

文章编号:1006-9941(2019)06-0448-08

## 低温共烧陶瓷爆炸箔起爆芯片的设计、制备与发火性能

张秋<sup>1</sup>,陈楷<sup>2</sup>,朱朋<sup>1</sup>,徐聪<sup>1</sup>,覃新<sup>1</sup>,杨智<sup>1</sup>,沈瑞琪<sup>1</sup>

(1.南京理工大学化工学院,江苏南京210094;2.北京宇航系统工程研究所,北京100076)

**摘要:** 采用低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC)工艺实现了爆炸箔起爆芯片的一体化集成制备。采用丝网印刷的方式制备了厚度为5 μm的Au桥箔(300 μm×300 μm);采用25 μm和50 μm两种厚度的生瓷片作为爆炸箔起爆芯片的飞片,设计了圆形(Φ=400 μm)和方形(L×W=300 μm×300 μm)的两种加速膛形状的爆炸箔起爆芯片。在0.22 μF电容放电条件下,研究了Au桥箔的电爆性能。通过光子多普勒测速技术分析了陶瓷飞片的速度特征及其运动过程中的形貌。结果表明,在发火电压1.8 kV下,Au桥箔的能量利用率最大;飞片的终态速度随着发火电压的增加而增大;在相同的发火条件下,飞片经方形加速膛加速后的出口速度比圆形加速膛高出106~313 m·s<sup>-1</sup>;另外,陶瓷飞片越厚,飞片在飞行过程中的运动形貌保持得越完整。该工艺制备的爆炸箔起爆芯片可成功点燃硼/硝酸钾(BPN)点火药,并起爆六硝基芪(HNS)炸药。LTCC爆炸箔起爆芯片(50 μm厚陶瓷飞片,圆形加速膛)的最小点火电压为1.4 kV,最小起爆电压为2.5 kV。

**关键词:** 低温共烧陶瓷(LTCC);爆炸箔起爆芯片;Au桥箔;陶瓷飞片

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018338

### 1 引言

爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator, EFI)<sup>[1]</sup>是一种典型高安全性和高可靠性的B类火工品,主要用于起爆钝感炸药和点燃固体火箭发动机推进剂。EFI中的换能元,即爆炸箔,不与始发装药接触,因此具有良好的耐射频、静电以及电磁环境的能力,应用前景广阔<sup>[2-6]</sup>。传统的EFI采用分离式组件装配方式,EFI的体积大且集成度低;小尺寸的EFI组件对装配精度要求较高,制造成本高,难以实现批量化生产。因此,简化制备工艺、降低生产成本,实现EFI的小型化、集成化和批量化制造是近年来爆炸箔起爆器的重要发展趋势。

付秋波等<sup>[7]</sup>采用磁控溅射和光刻技术加工了不同

尺寸的爆炸箔,获得了爆炸箔厚度和桥区尺寸对冲击片雷管飞片速度的影响,同时研究了小尺寸爆炸箔与加速膛匹配的关系。Amish Desai<sup>[8]</sup>采用光刻技术依次将Cu箔和飞片形状刻蚀出来,并利用SU-8胶通过前烘、曝光、显影等工艺制作出加速膛,从而将桥箔、飞片和加速膛集成在一起,实现大规模批量制造。曾庆轩等<sup>[9]</sup>利用光固化的环氧树脂制作成加速膛,将聚酰亚胺(PI)飞片、爆炸箔和玻璃基底与加速膛集成在一起,结果表明环氧树脂加速膛能够剪切聚酰亚胺薄膜形成飞片。房旷等<sup>[10]</sup>利用化学气相沉积(CVD)制备了聚氯代对二甲苯(PC)飞片,并利用光刻法原位集成了SU-8加速膛;对比了常规方法制造的PI飞片与PC飞片的加速历程,结果表明两组加速历程基本一致。李可为等<sup>[11]</sup>制备了基于非硅MEMS技术的爆炸箔起爆器,试验了起爆器组件的耐高温性能,结果表明,在160℃下经历50 h后,该起爆器组件依然可以正常起爆IV型六硝基芪(HNS)药柱。陈楷等<sup>[12-13]</sup>采用MEMS工艺,结合CVD和磁控溅射技术制备了PC/Cu的复合飞片,通过紫外光刻工艺制备了SU-8加速膛,实现了爆炸箔起爆器的集成制备。徐聪等<sup>[14]</sup>通过磁控溅射、化学沉积和紫外光刻等MEMS技术首

收稿日期:2018-12-06;修回日期:2019-01-17

网络出版日期:2019-04-09

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20151486)

作者简介:张秋(1993-),女,在读博士,主要从事爆炸箔技术研究。e-mail:qiuzhang0817@foxmail.com

通信联系人:朱朋(1978-),男,博导,副研究员,主要从事先进火工品技术研究。e-mail:zhupeng@njust.edu.cn

引用本文:张秋,陈楷,朱朋,等.低温共烧陶瓷爆炸箔起爆芯片的设计、制备与发火性能[J].含能材料,2019,27(6):448-455.

ZHANG Qiu, CHEN Kai, ZHU Peng, et al. Design, Fabrication and Ignition Performance of LTCC Exploding Foil Initiation Chip[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(6):448-455.

次将肖特基单触发开关与爆炸箔芯片集成为一体,结果表明该集成芯片可成功起爆 HNS 的最小电压为 1.4 kV。朱朋等<sup>[15]</sup>采用 LTCC 工艺设计制备了微芯片爆炸箔起爆器 (McEFI), 实现了爆炸箔起爆器一体化、批量化和低成本加工, 并利用 McEFI 芯片成功起爆了 HNS。以上研究表明, 目前的爆炸箔起爆器多采用 MEMS 加工方式, 加工工艺繁琐, 操作复杂。为进一步简化爆炸箔起爆器制备流程, 解决传统 MEMS 加工过程中复杂的曝光、对位和键合等问题, 提高生产效率, 降低生产成本, 实现 EFI 集成化、批量化制造, 本研究采用低温共烧陶瓷 (Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC) 一体化的加工工艺, 将爆炸箔起爆器基本结构与现阶段成熟的 LTCC 技术相结合, 设计了 LTCC 爆炸箔起爆芯片 (LTCC-Exploding Foil Initiation chip, LTCC-EFIc)。从而实现了基底、桥箔、飞片、加速膛等组件一体化烧结制备。利用光子多普勒速度测试技术 (Photon Doppler Velocimetry, PDV), 研究发火电压、加速膛形状对飞片速度的影响规律, 以及陶瓷飞片的厚度对其飞行过程中形貌的影响。并进行了点燃硼/硝酸钾 (BPN) 药柱和起爆六硝基芪 (HNS) 药柱的实验, 验证了 LTCC 工艺制备起爆芯片的可行性。

## 2 LTCC 爆炸箔起爆芯片的设计与制备

### 2.1 LTCC 爆炸箔起爆芯片设计

LTCC 技术是集互联、无源元件和封装于一体的多层电路印制板技术。其技术特征是: 将多层陶瓷元件技术与多层电路图形技术相结合, 以玻璃/陶瓷等材料作为电路的介电层, 应用 Au、Ag、Cu 等高导电率金属作为内外层电极材料, 以丝网印刷方式印制电路, 在低于金属熔点约 900 °C 的烧结炉中烧结而成的陶瓷元件或基板<sup>[16]</sup>。

图 1 为本研究设计的 LTCC-EFIc。其中, 芯片的基底、飞片、加速膛结构均采用生瓷带材料堆叠而成, 选用 Au 作为桥箔材料, 金属导带与桥箔材料相同。由于 Au 烧结后不易焊接, 因此我们在裸露于空气中的金属导带的上面再次丝网印刷一层 Pd / Ag 材料, 便于后期焊接封装。

根据爆炸箔起爆器的小型化, 集成化的发展需求, 设计了两种桥箔参数桥箔长宽高为  $L \times W \times H = 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ , 厚度为 25~50  $\mu\text{m}$  的生瓷片作为 LTCC-EFIc 的飞片。加速膛尺寸设计为圆形和方

形两种, 高度  $H = 300 \mu\text{m}$ ; 其中, 圆形加速膛的直径为桥区长度的  $\sqrt{2}$  倍, 方形加速膛的边长与桥区长度相同。两种 LTCC-EFIc 具体尺寸参数见表 1。

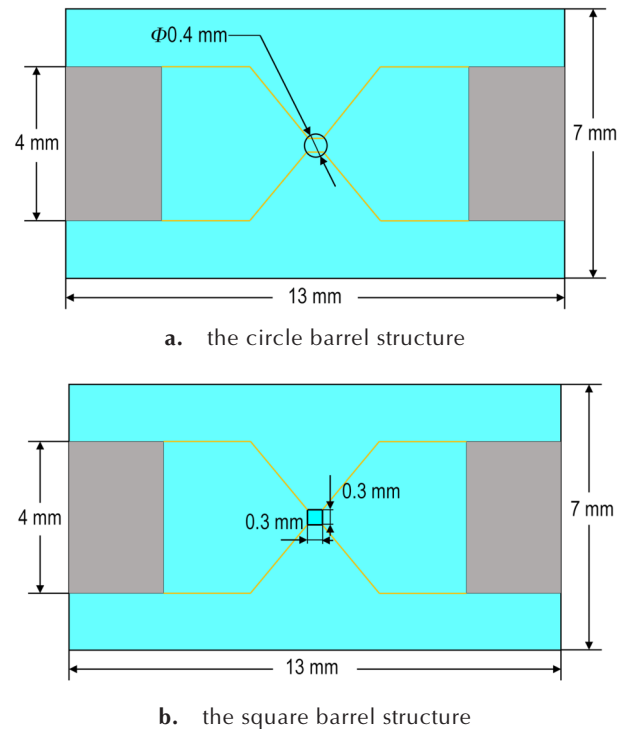


图 1 两种 LTCC-EFIc 结构示意图

Fig.1 Structure diagram of two kinds of LTCC-Exploding Foil Initiation chip (LTCC-EFIc)

表 1 LTCC-EFIc 尺寸参数

Table 1 The dimensional parameter of LTCC-EFIc

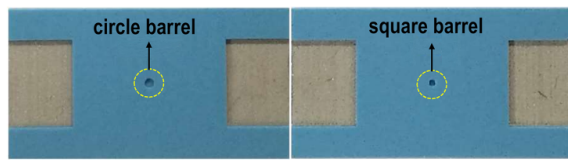
| structure   | parameter / $\mu\text{m}$  |
|-------------|--|
| bridge foil | $L \times W \times H = 300 \times 300 \times 5$  |
| barrel      | $\Phi \times H = 400 \times 300$ (circle) or<br>$L \times W \times H = 300 \times 300 \times 300$ (square) |
| flyer       | $H = 25$ or $50$   |
| Au strip    | $H = 8-12$   |
| Pd/Ag pad   | $H = 12-15$  |

Note:  $L$  is length.  $W$  is width.  $H$  is thickness.  $\Phi$  is diameter of a circle.

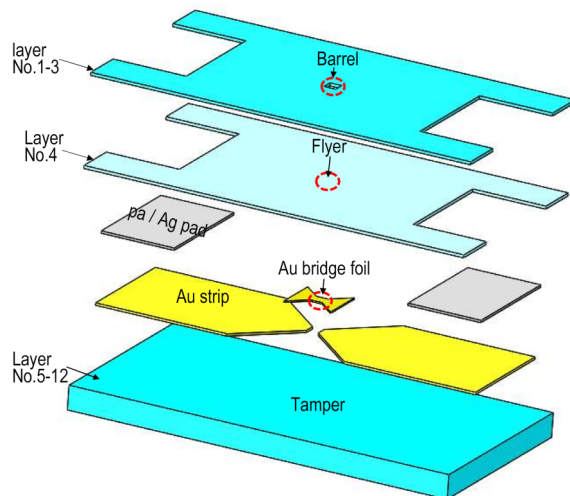
### 2.2 LTCC 爆炸箔起爆芯片制备

LTCC-EFIc 制备的工艺流程主要为: 贴片、冲孔、印刷、叠压、共烧、划片、检测、焊接和封装。图 2 为 LTCC-EFIc 的实物图及结构示意图。1~3 层与 5~12 层均采用 DP951-PT 生瓷片, 生瓷片烧结前每层厚度为 114  $\mu\text{m}$ 。其中 1~3 层为加速膛层, 5~12 层作为

LTCC-EFIC的基底。第4层作为飞片层,选用厚度为50 μm的DP951-C2生瓷片。



a. the optical figure



b. the schematic diagram

图2 LTCC-EFIC的实物图及结构示意图

Fig.2 The optical figure and schematic diagram of LTCC-EFIC

在140 mm×140 mm的生瓷片上,按阵列排布EFI单体版图后,在焊盘和加速膛所对应的位置依次对生瓷片做冲空孔处理;同时第5层陶瓷生片上,采用丝网印刷工艺依次印刷相应厚度的金属图形,包括金属导带、爆炸桥箔以及焊盘。其中,金属导带厚度为8~12 μm,爆炸桥箔厚度约为4~6 μm, Pd / Ag焊盘部分厚度12~15 μm,印刷完成后将生瓷片放入烘箱烘干。将所有图形印制完成的生瓷片按照图层顺序依次叠放、校位,并用等静压力机压实。然后将叠压好的基板放入共烧炉内,在900 °C下进行烧结。最后对基板划片、检测,从而实现LTCC-EFIC的一体化集成制备。

### 3 LTCC爆炸箔起爆芯片发火性能

LTCC-EFIC的作用过程如下:当一个脉冲大电流通过Au桥箔后,剧烈的焦耳热沉积使得桥箔的物理状态发生急剧的变化,桥箔经历从固、液、气再到高温高

压等离子体的四态变化而发生电爆炸。随后高温高压等离子体以一个极高的压力(兆帕数量级)作用在陶瓷飞片上,并在加速膛的限定下驱动飞片运动。飞片在加速膛内加速,最终以几千米每秒的速度被剪切出来。高速运动的飞片撞击下一级目标装药,从而实现点火或起爆。因此,研究LTCC-EFIC的桥箔电爆特性和飞片运动历程对于实现其点火或起爆功能具有重要意义。

#### 3.1 电爆性能

选用0.22 μF电容和冷阴极触发管,在不同发火电压下对Au桥箔(300 μm×300 μm×5 μm)进行电爆测试。实验电路如图3所示。利用高压差分探头和罗氏线圈采集桥区两端的电流和电压信号,将所得信号通过示波器进行储存记录。

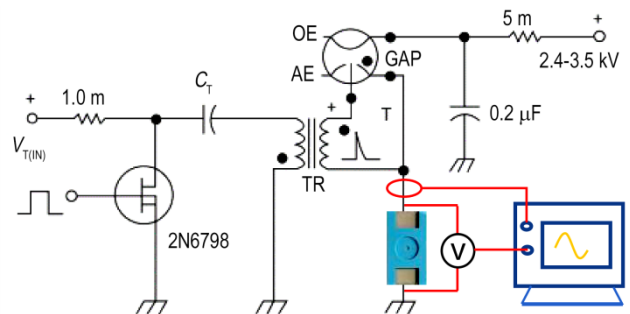


图3 LTCC-EFIC测试电路图

Fig.3 The test circuit of LTCC-EFIC

在不同的发火条件下对LTCC-EFIC进行电爆实验,桥箔电爆炸的性能参数(爆发电流、峰值电压、爆发时间、能量利用率等)三次平行实验结果的平均值记录于表2,其中桥箔的回路能量利用率<sup>[17]</sup>见公式(1):

$$\eta_1 = \frac{2 \int_0^{t_b} U \cdot I dt}{CU_0^2} \quad (1)$$

式中, C为电容容值, F;  $U_0$ 为发火电压, V;  $t_b$ 为爆发点时刻, s。国内外研究学者通常把电压峰值时刻作为桥箔的爆炸时刻。

从表2可知,随着发火电压的增加,芯片两端的爆发电流和峰值电压均呈逐渐增加的趋势。理想状态下,桥箔爆炸时刻应尽可能接近电流峰值,即当电压峰值与电流峰值一致时,桥箔的能量利用率( $\eta_1$ )最大。图4为芯片的电流、电压曲线,及由电流、电压的乘积所得的桥箔功率曲线。图4中桥箔爆发点时刻下的电流、电压和功率,以及桥箔爆发能量(桥箔功率对爆发点时刻前的时间积分)均记录在表2中。由图4可见在1.8 kV / 0.22 μF的发火电压下,芯片的峰值电压、

表 2 Au 桥箔电爆参数

Table 2 The parameters of electric explosion of the Au bridge foil

| firing voltage / kV | Resistance / mΩ | current of burst / A | peak voltage / V | power of burst / MW | energy of burst / mJ | energy utilization ratio $\eta_1$ / % |
|---------------------|-----------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1.8                 | 60              | 1733                 | 943              | 1.65                | 143                  | 40.12                                 |
| 2.0                 | 57              | 1843                 | 1051             | 1.94                | 154                  | 35.00                                 |
| 2.2                 | 59              | 1971                 | 1196             | 2.36                | 179                  | 33.62                                 |
| 2.4                 | 60              | 1993                 | 1318             | 2.63                | 171                  | 26.99                                 |
| 2.6                 | 61              | 2177                 | 1416             | 2.79                | 181                  | 24.34                                 |

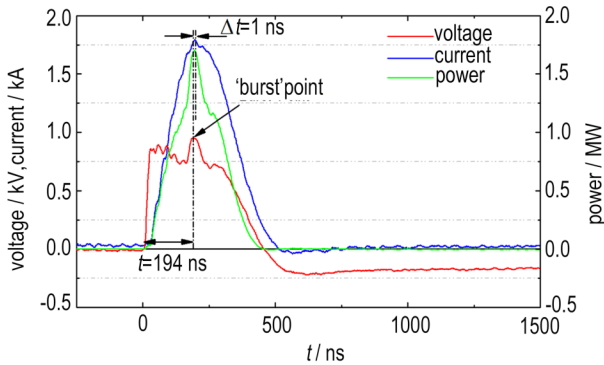


图 4 1.8 kV / 0.22 μF 发火电压下 Au 桥箔电流、电压和功率曲线  
Fig. 4 The current, voltage and power curves of the Au bridge foil at 1.8 kV / 0.22 μF firing voltage

峰值电流时间差仅为 2 ns, 电压峰值与电流峰值几乎重合在一起, 能量利用率为 40.12% 达到最大。

### 3.2 陶瓷飞片速度特征及运动形貌分析

飞片的速度和完整性是冲击起爆的关键指标。因此, 本研究中采用课题组自主研发的 PDV 系统, 对 LTCC-EFIC 的陶瓷飞片的加速历程进行了研究, 包括飞片速度特征及其在运动过程中的形貌。采用 1550 nm 波长半导体激光器辐射的激光作为光源, 干涉信号的频率 1.29 MHz 对应 1 m · s<sup>-1</sup> 运动速度。PDV 系统原理图如图 5 所示。

PDV 利用光学多普勒效应进行速度测量, 以自激光探头表面的反射光作为参考光, 飞片表面反射回来的激光作为信号光, 使两次反射光发生干涉后, 利用探测器检测参考光和信号光的差拍干涉信号, 利用半导体光电转换器实现光信号到电信号的转换, 并由数字示波器采集记录电信号, 最后通过快速傅里叶变换处理, 可获得陶瓷飞片的速度历程。

#### 3.2.1 发火电压对飞片速度的影响

选用桥箔尺寸为 300 μm × 300 μm × 5 μm、飞片厚度为 50 μm 且加速膛尺寸为圆形的 Φ=400 μm、H=300 μm 的 LTCC-EFIC, 利用 PDV 测速系统, 测量在不同的发火电压下飞片的速度, 数据处理后可获得如

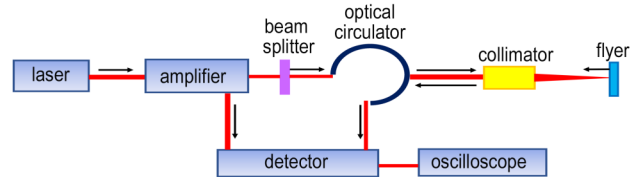


图 5 PDV 系统原理图  
Fig. 5 The schematic diagram for PDV system

图 6 所示的在不同发火电压下, 飞片的速度-时间曲线以及飞片的位移-时间曲线。其中, 飞片的能量利用率按公式(2)计算, 表示飞片动能与回路中总能量之比:

$$\eta_2 = \frac{mv^2}{CU_0^2} \quad (2)$$

式中,  $m$  为飞片的质量, kg;  $v$  为飞片飞出加速膛出口时的速度, m · s<sup>-1</sup>。

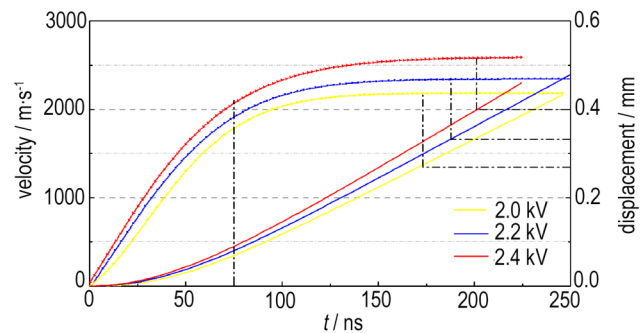


图 6 在不同发火电压下的陶瓷飞片速度-时间曲线与位移时间曲线  
Fig. 6 The velocity-time curves and displacement-time curves of ceramic flyer under different firing voltages

由图 6 可知, 在加速膛尺寸相同的条件下, 飞片的速度和加速度均随着发火电压的增大呈增加趋势, 将飞片的速度-时间曲线进行积分, 从而得到飞片的位移-时间曲线。在起始的 75 ns 处, 三组试验的飞片速度-时间历程上均出现拐点, 加速度明显减小; 此时飞片速度分别加速到了 1787~1920 m · s<sup>-1</sup> 和 2066 m · s<sup>-1</sup>, 达到了最大速度的 80%~82% 左右, 在

随后的加速过程中,三组试验的飞片速度上升较为缓慢,并在后续的 90 ns 内逐渐加速到其最大速度。

表 3 为不同发火电压下的陶瓷飞片速度等参数以及飞片的能量利用率。从表 3 可知,在发火电压为 2.0 kV 时,飞片加速到其最大速度的位移小于加速膛的高度  $H=300\ \mu\text{m}$ ,即飞片飞出加速膛口时,速度已达到最大值;但当发火电压大于 2.0 kV 时,飞片在加速膛出口处的速度尚未达到最大。分析其原因:随着发

火电压的升高,桥箔的电爆程度越剧烈,产生的高温高压等离子体的数量越多,对飞片的驱动力越大,使得飞片在加速膛出口处的速度尚未达到其峰值;但是由于飞片速度的提高所带来的飞片动能的增加不足以弥补总能量的损耗,因此在 2.0 kV 的发火电压下,飞片的能量利用率最大。在实验过程中,可以通过适当提高加速膛的高度或降低发火电压,来确保飞片以其最大的速度飞出加速膛口,从而保证飞片能量的最大利用。

表 3 不同发火电压下陶瓷飞片速度等参数

Table 3 The parameters of ceramic flyer under different firing voltages

| firing voltage / kV | acceleration time / ns | acceleration distance / $\mu\text{m}$ | maximum velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | energy utilization ratio / % |
|---------------------|------------------------|---------------------------------------|---|------------------------------|
| 2.0                 | 173                    | 274                                   | 2178  | 11.36                        |
| 2.2                 | 187                    | 331                                   | 2340  | 10.78                        |
| 2.4                 | 201                    | 401                                   | 2583  | 10.92                        |

### 3.2.2 加速膛形状对飞片速度的影响

对于小尺寸飞片的爆炸箔起爆器而言,驱动飞片运动的作用力,主要来源于桥箔电爆炸产生的等离子体膨胀的热压力。因此,桥箔电爆产生的等离子体的密度分布,将会影响等离子体内的压力分布,继而会对飞片的速度产生间接影响<sup>[18]</sup>。而加速膛在 EFI 作用过程中主要起着剪切飞片和约束等离子体的作用,国内关于加速膛形状对 EFI 飞片速度的影响方面的研究较少。因此,在本小节中,选择桥箔尺寸为  $300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ 、飞片厚度为  $50\ \mu\text{m}$  厚的 LTCC-EFIc 测试,研究了两种加速膛形状:  $\Phi=400\ \mu\text{m}$  圆形加速膛,以及  $L\times W=300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}$  方形加速膛对飞片速度的影响规律,结果见表 4。

表 4 加速膛形状对陶瓷飞片速度的影响

Table 4 Effects of barrel shape on the velocity of ceramic flyer

| firing voltage / kV | velocity of ceramic flyer / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |  |
|---------------------|--|--|
|                     | circle barrel<br>( $\Phi=400\ \mu\text{m}$ )             | square barrel<br>( $L\times W=300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}$ ) |
| 2.0                 | 2178   | 2314   |
| 2.2                 | 2340   | 2653   |
| 2.4                 | 2583   | 2689   |

由表 4 中可知,飞片经方形加速膛加速后的出口速度,比圆形加速膛高出  $106\sim 313\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当发火电压为 2.2 kV 时,两种加速膛尺寸下的飞片速度时间曲线和位移时间曲线如图 7 所示。从表 4 和图 7 可以得知:在相同的条件下,圆形加速膛的起始加速度更高;而方形加速膛的终态速度更大。分析其原因主要为:

对于方形加速膛来说,加速膛在等离子体的作用下将飞片沿其边缘均匀剪切,飞片的形状被精确地限定与桥箔形状相同,保证了飞片上应力分布均匀,以及飞片在整个飞行过程中的平稳性,从而使飞片有较高的终态速度;而对于圆形加速膛来说,加速膛直径与桥箔外切,且桥箔电爆区域与飞片区域不匹配,因此飞片在形成过程中,仅受到桥箔与加速膛重叠边缘处的约束,使得飞片在初始阶段有较高的加速度;但由于飞片未能完全沿加速膛边缘剪切,飞片在加速过程中会受到空气的稀疏波对等离子体强度的削弱,使得电爆炸所产生的等离子体膨胀压力迅速衰减,从而表现出飞片起始加速度高但终态速度低的现象。

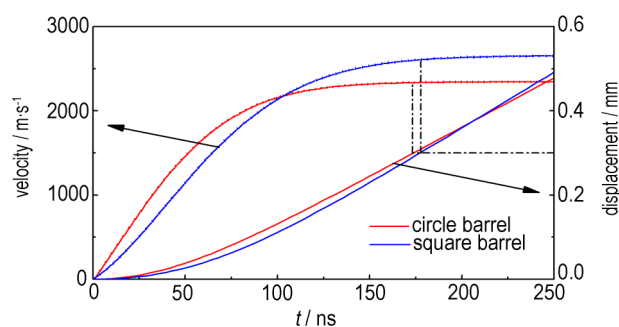


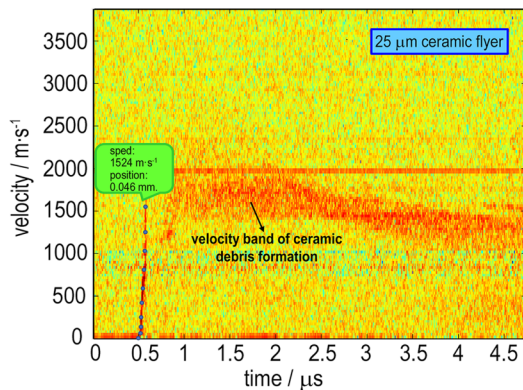
图 7 两种加速膛下的陶瓷飞片的速度-时间曲线和位移-时间曲线(2.2 kV / 0.22  $\mu\text{F}$ )

Fig. 7 The velocity-time curves and displacement-time curves of ceramic flyer under two kinds of barrel at 2.2 kV / 0.22  $\mu\text{F}$

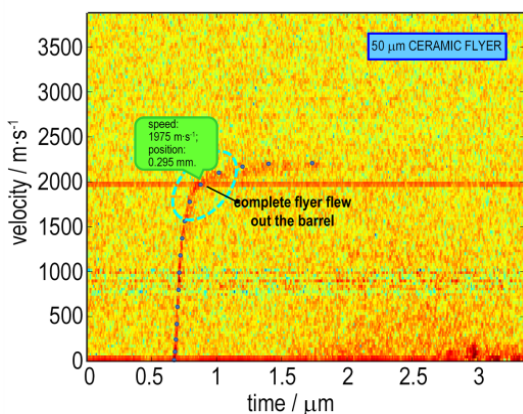
### 3.2.3 飞片的厚度对其运动形貌的影响

在飞片速度足够高的情况下,影响 LTCC-EFIc 冲击起爆能力取决于飞片的形貌。由于陶瓷飞片具有易

碎性,为了保证LTCC-EFIC以完整的飞片飞出加速膛口,并撞击下一级目标,采用两种LTCC-EFIC,两种芯片的桥箔尺寸均为 $400\ \mu\text{m}\times 400\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ ,加速膛形状均设计为圆形( $\Phi=560\ \mu\text{m}$ ),而飞片厚度则分别为 $25\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 。通过分析飞片的PDV频谱图,研究陶瓷飞片的厚度对其运动形貌的影响。图8为 $1.8\ \text{kV}/0.22\ \mu\text{F}$ 条件下,两种厚度飞片的实测速度曲线。



a.  $25\ \mu\text{m}$  thickness flyer velocity vs time curve



b.  $50\ \mu\text{m}$  thickness flyer velocity vs time curve

图8  $25\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 两种厚度飞片的PDV频谱图( $1.8\ \text{kV}/0.22\ \mu\text{F}$ )

Fig.8 The Photon Doppler Velocimetry spectrograms of the ceramic flyer with thickness of  $25\ \mu\text{m}$  and  $50\ \mu\text{m}$  at  $1.8\ \text{kV}/0.22\ \mu\text{F}$

由图8a中可以清楚的看出, $25\ \mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片一开始以完整的飞片被剪切出来,飞片保持完整的飞行距离约为 $0.046\ \text{mm}$ ,随后完整的陶瓷飞片破碎成多个小飞片或粒子群(其尺寸远小于光纤探头的光束直径),且各小飞片或粒子存在一定的尺寸和速度的差异。单位时间内干涉信号包含多个(其数值等于具有速度差异的运动物体数量)频率,使得单个PDV探头对其探测光束照射范围内的多个运动目标同时进行速度测量。多个陶瓷碎片或粒子运动的速度时间曲线如

图8a所示。由于陶瓷破片或粒子数量较多,相邻碎片在尺寸、飞行姿态和速度方面均存在差异;且某些较大的破片在飞行途中会再次裂变成多个更小的碎片;最终,大量运动目标的多条速度曲线整体形成了一条具有一定宽度的速度带。而由图8b可知, $50\ \mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片在飞行过程中一直保持着飞片的完整性,并以大约 $1975\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度飞出加速膛口。

分析在不同的发火电压下( $1.6\sim 2.2\ \text{kV}$ )陶瓷飞片的PDV频谱图,得知 $25\ \mu\text{m}$ 厚度的飞片在加速膛内均发生了飞片破碎的现象,而 $50\ \mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片均保持完整。从而说明了陶瓷飞片越厚,其在飞行过程中的形貌会保持得越完整。根据目前的结果来看,陶瓷飞片由于其密度大质量高,飞片的速度难以提升,而减薄陶瓷飞片又会带来飞片易碎等弊端。后期可以通过调整飞片的组成成分既保证飞片的完整性又能提高飞片速度,从而降低起爆能量。

### 3.3 点火与起爆验证

分别采用硼/硝酸钾(BPN)点火药以及HNS炸药对LTCC-EFIC进行发火性能验证。其中,BPN点火药的粒径为硝酸钾 $60\ \mu\text{m}$ ,硼粉 $1.50\ \mu\text{m}$ ,装药密度为 $1.57\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;HNS炸药粒度 $D_{50}=1196.6\ \text{nm}$ ,装药密度为 $1.60\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,纯度为 $99.46\%$ 。将LTCC-EFIC分别与BPN和HNS组成发火序列,结果见表5。

表5 LTCC-EFIC点火和起爆结果

Table 5 The results of ignition and initiation of LTCC-EFIC

| explosive | minimum ignition and initiation voltage / kV |                                  |               |
|-----------|--|----------------------------------|---------------|
|           | 50 $\mu\text{m}$ thickness flyer             | 25 $\mu\text{m}$ thickness flyer |               |
|           | circle barrel                                | circle barrel                    | square barrel |
| BPN       | 1.4  | 2.2                              | 1.5           |
| HNS       | 2.5  | -                                | -             |

Note: “-” indicates that the HNS explosive has not been successfully detonated under the ignition voltage below  $2.8\ \text{kV}$ .

实验结果表明,使用LTCC工艺制备的爆炸箔起爆芯片可成功起爆HNS并点燃BPN,从而验证了采用Au桥箔和陶瓷飞片制备爆炸箔芯片的可行性。从表5可以看出,在加速膛形状相同的条件下, $50\ \mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片的能成功点燃BPN的最小电压是 $1.4\ \text{kV}$ ,而 $25\ \mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片最小点火电压是 $2.2\ \text{kV}$ 。即随着飞片厚度的增加,冲击点燃B/KNO<sub>3</sub>的能量阈值也在降低。分析其原因,飞片以一定的速度撞击BPN,药柱表面受到冲击波的作用产生药剂颗粒间的

运动,同时药柱内的孔隙也会受到绝热压缩,导致热能聚集于很小的局部范围,形成热点,温度升高,点火药发生分解反应。对于25  $\mu\text{m}$ 陶瓷飞片而言,由于飞片背部稀疏波到达时间短,使得冲击波压力迅速下降,从而使药剂内部的化学反应不能持续进行。另外,在飞片厚度均为25  $\mu\text{m}$ 的情况下,方形加速膛的BPN最小点火电压,比圆形加速膛要小700 V,从而验证了飞片经方形加速膛加速后其出口速度更大,爆炸箔起爆芯片的点火能力也就越强。

根据目前的HNS起爆条件可以看出,50  $\mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片起爆HNS的最小电压为2.5 kV,而25  $\mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片由于在加速膛内既已破碎成多个小碎片,目前尚未成功起爆过HNS。其原因可归结于:对于非均质炸药而言,引爆炸药的主要因素是飞片的冲击压强,冲击压强激发炸药化学反应引起压强的增长,飞片侧面和背部稀疏波同时又会造成压强的下降,当化学反应释能和稀疏波耗能达到某个临界条件时,稳定爆轰得以成立。在飞片冲击起爆HNS的过程中,飞片的速度主要影响入射冲击波压力,飞片的厚度则影响压力持续时间<sup>[19]</sup>。50  $\mu\text{m}$ 陶瓷飞片由于其密度大,飞片质量较大,飞片速度难以提升;为保证飞片撞击在HNS-IV表面处的冲击压力足够强,需要提高发火能量使飞片能以更高的速度撞击炸药。

## 4 结论

采用低温共烧陶瓷技术设计制备了以Au作为桥箔,陶瓷作为飞片的爆炸箔起爆芯片,在0.22  $\mu\text{F}$ 电容充放电条件下,对制备的两种加速膛形状的LTCC爆炸箔起爆芯片的性能进行了研究,主要结论如下:

(1) 通过桥箔电爆性能研究得出,300  $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  Au桥箔在发火电压为1.8 kV时,回路的电爆能量利用率最大,为40.12%。

(2) 陶瓷飞片的速度随着发火电压的增大呈增加趋势;在相同的发火电压下,方形加速膛的终态速度要比圆形加速膛高出约106~313  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;50  $\mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片的运动形貌完整,而25  $\mu\text{m}$ 厚的陶瓷飞片在加速膛内飞行阶段时既已破碎。

(3) 采用LTCC工艺制备的爆炸箔起爆芯片(50  $\mu\text{m}$ 厚陶瓷飞片,圆形加速膛)可成功起爆HNS炸药的最小电压为2.5 kV,点燃BPN点火药的最小电压为1.4 kV。

## 参考文献:

- [1] Stroud J R. A new kind of detonator: the slapper [R]. UCRL77639: 1976.
- [2] Cope R D. NAVAIR Fuze Overview [C]// NDIA 48th Annual Fuze Conference. Charlotte, NC, 2004
- [3] Robbins J. United States Navy Overview [C]// Report to 49th Annual Fuze Conference. Seattle WA, 2005.
- [4] Tang W C. MEMS Programs at DARPA [C]// MEMS Components and Application for Industry, Automobiles, Aerospace, and Communication. San Francisco, CA, 2001, 4559: 1-5.
- [5] Scholtes G, Prinsec W. A development platform for a microchip EFI [C]// 52th Annual Fuze Conference. Kansas City, 2008, 3: 13-15.
- [6] 陈清畴,马毅,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.  
CHEN Qing-chou, MA Tao, LI Yong. Research Progress in the Function Mechanism of Exploding Foil Initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, (HannengCailiao). 2019, 27(1): 79-88..
- [7] 付秋波,郭菲,只永发. 小尺寸爆炸箔与加速膛匹配研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(2): 114-116.  
FU Qiu-bo, GUO Fei, ZHI Yong-fa. Matching experiment of small scale exploding foil with barrel [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(2): 114-116.
- [8] Desal A. Efficient exploding foil initiator and process for making same: US7938065 [P]. 2009-06-18.
- [9] 曾庆轩,郑志猛,李明愉,等. 冲击片雷管集成制造方法研究[J]. 火工品, 2012(5): 1-3.  
ZENG Qing-xuan, ZHENG Zhi-meng, LI Ming-yu, et al. Research on fabrication method of integrated slapper detonator [J]. *Initiator & Pyrotechnics*, 2012, 5: 1-3.
- [10] 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.  
FANG Kuang, Chen Qing-chou, HE Si-min, et al. Fabrication and flyer driving capability of in-situ integrated exploding foil initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, (HannengCailiao), 2016, 24(1): 101-105.
- [11] 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(2): 56-61.  
LI Ke-wei, CHU En-yi, XUE Yan, et al. Research on exploding foil initiator based on non-silicon MEMS technology [J]. *Acta Armamentarii*, 2017(02): 56-61.
- [12] 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. Effect of barrel and multilayer flyer on the performances of micro chip exploding foil initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, (HannengCailiao), 2018, 26(3): 273-278.
- [13] 陈楷. 集成爆炸箔起爆器与平面三电极高压开关技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.  
CHEN Kai. Research on the technique of micro chip exploding foil initiator and planar three electrodes high voltage switch [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [14] Xu C, Zhu P, Chen K, et al. A Highly Integrated Conjoined Single Shot Switch and Exploding Foil Initiator Chip Based on MEMS Technology [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(11): 1610-1613.

- [15] ZHU Peng, CHEN Kai, XU Cong, 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.
- [16] 今中佳彦. 多层低温共烧陶瓷技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-16.  
Yoshihiko Imanaka. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-16.
- [17] 王竊, 孙秀娟, 郭菲, 等. Al/Ni爆炸箔电爆特性及驱动飞片能力研究[J]. 火工品, 2016(3): 5-8.
- WANG Yao, SUN Xiu-juan, GUO Fei, et al. Study on electrical characteristic and flyer driven ability of Al / Ni exploding foil[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016 (3): 5-8.
- [18] 罗斌强. 金属箔电爆炸及其在冲击动力学中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.  
LUO Bin-qiang. Electrical explosive of metallic foils and its application in dynamic mechanics[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [19] CHEN Qing-chou, LI Yong, MA Tao. Characterization of the super-short shock pulse generated by an exploding foil initiator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 286: 91-97.

## Design, Fabrication and Ignition Performance of LTCC Exploding Foil Initiation Chip

ZHANG Qiu<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>2</sup>, ZHU Peng<sup>1</sup>, XU Cong<sup>1</sup>, QIN Xin<sup>1</sup>, YANG Zhi<sup>1</sup>, SHEN Rui-qi<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology was employed to realize the integrated fabrication of exploding foil initiation chip. 5  $\mu\text{m}$  thick Au bridge foil (300  $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ ) was prepared by screen printing, using raw porcelain sheets of 25  $\mu\text{m}$  and 50  $\mu\text{m}$  thickness as the flyers for the chip. Two kinds of chips with the barrel shape of circular ( $\Phi=400 \mu\text{m}$ ) and square ( $L \times W=300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ ) were obtained. The electrical explosion characteristics of Au bridge foil were studied under the discharge of 0.22  $\mu\text{F}$  capacitor. The velocity characteristics of the ceramic flyer and its morphology in motion process were analyzed by photon Doppler velocimetry. Results show that the maximum energy utilization rate of Au bridge foil at 1.8 kV, and the final speed of flyer increases with the increase of the firing voltage. Besides, the outlet velocity of flyer in square barrel is 106-313  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , which is higher than that in circular barrel at the same firing condition. In addition, the thicker of the ceramic flyer, the more complete it will be during the course of flying. The exploding foil initiation chip prepared by the LTCC technology can successfully detonate the HNS explosive and ignite the BPN ignition powder. The minimum detonation voltage and minimum ignition voltage of LTCC exploding foil initiation chip (50  $\mu\text{m}$  thick ceramic flyer, circular barrel) are 2.5 kV and 1.4 kV, respectively.

**Key words:** low-temperature co-fired ceramic(LTCC); exploding foil initiation chip; Au bridge foil; ceramic flyer

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018338

(责编:姜梅)