

气溶胶喷印银膜换能元的制备与电爆特性研究

张金鹏^{1*}, 史春景^{1#}, 郝永平², 张 慧²

¹沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

²沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月22日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

针对传统薄膜换能元制备工艺复杂、加工周期较长等问题, 采用气溶胶喷印技术制备银膜桥式换能元, 并对焊盘打印路径和桥区结构进行优化。通过对比蛇形与回形焊盘填充路径以及圆弧桥、菱形桥和V形桥3种桥区结构的成形与电爆特性, 确定蛇形填充焊盘和圆弧桥结构为优化方案。在此基础上, 对烧结后银膜的厚度及电学性能进行定量表征。四探针测试结果表明银膜方阻约为 $0.67 \Omega/\text{sp}$, 轮廓仪测得膜层厚度约为 $5 \mu\text{m}$, 据此计算电导率约为 $2.99 \times 10^5 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。同时对换能元表面形貌及微观结构进行表征, 并开展电容放电电爆与起爆实验。优化后的换能元结构完整, 桥区电爆位置主要集中于中心区域; 在 5.12 mJ 储能条件下实现桥区电爆, 并成功引爆三硝基间苯二酚(LTNR)。该研究为MEMS微型起爆系统中薄膜换能元的制造与集成化应用提供参考。

关键词

气溶胶喷印, 银膜换能元, 圆弧桥, 三硝基间苯二酚, 电爆特性

Fabrication and Electrical Explosion Characteristics of Aerosol Jet Printed Silver-Film Transducers

Jinpeng Zhang^{1*}, Chunjing Shi^{1#}, Yongping Hao², Hui Zhang²

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

²School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: August 29, 2026; accepted: September 22, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

To address the complex fabrication process and long processing time associated with conventional

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张金鹏, 史春景, 郝永平, 张慧. 气溶胶喷印银膜换能元的制备与电爆特性研究[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 37-46. DOI: 10.12677/ms.2026.1610188

thin-film transducers, aerosol jet printing was employed to fabricate silver-film bridge transducers, and the pad printing path and bridge structure were optimized. The forming and electrical explosion characteristics of serpentine and loop pad-filling paths, as well as three bridge structures, namely arc-shaped, rhombus-shaped, and V-shaped bridges, were comparatively investigated. The serpentine pad-filling path and arc-shaped bridge were selected as the optimized configuration. After sintering, the silver film was quantitatively characterized. The four-point probe and profilometer measurements gave a sheet resistance of approximately $0.67 \Omega/\text{sp}$ and a film thickness of approximately $5 \mu\text{m}$, respectively, corresponding to an electrical conductivity of approximately $2.99 \times 10^5 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. The surface morphology and microstructure of the transducers were also characterized, followed by capacitor-discharge electrical explosion and initiation tests. The optimized transducers exhibited good structural integrity, with electrical explosion mainly occurring in the central region of the bridge. Electrical explosion was achieved at a capacitor stored energy of 5.12 mJ , successfully initiating lead trinitroresorcinate (LTNR). This study provides a reference for the fabrication and integration of thin-film transducers in MEMS-based initiation systems.

Keywords

Aerosol Jet Printing, Silver-Film Transducer, Arc-Shaped Bridge, Lead Trinitroresorcinate, Electrical Explosion Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着第四代火工品向安全化、智能化与集成化方向发展,传统火工装置在微型化、集成化及精确控制等方面仍存在进一步优化的需求。微机电系统(MEMS)技术凭借其微型化结构设计、高一致性加工能力及易于系统集成等优势,为火工品的小型化与功能集成提供了新的技术路径[1]。通过将换能元[2]和安保机构进行集成化设计,可显著提升系统的安全性及响应精度。

薄膜换能元是火工系统中的关键能量转换器件,其主要作用是将输入电能快速转换为热能等形式的能量,并作用于起爆药剂,从而实现能量传递与起爆[3]。其性能直接影响系统的起爆可靠性与能量输出特性。传统火工品换能元多依赖光刻、电镀、磁控溅射等加工工艺实现,其在结构尺寸控制与加工精度方面具有明显优势,被广泛应用于桥式点火器、薄膜起爆器等器件中[4]。沈佳驰等采用气溶胶辅助化学气相沉积、激光切割、微笔直写等技术,制备了一种类石墨碳膜换能元[5],表明气溶胶打印在材料适配性方面展现出高度灵活性。但碳膜材料电阻率较高,且打印成形一致性可能受工艺参数影响。李林等通过喷墨打印技术制备了银基换能元[6]。但喷墨打印液滴尺寸较大,在微细桥区结构制备及厚度均匀性方面存在一定局限。王科伟等采用磁控溅射技术制备了 Ni-Cr 桥膜换能元[7]。但该类工艺存在制备周期长、工艺复杂等问题[8]。

近年来,金属薄膜桥与增材制造换能元的研究进一步向低能化、微型化和工艺简化方向发展。传统 MEMS 薄膜桥中,磁控溅射结合光刻、湿法刻蚀能够获得致密且阻值一致性较好的 Ni-Cr 金属桥膜[8][9], Ni-Cr-Si 等薄膜材料也被用于改善换能元的电学稳定性与发火性能[10]。另一方面,数字增材制造开始用于换能元直接成形,喷墨打印银膜换能元已实现微米级膜层制备及毫焦量级脉冲发火响应[11]。针对气溶胶喷印导电银膜,已有研究表明,喷印气流、沉积状态与烧结制度会共同影响银颗粒连接、膜层致密程度及最终电导率[12][13]。因此,将 AJP 用于火工换能元时,除桥区几何结构和电爆行为外,还应同步给

出喷印核心工艺参数以及烧结后膜层的定量电学性能，以提高工艺的可重复性与结果的可比性。

上述问题在一定程度上制约了火工品器件向快速制造与高度集成方向的发展。气溶胶喷印技术(Aerosol Jet Printing)作为一种新兴增材制造技术，因其具有高分辨率、无需掩模、非接触式加工及材料适配性强等特点，逐渐应用于微电子与功能器件制造领域[14]。同时，银膜材料具有较低电阻率和良好的导电性能，通过合理设计焊盘与桥区尺寸，使换能元的电阻主要集中于桥区，有利于焦耳热在桥区积累，为桥区升温及后续电爆提供条件。基于此，本文采用气溶胶喷印技术制备银膜桥式换能元，针对焊盘打印路径及桥区结构开展对比研究，通过分析不同焊盘打印路径及桥区结构的成形和电爆特性，确定蛇形填充焊盘和圆弧桥结构作为优化方案。在此基础上，采用扫描电子显微镜对银膜表面形貌进行表征，并通过电容放电方式开展电爆及起爆实验，分析换能元的电爆特性及起爆能力，为气溶胶喷印银膜换能元在 MEMS 微型火工品中的应用提供实验依据[15]。

2. 薄膜换能元的设计和制备

薄膜换能元通常采用焊盘加桥区结构，如图 1 所示，两侧焊盘主要用于与外部电路连接，提供稳定的导电通路；中间桥区具有较小的导电截面和相对较高的电阻，可形成较高的电流密度并产生焦耳热，是换能元的主要能量转换区域。因此，桥区与焊盘的设计是影响换能元电热转换及电爆位置的重要因素。

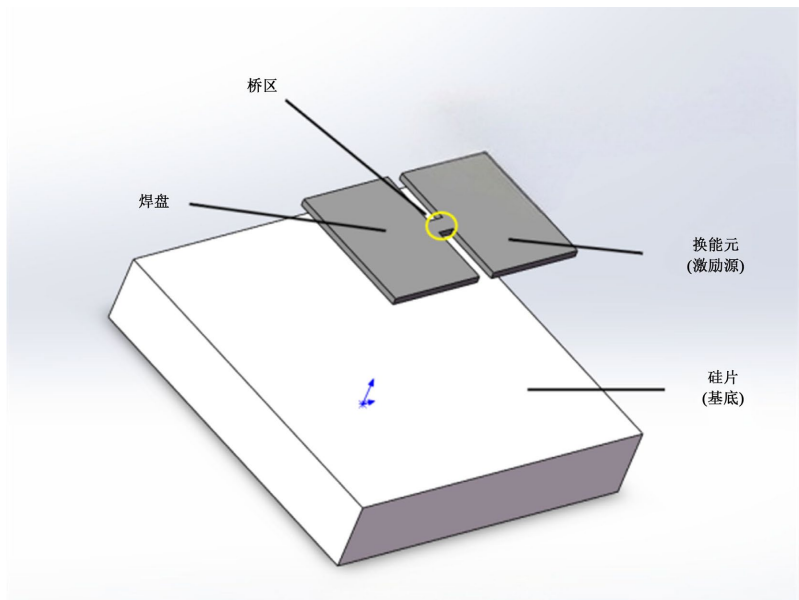


Figure 1. Schematic diagram of the transducer
图 1. 换能元示意图

2.1. 焊盘打印路径设计

在焊盘区域分别采用蛇形填充(Serpentine Fill)与回形填充(Perimeter Fill)两种打印路径，如图 2 所示，通过对比不同路径下的轨迹连续性及其成形情况，分析打印路径对焊盘成形质量的影响，并确定较优的焊盘打印路径。

2.2. 银膜换能元的桥区结构设计

为研究不同桥区结构对换能元电爆性能的影响，本文设计了圆弧桥、菱形桥及 V 形桥三种桥区结构，

如图 3 所示。三种桥区均采用相同材料及打印工艺进行制备，保证实验对比的一致性。不同桥区结构由于几何形貌存在差异，其电流密度分布及焦耳热分布也可能存在差异，因此通过对比不同桥区结构的电爆位置及电爆后形貌，分析桥区结构对换能元电爆特性的影响。

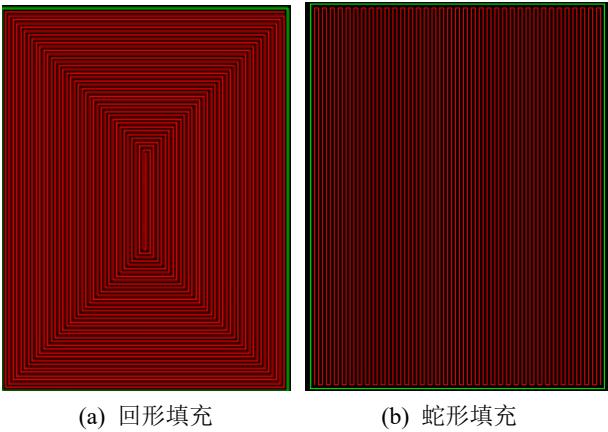


Figure 2. Schematic diagrams of different pad printing paths
图 2. 不同焊盘打印路径示意图

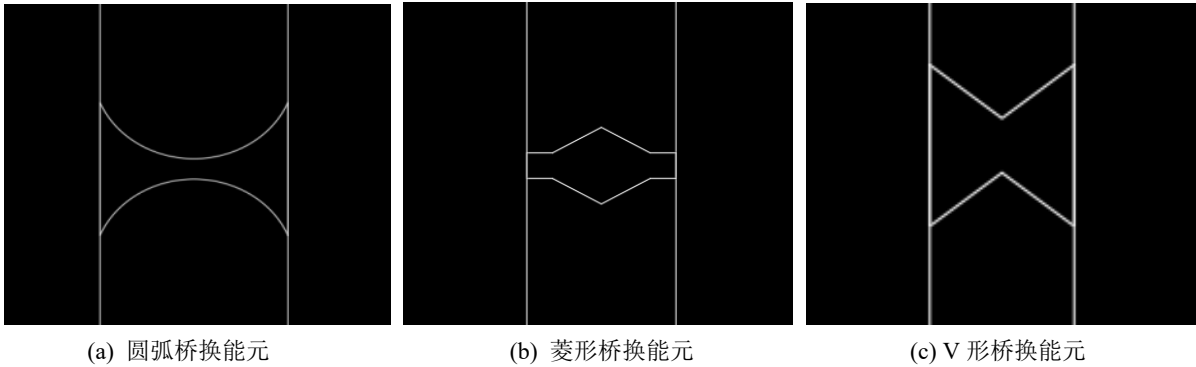


Figure 3. Silver-Film transducers with different bridge structures
图 3. 不同桥区结构的银膜换能元

2.3. 银膜换能元的制备工艺参数

打印设备选用 Optomec 公司 AJ200 型气溶胶喷射系统，导电墨水采用云尚制造生产的 JS-A221AE 型银纳米导电油墨。打印过程中，基板温度设定为 65℃，选用直径为 200 μm 的陶瓷喷头，超声雾化功率参数设定为 0.480 w，载气流量和鞘气流量分别为 32 sccm 和 45 sccm，焊盘与桥区打印速度分别为 2.0 mm/s 和 1.8 mm/s，基板温度为 65℃，喷嘴 - 基底间距为 1.5 mm，稳定打印线宽约为 20 μm。基底材料选用单面抛光的二氧化硅薄片，厚度为 1 mm。打印完成后，采用 DZF-6020 型真空干燥箱对样品热处理，烧结温度 180℃，保温 15 min，促进银纳米颗粒之间的烧结，提高薄膜的导电性能与结构稳定性。烧结结束后，将样品取出并在室温条件下自然冷却。

3. 银膜换能元的结构优化与表征

3.1. 不同焊盘打印路径的成形特性分析

为研究打印路径对焊盘成形质量的影响，在相同材料及工艺参数下，分别采用回形和蛇形两种填充

路径制备焊盘，其成形结果如图 4 所示。由图 4(a)可见，回形填充路径在打印过程中存在较多转角与轨迹衔接区域，虽然能够较好地保持焊盘边缘轮廓，但在路径转折与轨迹衔接区域存在一定沉积差异。图 4(b)所示的蛇形填充方式采用连续往复的打印路径，相邻轨迹之间衔接较为连续，有利于减少路径频繁改变方向对材料沉积的影响，从成形结果来看，其焊盘区域整体连续性较好，沉积更均匀。综合成形结果，蛇形填充方式在焊盘区域表现出更好的连续成形特性，因此后续焊盘采用蛇形路径进行打印。

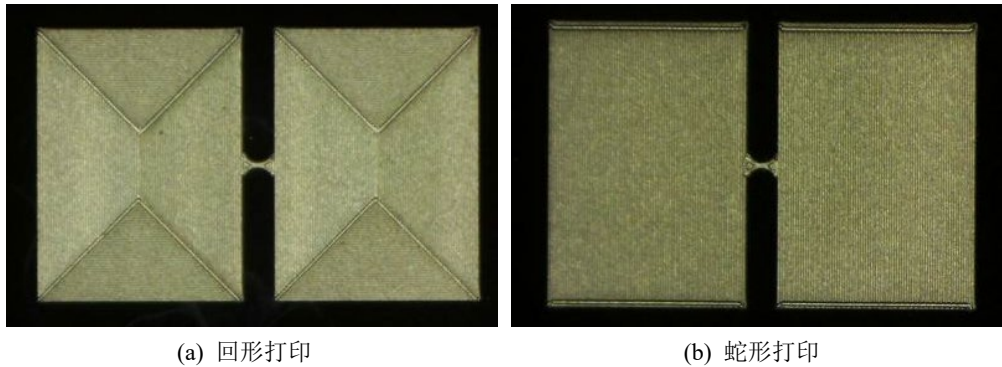


Figure 4. Forming results of different pad printing paths
图 4. 不同焊盘打印路径成形结果

3.2. 不同桥区结构电爆特性分析

为研究桥区结构对换能元电爆位置及一致性的影响，采用相同的打印工艺分别制备 V 形桥、菱形桥和圆弧桥换能元，并开展重复电爆试验，对各结构换能元的电爆位置进行统计，如图 5 所示，圆弧桥相较于 V 形桥和菱形桥有更高的中心电爆成功率，同时不同桥区结构的电爆位置存在一定差异，其中 V 形桥和菱形桥部分样品的电爆位置偏离桥区中心，表现出一定的离散性，圆弧桥结构的电爆位置主要集中于桥区中心区域，具有较好的位置一致性。

结合不同桥区的结构特征分析，V 形桥和菱形桥均存在尖角或尖端过渡区域，该几何特征可能引起局部电流集中，使部分样品的电爆位置偏离桥区中心。相比之下，圆弧桥采用平滑过渡结构，桥区中心位置的有效导电截面相对较小，有利于电阻和焦耳热在该区域集中。因此，圆弧桥结构电爆位置更加集中，具有较好的位置一致性。综合考虑电爆位置与成功率，选用圆弧桥作为银膜换能元的桥区结构。

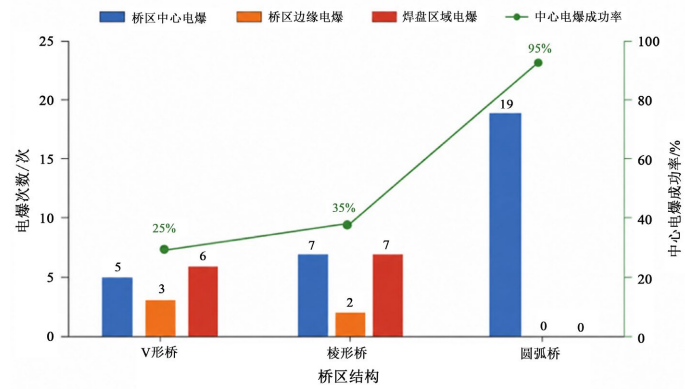


Figure 5. Comparison of electrical explosion characteristics of transducers with different bridge structures
图 5. 不同桥区结构换能元电爆特性对比

3.3. 换能元结构尺寸

基于上述电爆测试结果，选用圆弧桥作为换能元桥区结构，整体尺寸如图 6 所示。换能元焊盘长 1.5 mm、宽 2 mm，圆弧桥长 0.25 mm、宽 0.20 mm。通过焊盘与桥区的尺寸差异形成局部高电阻区域，有利于提高桥区电流密度并促进焦耳热积累。

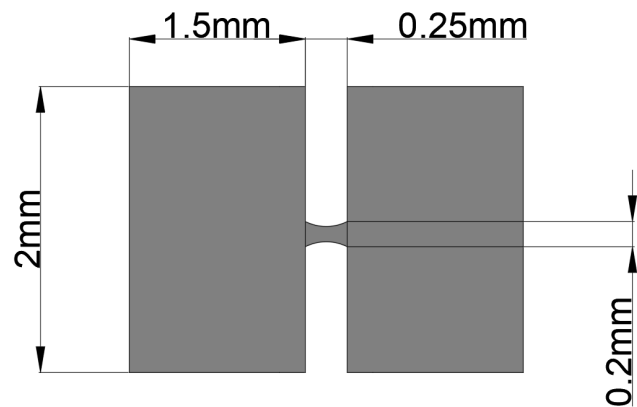


Figure 6. Schematic diagram of dimensions of the silver-film transducer
图 6. 银膜换能元结构尺寸示意图

3.4. 烧结后银膜厚度与电学性能表征

为定量评价烧结后气溶胶喷印银膜的厚度及导电性能，对与换能元采用相同打印和烧结工艺制备的银膜样品进行测试。采用四探针测试台测量膜层方阻，并采用轮廓仪测量膜层厚度，同时对优化后的圆弧桥换能元进行电阻测试，在此基础上计算银膜的电阻率和电导率。

四探针测试时，将四根探针与银膜表面稳定接触，由外侧探针加载测试电流、内侧探针采集电压信号，以减小探针接触电阻对测量结果的影响，测试装置如图 7 所示。测试结果表明，烧结后银膜的方阻 R_s 约为 $0.67 \Omega/\text{sp}$ 。

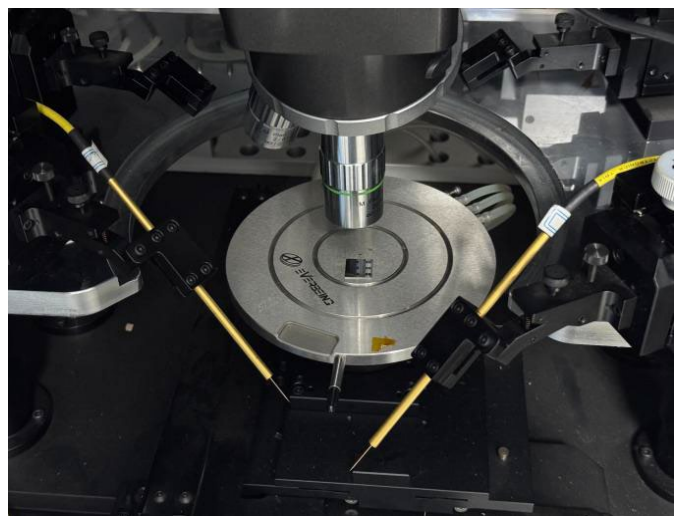


Figure 7. Four-probe station for sheet-resistance measurement
图 7. 四探针台方阻测试装置

采用轮廓仪对银膜厚度进行测量。测试时使探针沿垂直于银膜边缘的方向由裸露基底区域扫描至银膜区域，以银膜表面与基底表面的高度差作为膜层厚度。测得烧结后银膜厚度 t 约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

对于厚度近似均匀的导电薄膜，薄膜电阻率 ρ 、方阻 R_s 与膜层厚度 t 之间满足：

$$\rho = R_s t$$

银膜电导率 σ 为电阻率 ρ 的倒数，因此：

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R_s t}$$

将实测方阻 $R_s = 0.67\text{ }\Omega/\text{sp}$ 和膜层厚度 $t = 5\text{ }\mu\text{m}$ (即 $5 \times 10^{-6}\text{ m}$) 代入计算，可得银膜电阻率 ρ 约为 $3.35 \times 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ，相应电导率 σ 约为 $2.99 \times 10^5\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

此外，对优化后的圆弧桥换能元两端电阻进行测试，测得阻值约为 $3.02\text{ }\Omega$ 。由于两侧焊盘面积较大、导电截面较宽，其电阻相对较小，因此换能元电阻主要由桥区贡献，该测试结果可反映桥区的实际电阻水平，并为后续焦耳热集中及电爆过程分析提供电学参数依据。

上述结果表明，烧结处理后的气溶胶喷印银膜已形成稳定的导电通路。结合后续 SEM 观察到的连续膜层结构，所获得的膜层厚度和电学性能能够为桥区在脉冲电流作用下的焦耳热积累及后续电爆过程提供材料性能基础。

3.5. 银膜换能元 SEM 表征

为表征气溶胶喷印银膜换能元的表面形貌，对换能元桥区和焊盘结构进行 SEM 观察，结果如图 8 所示。图 8(a) 为桥区区域的整体形貌，可以观察到银膜桥区轮廓完整，膜层连续成形，未见明显的断裂和大面积缺陷，桥区由宽至窄逐渐过渡，最窄区域位于桥区中部。图 8(b) 为焊盘区域的局部放大形貌，未观察到明显的大面积孔洞和脱落现象。结合图 8(a) 和图 8(b) 可以看出，采用气溶胶喷印工艺能够实现桥区和焊盘区域的连续成形，为后续电爆实验提供了良好的结构基础。

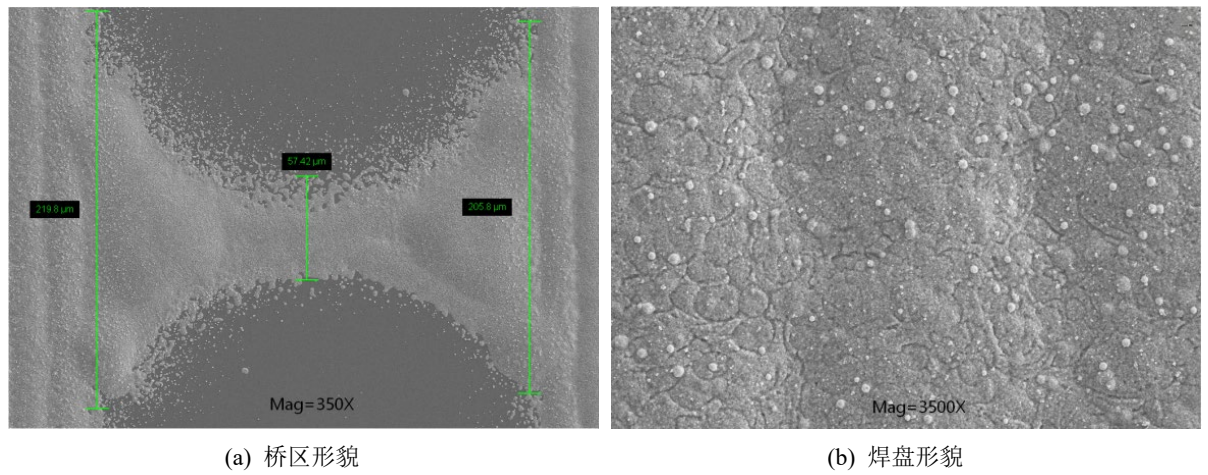


Figure 8. SEM images of the surface morphology of the silver-film transducer
图 8. 银膜换能元表面形貌 SEM 图

4. 银膜换能元电爆与起爆实验

4.1. 换能元电容激励电爆测试

为研究银膜换能元在瞬态电能输入下的电爆响应，采用储能电容放电方式对银膜换能元进行激励。

与直流激励相比，电容放电具有脉冲电流特征，能为换能元桥区提供较集中的电能输入，有利于产生较高的焦耳热积累。

实验电路主要由稳压直流电源、储能电容、示波器、串联采样电阻及银膜换能元组成，实验接线示意图如图 9 所示。其中，稳压直流电源用于对储能电容进行充电，储能电容作为换能元的瞬态能量源，串联采样电阻用于限制和采集放电回路中的电流信号，示波器用于观察实验过程中的电压变化。实验过程中，利用直流电源将储能电容充电至设定电压，当达到设定电压后，控制放电回路导通，储能电容中的能量快速释放并形成瞬态放电电流。电流通过银膜换能元桥区时，在桥区产生焦耳热并使其温度升高，达到一定条件后发生熔融、断裂等电爆现象。

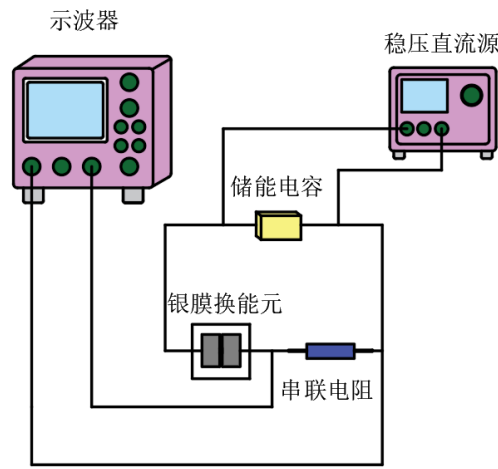


Figure 9. Experimental circuit for capacitor-discharge electrical explosion of the silver-film transducer
图 9. 银膜换能元电容放电实验电路

如图 10 所示为换能元成功引爆后的桥区照片，从桥区引爆后的显微图像可以看出，换能元桥区已经成功发生电爆。原本完整连接两侧焊盘的桥区区域出现明显烧蚀和断裂现象，桥区中心位置形成熔融痕迹，表明桥区在瞬态放电过程中发生明显的热积累。桥区两侧焊盘整体结构仍保持完整，表明放电过程中的电热作用主要集中于桥区。此外，桥区断裂位置较为集中，没有出现大面积焊盘损伤，说明换能元整体导电路径设计较为合理，电爆位置具有较好的可控性。

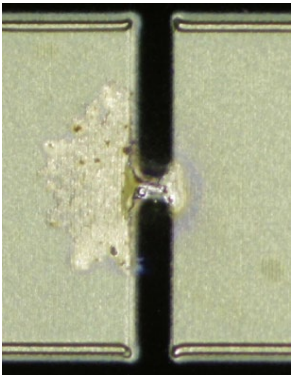


Figure 10. Morphology of the transducer after electrical explosion
图 10. 换能元电爆后形貌

实验所采用储能电容容量 $C = 10 \mu\text{F}$ ，额定电压 $U = 100 \text{ V}$ 。实验过程中，利用直流电源对储能电容进行充电，电压 $U = 32 \text{ V}$ 。根据电容储能公式：

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

式中： E 为电容储存的能量，单位为 J (焦耳)， C 为电容容量，单位为 F， U 为电容两端充电电压，单位为 V。计算可得充电电压为 32 V 时，储能电容理论储能约为 5.12 mJ。实验结果表明，在该储能条件下，所制备的银膜换能元能够实现桥区电爆，为其在低能量激励条件下的应用提供了实验依据。

4.2. 换能元起爆性能测试

为验证银膜换能元对起爆药剂的激励能力，在桥区表面涂覆密度为 3 g/cm^3 的三硝基间苯二酚铅 (LTNR)，采用电容放电方式进行激励，实验结果如图 11 所示。电容达到设定电压后接通放电回路，换能元桥区发生电爆，电爆后桥区银膜出现明显烧蚀和断裂，药剂层出现明显反应现象。实验结果表明，所制备银膜换能元能够实现 LTNR 的有效起爆，为其在 MEMS 微型火工系统中的集成应用提供实验依据。

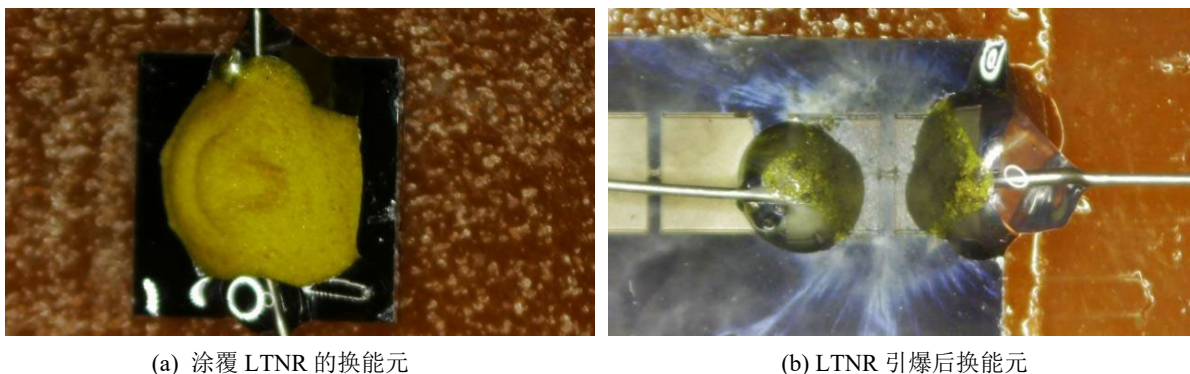


Figure 11. Morphologies of the LTNR-loaded transducer before and after initiation
图 11. LTNR 起爆实验前后换能元形貌

5. 结论

本文采用气溶胶喷印技术制备了银膜桥式换能元，并对焊盘打印路径及桥区结构进行了对比研究。确定了蛇形焊盘与圆弧桥结构的优化方案，圆弧桥换能元的电爆位置主要集中于桥区中心区域，表现出较好的位置一致性与可靠性。

烧结后银膜性能测试结果表明，四探针测得膜层方阻约为 $0.67 \Omega/\text{sp}$ ，轮廓仪测得膜层厚度约为 $5 \mu\text{m}$ ，据此计算银膜电阻率约为 $3.35 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ，电导率约为 $2.99 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。SEM 表征结果显示，优化后的银膜换能元桥区及焊盘均能够连续成形，未观察到明显的裂纹、断裂和脱落等缺陷，表明气溶胶喷印能够获得具有较好结构完整性和导电性能的银膜换能元。

本文所制备的银膜换能元在 5.12 mJ 储能条件下实现桥区电爆，并成功引爆密度为 3 g/cm^3 的三硝基间苯二酚铅 (LTNR)。实验结果表明，气溶胶喷印银膜换能元具有实现微型起爆功能的可行性，可为后续 MEMS 微型火工品中换能元的集成应用提供实验基础。

为进一步突出气溶胶喷印工艺在微尺度直接制造方面的特点，将本研究与采用磁控溅射、光刻和刻蚀等传统工艺制备的同类薄膜换能元进行对比，结果见表 1。

Table 1. Comparison between this work and conventional thin-film transducers
表 1. 本研究与传统工艺薄膜换能元对比

研究/工艺	关键指标	工艺特点
本文：气溶胶喷印(Ag)	桥区尺寸：200 μm $\times$ 250 μm 激励/发火：5.12 mJ 桥区电阻：约 3.02 Ω	数字直写；无需掩模、光刻和刻蚀；结构调整灵活
解瑞珍等[8]：磁控溅射 + 刻蚀(Ni-Cr)	激励/发火：约 1.05 mJ	真空沉积后刻蚀成形
王科伟等[9]：磁控溅射 + 光刻 + 湿法刻蚀(Ni-Cr)	桥区尺寸：400 μm $\times$ 380 μm 桥区电阻：(1 $\pm$ 0.1) Ω 激励/发火：5 A	需光刻、显影、刻蚀等多道工序

对比可见，本研究的主要优势是通过数字路径直接完成焊盘与桥区成形。相较传统磁控溅射、光刻、刻蚀路线，可省去掩模、匀胶、显影、刻蚀及去胶等多步图形转移工序，因此在微尺度结构快速迭代、工艺简化和小批量定制方面更具优势。

参考文献

- [1] 褚恩义, 刘卫, 韩瑞山, 等. MEMS 火工品设计方法探讨[J]. 火工品, 2023(6): 1-7.
- [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.
- [3] 褚恩义, 张方, 张蕊, 等. 第四代火工品部分概念初步探讨[J]. 火工品, 2018(1): 1-5.
- [4] 胡腾江, 任炜, 赵玉龙. MEMS 起爆器研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 359-368.
- [5] 沈佳驰. 碳膜换能元制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [6] 李林. 喷墨打印制备银基换能元及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- [7] 王科伟, 段卜仁, 姜晓斌, 等. Ni-Cr 桥膜换能元直流激励下作用规律研究[J]. 火工品, 2023(6): 21-26.
- [8] 解瑞珍, 任小明, 王可暄, 等. Ni-Cr 桥膜换能元的制备[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 584-587.
- [9] 王科伟, 杨正才, 刘海旭, 等. 钝感 Ni-Cr 金属桥膜换能元的制备及性能[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 819-823.
- [10] 任小明, 姚洪志, 解瑞珍, 等. 镍铬硅薄膜换能元的制备及其发火性能研究[J]. 火工品, 2024(5): 42-45.
- [11] 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.
- [12] Chen, Y., Nagarajan, V., Rosen, D.W., Yu, W. and Huang, S.Y. (2020) Aerosol Jet Printing on Paper Substrate with Conductive Silver Nano Material. *Journal of Manufacturing Processes*, **58**, 55-66.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.064>
- [13] Rosker, E.S., Barako, M.T., Nguyen, E., DiMarzio, D., Kisslinger, K., Duan, D., *et al.* (2020) Approaching the Practical Conductivity Limits of Aerosol Jet Printed Silver. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 29684-29691.
<https://doi.org/10.1021/acsami.0c06959>
- [14] Smith, M., Choi, Y.S., Boughey, C. and Kar-Narayan, S. (2017) Controlling and Assessing the Quality of Aerosol Jet Printed Features for Large Area and Flexible Electronics. *Flexible and Printed Electronics*, **2**, Article ID: 015004.
<https://doi.org/10.1088/2058-8585/aa5af9>
- [15] 王柯心, 胡腾江, 褚恩义, 等. 内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置[J]. 火工品, 2020(6): 5-9.