

文章编号:1006-9941(2023)03-0215-07

银膜换能元的喷墨打印及其性能表征

易镇鑫,李林,魏梦焱,朱顺官,李燕,张琳

(南京理工大学化学与化工学院,江苏南京210094)

摘要:针对常用薄膜换能元的沉积和成型方法耗时长、成本高、材料利用率低等问题,采用喷墨打印制备了银膜换能元,并采用扫描电镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对换能元形貌及厚度进行了表征,对银膜桥的打火性能进行了研究。结果表明,银膜换能元厚度为2.1 μm ,表面平整,在不同输入能量下存在电热、电爆两种情况。银膜桥更容易产生等离子体;蘸有斯蒂芬酸铅(LTNR)的银膜桥在47 μF 脉冲放电下50%打火电压为6.65 V,脚-脚间可以耐受25 kV静电放电(放电电容为500 pF,串联5 k Ω 电阻),可通过钝感电火工品1A1W5min测试。

关键词:喷墨打印;银膜桥;换能元;打火性能;电爆特性

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2022205

0 引言

火工品是武器系统中各级控制系统与动力系统间的接力系统,是武器系统的始发能源与始发动力^[1]。目前我国已经发展到第四代火工品:微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)火工品。典型的MEMS火工品包含微结构换能元、微含能芯片、微安保机构(微安全芯片)等3部分,共同组成一个微起爆序列或微点火序列^[2]。

对于MEMS火工品来说,微结构换能元是其核心部分^[3]。目前微结构换能元的制备工艺是MEMS工艺,其制备流程涉及到清洗基底、溅射电阻靶材、光刻胶涂布、刻蚀、去光刻胶、测试等复杂流程^[4]。薄膜沉积和换能元成型分为2步,耗时长、成本高昂、材料利用率低且工艺复杂,过程中产生的工业废水也增加了环境的负担。而喷墨打印技术作为一种低成本、非接触和环境友好的直接图形化薄膜沉积技术,其设备投

资小、成膜工艺简单并且无需真空环境^[5],用于电火工品换能元的制备能够一步实现换能元材料的沉积与成型,在时间和成本上相对于MEMS技术均具有很大优势,具备应用于大规模工业生产的潜力。

喷墨打印技术可将不同类型的导电墨水如纳米颗粒的胶体悬浮液^[5-6]、分散在溶液中的有机金属化合物^[7]以及导电聚合物^[8-9]等沉积到各类基板上,是目前最有前景的制造技术之一。利用喷墨打印技术将墨水喷涂于基底上,通过烧结、退火等后处理方式沉积成膜,已经广泛应用于各类电极、传感器、显示器等的制备。常见的导电墨水主要分为非金属导电墨水和金属导电墨水,其中非金属导电墨水以碳纳米管墨水^[10-11]、石墨烯墨水^[12-14]为主;金属导电墨水以金、银、铜墨水为主。铜的纳米颗粒在空气中易被氧化,影响导电性。金的化学性质稳定且导电率高,但价格高无法满足低成本要求。金属银导电性好,单质银的电阻率为 $1.586 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,且价格比金便宜,与铜、铝相比不易被氧化,多用作墨水材质^[15-17]。由于银墨水化学性质稳定、制备简单、储存方便,故有关喷墨打印制备银导电薄膜的研究较多且应用更为广泛。与喷墨打印类似的技术还有微笔直写/点胶,但是两者从打印原理、打印精度和墨水要求等角度均存在较大的区别^[18],尤其是在打印精度上,微笔直写技术难以满足换能元成型的要求,也难以保证成型的一致性。

收稿日期:2022-08-10;修回日期:2022-12-18

网络出版日期:2023-03-16

基金项目:国家自然科学基金(52203332)

作者简介:易镇鑫(1992-),男,讲师,主要从事火工品及火工药剂研究。e-mail: yizx@njust.edu.cn

通信联系人:张琳(1976-),女,研究员,主要从事火工品及火工药剂研究。e-mail: zhangl@njust.edu.cn

引用本文:易镇鑫,李林,魏梦焱,等.银膜换能元的喷墨打印及其性能表征[J].含能材料,2023,31(3):215-221.

YI Zhen-xin, LI Lin, WEI Meng-yan, et al. Preparation and Properties of Inkjet Printing Silver Film Bridge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2023, 31(3):215-221.

基于喷墨打印的优势以及其在薄膜成型的应用,本研究提出采用喷墨打印技术制备银膜换能元的实验思路,将纳米银墨水按照设计好的桥区图案打印在硅基底上,经过管式炉烧结后得到银膜换能元,并采用扫描电镜和原子力显微镜对其结构进行了表征,与半导体桥(SCB)对比研究了脉冲发火特性,最后对银膜火工品的点火感度和安全特性进行了研究。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:纳米银墨水(实验室自制^[19])、斯蒂芬酸铅(LTNR,粒径约为20 μm,实验室自制^[20])。

仪器:Dimatix Materials Printer 喷墨打印机(DMP-2850, FUJIFILM, 日本)、10 pL 墨盒(DMC-11610, FUJIFILM, 日本)、扫描电子显微镜(SEM, JSM-IT500HR, JEOL, 日本)、原子力显微镜(AFM, SOLVER P47, NT-MDT, 俄罗斯)、四点探针测试仪(RTS-8, 广州四探针科技, 中国)、示波器(MDO3034, Tektronix, 美国)、脉冲储能放电仪(ALG-CN1, 南京理工大学, 中国)、高速摄影(Motion-Xtra HG-100K, REDLAKE, 美国)和静电感度测试仪(JGY-50Ⅲ, 陕西应用物理化学研究所, 中国)。

1.2 银膜换能元的制备

使用DMP-2850喷墨打印机进行换能元的打印制备,打印参数为基板温度55℃、喷墨间距25 μm,基底为二氧化硅片。打印结束后在基板上预固化30 min,然后放入管式炉内进行烧结,得到银膜换能元,经过贴片、点银浆将其封装在陶瓷塞中加工成银膜桥(SFB, silver film bridge)。

从安全性的角度考虑,为满足钝感火工品1A1W5min不发火的要求,换能元的阻值应为1 Ω,为此,研究选择矩形桥区换能元,设计长度为150 μm,宽度为180 μm,厚度为2 μm。

1.3 银膜桥与半导体桥点火头的制备

考虑到钝感电火工品1A1W5min不发火的要求,使用电阻为(1±0.1) Ω的银膜桥和半导体桥,采用蘸药的方式在桥面增加LTNR点火药(LTNR:4% NC乙酸乙酯胶为1:1,即LTNR中外加4% NC),单发药量约为20 mg,样品烘干后即成为银膜桥/半导体桥点火头。

1.4 银膜换能元的表征

采用扫描电子显微镜(SEM, JSM-IT500HR)对银

膜的形貌进行表征;采用原子力显微镜(AFM, Solver P47)对银膜的表面粗糙度和厚度进行测量;采用四点探针测试仪(RTS-8, 广州)研究银膜换能元的电阻率。

1.5 银膜桥的性能测试

脉冲发火特性测试:选择(1.0±0.1) Ω的银膜桥对其发火特性进行研究。发火实验装置由示波器、脉冲储能放电仪、高速摄影等组成,点火试验装置示意图见图1。

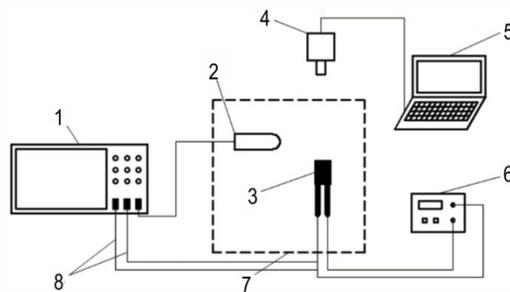


图1 点火试验装置示意图

1—数字示波器, 2—光电转换器, 3—火工品, 4—高速摄影, 5—计算机, 6—脉冲储能放电仪, 7—防护罩, 8—电压/电流探头

Fig.1 Schematic diagram of ignition test system

1—digital oscilloscope, 2—photoelectric converter, 3—igniter, 4—high-speed camera, 5—computer, 6—pulse discharge instrument, 7—protection cover, 8—voltage and current probe

研究银膜桥的脉冲发火特性,储能电容选择军用常用的47 μF钽电容,电路连接好后先给电容充电,充电至实验电压后对火工品进行放电发火,通过示波器记录放电过程中火工品的电压、电流信号;利用高速摄影拍摄发火照片并记录作用时间,高速摄影帧率设置为30000 fps。通过对银膜桥作用过程的分析,了解其电热、电爆特性,并与半导体桥进行比较。将银膜桥蘸斯蒂芬酸铅(LTNR)(约20 mg),制成电火头,测定其脉冲发火感度和恒流发火感度,利用Neyer's D-最优化法^[21]计算50%发火电压(50%发火电流)和标准差。

安全性测试:安全电流的测定参照GJB 5309.11-2004,对银膜桥进行1A1W5min测试,采用蘸有LTNR的(1.0±0.1) Ω的银膜桥点火头进行,平行实验2组,每组25发样品,电流为1 A,通电时间为5 min。

静电感度测试:参照火工品静电放电测试标准GJB 5309.14-2004,脚-脚间静电感度测试,采用蘸有LTNR的(1.0±0.1) Ω的银膜桥点火头,平行实验2组,每组25发样品,放电电容为500 pF,串联5 kΩ电阻,放电电压为25 kV。

2 结果与讨论

2.1 银膜的表征

为研究烧结温度对银膜电阻率的影响,对100~550 °C下烧结的银膜进行表征,不同烧结温度下银膜的电阻率和形貌结果见图2。

由图2a可以看出,随着烧结温度的由100 °C提高至550 °C,银膜的电阻率由 $7.850 \mu\text{m}\cdot\Omega$ 降低至 $0.136 \mu\text{m}\cdot\Omega$,且随着烧结温度升高前期电阻率下降显著,在300 °C以后下降趋势变得平缓,烧结温度越高下降幅度越小,最后趋于平稳。由图2b可见,低烧结温度(如150 °C)时银膜是由银纳米颗粒均匀整齐排列而形成的,随着烧结温度的升高,银颗粒间发生融合变大,逐步连成片(如550 °C),从而导致银膜电阻率的下降。这表明烧结温度对银膜的电阻率有较大的影响,烧结温度越高银膜的电阻率越低。

根据换能元的规格和电阻需求 $R=\rho l/s$,式中, R 为换能元阻值, Ω ; ρ 为换能元材料电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; l 为换能

元桥区宽度, m ; s 为换能元桥区截面积, m^2 。

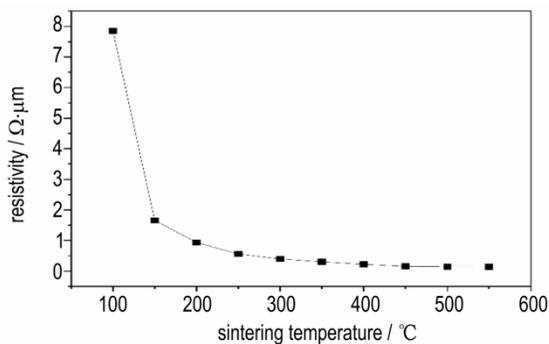
考虑换能元最终阻值为 1Ω ,设计桥区长宽高分别为 $240 \mu\text{m}\times 110 \mu\text{m}\times 2 \mu\text{m}$,故选用150 °C的烧结温度来制备银膜换能元,并进行AFM表征及厚度测定,结果表明银膜的表面粗糙度为18.6 nm,银膜厚度为 $2.1 \mu\text{m}$,整体呈现出平整度好,厚度均匀。

据此,研究再将银膜换能元经过贴片、点银浆将其封装在陶瓷塞中加工制成银膜桥如图3所示。

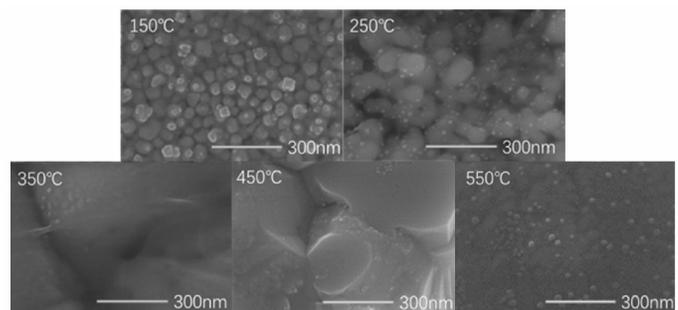
2.2 银膜桥的发火特性

2.2.1 银膜桥的脉冲作用过程

选择阻值为 $(1.0\pm 0.1) \Omega$ 的银膜桥,测定不同脉冲放电电压下银膜桥的作用过程,得到了脉冲作用的 $U-I-R$ 曲线,结果如图4所示。结合实验过程及图5可以看出,脉冲作用下银膜换能元的作用过程有3种:①当输入能量较小(如放电电压为5 V,见图4a)时,银膜桥呈现纯电阻特性,作用过程中无明显现象(声、光、烟等)产生,发火后桥路仍连通,且电阻值基本无变化,这种情况下桥区未发生明显变化;②当输入能量增大时(如放电电压为14 V,见图4b),银膜桥的电流电压升



a. relationship between sintering temperature and resistivity of silver film



b. relationship between sintering temperature and morphology of silver film

图2 银膜电阻率及形貌与烧结温度的关系

Fig.2 Relationship between resistivity and morphology of silver film and sintering temperature

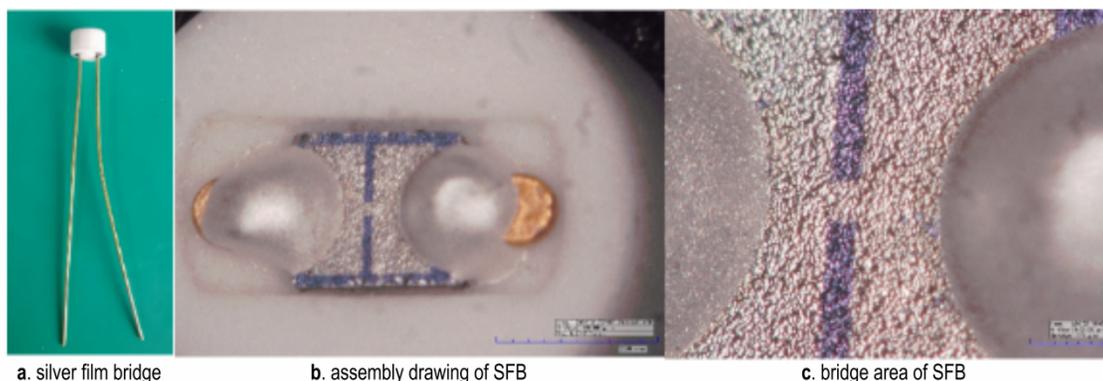


图3 银膜桥实物图

Fig.3 Physical photos of silver film bridge(SFB)

到峰值后电流瞬间降为0,这时桥区快速升温、熔融并汽化,但是能量并不足以使汽化的银产生等离子体,故很快就发生断路;③当输入能量高于电爆所需临界能量时(如放电电压为25 V,见图4c),发生电爆现象,此时银膜熔融后汽化,汽化的银在电能作用下发生电离

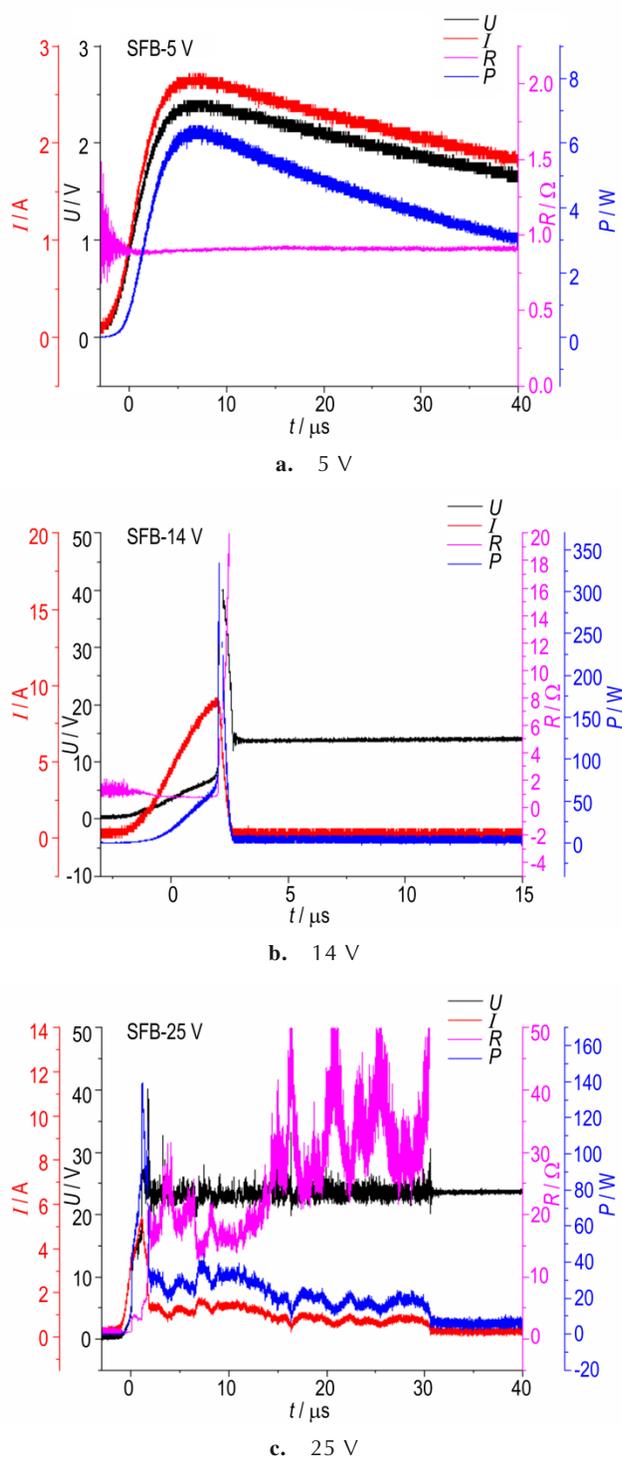


图4 不同脉冲放电电压下银膜桥的脉冲作用 $U-I-R$ 曲线
Fig.4 $U-I-R$ curve of silver film bridge under different voltage pulse discharge

产生等离子体,等离子体导电接通电路,使得桥断后电流仍持续了一定时间。银膜桥这种易发生电爆的特性有利于药剂的着火。

2.2.2 银膜桥与半导体桥的电爆性能对比

采集半导体桥在与银膜桥相同的放电条件(47 μF , 25 V)的电流电压曲线,对银膜桥和半导体桥的电爆过程进行比较分析,如图5所示。根据文献[22-23]对半导体桥作用过程的研究,结合图5可以得出银膜桥的电爆作用过程可分为以下4个阶段: $t_0 \sim t_1$ 阶段:电压、电流迅速上升,温度同时上升,在到达 t_1 点时,换能元开始熔化; $t_1 \sim t_2$ 阶段:电压下降,换能元熔化, t_2 点换能元熔化结束,开始汽化; $t_2 \sim t_3$ 阶段:换能元的汽化阶段,此阶段电压会突然增加, t_3 点电压达到第二个峰值,这通常被认为是汽化结束和等离子体出现的标志; $t_3 \sim t_4$ 阶段:换能元等离子体放电的阶段,这时换能元桥区已全部汽化,电压加载导致蒸汽等离子体放电,随着蒸汽的减少,电流逐渐减小,到 t_4 点电流降为0 A,电爆过程结束。由图5可以看出,银膜桥的作用过程与半导体桥类似,均存在熔化-汽化-等离子体放电3个过程,但是由于银材料相变温度低(熔点约

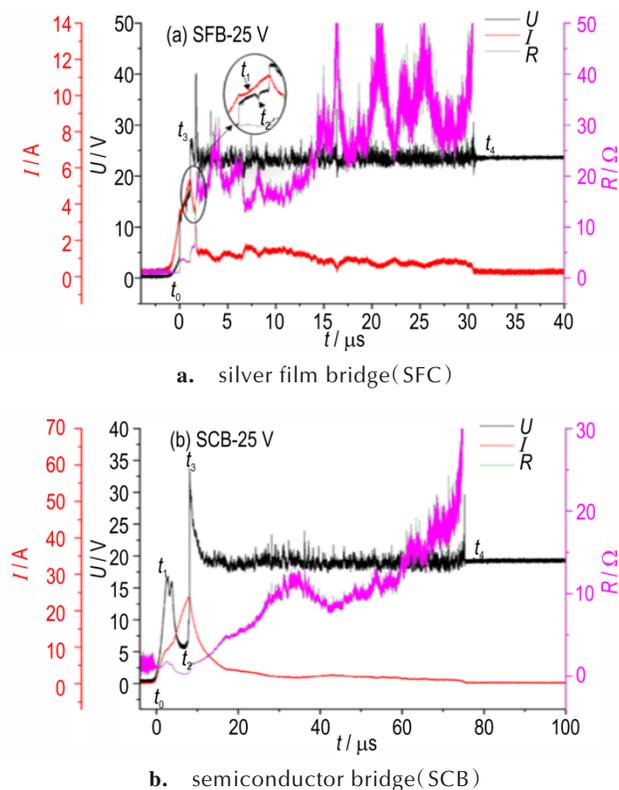


图5 银膜桥和半导体桥在脉冲电压25 V下的电爆过程
Fig.5 Electric explosion process of SFB and SCB under the pulse voltage of 25 V

为 960 °C, 沸点约为 2200 °C) 和比热容低的特点, 其作用过程更快, 持续时间更短。

为清晰对比半导体桥和银膜桥电爆过程, 将银膜桥和半导体桥各阶段时间点、电爆所需能量 ($t_0 \sim t_3$ 的积分能量 E_c) 和电爆总能量 ($t_0 \sim t_4$ 的积分能量 E_t) 列于表 1。

由表 1 可以看出, 半导体桥和银膜桥的电爆过程存在一些共同规律: 随着脉冲放电电压的增大, t_1 、 t_2 、 t_3 点的时间均提前, 表明输入电压越大, 换能元的熔化、汽化起点均会提前, 同时 $t_1 \sim t_2$ 阶段的持续时间 Δt_1 和 $t_2 \sim t_3$ 阶段的持续时间 Δt_2 均会变短, 表示熔化和汽化的

过程均随着输入电压升高而变快, 而 $t_3 \sim t_4$ 阶段即等离子体放电阶段的持续时间 Δt_3 随着电压的升高而变长, 推测其原因是电压越高换能元桥区汽化的区域越大, 蒸汽持续时间越久, 等离子体放电的时间也就越久。 E_c 和 E_t 均随输入电压的升高而增大, E_c 为银换能元电爆所需要的最小能量, 理论上在桥区形状尺寸确定后是定值, 但是在电爆过程中, 换能元的相变并不是同时发生的, 而是部分区域先相变, 导致作用时间的不一致, 从而导致 E_c 随着输入电压的升高而增大; E_t 为换能元电爆过程的总能量, 当输入能量增大, 电爆过程更持久, 所以电爆过程总的能量也就越大。

表 1 银膜桥 SFB 和半导体桥 SCB 的电爆过程对比

Table 1 Electric explosion process of SFB and SCB under pulse discharge

	discharge voltage	$t_1 / \mu s$	$t_2 / \mu s$	$t_3 / \mu s$	$t_4 / \mu s$	$\Delta t_1 / \mu s$	$\Delta t_2 / \mu s$	$\Delta t_3 / \mu s$	E_c / mJ	E_t / mJ
SCB	25 V	2.663	6.620	8.158	75.327	3.957	1.598	69.698	0.949	5.905
	40 V	1.592	4.034	5.629	83.914	2.442	1.535	82.791	1.460	21.69
SFB	25 V	0.596	0.724	1.123	30.747	0.128	0.399	30.184	0.182	3.799
	40 V	0.493	0.505	0.563	48.551	0.012	0.058	48.551	0.223	9.450

Note: t_1 is the bridge material begins to melt. t_2 is the bridge material completely melts and begins to vaporize. t_3 is the bridge material completely vaporizes and begins to produce plasma. t_4 is function complete. E_c is the energy required for electric explosion, E_t is the total energy of electric explosion. $\Delta t_1 = t_2 - t_1$, $\Delta t_2 = t_3 - t_2$, $\Delta t_3 = t_4 - t_3$.

由表 1 还可以看出, 相同电压下银膜桥的 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 点的时间均比半导体桥更早, $t_1 \sim t_2$ 阶段的持续时间 Δt_1 、 $t_2 \sim t_3$ 阶段的持续时间 Δt_2 和 $t_3 \sim t_4$ 阶段的持续时间 Δt_3 银膜桥均比半导体桥短, E_c 和 E_t 银膜桥也均比半导体桥小, 这表明银膜桥更容易熔化、汽化和产生等离子体。分析认为这是由于银的熔化和汽化温度均低于多晶硅 (熔点约为 1400 °C, 沸点约为 2300 °C), 更易发生电爆。尤其是银膜桥的 $t_1 \sim t_2$ 阶段的持续时间 Δt_1 非常短, $U-I$ 曲线图中需经过放大处理才找到这一阶段的节点, 且银膜桥 $t_1 \sim t_3$ 的时间也非常短, 这是由于银的比热容较低, 熔化到汽化的过程所需热量小, 银膜桥区的熔化和汽化几乎同步进行。表明银膜桥在脉冲作用下更易发生电爆, 作用时间更短, 点火同步性更好。

2.2.3 银膜桥的发火研究

采用高速摄影记录了银膜桥在 47 μF 12 V 脉冲

放电下的发火过程, 结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在脉冲作用下发火过程中, 银膜桥点火头约 33 μs 开始产生火光, 200 μs 时火光达到最亮, 火焰持续时间约为 1.5 ms, 说明银膜桥能够可靠点燃 LTNR。

2.2.4 银膜桥的发火感度

采用 Neyer's D-最优化法, 对蘸有 LTNR 的银膜桥进行脉冲发火感度和恒流发火感度的试验, 并与半导体桥进行对比, 试验结果如表 2 和表 3 所示。结果表明: 相较于半导体桥, 银膜桥的脉冲发火电压更低, 而恒流发火电流更高, 这一结果表明银膜桥在脉冲点火上更有优势, 分析其原因是银的比热容 (约 237 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) 较硅 (约 700 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) 更低, 在脉冲作用过程中, 温升更快, 进而发火电压更低; 而恒流放电是一个持续加热的过程, 由于银具有较高的导热系数, 并不利于换能元能量的积累, 从而导致恒流发火电压略高于 SCB。从两

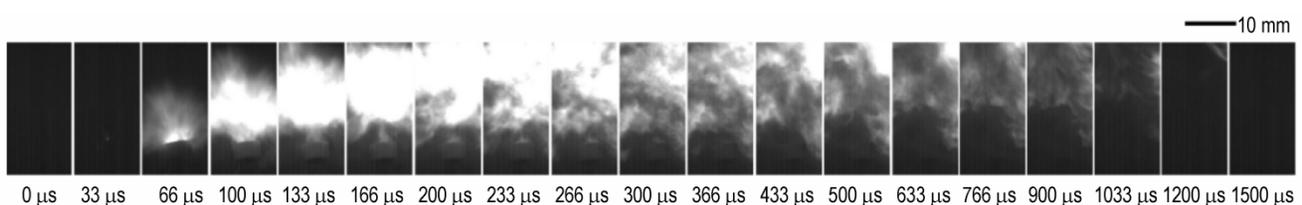


图 6 银膜桥的脉冲发火过程

Fig.6 Pulse discharge process of SFB

表2 银膜桥和半导体桥的脉冲发火感度

Table 2 Pulse firing sensitivity of SFB and SCB

	discharge capacitance / μF	50% firing voltage / V	0.1% firing voltage / V	99.9% firing voltage / V	standard deviation
SFB	47	6.645	6.176	7.115	0.152
SCB	47	8.917	8.807	9.013	0.033

表3 银膜桥和半导体桥的恒流发火感度

Table 3 Constant current firing sensitivity of SFB and SCB

	50% firing current / A	0.1% firing current / A	99.9% firing current / A	standard deviation
SFB	2.632	2.076	3.187	0.179
SCB	2.150	2.039	2.261	0.036

组发火感度的标准差可以看出,银膜桥的标准差大于半导体桥,这是由于工艺的一致性的原因。半导体桥因采用了MEMS工艺,其加工精度更高,故各换能元之间的一致性更好;银膜换能元采用喷墨打印技术,虽简化了换能元的成型工艺,但是其加工精度也较MEMS略差,从而导致银膜桥的发火感度标准差大于半导体桥。

2.3 银膜桥的安全特性

对蘸有LTNR的 $(1.0\pm 0.1)\ \Omega$ 的银膜桥点火头进行了安全电流测试,测试结果表明,蘸有LTNR的 $(1.0\pm 0.1)\ \Omega$ 银膜桥,可以满足钝感火工品1A1W5min不发火的要求。在相同测试条件下, $(1.0\pm 0.1)\ \Omega$ 的半导体桥也能满足钝感火工品1A1W5min不发火的要求。表明银膜桥具有较好的安全性。

对银膜桥进行脚-脚间静电感度测定。结果表明,蘸有LTNR的 $(1.0\pm 0.1)\ \Omega$ 银膜桥脚-脚间能够耐受25 kV静电放电,在相同的测试条件下,半导体桥脚-脚间仅能耐受23 kV静电放电,说明银膜桥的脚-脚间抗静电能力优于半导体桥。

3 结论

采用喷墨打印一步成型的工艺制备了银膜换能元,对银膜桥的发火过程、发火特性以及安全性能进行测试研究,结果表明:

(1)采用喷墨打印制备的银膜换能元具有均匀性好,平整度高的特点,相比SCB的MEMS工艺,该法能一步实现换能元材料的沉积与成型控制。

(2)银具有较低的相变温度,相比半导体桥更易产生等离子体,有利于药剂的发火。银膜桥的脉冲发火电压较SCB低2.272 V,但是恒流发火电流略高于SCB。

(3)银膜桥可以耐受25 kV的静电放电(放电电容500 pF、串联电阻5 k Ω),抗静电能力优于SCB;可以通过1A1W5min不发火的安全电流测试,安全性能好。

参考文献:

- [1] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 1-5.
CAI Rui-jiao. Design principle of pyrotechnics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999: 1-5.
- [2] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(5): 428-436.
ZHANG Bin, CHU En-yi, REN Wei, et al. Research progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5): 428-436.
- [3] 焦清介, 任慧, 聂建新, 等. 含能元器件设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020: 20-21.
JIAO Qing-jie, REN Hui, NIE Jian-xin, et al. Energetic cells design principles [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020: 20-21.
- [4] 解瑞珍, 任小明, 王可喧, 等. Ni-Cr桥膜换能元的制备[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 584-587.
XIE Rui-zhen, REN Xiao-ming, WANG Ke-xuan, et al. Fabrication of Ni-Cr Film igniting resistor [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5): 584-587.
- [5] WALKER S, BRETT Jennifer A. Lewis. Reactive silver inks for patterning high-conductivity features at mild temperatures [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(3): 1419-1421.
- [6] SON Yong, YEO Junyeob, WOO Chelo Ha, et al. Application of the specific thermal properties of Ag nanoparticles to high-resolution metal patterning [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 542: 52-56.
- [7] LIU Zheng-chun, VARAHAMYAN K. Inkjet-printed silver conductors using silver nitrate ink and their electrical contacts with conducting polymers [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 478(1-2): 275-279.
- [8] VILLANI F, VACCA P, NENNA G, et al. Inkjet printed polymer layer on flexible substrate for OLED applications [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(30): 13398-13402.
- [9] SOLTMAN D, SUBRAMANINA V. Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect [J]. *Langmuir*, 2008, 24(5): 2224-2231.
- [10] FRANKLIN A D. Nanomaterials in transistors: From high performance to thin-film applications [J]. *Science*, 2015, 349(6249): 2750.
- [11] RODRIGUEZ Raul D, OLFA Kanoun, THOMAS Blandek, et

- al. High-resolution inkjet printing of conductive carbon nanotube twin lines utilizing evaporation-driven self-assembly [J]. *Carbon*, 2016, (96):382–393.
- [12] LI Jian-tong, FEI Ye, SAM Vaziri, et al. Efficient inkjet printing of graphene [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(29): 3985–3992.
- [13] LI Bin, HU Nan-tao, SU Yan-jie, et al. Direct inkjet printing of aqueous inks to flexible all-solid-state graphene hybrid micro-supercapacitors [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11(49): 46044–46053.
- [14] JIN Yi-qian, Lee Woo. Cross-linking stabilizes electrical resistance of reduced graphene oxide in humid environments [J]. *Langmuir*, 2019, 35(16): 5427–5434.
- [15] ZHANG Zhi-liang, ZHANG Xing-ye, XIN Zhi-qing, et al. Synthesis of monodisperse silver nanoparticles for ink-jet printed flexible electronics [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(42):1–8.
- [16] 徐佳佳. 基于喷墨打印的纳米银油墨研制及应用研究 [D]. 南京:东南大学, 2017.
XU Jia-jia. Research on Ink-Jet printed silver nanoink preparation and application [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [17] DENG Dun-ying, CHEN Zhao-yong, HU Yong-le, et al. Simple and green fabrication process of nano silver conductive ink and the application in frequency selective surface [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(10):1–8.
- [18] CAO Yu, ZHOU Liang-wen, WANG Xiao-ye, et al. MicroPen direct-write deposition of polyimide [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(10): 1989–1993.
- [19] IARA Ernands J, AROCHE AngÃlica F, ARIADNA Schuck, et al. Silver nanoparticle conductive inks: Synthesis, characterization, and fabrication of inkjet-printed flexible electrodes [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1–11.
- [20] JOHN. Stenhouse. II. Contributions to the history of orcin—No. I. Nitro-substitution compounds of the orcins [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1871, 19: 410–417.
- [21] BARRY T Neyer. A D-optimality-based sensitivity method [J]. *Technometrics*, 1994, 36(1): 61–70.
- [22] MARTINES M J, BARE M R. Microconvective heating of granular explosives by a semiconductor bridge [R]. USA, Albuquerque, Sandia National Labs, 1989 :5–8.
- [23] 冯红艳. 半导体桥等离子体与药剂作用机理研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2011.
FENG Hong-yan. The mechanism to reveal SCB plasma-primary explosive interactions [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.

Preparation and Properties of Inkjet Printing Silver Film Bridge

YI Zhen-xin, LI Lin, WEI Meng-yan, ZHU Shun-guan, LI Yan, ZHANG Lin

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problems of long time consumption, high cost and low material utilization in the deposition and forming methods of commonly used thin-film energy conversion component, silver film bridge were prepared by inkjet printing. The morphology and thickness of the silver film bridge were test by scanning electron microscopy (SEM) and atomic mechanics microscopy (AFM), and the ignition performance was studied. The results show that the thickness of the silver film bridge is 2.1 μm , and the surface roughness is good. The performance test results show that the silver film bridge has two situations of electric heating and electric explosion under different input energy. Under 47 μF pulse discharge, the 50% ignition voltage of the silver film bridge dipped with lead stiphenate (LTNR) is 6.65 V. and the foot-to-foot can withstand 25 kV electrostatic discharge (discharge capacitance is 500 pF, 5 k Ω resistor in series), which can pass the 1A1W5min test of insensitive electric initiating device.

Key words: inkjet printing; silver film bridge; energy conversion component; ignition performance; electric explosion performance

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022205

Grant support: National Natural Science Foundation of China(No. 52203332)

(责编:姜梅)