 飞片测速经典模型

爆炸箔起爆器通过爆炸箔接收脉冲高电压,从而爆炸产生等离子体,等离子体膨胀驱动飞片,飞片撞击炸药导致炸药的起爆。因而飞片速度影响冲击波压力 $p$ ,是决定冲击起爆的关键因素之一。

1975年,T J Tucker和P L Stanton<sup>[22]</sup>根据飞片能量、动量和质量守恒关系,对格尼公式的平面一维公式的格尼能进行了修正,提出了电格尼能公式,并进一步给出了电爆炸驱动绝缘飞片所达到的最大速度经验公式:

$$u_f = \left\{ \frac{2KJ_b^n}{\frac{1}{3} + R} \right\}^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2E_{\text{eg}}} \left( \frac{\rho_f d_f}{\rho_e d_e} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, $K$ 、 $n$ 是由实验确定的电格尼能常数, $J_b$ 是桥箔爆发电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ , $u_f$ 是飞片速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $\rho_f$ 是飞片密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , $d_f$ 是飞片厚度, $\mu\text{m}$ , $\rho_e$ 是爆炸箔密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , $d_e$ 是爆炸箔厚度, $\mu\text{m}$ 。

1982年,王治平<sup>[23]</sup>又通过实验给出了与电格尼能具体实验参数有关的常数, $A_1=1.213\times 10^{-9}$ , $A_2=1.285$ , $B_1=0.618$ , $B_2=0.108$ 。

由式(3)可知,飞片由爆炸箔电爆炸驱动提供速度,其速度不仅取决于爆炸箔特性,而且与飞片、加速膛有关,本研究主要探讨不同加速膛对飞片速度的影响。

### 1.4.2 飞片测速模型的修正

将电爆炸性能测试实验的各个状态参数代入飞片速度经验公式(3)中,发现飞片速度的实验结果与计算结果差异较大,误差均在30%以上。对比实验选材各参数与经验公式参数的差异,得出结论:由于复合爆炸箔材料组成部分之间会发生合金化和电化学反应,且不同反应体系复合爆炸箔之间反应过程不同,难以量化计算相态变化过程中的具体数值,导致爆炸箔为多层膜的情况下,电格尼能、飞片速度难以应用经典公式进行直接计算。选取不同变量条件下的陶瓷加速膛,经过飞片速度测试系统测试飞片速度并进行拟合。经过拟合,得出了与具体实验有关的参数的经验值为 $A_1=-4.33$ , $A_2=0.898$ , $B_1=9.366$ , $B_2=-0.1053$ ;并且根据经典公式对爆炸箔为TiW/Ni/Au复合薄膜的飞片速度公式进行修正,为其密度增加修正系数 $\theta$ ,最终得到了TiW/Ni/Au多层膜电爆炸驱动微飞片的速度经验公式。

$$u_f = \sqrt{2E_{\text{eg}}} \left( \frac{\rho_f d_f}{\theta \rho_e d_e} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{2E_{\text{eg}}} \left( \frac{\rho_f d_f}{\rho_m d_e} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, $\rho_m$ 是等效密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,等效密度为爆炸箔各层总质量与总体积之比,经过计算得到,TiW/Ni/Au爆炸箔的等效密度 $\rho_m=17.33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 加速膛有关参数对飞片速度的影响

#### 2.1.1 加速膛厚度对飞片速度的影响

按照图2测试连接电路图搭建测速系统,采用PDV分别测试在0.15, 0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm的陶瓷加速膛孔径下,当加速膛厚度为0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm时换能元测试样品的飞片速度,得到的飞片速度变化曲线如图7所示。

通过实验记录与分析发现,在0.15, 0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm五种不同陶瓷加速膛孔径下,飞片速度随加速膛厚度的变化规律如下:在确定加速膛直径的情况下,飞片速度随加速膛厚度的增加呈先增后减的趋势。具体来说,当加速膛厚度从0.3 mm增加到0.4 mm时,飞片速度显著提高;然而,当厚度超过0.4 mm后,飞片速度开始下降。因此,在厚度为0.4 mm处,飞片速度最大。

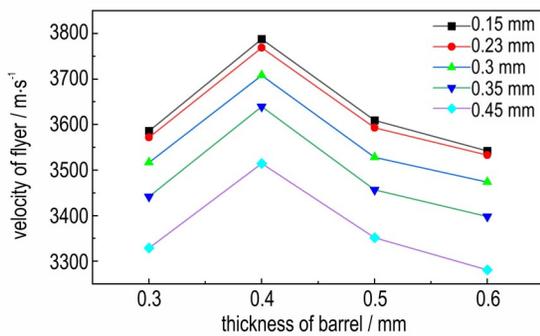


图7 不同加速膛厚度下的飞片速度变化曲线

Fig.7 Velocity variation curve of flyer under different barrel thicknesses

这是由于加速膛是飞片的加速路径,飞片进入加速膛后,在加速膛内不仅受到等离子体冲击的驱动力作用,也受到阻力的影响<sup>[24]</sup>。当加速膛厚度较小时,飞片运动的路径较短,所受的驱动力始终大于阻力,导致飞片在加速膛内持续加速,并且随着加速膛厚度的增加,飞片速度仍有上升空间;当厚度增加到某一值后,驱动力逐渐减小与阻力达到平衡,在这种平衡状态下,若飞片此时冲出加速膛,其速度达到最高且最为理想;继续增大加速膛厚度,驱动力小于阻力,飞片冲出加速膛的速度开始由最大值下降。

根据分析结果,在加速膛厚度为0.4 mm处,飞片飞出加速膛时的驱动力与阻力达到平衡,飞片速度达到最优状态。此时,加速膛的厚度约为爆炸箔尺寸的2.6~2.7倍;同时,图7中观察到,加速膛直径为0.15 mm的飞片速度始终高于同一厚度下其他四种直径的飞片速度。综上所述,在加速膛直径为0.15 mm、厚度为0.4 mm时,飞片速度达到最高值。

### 2.1.2 加速膛孔径对飞片速度的影响

本研究通过飞片速度测试系统分别测试在0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm的陶瓷加速膛厚度下,当加速膛孔径为0.15, 0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm时换能元测试样品的飞片速度,得到的飞片速度变化曲线如图8所示。

在0.3、0.4、0.5、0.6 mm四种加速膛厚度下,随着加速膛孔径的增加,飞片速度均呈现下降的趋势。分析其中原因可知:在电爆炸驱动飞片的实验中,当加速膛孔径接近爆炸箔尺寸时,爆炸箔爆炸产生的能量主要用于驱动飞片运动;而当加速膛孔径超出爆炸箔尺寸时,边缘位置飞片由于无法直接接受到冲击波压力产生速度,需要依靠中间位置飞片的动能获得速度,导致加速膛在剪切飞片消耗能量的过程中,还会伴随因拖拽而造成的能量损失;并且随着加速膛孔径的增加,

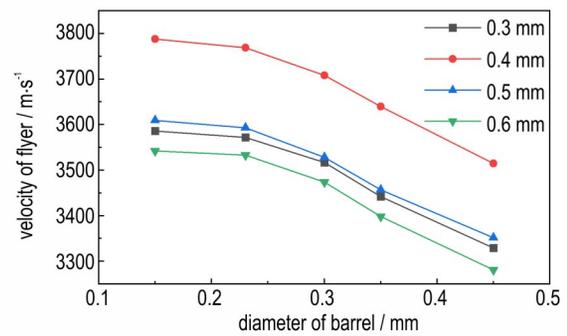


图8 不同加速膛孔径下的飞片速度变化曲线

Fig.8 Velocity variation curve of flyer under different barrel diameters

需要拖拽的边缘位置的飞片质量增加,拖拽消耗的能量上升,驱动飞片运动的能量下降,飞片速度降低<sup>[25]</sup>。因此得出结论,加速膛孔径越大,飞片速度越低。

当加速膛的孔径为0.15 mm时,与爆炸箔尺寸0.15 mm×0.15 mm最接近,爆炸箔爆炸能够实现更高的能量转化;随着加速膛孔径增大至0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm,超出了爆炸箔尺寸,导致爆炸箔释放的能量在剪切和拖拽飞片的过程中消耗增加,飞片动能的转化逐渐减小,飞片速度也相应减小。因此,在加速膛孔径为0.15 mm时,飞片速度最高;另外,在比较图8中4种加速膛厚度下的飞片速度时,发现厚度为0.4 mm的加速膛测试得到的飞片速度最高。因此,可得出结论:在加速膛直径为0.15 mm、厚度为0.4 mm时飞片速度最高。

### 2.1.3 加速膛材料对飞片速度的影响

根据加速膛的功能,要求加速膛应具有一定的强度和韧性。目前常用陶瓷材料,但其存在易碎、工艺要求高、价格高等局限性。而聚酰亚胺材料满足强度和韧性的要求,同时造价低。因此,本研究在加速膛材料为聚酰亚胺时进行了飞片速度测试实验,并将测试结果与加速膛材质为陶瓷时测试得到的飞片速度进行了对比,图9为两种加速膛示意图。图10为加速膛材料的

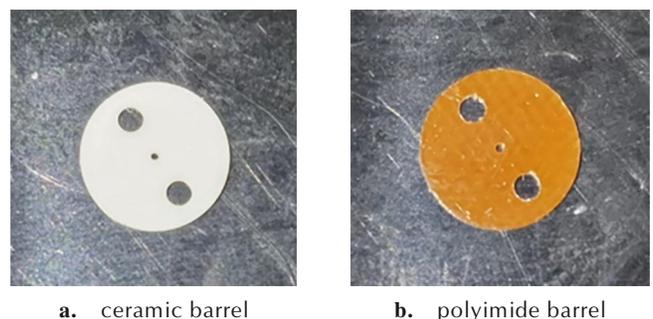


图9 加速膛示意图

Fig.9 Schematic diagram of barrels

改变时不同厚度下的飞片速度对比结果,图 11 为加速膛材料改变时不同直径下的飞片速度对比结果,其参数为陶瓷加速膛厚度( $th_c$ )和直径( $d_c$ ),聚酰亚胺加速膛厚度( $th_p$ )和直径( $d_p$ )。

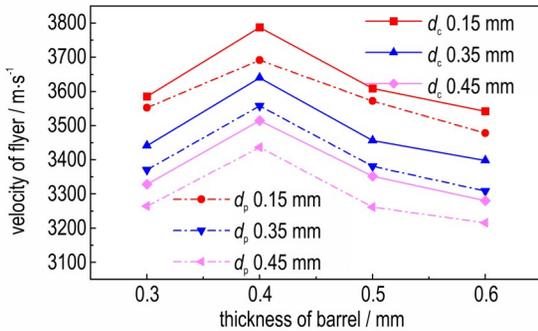


图 10 不同厚度下比较加速膛材料改变时的飞片速度  
Fig. 10 Comparison of flyer velocities for barrel material changes under different thicknesses

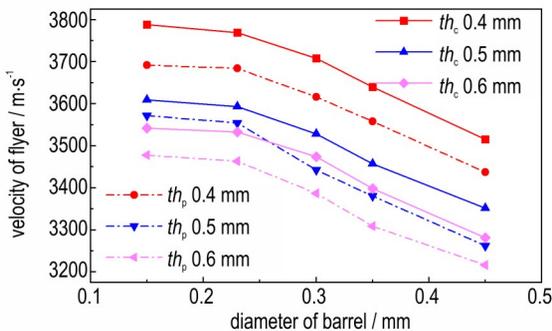


图 11 不同孔径下比较加速膛材料改变时的飞片速度  
Fig. 11 Comparison of flyer velocities for barrel material changes under different diameters

图 10 中,在 0.15,0.35,0.45 mm 三种加速膛直径下,比较两种材质的加速膛其厚度对飞片速度的影响后发现,当使用聚酰亚胺作为加速膛材质时,飞片速度的变化规律与使用陶瓷加速膛时一致,即随着加速膛厚度的增加,飞片速度先增后减,在厚度为 0.4 mm 处达到最高值;图 11 中,在 0.4,0.5,0.6 mm 三种加速膛厚度下,以加速膛直径作为自变量时,通过比较陶瓷和聚酰亚胺两种材质加速膛的飞片速度变化情况,发现当采用聚酰亚胺作为加速膛材质时,飞片速度仍满足随加速膛直径的增加而减小的规律,在直径为 0.15 mm 处飞片速度最高;此外,在相同条件下,飞片经过两种加速膛测得的速度差值均小于  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。综上所述,将加速膛材质从陶瓷更换为聚酰亚胺并不会显著影响飞片速度,聚酰亚胺可以代替陶瓷作为加速膛材料使用,既不影响实验结果,又能降低工艺复杂度和成本。

## 2.2 飞片测速修正模型的验证

为了验证拟合后的飞片速度经验公式是否可靠,计算了不同加速膛参数下的飞片速度,并与实验速度进行比较,比较情况如表 2 所示。

表 2 不同加速膛条件下飞片理论速度与实验结果的对比  
Table 2 Comparison of theoretical velocities and experimental results of flyer under different barrel conditions

$l$ / mm	$d$ / mm	$v_f$ / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_c$ / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta_c$ / %	$v_p$ / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta_p$ / %
0.3	0.23	3566	3572	0.2	3537	1
	0.45	3313	3329	0.5	3265	1.5
0.4	0.23	3753	3769	0.5	3684	2
	0.45	3498	3515	0.5	3437	1.8
0.5	0.23	3579	3593	0.4	3554	0.7
	0.45	3337	3352	0.5	3262	2.4
0.6	0.23	3503	3533	0.8	3463	1.1
	0.45	3260	3281	0.6	3216	1.4

Note: 1)  $l$  is thickness of barrel. 2)  $d$  is diameter of barrel. 3)  $v_f$  is theoretical velocity of flyer. 4)  $v_c$  is flyer velocity under ceramic barrel. 5)  $v_p$  is flyer velocity under polyimide barrel. 6)  $\theta_c$  is error rate between  $v_f$  and  $v_c$ . 7)  $\theta_p$  is error rate between  $v_f$  and  $v_p$ .

根据表 2 比较结果,在爆炸箔材料为 TiW/Ni/Au 多层膜时,加速膛材质无论是陶瓷还是聚酰亚胺,本研究给出的经验公式在加速膛直径 0.15~0.45 mm、加速膛厚度 0.3~0.6 mm,计算精度均在 2.5% 的范围内。

## 3 结论

本研究设计并制备了一种膜层厚度为 0.5/0.5/2  $\mu\text{m}$ 、桥区尺寸为 0.15 mm×0.15 mm 的 TiW/Ni/Au 复合薄膜爆炸箔,采用光子多普勒速度测试技术测试了在充电电压为 1200 V、充电电容为 0.1  $\mu\text{F}$  时不同加速膛参数下的飞片速度,总结速度变化规律,并采用数值模拟方法重新拟合了适用于 TiW/Ni/Au 复合薄膜的飞片速度经验公式,可得出以下结论:

(1) 当陶瓷加速膛孔径分别为 0.15、0.23、0.3、0.35、0.45 mm 时,飞片速度随加速膛厚度的增加先增后减,在每一种孔径下,当加速膛厚度为 0.4 mm 时,测试得到的飞片速度最高。

(2) 当陶瓷加速膛厚度分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 mm 时,飞片速度随加速膛孔径的增加均呈下降的趋势,即加速膛孔径越大,飞片速度越低,同一厚度下,孔径为 0.15 mm 的加速膛剪切飞片达到的速度最高。飞片速度在加速膛直径为 0.15 mm、厚度为 0.4 mm

处达到最大值。

(3)在相同的加速膛孔径以及厚度下,比较选用聚酰亚胺和陶瓷两种加速膛时测试得到的飞片速度,发现飞片速度变化规律并未随加速膛材质的改变发生变化,且飞片经过两种材质的加速膛测得的速度差值小于 $100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,对实验结果造成的影响很小;同时,聚酰亚胺材料满足加速膛韧性和强度的要求,成本较低,因此可选用聚酰亚胺作为加速膛材料。

(4)以经典飞片速度计算公式为依据,结合实验数据,拟合出一组适用于爆炸箔为TiW/Ni/Au复合薄膜的飞片速度经验公式。用这组经验公式对多组不同加速膛孔径、不同加速膛厚度、不同加速膛材料的飞片速度计算,并与实验结果对比,偏差均在2.5%以内。

#### 参考文献:

- [1] 曹始发. 爆炸箔起爆器的结构设计及性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.  
CAO Shi-fa. Structural design and performance research of explosive foil detonator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [2] BOWDEN M D, MAISEY M P. Determination of critical energy criteria for Hexanitrostilbene using laser-driven flyer plates[J]. *Proceedings of Spie*, 2008, 7070: 707004-707007.
- [3] Paisley, Dennis L, Sheng-Nian L, et al. Laser-launched flyer plate and confined laser ablation for shock wave loading: Validation and applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(2): 1131.
- [4] 王宗辉, 褚恩义, 贺爱锋, 等. 加速膛刀口直径对激光驱动飞片影响的研究[J]. 火工品, 2011(6): 14-17.  
WANG Zong-hui, ZHU En-yi, HE Ai-feng, et al. Effect of inner diameter of accelerating barrel on the laser-driven flyer plate[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2011(6): 14-17.
- [5] 杨振英, 马思孝, 邓琼, 等. 冲击片雷管的参数设计[J]. 火工品, 1996, (1): 31-35.  
YANG Zhen-ying, MA Si-xiao, DENG Qiong, et al. Parameter design of slapper detonator [J]. *Initiators& Pyrotechnics*, 1996(1): 31-35.
- [6] 谭迎新, 张景林, 王桂吉. 电爆炸导体驱动小飞片起爆技术研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 253-256.  
TAN Ying-xin, ZHANG Jing-lin, WANG Gui-ji. A study on the exploding initiation by electrically exploded conductor driving a small flyer[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(2): 253-256.
- [7] DAVIES H R, CHAPMAN D J, VINE T A, et al. Characterisation of an exploding foil initiator (EFI) system[J]. *American Institute of Physics*, 2009, 1195: 283-286.
- [8] 黄娜. 冲击片雷管的参数优化及关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.  
HUANG Na. Research on parameter optimization and key technologies of impact plate detonators[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [9] 陈楷, 徐聪, 朱朋, 等. 加速膛与复合飞片对集成爆炸箔起爆器性能的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 273-278.  
CHEN Kai, XU Cong, ZHU Peng, et al. The effect of accelerating chamber and composite flyer on the performance of integrated explosive foil detonator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3): 273-278.
- [10] 陈清畴. 冲击片雷管作用特征及影响规律研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.  
CHEN Qing-Chou. Research on the Characteristics and Influence Laws of Impact Plate Detonators[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [11] 覃文志, 王志昊, 何碧, 等. 加速膛对激光驱动飞片速度及形貌的影响规律[J]. 含能材料, 2020, 28(2): 99-104.  
QIN Wen-zhi, WANG Zhi-hao, HE Bi, et al. The influence of acceleration tube on the velocity and morphology of laser-driven flyers [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(2): 99-104.
- [12] STRAND O T, BERZINS L V, GOOSMAN D R, et al. Velocimetry using heterodyne techniques[C]//26th International Congress on High-speed Photography and Photonics, Alexandria, 2005: 593-599.
- [13] 李思宇, 董晓芬, 王云鹏, 等. TiW/Ni/Au爆炸箔制备及性能研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(12): 3826-3835.  
LI Si-yu, DONG Xiao-fen, WANG Yun-peng, et al. Preparation and performance study of TiW/Ni/Au explosive foils [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3826-3835.
- [14] 韩克华, 曾鑫, 赵婉君, 等. Cu箔晶体微观形貌对爆炸箔起爆器的性能影响试验研究[J]. 含能材料, 2023, 31(6): 568-576.  
HAN Ke-hua, ZENG Xin, ZHAO Wan-jun, et al. Experimental study on the influence of microstructure morphology of Cu foil on the performance of explosive foil initiators [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(6): 568-576.
- [15] 陈少杰. 激光驱动复合飞片冲击起爆HNS-IV的规律和机理研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.  
CHEN Shao-jie. Research on the law and mechanism of laser-driven composite flyer impacting detonation of HNS-IV [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [16] 李瑞. 无起爆药DDT雷管的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.  
LI Rui. Research on key technologies of DDT detonators without primary explosive[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [17] 谭迎新, 张景林, 王桂吉, 等. 小飞片起爆系统加速膛参数的确定[J]. 火炸药学报, 2001(3): 51-52, 55.  
TAN Ying-xin, ZHANG Jing-lin, WANG Gui-ji, et al. Determination of barrel parameters for small flyer initiation system [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001(3): 51-52, 55.
- [18] 王窈. 脉冲能量作用下Al/Ni含能多层膜爆炸特性及应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021.  
WANG Yao. Study on the explosion characteristics and applications of Al/Ni high-energy multilayer films under pulse energy action[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [19] 曾庆轩, 袁士伟, 罗承沐, 等. 爆炸箔起爆系统初始电阻对爆发电流和飞片速度影响的数值模拟[J]. 火工品, 2002(1): 43-45.  
ZENG Qing-xuan, YUAN Shi-wei, LUO Cheng-mu, et al. Numerical simulation of the influence of initial resistance on detonation current and flyer velocity in explosive foil initiation sys-

- tem[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2002(1): 43-45.
- [20] 陈航. 微结构对Cu爆炸箔电爆性能的影响研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2023.  
CHEN Hang. Research on the influence of microstructures on the electrical explosion performance of Cu explosive foil[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [21] HAN K H, ZHAO W J, DENG P, et al. Research on characteristics of copper foil three-electrode planar spark gap high voltage switch integrated with EFI[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4): 1989.
- [22] T. J. Stanton P. L Tucker. Electrical Gurney Energy: A New Concept in Modeling of Energy Transfer from Electrically Exploded Conductors[R], SAND-75-0244. Albuquerque, USA: 1975.
- [23] 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, 1982(2): 83-86.  
WANG Zhi-Ping. The effect of the diameter of the flyer on the speed of the flyer in a detonating cord[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1982(2): 83-86.
- [24] 程松. 小尺寸装药爆轰驱动飞片速度测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.  
CHENG Song. Research on Testing the speed of flyer driven by small size charge detonation[D]. Taiyuan: North University of China, 2010.
- [25] 贺翔, 严楠, 曾祥涛, 等. 微尺寸叠氮化铅驱动飞片重要结构参数与飞片速度和能量的关系[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1363-1371.  
HE Xiang, YAN Nan, ZENG Xiang-tao, et al. Relationship between important structural parameters of micro sized lead azide driven flyers and flyer speed and energy[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1363-1371.

## Influence of Barrel Parameters on the Velocity of the Transducer Flyer

WANG Wei, DONG Xiao-fen, WANG Duan, LI Qian, LI Si-yu, GUO Yu-xuan

(School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The velocity of the flyer is a key factor in determining the reliability of initiating exploding detonators. In order to investigate the influence of barrel parameters on the flyer velocity, the factors affecting the flyer velocity were analyzed through both experimental and numerical simulation methods. A TiW/Ni/Au composite film exploding foil with a film thickness of 0.5/0.5/2  $\mu\text{m}$  and dimensions of 0.15 mm $\times$ 0.15 mm was designed and prepared using magnetron sputtering technology. Under excitation conditions of 0.1  $\mu\text{F}$  and 1200 V, a polyimide flyer with a density of 1.45  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and a thickness of 25  $\mu\text{m}$  was selected, and the flyer velocities with different barrel parameters were measured using photon Doppler velocity testing technology. The research results indicate that, under the same diameter conditions, the flyer velocity initially increases and then decreases with increasing barrel thickness, reaching a peak at 0.4 mm. When the barrel diameter are 0.15, 0.23, 0.3, 0.35, 0.45 mm, the flyer velocity decreases as the diameter increases, with the highest velocity observed at a diameter of 0.15 mm. Furthermore, under the same thickness and diameter conditions, the velocities obtained from polyimide and ceramic barrel tests exhibit similar trends and values, with polyimide demonstrating higher strength and toughness and lower cost, making it a viable alternative to ceramic as a barrel material. Furthermore, a numerical simulation method was used to re-fit the empirical formula for flyer velocity applicable to the TiW/Ni/Au composite thin film, and the verification results show that the deviation between the calculated results and experimental data is within 2.5%.

**Key words:** exploding foil; photon doppler velocity testing technology (PDV); flyer speed; barrel; polyimide

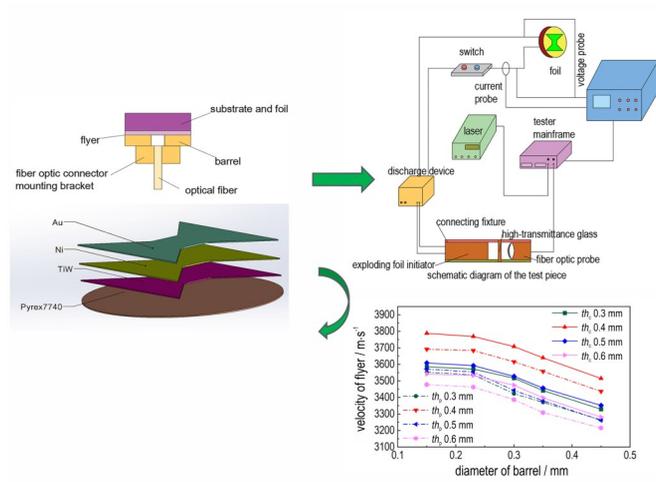
**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023254

(责编:高毅)

图文摘要:



The TiW/Ni/Au exploding foil transducer with a thickness of 0.5/0.5/2  $\mu\text{m}$  and dimensions of 0.15 mm $\times$ 0.15 mm was prepared, the study on the variation of flyer velocity with different barrel thickness, diameter, and materials was comprehensively conducted using Photon Doppler Velocimetry (PDV) technology, and the empirical formula for calculating flyer velocity was summarized.