

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0071-07

MEMS集成爆炸箔芯片的发火性能研究

杨智¹, 王一飞¹, 黎浩学¹, 韩书锋¹, 王玉强¹, 朱朋²

(1. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安, 710025; 2. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094)

摘要: 为了实现高速飞片输出和爆炸箔起爆器 (Exploding Foil Initiator, EFI) 低能发火, 依据 EFI 工作原理, 进行 Cu 桥箔电热仿真、PC (聚氯代对二甲苯) 飞片冲击作用参数计算和 SU-8 加速膛结构确定。基于结构设计参数, 采用微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 工艺实现了爆炸箔芯片一体化批量制备, 并开展了 MEMS 集成爆炸箔芯片的桥箔电爆特性、飞片实时速度和冲击起爆性能测试。结果表明: 基于小尺寸桥箔结构在较低放电电压下就能够获得较高的飞片速度, 并且在加速膛口飞片速度达到峰值速度的 96% 以上; 冲击起爆 HNS-IV 药柱的最低发火条件为 0.22 $\mu\text{F}/100\text{ V}$, 实现了 EFI 低能发火。

关键词: 集成爆炸箔芯片; MEMS 工艺; 飞片实时速度; 低能发火

中图分类号: TJ450.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.011

Research on the Firing Performance of MEMS Integrated Exploding Foil Chip

YANG Zhi¹, WANG Yi-fei¹, LI Hao-xue¹, HAN Shu-feng¹, WANG Yu-qiang¹, ZHU Peng²

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Technique Institute, Xi'an, 710025; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: In order to achieve high-velocity flyer output and low energy ignition of the exploding foil initiator (EFI), the study on electro-thermal simulation of Cu bridge foil, impact parameters calculation of PC flyer, and dimensions determination of SU-8 barrel were conducted according to the working principle of EFI. The prototype exploding foil chip has been batch-prepared using micro-electro-mechanical system (MEMS) technology based on the structure design parameters. Furthermore, the primary characteristics of MEMS exploding foil chip were tested, including the foil electrical-explosion properties, real-time flyer velocities and impact initiation properties. The results show that based on a small-sized bridge foil structure, higher flyer velocity can be achieved at lower discharge voltage, and the flyer velocity at the SU-8 barrel muzzle reaches over 96% of its peak velocity; The minimum ignition condition for impact initiation of HNS-IV charges is 0.22 $\mu\text{F}/100\text{ V}$, which indicates EFI with low energy ignition has been achieved.

Key words: Integrated exploding foil chip; MEMS technology; Real-time flyer velocity; Low energy ignition

直列式安全发火装置 (In-Line Safe-Arm Device) 为点火/传爆序列中各发火元件之间无任何机械隔断或者错位机构的安全发火装置, 具有包括作用阈值、结构及药剂在内的火工品本质安全性^[1], 在固体发动机和导弹战斗部等安全点火及起爆领域具有广阔应

用前景。爆炸箔芯片是爆炸箔起爆器 (Exploding Foil Initiator, EFI) 的核心换能元件, 主要由基底、桥箔、飞片层和加速膛组成, 通过桥箔电爆炸产生的等离子体驱动薄膜形成高速飞片, 实现脉冲电容储能向飞片动能的转化。传统爆炸箔芯片采用机械加工零部件和

收稿日期: 2023-12-08

作者简介: 杨智 (1994-), 男, 工程师, 主要从事直列式点火及起爆系统技术研究。

引用本文: 杨智, 王一飞, 黎浩学, 等. MEMS 集成爆炸箔芯片的发火性能研究[J]. 火工品, 2024(5):71-77.

分立组装工艺实现单个样品生产,存在制备效率低、一致性差、成本高等不足,不利于拓宽爆炸箔或者直列式技术的应用范围。

近年来,研究者采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)和印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)等加工工艺,从多角度深入开展了爆炸箔芯片制备方法研究,实现了爆炸箔芯片的批量制备和发火输出。2005年至2010年期间,郭菲等^[2]开展了硅集成爆炸箔芯片研制,并且系统研究了桥箔材料、飞片材料及厚度对芯片加工及性能的影响规律。2009年,Desai A^[3]在专利中提出采用镀膜、光刻和刻蚀等非硅 MEMS 工艺,将桥箔、飞片层和加速膛在基底上依次沉积并且图形化,自底向顶原位制备获得爆炸箔芯片。2012年,曾庆轩等^[4]采用光刻制备铜桥箔、黏贴聚酰亚胺飞片层、紫外曝光制作环氧树脂加速膛,研制了爆炸箔芯片,采用 PVDF 压电薄膜测试了飞片平均速度,测试结果与理论计算结果具有很好的一致性。2016年,房旷等^[5]采用化学气相沉积技术批量制备了基于 PC(聚氯代对二甲苯)飞片和 SU-8 胶加速膛的爆炸箔芯片,对比研究了常规爆炸箔芯片(采用聚酰亚胺飞片和不锈钢加速膛)和 MEMS 爆炸箔芯片(采用聚氯代对二甲苯飞片和 SU-8 胶加速膛)的飞片实时速度,结果表明加速膛和飞片材料对速度的影响很小。2017年,李可为等^[6]在 Pyrex7740 玻璃基底上,采用铜作为桥箔、聚甲基丙烯酸甲酯作为飞片层、SU-8 胶作为加速膛,批量制备了爆炸箔芯片,获得了冲击起爆 HNS-IV(IV 型六硝基萘)药柱的临界发火电压为 2 185 V,并且芯片经受 160 °C/50 h 高温环境后发火性能不受影响。2018年,陈楷等^[7]基于特定厚度 SUEx 干膜,采用 MEMS 工艺批量制备了爆炸箔芯片,并且研究了加速膛参数对飞片速度和冲击起爆的影响规律。2018年,Zhu P 等^[8]采用包括冲孔、丝网印刷、叠压、共烧及划片在内的 LTCC 工艺,一体化烧制制备了具有独石结构的爆炸箔芯片,采用 LTCC 爆炸箔芯片在 0.22 $\mu\text{F}/2\ 500\ \text{V}$ 放电条件下成功起爆了 HNS-IV 药柱。2021年,Yang Z 等^[9]通过对 Cu 桥箔、

FR-4 飞片和 FR-4 加速膛开展理论设计,确定了爆炸箔芯片的结构参数并且实现了一体化批量制造,研究了 PCB 爆炸箔芯片的发火性能,使用该芯片冲击起爆的最低能量为 0.40 $\mu\text{F}/1\ 800\ \text{V}$ 。

研究人员深入摸索了爆炸箔芯片的集成制备工艺,并且系统研究了芯片的性能,但是发火感度较低(发火能量较高),不利于直列式安全发火装置低能化发展,提高了对前级脉冲功率系统的升压、降额、电磁兼容等技术指标要求。为了实现高速飞片输出和 EFI 低能发火,本文依据“桥箔电爆-飞片加速-冲击炸药”的界面能量耦合关系,优化爆炸箔芯片的组件结构参数,基于包括磁控溅射镀膜、紫外光刻和化学气相沉积在内的 MEMS 工艺,实现爆炸箔芯片批量制备。采用光子多普勒测速技术(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)测试 MEMS 集成爆炸箔芯片的飞片实时速度,并开展爆炸箔芯片冲击起爆 HNS-IV 药柱的发火性能验证。

1 爆炸箔芯片组件的设计与制备

1.1 Cu 桥箔电热仿真

研究表明通过减小桥箔截面积可以获得更高的爆发电流密度,根据电格尼能模型有利于获得更高的飞片速度,进一步依据撞击界面的冲击波关系式有利于获得更高的冲击压力^[10],本文设计的小尺寸 Cu 桥箔结构为: 200 $\mu\text{m}(l) \times 200\ \mu\text{m}(w) \times 3.6\ \mu\text{m}(h)$ 。

为了向桥箔传输短脉冲大电流,一般将桥箔设计成“蝴蝶领结”形状,通过桥箔两端焊盘施加脉冲高压,将会在桥箔引入成比例的脉冲电流。根据 EFI 的工作原理,桥箔的作用是将储存在脉冲高压电容器中的电能转化为飞片动能,为了提升驱动飞片的性能,桥箔应该均匀受热,进而同步发生电爆炸。因此,本文首先基于瞬态热传导方程,对 Cu 桥箔电热作用过程进行分析。

根据经验和测试结果,假设作用在 Cu 桥箔上的电流在 100 ns 内上升到 2 000 A,在 RLC 回路中短脉冲大电流为振荡形式,因此初始条件可以简化为一条正弦放电曲线:

$$I(t) = 2000 \sin(1.57 \times 10^7 t) \quad (1)$$

对确定尺寸的 Cu 桥箔开展电热仿真, 得到电热耦合作用过程的温度场分布结果, 见图 1。

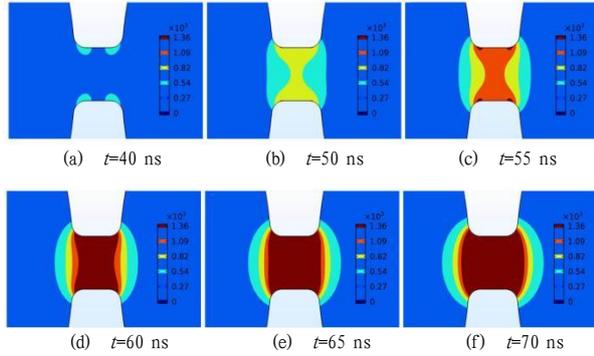


图 1 Cu 桥箔在 2 000 A/100 ns 下的电热仿真温度场云图
Fig.1 Electro-thermal simulation results of Cu bridge foil at 2 000 A/100 ns

由图 1 可知: (1) 在通电作用 40 ns 后, 桥箔 4 个拐角处率先出现微小温升; (2) 在拐角被加热后, 桥箔中间区域开始出现温升, 并且迅速向外扩展; (3) 随着短脉冲大电流的持续作用, 桥箔主体温度最终达到熔点 (1 358 K) 的时间不超过 70 ns, 温度场云图介于图 1(e)和图 1(f)之间。电热仿真结果表明桥箔主体熔化时间差值小, 受热近似均匀, 这预示着 Cu 桥箔几乎同步发生电爆炸, 有利于提升飞片的平面度和完整性。

1.2 PC 飞片冲击作用参数计算

在 EFI 中, 飞片材料通常选用薄膜状的高分子聚合物, 厚度介于十几微米至数百微米之间。本文采用聚氯代对二甲苯 (Parylene C, PC) 作为飞片材料, 厚度设计为 25 μm 。

根据冲击起爆准则, 飞片冲击起爆炸药的作用效果主要受 2 个因素的影响: 冲击压力 (p) 和冲击持续时间 (τ)。首先基于常用的电格尼能模型计算 PC 飞片速度:

$$v_f = \sqrt{\frac{2kJ_b^n}{1/3+R}} \quad (2)$$

式 (2) 中: v_f 为 PC 飞片的终了速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; k 、 n 为电格尼常数; R 为单位面积下飞片质量和桥箔质量之比; J_b 为爆发电流密度, $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

基于电格尼能模型计算 PC 飞片终了速度, 所需

的材料特性参数列于表 1。

表 1 求解飞片终了速度所需的材料特性参数

Tab.1 Material properties for the terminal flyer velocity

材料	密度 ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	厚度 δ (μm)	电格尼常数
Cu 桥箔	8.89	3.6	$k = 1.388 \times 10^{-9}$, $n = 1.192 \text{ 3}^{[11]}$
PC 飞片	1.286	25	-

假设当 Cu 桥箔电爆炸的爆发电流为 1 000 A 时可以实现药柱的冲击起爆, 此时 Cu 桥箔的爆发电流密度为 $1.39 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 结合桥箔和飞片结构参数, 获得 PC 飞片终了速度为 $3 \text{ 257 m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

进一步计算 PC 飞片冲击 HNS-IV 药柱产生的压力和持续时间。在冲击起爆过程, 对于 HNS-IV 药柱和 PC 飞片满足如下的冲击波关系式:

$$p_e = \rho_e(c_e + \lambda_e u_{p,e})u_{p,e} \quad (3)$$

$$p_f = \rho_f(c_f + \lambda_f u_{p,f})u_{p,f}$$

式 (3) 中: p_e 为飞片作用于药柱的压强, GPa; ρ_e 为 HNS-IV 药柱的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; c_e 和 λ_e 为炸药的 Hugoniot 参数; $u_{p,e}$ 为 HNS-IV 的质点速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; p_f 为药柱作用于飞片的压强, GPa; ρ_f 为 PC 飞片的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; c_f 和 λ_f 为飞片的 Hugoniot 参数; $u_{p,f}$ 为 PC 的质点速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在冲击界面处质点速度和冲击压力连续, 即:

$$u_p = u_{p,e} = v_f - u_{p,f}, p = p_e = p_f \quad (4)$$

式 (4) 中: v_f 为飞片速度, 由公式 (2) 计算得到, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于小尺寸薄飞片, 冲击持续时间 τ 可以采用如下公式近似计算:

$$\tau = \frac{2\delta_f}{u_{s,f}} \quad (5)$$

$$u_{s,f} = c_f + \lambda_f u_{p,f} \quad (6)$$

式 (5)~(6) 中: δ_f 为 PC 飞片厚度, 25 μm ; $u_{s,f}$ 为飞片中的冲击波速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

计算飞片冲击压力及其作用持续时间所需的材料特性参数见表 2。

表 2 求解飞片冲击压力及冲击持续时间所需的材料特性参数

Tab.2 Material properties for the flyer impact pressure and impact duration			
材料	密度 ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	c ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	λ
PC 飞片	1.286	2 228 ^[12]	1.37 ^[12]
HNS-IV 药柱	1.60	2 200 ^[13]	1.45 ^[13]

在依据电格尼能模型获得飞片终了速度 $3\,257\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的基础上, 联立公式 (3) 和 (4) 计算得到 $u_p=1\,499\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 进而得到 $p=10.49\text{ GPa}$ 、 $\tau=0.010\,8\text{ }\mu\text{s}$ 。

根据文献给定的冲击起爆判据^[14], 计算得到 $p^{2.76}\tau=7.07\text{ GPa}^{2.76}\mu\text{s}>5.39\text{ GPa}^{2.76}\mu\text{s}$ 。忽略飞片材料带来的影响, 由于理论能量大于临界起爆阈值, 所以理论上速度为 $3\,257\text{ m/s}$ 的 PC 飞片, 能够以超过 50% 的概率起爆 HNS-IV 药柱, 此时对应的桥箔爆发电流为 $1\,000\text{ A}$ 。

1.3 SU-8 加速膛结构确定

加速膛 (Barrel), 也称作炮筒, 通常为中空圆柱状, 是爆炸箔芯片的另一个关键组件。加速膛主要起到 3 个方面的作用: (1) 将 PC 薄膜剪切形成圆盘状飞片; (2) 为 PC 飞片提供加速通道; (3) 避免侧向稀疏波对飞片冲击压力造成衰减。为了实现上述目的, 要求加速膛具有锋利的刀刃 (硬度高) 和良好的筒体垂直度, 因此先前的研究主要选用蓝宝石、不锈钢、硅等材料作为加速膛。然而, 采用这些材料不利于通过 MEMS 技术实现爆炸箔芯片的批量制备, 为此选用具有高深宽比的 SU-8 光刻胶作为加速膛材料。

加速膛包含直径和高度 2 个特征参数。一方面, 为了充分利用 Cu 桥箔电爆能量, 要求 SU-8 加速膛能够完全包覆电爆区域, 并且有利于剪切形成飞片和限制飞片的飞行轨迹。根据前述 Cu 桥箔的电热仿真结果, 当加速膛直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 时, 能够精确包覆电爆区域。另一方面, 为了确保加速距离适合于飞片冲击起爆, 通常认为加速膛理论高度是飞片速度达到峰值时刻对应的高度, 这将有利于飞片以最大速度冲击药柱。相较常规爆炸箔芯片采用约 $400\text{ }\mu\text{m}$ 高度的加速膛, 由于本文采用小尺寸桥箔、薄飞片结构, 具有更好的加速性能, 因此结合测速结果减薄加速膛高度至 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.4 爆炸箔芯片的批量制备

MEMS 是一种集成了薄膜、光刻、刻蚀和精密机械加工等技术的电子机械器件。本文采用非硅 MEMS 加工工艺, 在陶瓷基底表面一体化批量制备爆炸箔芯片, 整体制备流程见图 2。

由图 2 可知, 根据芯片组件划分了包括磁控溅射

工艺制备 Cu 薄膜、光刻工艺实现 Cu 桥箔图形化、化学气相沉积 PC 飞片层以及光刻工艺制作 SU-8 加速膛在内的 4 个主要制备步骤。相较传统手工对正组装单只芯片的工艺, 通过 MEMS 集成工艺极大提升了爆炸箔芯片的制备效率。

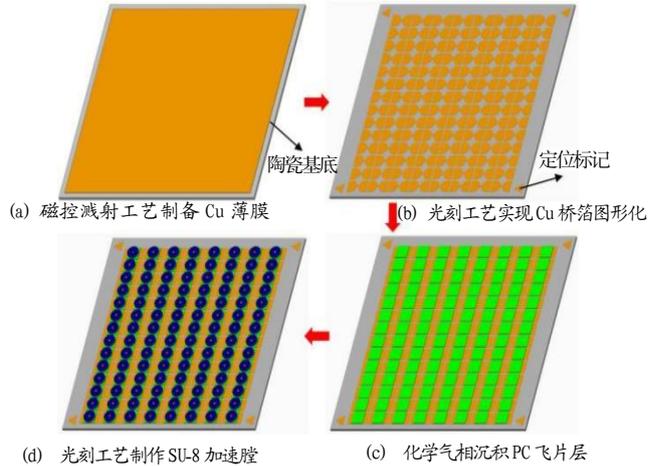


图 2 MEMS 爆炸箔芯片批量制备流程

Fig.2 Batch preparation processes of MEMS exploding foil chips

采用 MEMS 工艺批量制备获得的爆炸箔芯片样品及激光共聚焦下的加速膛形貌如图 3 所示。

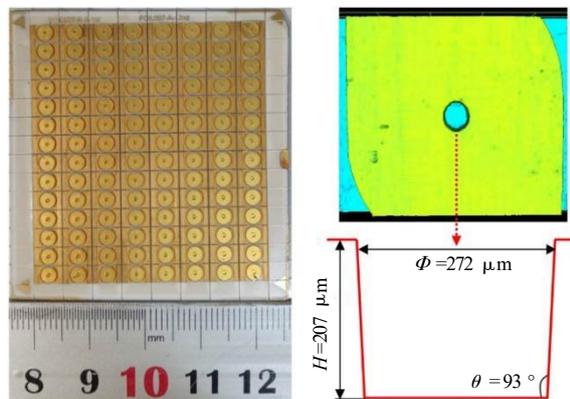


图 3 MEMS 爆炸箔芯片阵列照片及激光共聚焦拍摄的加速膛结构

Fig.3 Photo of MEMS exploding foil chip array and SU-8 barrel structure captured by laser confocal microscopy

由图 3 可知, 采用 MEMS 工艺实现了爆炸箔芯片批量制备, 对阵列芯片切片后即可获得芯片单体, 样品一致性好; SU-8 加速膛孔中无杂质、侧壁光滑、垂直度高、形貌清晰, 为飞片提供了良好的加速通道, 实测加速膛直径为 $272\text{ }\mu\text{m}$, 略小于理论设计值, 高度为 $207\text{ }\mu\text{m}$, 满足设计值。

2 爆炸箔芯片的发火性能

2.1 桥箔电爆特性

为了测试 Cu 桥箔电爆特性以及爆炸箔芯片性能,组建了电爆特性测试平台,如图 4 所示。测试平台主要包括电容放电单元和电爆特性测试仪器,其中电容放电单元由脉冲高压电容器 ($C=0.22 \mu\text{F}$)、脉冲高压开关和 Cu 桥箔组成,电爆特性测试仪器记录桥箔两端电压和回路放电电流,获取不同放电条件下桥箔的电爆特性参数,由高压差分探头、Rogowski 线圈和多通道数字示波器组成。

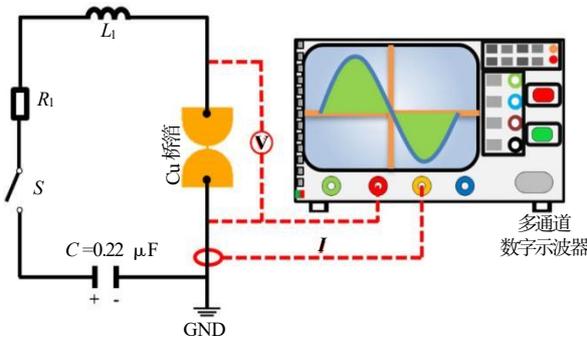


图 4 Cu 桥箔电爆特性测试平台

Fig.4 Test device for the electrical-explosion characteristic parameters of Cu bridge foil

在 750~1 500 V 放电电压条件下,测试得到 Cu 桥箔的典型电爆特性曲线,见图 5。

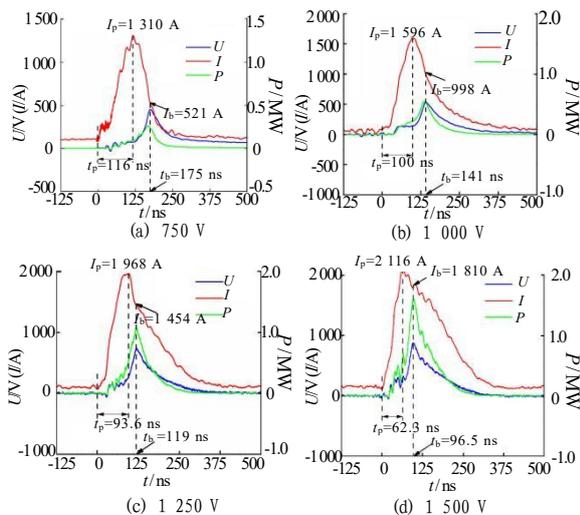
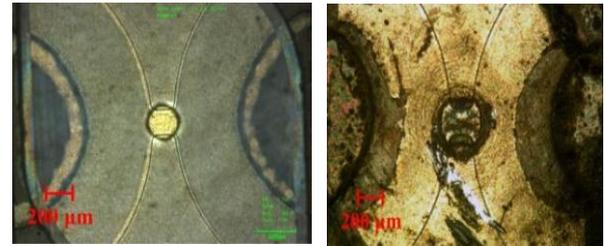


图 5 不同放电电压下 Cu 桥箔典型电爆特性曲线

Fig.5 Typical electrical-explosion curves of Cu bridge foil under different discharge voltages

由图 5 可知:(1)随着放电电压升高,峰值电流时间和爆发时间逐渐提前,爆发电流逐渐升高,有利于提升飞片速度和冲击作用压力;(2)在 0.22 $\mu\text{F}/1\ 000\ \text{V}$ 放电条件下,测试爆发电流 $I_b=998\ \text{A}$,计算得到对应爆发电流密度 $J_b=1.39 \times 10^8\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,可确保桥箔完全电爆炸,如图 6 所示。



(a) 电爆前 (b) 电爆后

图 6 桥箔电爆炸前后的显微照片

Fig.6 Micrographs of bridge foil before and after electrical-explosion

根据电爆特性曲线,进一步处理获得电爆特性参数,见表 3。结果表明:(1)随着放电电压的升高,峰值电流时间和爆发时间缩短,峰值电流、爆发电压、爆发电流、爆发功率和爆发能量都呈现升高趋势;(2)随着放电电压的升高,导致桥箔电爆后剩余储能增多,能量利用率减小;(3)通过减小桥箔截面积,能够在低放电电压下获得高爆发电流密度,根据电格尼能模型有利于获得高速飞片,进一步依据撞击界面的冲击波关系式有利于获得高冲击压力。

表 3 不同放电电压下 Cu 桥箔的典型电爆特性参数

Tab.3 Typical electrical-explosion parameters of Cu bridge foil under different discharge voltages

R_F /m Ω	U_0 /V	t_p /ns	I_p /A	t_b /ns	U_b /V	I_b /A	P_b /MW	E_b /mJ	η /%
30	750	116	1 310	175	453	521	0.24	14.2	22.9
	1 000	100	1 596	141	538	998	0.54	25.1	22.8
	1 250	93.6	1 968	119	755	1 454	1.10	34.2	19.9
	1 500	62.3	2 116	96.5	882	1 810	1.60	43.5	17.6

注: R_F 为平均桥箔初始电阻; U_0 为初始电容电压; t_p 为峰值电流时间; I_p 为峰值电流; t_b 为爆发时间; U_b 为爆发电压; I_b 为爆发电流; P_b 为爆发功率; E_b 为爆发能量; η 为能量利用率。

2.2 飞片实时速度

采用 PDV 技术测试 MEMS 爆炸箔芯片 PC 飞片实时速度。在 750~1 500 V (0.22 μF) 放电条件下获得的飞片速度见图 7。

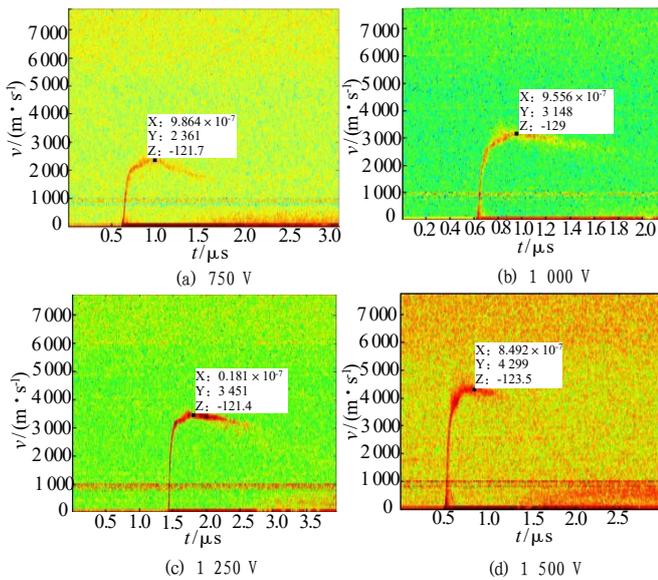


图 7 不同放电电压下 PDV 系统输出的 PC 飞片实时速度
Fig.7 Real-time velocities of PC flyer recorded by PDV system under different discharge voltages

由图 7 可知: (1) 整体而言, 基于小尺寸桥箔结构, 在较低放电电压下就能够获得较高的飞片速度, 并且随着放电电压升高, 爆发电流逐渐升高, 相应的峰值速度逐渐升高; (2) 在 $0.22 \mu\text{F}/1000 \text{V}$ 放电条件下, 爆发电流 $I_b=998 \text{A}$ (表 3), 与前述计算飞片终了速度取值 1000A 相当, 并且据此计算获得的 PC 飞片终了速度为 $3257 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与实测速度 $3148 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 相当, 表明基于电格尼模型计算飞片终了速度切实可行。

采用图像处理软件对 PDV 输出的原始图像做进一步处理, 获得不同放电条件下飞片加速历程的速度细节, 积分获得加速位移, 如图 8 所示。

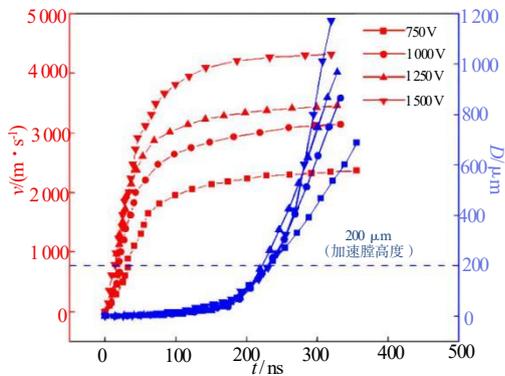


图 8 数据处理后的飞片速度与加速位移历程
Fig.8 Flyer velocity and its acceleration displacement histories after data processing

由图 8 可知: (1) 飞片速度曲线具有明显拐点, 加速度发生本质变化, 将曲线分为快速增长阶段和慢速增长阶段, 高加速阶段驱动飞片的主动动力是冲击波, 低加速阶段驱动飞片的主动动力变为等离子体膨胀做功^[15]; (2) 在 750, 1000, 1250, 1500 V 放电电压下, 飞片出加速腔口的速度分别约为 $2282 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应 231 ns)、 $3033 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应 231 ns)、 $3360 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应 220 ns)、 $4257 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应 233 ns), 分别为最大速度的 96.7%、96.3%、97.4%、99.0%, 结果表明飞片出加速腔口后能够以接近峰值速度撞击药柱, 有利于实现飞片冲击着火。

2.3 爆炸箔芯片冲击起爆性能

MEMS 集成爆炸箔芯片冲击着火试验装置原理如图 9 所示。

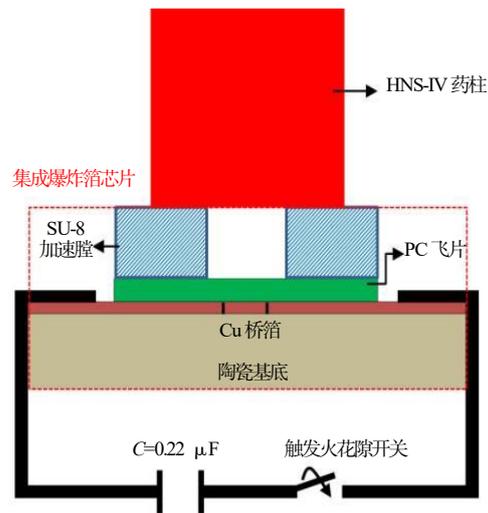


图 9 MEMS 集成爆炸箔芯片冲击着火试验装置原理图
Fig.9 Schematic diagram of test device for impact ignition of MEMS integrated exploding foil chip

在冲击起爆试验中, 脉冲陶瓷高压电容为 $0.22 \mu\text{F}$, 回路等效电阻为 $141.6 \text{m}\Omega$, 等效电感为 37.9nH ^[16], HNS-IV 药柱密度为 $1.60 \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、尺寸为 $\Phi 4.0 \text{mm} \times 4.0 \text{mm}$ 。在起爆试验前将铝鉴定块紧贴在炸药柱输出端表面, 以测定其轴向输出能力, 在 $0.22 \mu\text{F}/100 \text{V}$ 最低发火条件下, 连续成功起爆 3 发 HNS-IV 药柱, 铝块凹痕直径约为 5mm 、深度约为 0.76mm , 药柱实现完全爆轰。发火试验结果表明: 依据“桥箔电爆-飞片加速-冲击炸药”的界面能量耦合关系, 优化爆炸箔芯片的组件结构参数, 能够提高

飞片速度, 最终获得低能发火集成爆炸箔芯片。

3 结论

(1) 为了提升飞片速度和 EFI 的发火感度, 依据 EFI 工作原理, 通过对 Cu 桥箔、PC 飞片和 SU-8 加速膛开展理论设计, 确定了小尺寸桥箔爆炸箔芯片的结构参数, 进一步采用 MEMS 工艺实现了爆炸箔芯片的批量制备。

(2) 开展了爆炸箔芯片性能验证试验, 获得了不同放电电压下桥箔的电爆特性参数以及飞片实时速度, 电爆特性结果表明通过减小桥箔截面积, 有利于提升爆发电流密度, 测速结果验证了基于小尺寸桥箔结构在较低放电电压下就能够获得较高的飞片速度, 并且在加速膛出口处飞片速度达到其峰值速度的 96% 以上。

(3) 冲击发火试验验证了小尺寸桥箔结构爆炸箔芯片能够降低发火能量, 提升冲击起爆感度, 最低发火能量为 $0.22 \mu\text{F}/100\text{V}$ 。

参考文献:

- [1] Varosh R. Electric detonators: EBW and EFI[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21(3): 150 - 154.
- [2] 郭菲, 施志贵, 蒋小华, 等. 硅集成爆炸箔组件起爆 HNS-IV 试验研究[J]. 火工品, 2009(6): 5-7.
- [3] Desai A. Efficient exploding foil initiator and process for making same: US, 07938065 B2[P]. 2011-05-10.
- [4] 曾庆轩, 郑志猛, 吕军军. 冲击片雷管集成制造方法研究[J]. 火工品, 2012(5): 1-3.
- [5] 房旷, 陈清畴, 贺思敏, 等. 一种原位集成冲击片组件的制备及飞片驱动性能[J]. 含能材料, 2016, 24(1): 101-105.
- [6] 李可为, 褚恩义, 薛艳, 等. 基于非硅微制造工艺的爆炸箔起爆器研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 261-266.
- [7] 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.
- [8] Zhu P, Chen K, Xu C, et al. Development of a monolithic micro chip exploding foil initiator based on low temperature co-fired ceramic[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018 (276): 278-283.
- [9] Yang Z, Zhu P, Chu Q, et al. A micro-chip exploding foil initiator based on printed circuit board technology[J]. Defence Technology, 2022, 18(8): 1 435-1 444.
- [10] Chen Q, Fu Q, Chen L, et al. Parametric influences on the sensitivity of exploding foil initiators[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(4): 558-562.
- [11] 陈军, 王治平, 李涛. 小尺寸电爆炸箔推动飞片运动速度的经验计算[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 463-466.
- [12] May C M, Tarver C M. Modeling short shock pulse duration initiation of LX-16 and LX-10 charges[R]. LLNL-PROC-414030, 2009.
- [13] Ebenhöch S, Nau S, Häring I. Validated model-based simulation tool for design optimization of exploding foil initiators[J]. Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2014, 12(2): 189-207.
- [14] 同红海, 奥成刚, 韩克华, 等. 超细 HNS-IV 炸药的窄脉冲起爆判据研究[J]. 火工品, 2011(2): 32-36.
- [15] 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.
- [16] Yang Z, Wang K, Zhu P, et al. A reusable planar triggered spark-gap switch batched-fabricated with PCB technology for medium- and low-voltage pulse power systems[J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1 572-1 578.