

金属飞片对 EFI 起爆能量的影响

王寅¹, 栾前进², 同红海¹, 周密¹, 秦国圣¹, 李蛟¹

(1. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 西安 710061;

2. 陆军装备部 驻西安地区航空军事代表室, 西安 710065)

摘要: **目的** 降低 EFI 的发火能量, 研究非金属飞片与金属飞片在 EFI 中的应用。**方法** 采用飞片材料匹配的方法, 并选择金属 Al 与金属 Ti, 开展金属飞片的设计与制备, 得到 Al-PI 与 Ti-PI 的金属飞片以及金属飞片-爆炸桥箔 metallic flyer, 并开展发火摸底试验。**结果** 在不额外对金属飞片进行绝缘处理的情况下, 含有金属飞片的 EFI 均未发火; 对金属飞片进行绝缘处理后, 含有金属飞片的 EFI 均可靠发火。采用光子多普勒测速仪(PDV)进行的飞片速度测试结果表明, 在充电电压为 1200 V 时, Ti-PI 金属飞片的速度为 3604 m/s, 金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元速度为 2986 m/s。**结论** 同样的发火电压下, 金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元的金属飞片速度明显小于绝缘层较厚的金属飞片速度。

关键词: EFI; 金属飞片; 绝缘处理; PDV; 飞片速度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.011

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0067-06

Influences of Metallic Flyer on Initiation Energy of EFI

WANG Yin¹, LUAN Qian-jin², TONG Hong-hai¹, ZHOU Mi¹, QIN Guo-sheng¹, LI Jiao¹

(1. National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. Aviation Military Respective Office of Army Equipment Department in Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: **Objective** To reduce the ignition energy of EFI, and study the application of non-metallic flyer and metallic flyer in EFI. **Methods** With the metallic flyer matching method, Al and Ti were selected to design and prepare metallic flyer. The Al-PT and Ti-PI metallic flyer and metallic flyer - explosive bridge foil integrated energy conversion element were obtained. **Results** In the case of no additional insulation treatment for metallic flyer, EFI containing metallic flyer were not ignited. After insulation treatment of metallic flyer, EFI containing metallic flyer were reliably ignited. The results of flyer velocity test with PDV showed that when the charging voltage was 1200V, the speed of Ti-PI metallic flyer was 3604m/s, the speed of material pieces of flyer for bridge was 2986m/s. **Conclusion** Under the same ignition voltage, the speed of metal flyer with metal flyer and explosive bridge foil integrated energy conversion element is significantly smaller than that of metal flyer with thicker insulation layer.

KEY WORDS: EFI; metallic flyer; insulating treatment; PDV; flyer velocity

在 EFI(爆炸箔起爆器)的电-动能转换环节中, 飞片的结构和材料对其运动特性有较大影响, 通过研究飞片结构和材料对 EFI 的低能化具有参考意义。

目前国外已经开展了此项研究工作, Dudley^[1]开

展了厚度为 5~50 μm PI 飞片的速度测试。Schwarz^[2]开展了厚度为 50~254 μm PI 飞片的速度测试。Bowden^[3-4]测试了 3~5 μm 铝飞片的飞片速度, 但并未对其他金属材料进行研究。国内对此也有类似研

究,何碧等^[5]用双灵敏度 VISAR 对 EFI 中的飞片速度进行测试。王祥等^[6]开展了飞片材料对电爆驱动飞片速度影响,但也只是常规飞片尺寸的测试。南京理工大学的周翔^[7]制备了 Cu/Al/CuO 复合爆炸箔,测试表明,Al/CuO 纳米含能材料的加入并没有提高飞片的速度,可能是由于材料的反应时间与电爆时间的不匹配而导致。Davies H^[8]研究了直径为 $\phi 1.00$ mm 的加速腔对尺寸为 $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 桥箔形成的无限制性约束,加速腔对桥箔电爆后,产生的高温高压等离子体的约束力较小。南京理工大学的陈楷等^[9]的研究表明,复合飞片的速度随着发火电压的增加逐渐增大,在相同发火条件下,复合飞片的速度随着加速腔直径的减小反而逐渐增加。

随着 EFI 低能化以及小型化的发展,使飞片的尺寸也越来越小。本研究采用 PDV 测量小飞片的速度历程,为 EFI 的优化提供依据。

1 实验

1.1 爆炸桥箔与飞片的匹配研究

传统的 EFI 通常采用聚酰亚胺薄膜作为飞片^[10],聚酰亚胺薄膜作为一种绝缘性能良好的非金属材料,它的抗拉强度为 140 MPa,但一般常见金属箔的抗拉强度都比聚酰亚胺薄膜大。在飞片飞行的过程中,选择抗拉强度大的材料有利于飞片保持飞片的运动姿态。基于这个思路,文中选择金属 Al 或者 Ti 作为飞片,应用在 EFI 中。由于金属直接与桥箔接触会产生漏电现象,导致最终 EFI 不能可靠发火,所以需要选

择绝缘层对金属与桥箔之间进行隔离。根据绝缘层以及制备方法的区别,金属飞片制备有以下两种方案。

1) 选择聚酰亚胺薄膜作为绝缘层,利用非平衡磁控溅射,将金属直接溅射在聚酰亚胺薄膜上,形成金属飞片。

2) 利用 MEMS 工艺,选择 Si_3N_4 材料作为绝缘层,直接在桥箔上溅射。再选择 Ti,作为飞片层溅射在非金属层上。最终,得到金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元。

目前 EFI 采用的聚酰亚胺飞片的厚度为 $13\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $25\text{ }\mu\text{m}$,选择这两种厚度的聚酰亚胺薄膜作为绝缘层,通过控制非平衡磁控溅射的参数,以及利用台阶仪来保证金属层的厚度。试验采用 Al 作为金属层,在聚酰亚胺薄膜上溅射了 1、2、4、5 μm 等四种不同厚度的飞片层,如图 1 所示。选择 Ti 作为金属层,在聚酰亚胺薄膜上溅射了 1、3、5 μm 等三种不同厚度的飞片层,如图 2 所示。



图 1 不同厚度的 Al-Pi 金属飞片

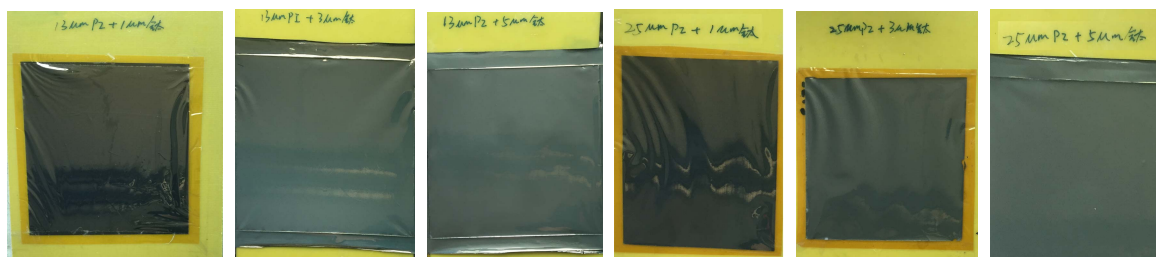


图 2 不同厚度的 Ti-Pi 金属飞片

选择 Si_3N_4 作为绝缘层,利用非平衡磁控溅射直接在桥箔上溅射,通过控制溅射时间来预估绝缘层厚度。选择 Ti 金属,作为飞片层溅射在绝缘层上,通过控制溅射时间来预估飞片层厚度。最终,得到金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元。具体制备流程如图 3 所示,样品如图 4 所示。

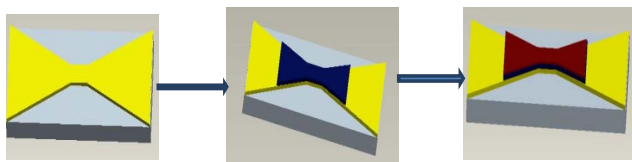


图 3 金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元制备流程

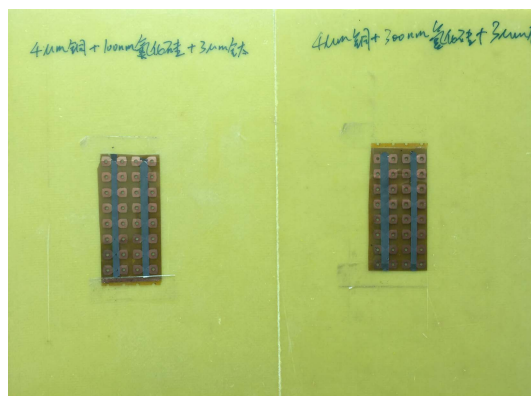


图 4 金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元样品

1.2 实验过程

1.2.1 EFI 发火摸底试验

将金属飞片裁成 2 mm×2 mm 的正方形,将其盖在桥区中心,利用设计对中的方式,将加速膛、装药环、药柱依次进行装配,并标号,EFI 结构如图 5 所示。

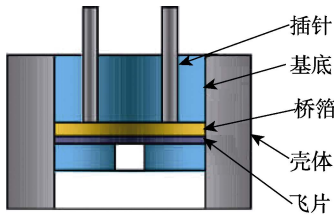


图 5 起爆单元结构

1.2.2 EFI 飞片速度测试

设计并制作了一种简易的飞片发生装置,它由高压起爆电源、高压数字表、起爆盒构成,其中起爆盒中有冷阴极触发管(高压火花隙开关)、高压脉冲电容。采用光子多普勒测速仪(PDV)对金属飞片进行速度测试。试验原理如图 6 所示。

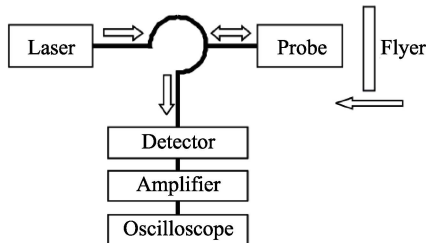


图 6 试验原理

2 结果与讨论

2.1 EFI 发火摸底试验

先以 Al-PI 金属飞片进行发火摸底试验,试验结果见表 1。

表 1 Al-PI 金属飞片发火摸底试验试验结果

Serial number	Insulating layer/ μm	Metal layer/ μm	Ignition voltage/kV	Detonate
1-1	13	1	1.6	No
1-2	13	2	1.6	No
1-3	13	4	1.6	No
1-4	13	5	1.6	No
1-5	25	1	1.6	No
1-6	25	2	1.6	No

通过表 1 可以看出,将飞片更换为金属飞片后,EFI 均未发火。为了分析失效的原因,对爆炸箔电爆炸过程的温度分布情况进行研究。导体固体加热阶段为爆炸箔电爆炸的第一个阶段,它对形成等离子体的浓度和时间有着重要的影响,而等离子体是后续推动飞片的动力源。因此,爆炸箔在加热阶段的电分析具有重要意义,本仿真利用 Ansys-workbench 对桥箔进行电热分析。采用如图 7 所示的 Ansys-workbench 电热耦合模块,对桥箔熔化前的电热过程进行模拟。

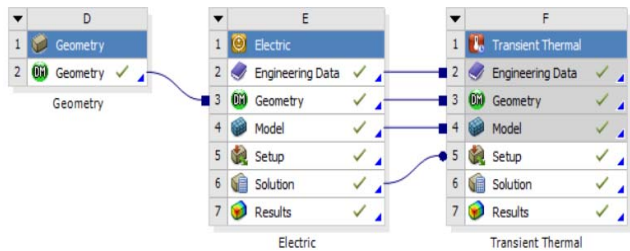


图 7 电热仿真模块

对爆炸桥箔采用电热耦合模块进行短脉冲作用下的电热分析,来讨论其作用过程中的温度分布情况。爆炸桥箔厚度为 3 μm ,桥区尺寸为 0.33 mm×0.33 mm。爆炸桥箔建模及网格划分如图 8 所示。

由于铜的热导率与电导率相比,在量级上有差异,同时脉冲电流作用时间短,因此可忽略桥箔与环境的热传导。在美军标 MIL-DTL-23659D 中,对其规

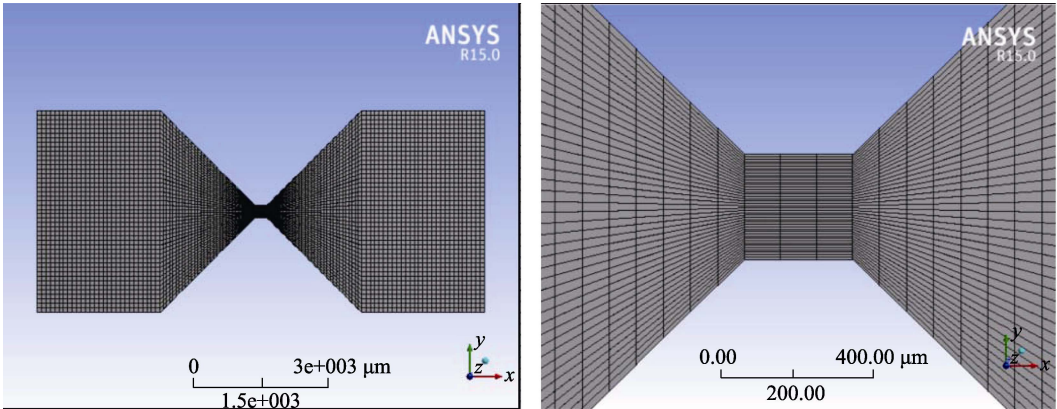


图 8 网格划分

定测试回路电流应包含至少 5 个等间隔减幅振荡电流, 利用此振荡波形参数可以进行系统等效电阻、等效电感的性能测试。等效电感 L 、电阻值 R 根据串联 R - L - C 电路放电理论推导的计算公式来求解。

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

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

式中: T 为电流曲线的振荡周期, μs ; I_1 、 I_2 为最开始两个正向电流峰值, A 。

根据短路实验结果推算出回路电感 L 和电阻 R , 则可以得到回路电流计算公式:

$$I(t) = V / \left[L \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R_C^2}{4L^2}} \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R_C^2}{4L^2}} \cdot t \right) \cdot e^{-\frac{R_C}{2L} \cdot t} \right]$$

式中: $R_C = R + R_0$, R_0 为桥箔电阻。

Ansys 热电耦合模块中需要的材料参数包括材料密度、比热率、热导率和电阻率。通过查阅文献资料可知, 铜的密度为 8900 kg/m^3 , 比热率为 $385 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 热导率为 $401 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 而电阻率与温度的关系为:

$$\rho_e = -4.12 \times 10^{-10} + 0.113 \times 10^{-5} (T/11\ 604)^{1.145}$$

仿真后不同时刻方形桥箔桥区的温度分布如图 9 所示。

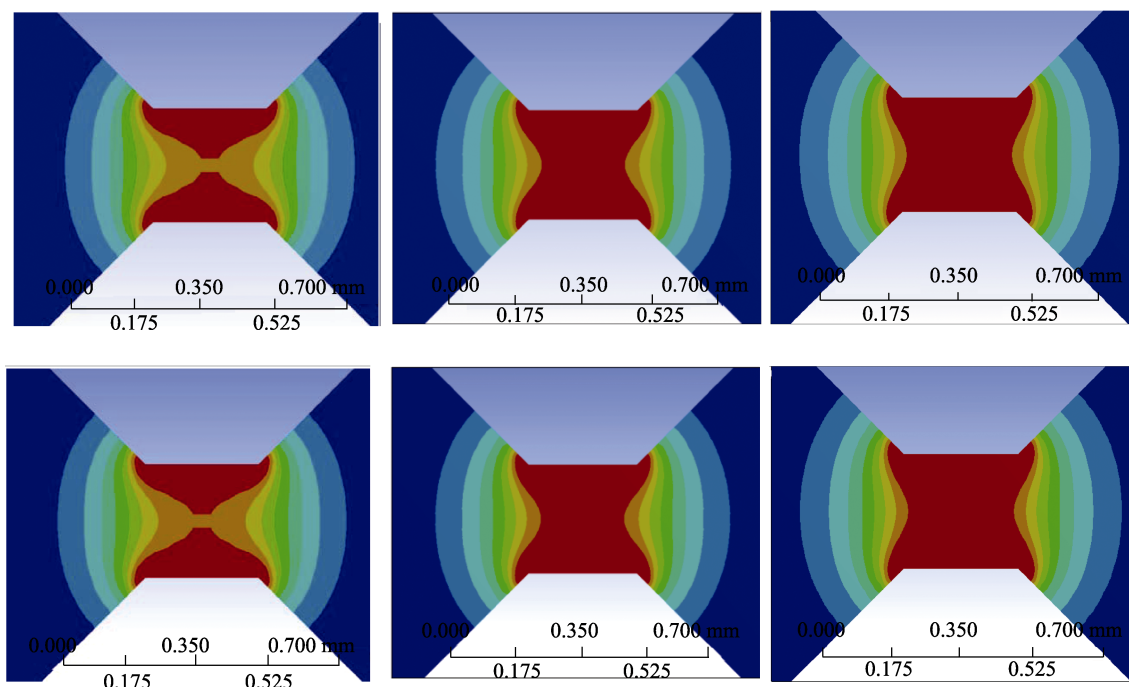


图 9 方形桥温度曲线

从温度分布图可以看出, 桥区的四个拐点处最早在输入电流的作用下开始升温, 但升温并不明显, 此时桥箔其他区域无明显升温现象。随后, 随着输入电流的快速增大, 整个桥区范围内的温度由于焦耳热作用迅速升高, 而桥区四个拐点处由于温度高于桥区中心区域, 其电导率随着有一定幅度降低, 电阻较之其他区域高, 因此该处的升温速率进一步增大。同时由于热传导作用, 最早产生温升的桥区边缘温度也向中心扩散, 最终整个桥区基本完全达到熔点。由此可以看出, 爆炸桥箔作用时, 电流呈向中心区域汇聚的趋势, 桥区在中心区域爆炸, 对飞片的作用力集中在飞片中心处。根据仿真结构, 选取典型样品进行解剖, 具体情况如图 10 所示。

通过图 10 发现, 金属飞片均被切出, 但飞片周围均有烧蚀或金属层脱落现象。根据分析, 在桥箔

爆炸瞬间, 会产生高温以及大电流。一方面桥区周围的金属层在高温的情况下会产生烧蚀情况, 或者使金属层的附着力降低, 使其脱落, 这个与仿真结果一致。另一方面, 在高温和大电流共同作用下, 飞片的金属层可能会发生漏电情况, 从而导致 EFI 不能可靠发火。

根据上述分析, 对飞片进行绝缘处理, 并做摸底试验, 试验结果见表 2。可以看出, 采用经过处理后的金属飞片可使 EFI 可靠起爆。采用不同厚度的 Ti-PI 金属飞片进行发火试验, 试验前对金属飞片进行绝缘处理, 实验结果见表 3。可以看出, 采用不同厚度的 Ti-PI 金属飞片可使 EFI 可靠起爆。

将制备好的金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元直接装配, 并标号, 试验结果见表 4。可以看出, EFI 均发火, 说明 100 nm 的 Si_3N_4 能够绝缘, 飞片的金属

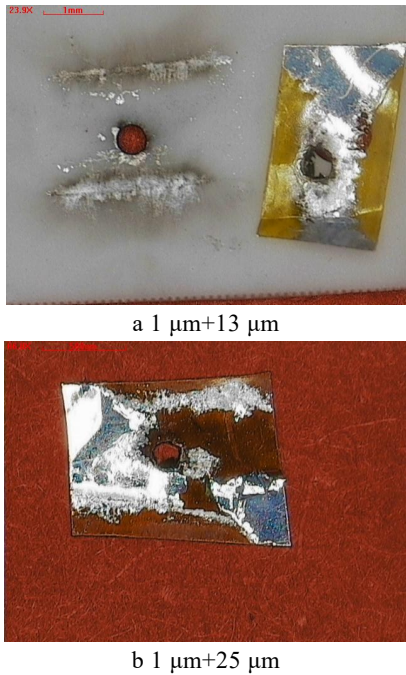


图 10 Al-PI 金属飞片试验结果

表 2 绝缘处理后试验结果

Serial number	Insulating layer/ μm	Metal layer/ μm	Ignition voltage/kV	Detonate
2-1	13	1	1.6	Yes
2-2	13	4	1.6	Yes
2-3	13	5	1.6	Yes
2-4	25	1	1.6	Yes
2-5	25	4	1.6	Yes
2-6	25	5	1.6	Yes

表 3 Ti-PI 金属飞片试验结果

Serial number	Insulating layer/ μm	Metal layer/ μm	Ignition voltage/kV	Detonate
3-1	13	1	1.6	Yes
3-2	13	3	1.6	Yes
3-3	13	5	1.6	Yes
3-4	25	1	1.6	Yes
3-5	25	3	1.6	Yes
3-6	25	5	1.6	Yes

表 4 金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元试验结果

Serial number	Insulating layer/nm	Metal layer/ μm	Ignition voltage/kV	Quantity	Detonate
4-1	100	3	1.6	5	Yes
4-2	300	3	1.6	5	Yes

层并不会发生漏电情况。其他非金属材料（如 CuO 等）作为绝缘层，EFI 能否可靠发火还需要进一步试验来验证。

2.2 EFI 飞片速度测试

EFI 飞片速度测试结果见表 5，典型试验曲线如图 11 所示。可以看出，在充电电压为 1200 V 时，Ti-PI 金属飞片的速度为 3604 m/s，金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元中金属飞片的速度为 2986 m/s。其原因是因为飞片的厚薄决定了飞片在加速腔内飞行姿态的持续时间。过于薄的金属飞片，在加速腔内飞行姿态持续时间较短，有可能还未到最大速度，飞片已经破碎。

表 5 EFI 飞片速度试验结果

Serial number	Insulating layer/ μm	Insulating layer	Metal layer/ μm	Metal layer	Ignition voltage/kV	Produce of flyer
1-1	0.3	Si_3N_4	3	Ti	1.2	Yes
1-2	12.5	PI	3	Ti	1.2	Yes

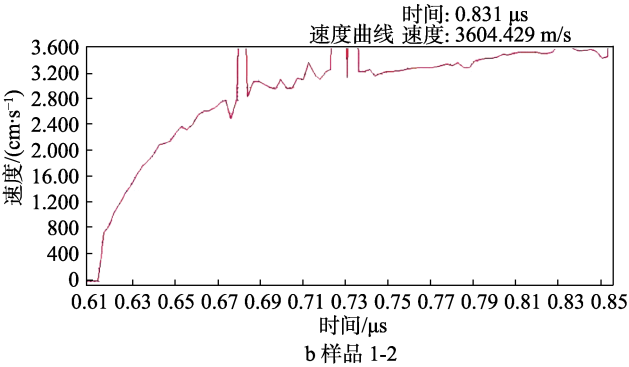
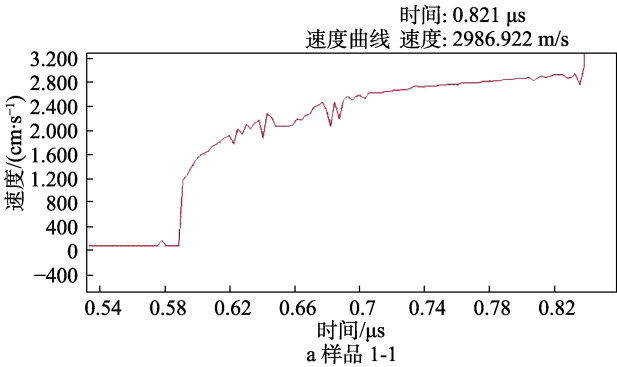


图 11 飞片速度

3 结论

通过对含有不同结构金属飞片的 EFI 进行起爆

摸底试验以及飞片速度测试，结果表明，当金属飞片的绝缘层完全做到绝缘时，含有金属飞片的 EFI 均能可靠起爆。同样的发火电压下，金属飞片-爆炸桥箔一体化换能元的金属飞片速度明显小于绝缘层较厚

的金属飞片速度。

参考文献:

- [1] SCHWARZ A C. Study of Factors Which Influence the Shock-initiation Sensitivity of Hexanitrostilbene (HNS) [R]. Albuquerque: Sandia National Labs, 1981.
- [2] DUDLEY E, DAMM D, WELLE E. The Pore Collapse “Hot-Spots” Model Coupled with Brittle Damage for Solid Explosives[C]// 14th International Detonation Symposium Office of Naval Research. Coeur d’Arlene: ID, 2010.
- [3] BOWDEN M D, KNOWLES S L, MAISEY M P. Characterisation of Laser-driven Flyer Performance Using Photonic Doppler Velocimetry[C]// 2011 AIP Conf Proc. Chicago: IL, 2011.
- [4] BOWDEN M D, MAISEY M P. Determination of Critical Energy Criteria for Hexanitrostilbene Using Laser-driven Flyer Plates[C]// Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008.
- [5] 何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 31-34.
- [6] 王翔, 谭凯元, 文尚刚, 等. 飞片材料对电爆驱动飞片速度的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 259-262.
- [7] ZHOU Xiang, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Influence of Al/CuO Reactive Multilayer Films Additives on Exploding Foil Initiator[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(9): 094505-1-094505-6.
- [8] 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(3): 273-278.
- [9] DAVIES H R, CHAPMAN D J, VINE T A, et al. Characterisation of an Exploding Foil Initiator (EFI) System[C]// AIP Conference Proceedings. USA: American Institute of Physics Conference Series, 2009.
- [10] 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.