

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.06.002

基于芯片式银钯合金膜电桥的换能元的设计与性能研究*

樊龙龙^① 马骏^② 刘剑^② 艾沛延^② 杨康^② 郭凯^② 吴琴钟^② 韩克华^②

① 海军装备部(陕西西安,710043)

② 陕西应用物理化学研究所(陕西西安,710061)

[摘要] 为了使火工品换能元电桥芯片化,提升火工品换能元电桥的加工精度及效能,采用银钯合金膜制备芯片式火工品换能元电桥,并开展了性能研究。结果表明:通过激光调阻工艺制备的银钯合金膜换能元电桥芯片的电阻精度得到提高,电阻为 $1\ \Omega$ 时,精度可达 $\pm 1\%$;基于银钯合金膜芯片的换能元的最小爆发工作电压为 $16\ \text{V}$ ($33\ \mu\text{F}$),最小爆发电流为 $2.9\ \text{A}$ ($50\ \text{ms}$),最大不熔断电流为 $1.3\ \text{A}$ ($5\ \text{min}$),最高温度为 $215.13\ ^\circ\text{C}$;基于银钯合金膜电桥芯片换能元的电点火器安全电流在 $1.3\sim 1.6\ \text{A}$ 之间,满足钝感火工品 $1\ \text{A}$ 、 $1\ \text{W}$ 、 $5\ \text{min}$ 的要求,并且能可靠点燃 $40\ \text{mg}$ 斯帝芬酸铅与 $180\ \text{mg}$ 的 B/KNO_3 的装药序列。为高效能、高精度电火工品换能元电桥的标准化设计及应用提供技术参考。

[关键词] 火工品;换能元芯片;激光调阻;银钯合金膜

[分类号] TJ450;TQ565

Design and Performances of the Transducer Based on Chip-Type Silver-Palladium Alloy Film Bridge

FAN Longlong^①, MA Jun^②, LIU Jian^②, AI Peiyan^②, YANG Kang^②, GUO Kai^②, WU Qinzong^②, HAN Kehua^②

① Navy Equipment Department of PLA (Shaanxi Xi'an, 710043)

② Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] In order to realize the chip-based design of the transducer bridge of initiators and improve the processing accuracy and efficiency, a silver-palladium alloy film was used to prepare a chip-based initiator transducer bridge, and the performance research was conducted. The results indicate that the prepared chip-type silver-palladium alloy film transducer bridge can improve the accuracy of transducer resistance through laser trimming tuning technology. The resistance is $1\ \Omega$, and the accuracy can reach $\pm 1\%$. The minimum firing parameters of the alloy film chip-based transducer were measured as $16\ \text{V}$ ($33\ \mu\text{F}$) and $2.9\ \text{A}$ ($50\ \text{ms}$), with a maximum non-fusing current of $1.3\ \text{A}$ sustained for 5 minutes, reaching $215.13\ ^\circ\text{C}$ peak temperature. The safety current for the alloy film bridge-based transducer initiators is $1.3\sim 1.6\ \text{A}$, meeting the safety requirements of $1\ \text{A}$, $1\ \text{W}$, and $5\ \text{min}$ for insensitive initiators. It could successfully ignite lead styphnate ($40\ \text{mg}$) and B/KNO_3 ($180\ \text{mg}$) charge sequences with reliability. It provides technical references for the standardized design and application of high-efficiency and high-precision bridges in initiators.

[KEYWORDS] initiator; transducer chip; laser trimming; silver-palladium alloy film

0 引言

火工品是武器装备系统的始发能源,火工品的

安全性和可靠性直接影响武器装备系统的安全性和可靠性。作为火工品中的始发元件和核心部件,换能元承担着激发能量转换、引发爆炸反应的重要作用。故换能元的性能直接决定了火工品的发火可靠

* 收稿日期:2025-10-16

基金项目:国家技术基金项目(JZX7J202311BZ003000)

第一作者:樊龙龙(1984—),男,工程师,主要从事火工品质量监督工作。E-mail: 305405803@qq.com

通信作者:艾沛延(2000—),女,博士研究生,主要从事先进火工品技术研究。E-mail: 954730886@qq.com

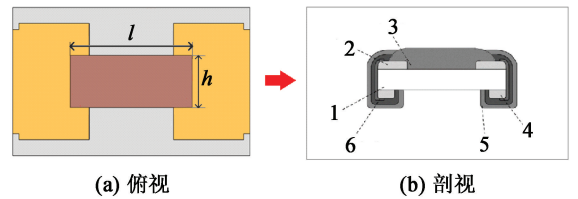
性和安全性。电火工品的换能元主要是由电桥、基体和电极组成。其中,电桥的参数对换能元以至火工品性能的影响至关重要;因此,国内学者对电桥开展了大量研究。王广海等^[1]采用掩膜-溅射镀膜方法制备了双V形薄膜换能元电桥,电阻范围在 $1.7 \sim 2.1 \Omega$ 之间,但该换能元电阻散差较大;齐雅松等^[2-3]利用线切割工艺制备了5桥区串联鱼骨形结构的换能元电桥,电阻范围为 $0.9 \sim 1.2 \Omega$,但使用线切割工艺成本高,制备的电桥合格率低;王科伟等^[4]采用湿法腐蚀制备了一种电阻为 1.0Ω 的薄膜换能元电桥,电阻精度为 $\pm 10\%$,但该工艺复杂、成本较高;易镇鑫等^[5]采用喷墨式打印工艺制备了电阻为 $(1.0 \pm 0.1) \Omega$ 的银膜换能元电桥,喷墨式打印工艺中墨水普遍具有较低的黏度,使得墨水在沉积至基底之后会产生扩散现象,导致电桥合格率低^[6-7];艾沛延等^[8]采用激光加工工艺制备了一种电阻为 $0.9 \sim 1.1 \Omega$ 的贴膜式薄膜换能元电桥,电桥形状为蝶形和S型,由于激光的功率对于薄膜有烧蚀现象,导致电阻的散差较大。综上,目前电火工品换能元电桥种类繁多,形态各异,电阻散差大,精度差,合格率低,在制备换能元时采用的工艺成本高,机械性能较差^[9]。银钯合金在电阻制造方面具有良好的机械性能和高温稳定性、较好的长期储存性和可靠性以及较高的导电性能与导热性能^[10]。但目前为止,没有将该材料应用于火工品换能元电桥制备方面的相关报道。

本文中,为了使火工品换能元电桥芯片化,提升火工品换能元电桥的加工精度及效能等,采用银钯合金膜制备了芯片式火工品换能元电桥,并开展了性能研究,为高效能、高精度电火工品换能元电桥的标准化设计及应用提供技术参考。

1 芯片式银钯合金膜电桥的设计、制备及表征

1.1 芯片式电桥设计

为了满足钝感火工品 1 A 、 1 W 、 5 min 安全性^[11]及电阻高精度的要求,设计的高精度电桥芯片结构如图1所示。其中,电桥芯片的电阻膜桥区长度为 l ,桥区宽度为 h ,电阻膜厚度为 t 。电阻膜材料采用银钯合金膜,基片厚度为 0.47 mm 的氧化铝 Al_2O_3 陶瓷,端电极膜采用厚度为 $4 \mu\text{m}$ 的金 Au 。为了解决磁控溅射中溅射功率对薄膜制备厚度及电桥电阻的影响,采用激光调阻方法对设计电阻为 0.95Ω 的换能元电桥芯片进行电阻精调,可实现精



1 - 基片;2 - 正电极膜;3 - 电阻膜;
4 - 背电极膜;5 - 锡铅可焊层;6 - 端电极膜。

图1 电桥芯片俯视图及剖视图

Fig. 1 Vertical view and sectional view of the bridge chip

度满足 $\pm 1\%$ 的 1Ω 电桥芯片。

电阻计算公式:

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{l}{ht}. \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻膜电阻率,取 $2.54 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。

为了提升银钯合金的机械强度,有利于后期的激光调阻以提升电阻精度,银钯合金电阻膜的厚度参数选取 $8 \mu\text{m}$ 。根据式(1),设计了电桥芯片 $1^\# \sim 5^\#$ 共5种电阻膜尺寸。参数如表1所示。

表1 电阻膜设计参数

Tab. 1 Design parameters of the resistive film

		mm				
电桥芯片		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
l		1.8	1.5	1.0	0.8	0.5
h		0.60	0.50	0.33	0.26	0.17

1.2 芯片式电桥制备

电桥芯片的制备工艺流程如图2所示。首先,采用磁控溅射将金属钯溅射在表面干净的 Al_2O_3 基板上,形成正电极膜和背电极膜,工艺流程如图2(a)~图2(c)所示;其次,在正面电极上采用磁控溅射工艺制备银-钯电阻膜,并进行激光调阻,工艺流程如图2(d)~图2(e)所示;第三,为了便于电桥芯片的自动化焊接,采用磁控溅射的方法给端电极镀金膜,形成电桥芯片的端电极,工艺流程如图2(f)所示;最后,采用划片机进行划片切割,形成高精度电桥芯片,工艺流程如图2(g)所示;制备的高精度电桥芯片实物如图2(h)所示。

1.3 芯片式电桥表征

采用Zeiss EVO-18型扫描电子显微镜、Thermo Scientific ESCALAB QXi型能谱仪、Bruker Dimension Icon型原子力显微镜分别对电桥芯片的电阻膜的微观形貌、能谱及表面粗糙度进行表征。其中,表面粗糙度采用频率为 190 kHz 的轻敲模式,敲击区域为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 。表征结果如图3所示。

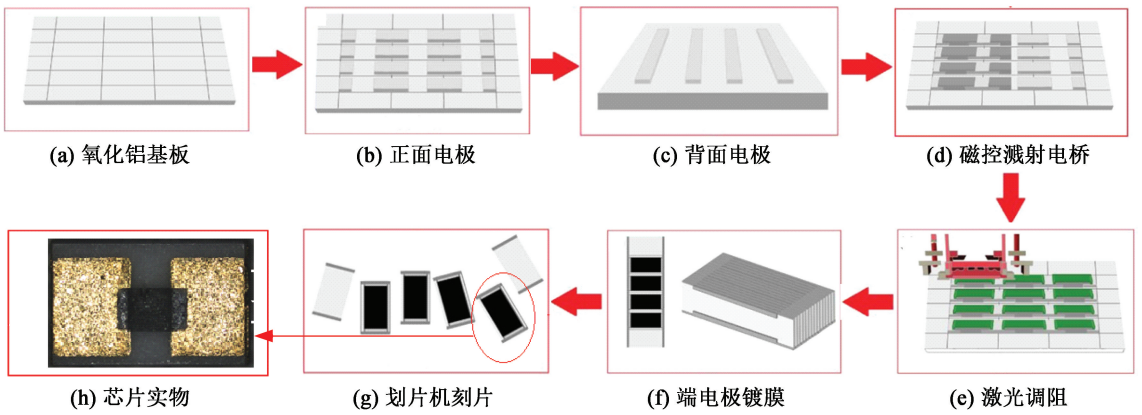
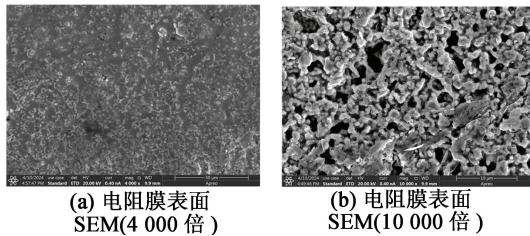


图 2 高精度电桥芯片制备工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of preparation process of the high-precision bridge chip

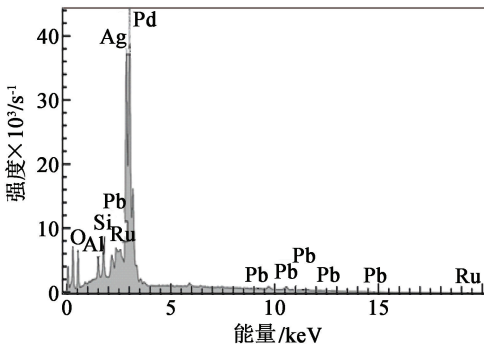


41.05%，银元素的质量分数为33.32%；并且存在少量质量分数4.16%的铝元素、质量分数3.27%的钨元素、质量分数1.60%的硅元素和质量分数1.45%的铝元素。如图3(d)可以看出，电桥芯片表面平均粗糙度为9.23 nm。

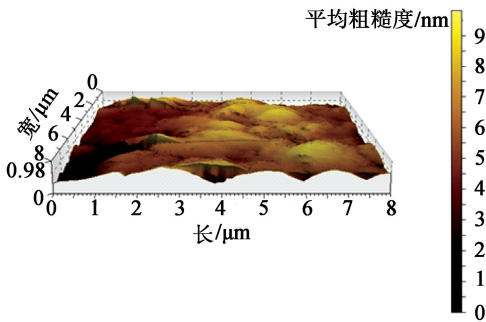
2 基于电桥芯片的换能元的设计、制备及性能研究

2.1 换能元设计

基于电桥芯片的换能元(简称芯片换能元)由电桥芯片、基底(塞子)、电极组成,结构示意图如图4所示。



(c) 电阻膜能谱分析

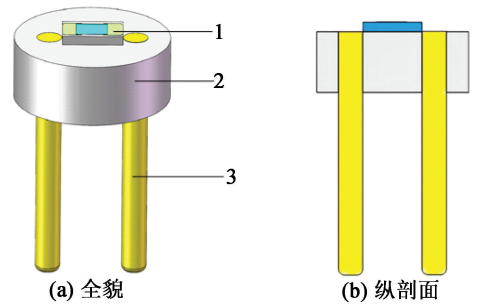


(d) 芯片换能元 AFM 形貌

图 3 电桥芯片表征

Fig. 3 Characterization of the bridge chip

由图3(a)~图3(b)可以看出,电阻膜表面呈现白色,表面晶粒均匀、细小,结合紧密;膜基结合好,表面光滑、致密,结构均匀,较少有缺陷。由图3(c)可以看出,制备的电阻膜中,钯元素的质量分数为



1 - 电桥芯片;2 - 塞子;3 - 电极。

图 4 芯片式电桥换能元结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of chip-type transducer bridge

针对上述5种电桥芯片的换能元开展安全性和可靠性的优化设计仿真。对于换能元的1 A、1 W、5 min 安全性仿真,可认为达到斯帝芬酸铅的5 s 爆点282 ℃时发火^[12];对于换能元的5 A、50 ms 发火可靠性仿真,可认为当电桥温度达到熔点961 ℃时可靠发火。图5为芯片换能元在1 A和5 A恒流

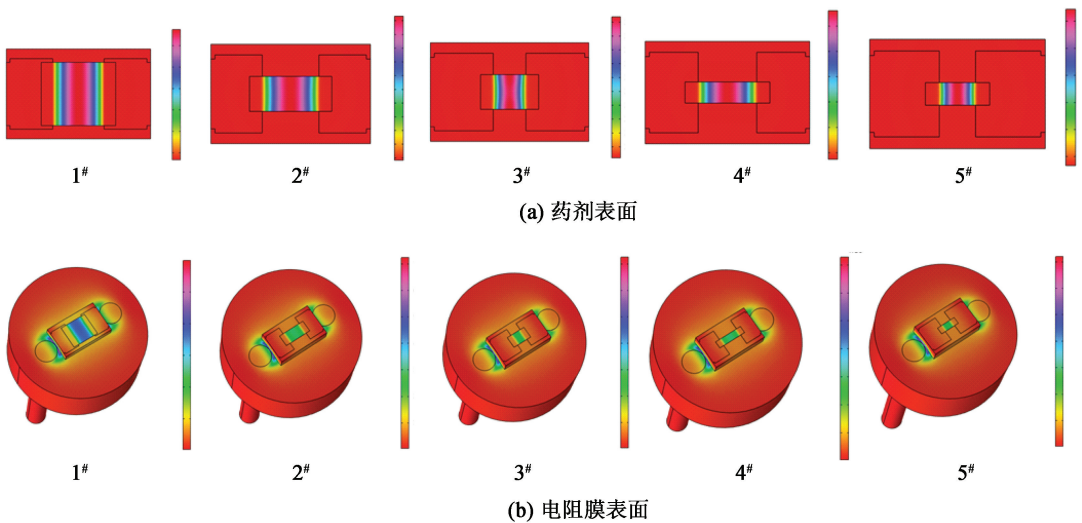


图5 芯片换能元在1 A和5 A恒流激励下的温度分布云图

Fig. 5 Cloud views of temperature distribution of the chip transducer under 1 A and 5 A constant current

作用时的温度分布云图。

在施加1 A、5 min恒流激励时,药剂表面的温度分布云图如图5(a)所示,芯片换能元1#~5#的最高温度分别为129.1、154.2、167.1、201.4、226.5℃,均未超过药剂的5 s爆发点;电阻膜表面的温度分布云图见图5(b),在施加5 A、50 ms恒流激励时,桥区表面最高温度均大于电阻膜材料的熔点961℃。

2种恒流激励条件下的升温曲线如图6所示。

从图6(a)中可以看出,在1 A、5 min恒流激励时,芯片换能元1#~5#分别在92、84、68、52、23 s时达到温度平衡,对应的最高温度分别为129.1、154.2、167.1、201.4、226.5℃;从图6(b)中可知,在5 A、50 ms恒流激励下,芯片换能元1#~5#的电阻膜温度分别在0.340、0.460、0.060、0.065、0.015 ms时达到电阻膜材料熔点961℃。

由图5和图6可知,当电阻为定值、电阻膜厚度 t 相同时, l 越小,宽度 h 越小,使得电阻膜面积减小,故而受热面积也随之减小。在相同的电激励作用下,电阻膜的升温速率越快,达到相同温度所需的时间越短,越不利于安全性。这是由于,在电阻相同的情况下, l 和 h 的减小,电桥芯片中的电阻膜散热面积也减小,相同时间内向周围传递的热量减少,电阻膜表面的热量更加集中,从而电阻膜表面的温度也就越高。因此,电桥芯片的尺寸对1 A、1 W、5 min安全性和5 A、50 ms发火可靠性都有显著影响。故而经过验证,选取 $l=1.8$ mm、 $h=0.6$ mm进行加工。

2.2 换能元的制备

将制备好的电桥芯片与基体表面的2个电极进

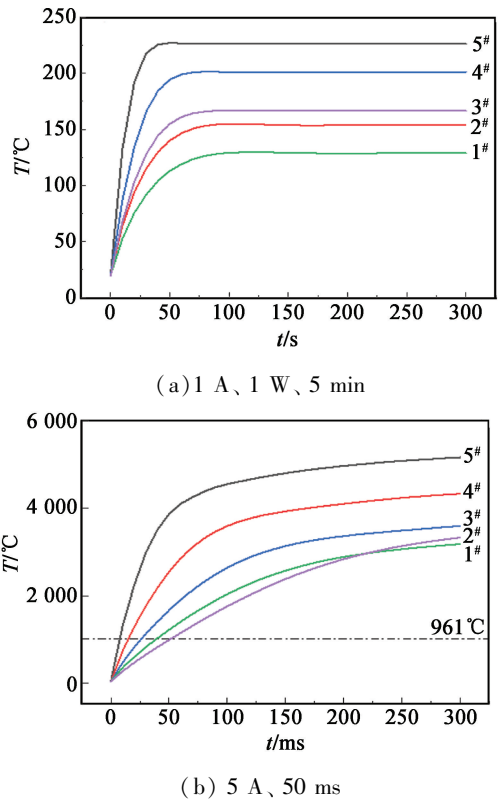


图6 芯片换能元在1 A和5 A恒流下的升温曲线

Fig. 6 Temperature rise curves of chip transducer at 1 A and 5 A constant current

行可靠焊接。选取20发样品进行电阻测试,测试结果如表2所示。

由表2可知,芯片换能元的桥路平均电阻为表2 芯片换能元的电阻

Tab. 2 Resistance of the chip transducer

样品发数	平均电阻/ Ω	标准差
20	1.008	0.000 38

1.008 Ω , 标准差为 0.000 38, 采用银钯合金膜通过激光调阻制备的火工品换能元的电阻精度可达 $\pm 1\%$, 电阻精度较高, 电阻散差较小。

2.3 芯片换能元的性能试验

2.3.1 试验设备及原理

2.3.1.1 最小爆发工作电压

采用 UTP1310 型直流电源通过 1 k Ω 充电电阻给全密封高能复合钽电容进行充电, 使电容在充电电压下进行工作。在放电开关闭合时, 电容对芯片换能元进行放电。放电回路的电流曲线采用 Model 5008C 型电流传感器进行测试, 采用数字示波器探头测试芯片换能元两端的电压 U , 并使用 MDO34 型数字示波器采集 $U-t$ 、 $I-t$ 曲线, 使用高速摄影拍摄电激励反应过程。

2.3.1.2 最小爆发电流

采用 AT-NS1132-25 型脉冲恒流源对芯片换能元施加 50 ms 的恒流脉冲, 两端电压 U 采用数字示波器探头进行测试, 并使用 MDO34 型数字示波器进行数据采集。

2.3.1.3 最大不熔断电流

将滑线变阻器设定为 10 Ω , 与芯片换能元进行串联, 采用 UTP1310 型直流电源提供预设的电压, 采用 Fluke 15B+ 型电流表对回路中的电流进行检测。试验过程中, 采用红外系统进行温度测试。

2.3.1.4 发火及输出特性

按 GJB 736.16A—2019《火工品试验方法 第 16 部分: 点火压力-时间曲线测定》^[13], 对基于高精度电桥芯片的火工品换能元的发火及输出特性进行测试。

2.3.2 试验结果及分析

2.3.2.1 最小爆发工作电压

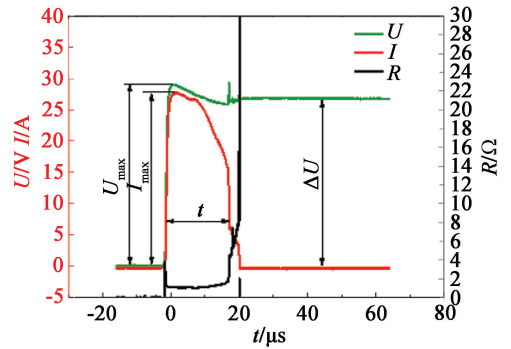
芯片换能元在不同工作电压下的 $U-t$ 、 $I-t$ 、 $R-t$ 曲线如图 7 所示。

由图 7 可知, 当芯片换能元发生电爆时, 由于电阻膜发生电爆而出现断裂, 导致放电回路形成开路; 同时, 电容两端还存在一定的剩余电压, 故电流瞬间陡降为 0, 电阻瞬间陡升, 对应的电压开始保持某一固定值。从电流上升时间到爆发时刻的时间为爆发时间 t , 电容两端剩余电压为 ΔU 。

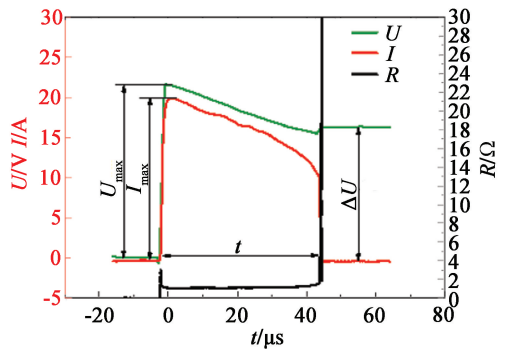
其中, 电容放电回路损耗

$$\delta = \left(1 - \frac{CU_{\max}^2/2}{CU_0^2/2}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{U_{\max}^2}{U_0^2}\right) \times 100\% \quad (2)$$

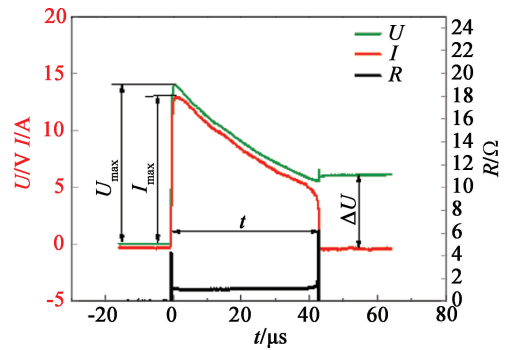
根据电容放电电压衰减公式及图 7 可知, 电容两端剩余电压为



(a) 32 V



(b) 24 V



(c) 16 V

图 7 在不同工作电压下芯片换能元的 $U-t$ 、 $I-t$ 与 $R-t$ 曲线

Fig. 7 $U-t$, $I-t$ and $R-t$ curves of chip transducer at different charging voltages

$$\Delta U = U_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

则爆发电压

$$U_b = U_{\max} - \Delta U = U_{\max} - U_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

输出的能量利用率 η 为

$$\eta = \frac{U_b}{U_{\max}} = \frac{U_{\max} - U_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}}}{U_{\max}} \times 100\% = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \times 100\% \quad (5)$$

发火能量裕度则为

$$\xi = 1 - \eta = e^{-\frac{t}{\tau}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: C 为电容; U_0 为工作时电容两端电压; U_{\max} 为

输出最大电压; τ 为时间常数。

采用33 μF 的电容作为激发源,最小爆发电压试验数据如表3所示。

如表3可知,芯片换能元的最小爆发工作电压为16 V。如图7、表3可知:随着工作电压的升高,输出最大电流 I_{max} 和输出最大电压 U_{max} 均在升高;同时,爆发时间 t 逐步减小,电容两端剩余电压 ΔU 增大,能量利用率减小,发火能量裕度提升。这是由于,工作电压的升高加快了电阻膜的气化过程,加速了电爆炸反应发生,爆发时间减小,距离电容电压衰减到0的时间(5τ)越远,能量利用率 η 降低,发火能量裕度提升,发火可靠性越高。如图7(c)所示,在最小爆发工作电压为16 V时,爆发时间接近电容放电时间参数(5τ),能量利用率最大,发火能量裕度最小,导致电爆后电阻膜未形成开路。

采用高速摄影观察芯片换能元在16 V和32 V工作电压下电激励反应过程,如图8(a)、图8(b)所示。图8中,拍摄速率为200 000 帧/s,拍摄零点为

放电开关导通时刻。

如图8所示,在工作电压为16 V时,芯片换能元在27 μs 时开始出现明显的火光现象,在81 μs 时反应最剧烈;在工作电压为32 V时,芯片换能元在5 μs 时开始出现明显的火光现象,在10 μs 时反应最剧烈,相较于16 V时反应时间更快,反应火光更剧烈。这是因为,在施加电激励时,芯片换能元由于电阻效应,桥区受热过程中发生了剧烈爆炸,在热膨胀作用下,爆炸范围不断向外扩散。当32 V工作电压条件下反应时间更短,反应程度更剧烈,是由于加载到芯片换能元两端的电能增加,通过电桥的瞬态电流增大。相同电桥面积下,电流密度更大,温度更高,爆发时间更短,电爆更剧烈,爆发出的火花亮度更加明显。

2.3.2.2 最小爆发电流

最小爆发电流试验数据如表4所示。

从表4可知,芯片换能元最小爆发电流为2.9 A。芯片换能元在2.9、3.0、3.5 A的恒流电爆曲线

表3 芯片换能元最小爆发工作电压测试数据

Tab. 3 Tested minimum burst voltage of the chip transducer

充电电压/V	U_{max}/V	I_{max}/A	$t/\mu\text{s}$	$\Delta U/\text{V}$	$\delta/\%$	$\eta/\%$	$\xi/\%$
32	29.21	28.64	18.70	25.70	16.68	43.45	56.55
28	25.53	24.55	26.54	19.15	16.85	55.07	44.93
24	21.84	20.60	45.90	15.21	17.19	75.09	24.91
20	18.21	17.51	47.66	10.56	17.06	76.31	23.69
16(重复试验5次, 标准差为1.6%)	14.55	13.85	108.90	5.97	17.28	96.31	3.69
15(重复试验5次, 均未作用)							
14(未作用)							

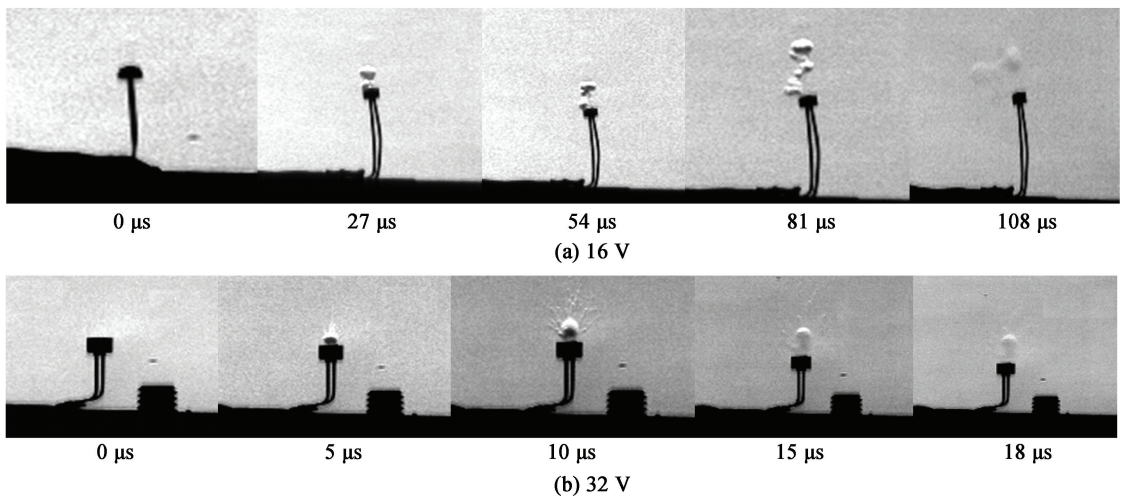


图8 芯片换能元在不同工作电压下电激励反应过程的高速摄影图

Fig. 8 High-speed photographic images of electrical excitation response process of chip transducers at different charging voltages

表 4 芯片换能元最小爆发电流

Tab. 4 Minimum burst current of the chip transducer

电流/A	电阻/ Ω	Δt /ms
4.5	1.002 3	0.50
4.0	1.001 6	0.70
3.5	1.001 9	1.46
3.0	1.009 7	4.60
2.9(重复试验 5 次,标准差 为 1.2%)	1.009 2	23.60
2.8(重复试验 5 次,均未作用)	1.001 7	
2.7(未作用)	1.003 9	

如图 9 所示。

由表 4 和图 9 可知,随着施加电流的减小,电爆时间 Δt 趋近于 50 ms,当芯片换能元两端的 $U-t$ 曲线从施加 50 ms 脉宽的预设电流起,由于电阻膜在经历 Δt 时间后发生电爆,使得回路产生开路,故 $U-t$ 曲线出现拐点后陡升。芯片换能元在 2.9 A、50 ms 和 3.5 A、50 ms 试验下电桥反应如图 10(a)、图 10(b) 所示。

由图 10 可以看出,芯片换能元在 2.9 A 时,由于接近未爆发电流点,芯片换能元所产生的电爆火

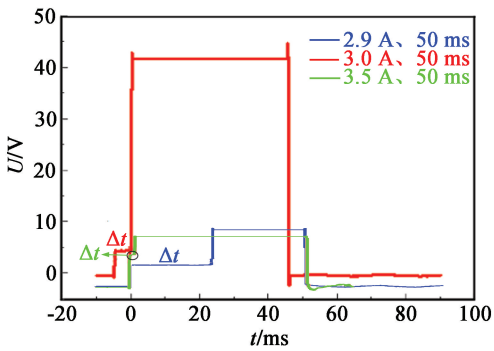


图 9 芯片换能元脉冲恒电流电爆曲线

Fig. 9 Pulsed constant current electroburst curves of the chip transducer

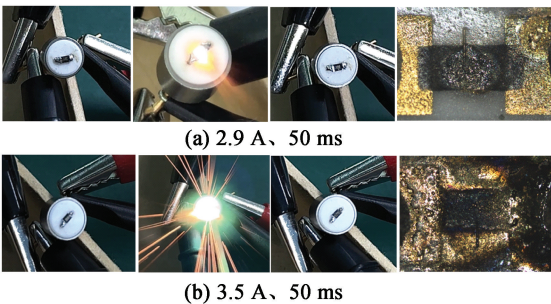


图 10 芯片换能元电爆过程及试验后电桥芯片形貌

Fig. 10 Electroburst process of the chip transducer and shape of the bridge chip after test

光比较微弱;在 3.5 A 恒流激励下,产生的电爆火光十分明亮,且火光面积较大,并且在发生电爆后电阻膜烧蚀更加明显。这是因为,通过芯片换能元的电流越大,在桥区面积内的电流密度越大,升温速率越快,50 ms 内产生的温度越高,从而导致反应更加剧烈。

2.3.2.3 最大不熔断电流

芯片换能元最大不熔断电流结果如表 5 所示。

表 5 芯片换能元最大不熔断电流试验数据

Tab. 5 Tested maximum non-fusing current of the chip transducer

施加 电流/A	电阻/ Ω	施加电流 时间/s	试验后 电阻/ Ω
1.0	1.017 0	300	1.007 0
1.1	1.002 7	300	1.002 4
1.2	1.005 5	300	1.004 3
1.3	1.010 2	300	1.010 1
1.4	1.002 1	300	0.932 5
1.5(重复试验 10 次, 标准差为 1.8%)	1.002 9	300	0.732 1
1.6(重复试验 3 次)	1.003 1	230	∞

从表 5 可知:当施加电流为 1.6 A、持续时间为 230 s 时,电流表显示回路电流为 0,试验后桥路电阻为 ∞ ,此时,芯片换能元的桥路电阻已经成为开路;当施加电流为 1.4 ~ 1.5 A 范围时,电流表显示回路电流逐渐增大,在经历 5 min 试验后,桥路电阻减小,分别为 0.932 5 Ω 和 0.732 1 Ω 。经分析,电阻变小是由于在该电流条件下,芯片换能元中的电桥芯片电阻膜发生热熔解,试验结束后经冷却重新凝固,导致试验后电阻变小;当经过 1.3 A、5 min 后,桥路电阻为 1.010 1 Ω ,属于正常测试范围,故芯片换能元最大不熔断电流为 1.3 A。在 1.3 A、5 min 和 1.6 A、5 min 试验下的红外测温 and 试验后显微镜下拍摄结果如图 11(a)、图 11(b) 所示。

如图 11 所示:芯片换能元在 1.3 A、5 min 的恒流激励条件下,红外测温系统实测最高温度为 215.13 $^{\circ}\text{C}$,试验后芯片换能元表面完好,焊点烧蚀程度较小;在 1.6 A、5 min 的恒流激励条件下,试验过程中红外测温系统实测最高温度为 284.81 $^{\circ}\text{C}$,试验后芯片换能元表面完好,焊点周围烧蚀程度严重,试验后电桥芯片的电极与塞子的焊点完全脱离。在 1.6 A、5 min 时,最高温度为 284.81 $^{\circ}\text{C}$,已经超过斯帝芬酸铅的爆发点温度 282 $^{\circ}\text{C}$;在 1.3 A、5 min 时,最高温度为 215.13 $^{\circ}\text{C}$,小于斯帝芬酸铅的爆发

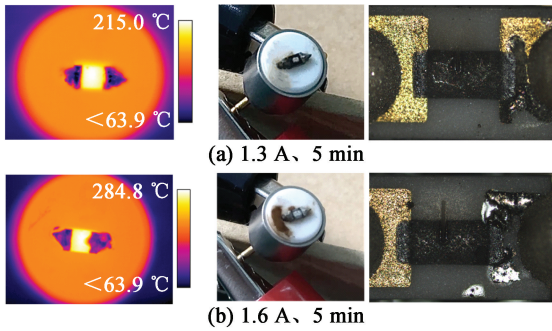


图 11 芯片换能元在 1.3 A 和 1.6 A 恒流激励下的桥区变化过程

Fig. 11 Variation process of bridge area of the chip transducer under 1.3 A and 1.6 A constant current

点温度 282 °C。由此可知,芯片换能元的安全电流在 1.3 ~ 1.6 A 之间,满足钝感火工品 1 A、1 W、5 min 安全性要求。

2.3.2.4 发火输出特性

为了验证芯片换能元的发火特性,采用 40 mg 的斯帝芬酸铅为始发装药,输出装药为 180 mg 的 B/KNO₃ 进行点火输出特性试验。分别采用电容放电和恒流激励进行发火,在电容为 33 μF 时,不同工作电压和恒流 5 A、50 ms 作用下测试 *p-t* 曲线,结果如表 6 和图 12 所示。

由表 6 和图 12 可知,在工作电压为 22、26、30 V 时,分别在 3.68、2.73 ms 和 0.48 ms 时检测到压力。因此,采用电容放电激励起爆时,随着工作电压的升高,建压时间逐步提前。采用恒流激励起爆电点火器时,峰值压力速率上升缓慢,在 2.11 ms 时检测到压力。芯片换能元的电点火器在 33 μF、22 V 及 5 A 恒流激励条件下的发火过程如图 13 所示。

图 13(a) 所示为芯片换能元的电点火器在 33

表 6 不同电激励下各 *p-t* 曲线的测试数据

Tab. 6 Tested *p-t* curves under different electrical excitations

起爆方式	施加激励	建压时间/ms	峰值压力/MPa	峰值压力时间/ms
电容放电	充电 22 V	3.68	10.29	5.03
	充电 26 V	2.73	10.26	4.08
	充电 30 V	0.48	10.13	3.52
恒流发火	5 A、50 ms	2.11	11.70	12.32

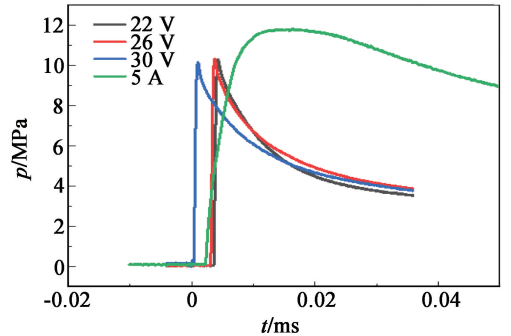


图 12 不同电激励下起爆电点火器的 *p-t* 曲线

Fig. 12 *p-t* curves of detonating electric igniter under different electrical excitations

μF、22 V 放电条件下的发火过程:在 $t = 105$ ms 时,开始起火;在 $t = 355$ ms 时,与药剂反应最为剧烈;在 $t = 380$ ms 时,燃烧接近尾声。图 13(b) 所示为 5 A 恒流的条件下发火:在 $t = 65$ ms 时,开始起火;在 $t = 140$ ms 时,点火器与药剂反应最为剧烈;在 $t = 190$ ms 时,燃烧接近尾声。芯片换能元的电点火器可以可靠点燃斯帝芬酸铅。

3 结论

采用银钯合金膜通过激光调阻工艺制备了高精

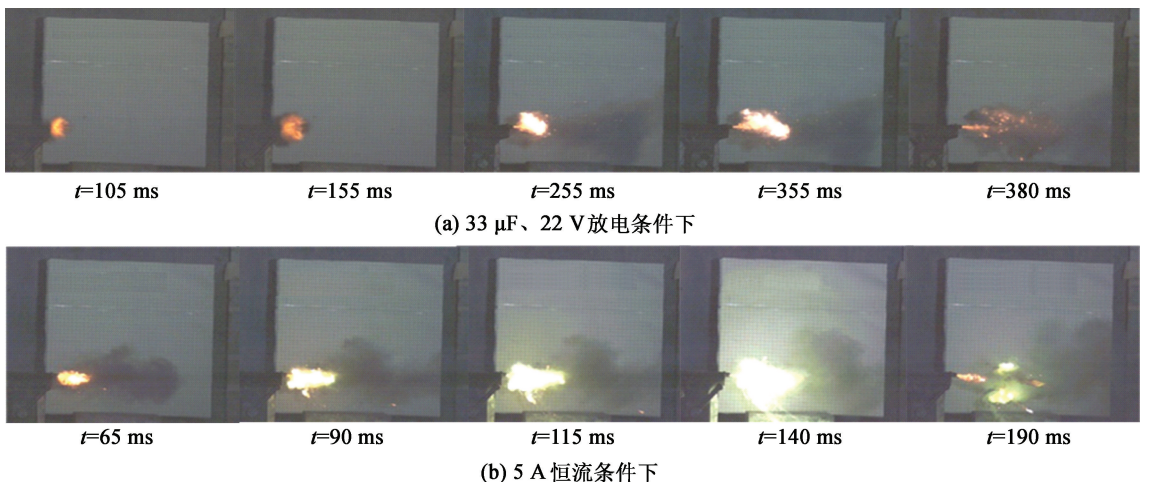


图 13 不同电激励下基于芯片换能元的点火器发火过程

Fig. 13 Firing process of chip transducer based igniter under different electrical excitations

度换能芯片,利用 Comsol 仿真分析软件,对 5 种电阻膜区尺寸的芯片换能元的结构进行了优化,最终采用 $l=1.8\text{ mm}$ 、 $h=0.6\text{ mm}$ 进行加工。在此基础上,开展了芯片换能元的电爆特性、安全特性以及发火特性的研究,结果表明:

1)通过激光调阻工艺制备的芯片式银钯合金膜换能元电桥电阻精度得到提高,电阻为 $1\ \Omega$,精度可达 $\pm 1\%$;

2)基于银钯合金膜芯片的换能元最小爆发工作电压为 16 V ($33\ \mu\text{F}$),最小爆发电流为 2.9 A (50 ms),最大不熔断电流为 1.3 A (5 min),最高温度为 $215.13\text{ }^\circ\text{C}$;

3)基于银钯合金膜电桥芯片的换能元电点火器安全电流在 $1.3\sim 1.6\text{ A}$ 之间,满足钝感火工品 1 A 、 1 W 、 5 min 的要求,并且能可靠点燃 40 mg 斯帝芬酸铅与 180 mg 的 B/KNO_3 的装药序列。

参 考 文 献

- [1] 王广海,李国新,阿苏娜. 薄膜桥火工品的制备与性能研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 543-546.
WANG G H, LI G X, A S N. Preparation and properties of thin film bridge EED [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 543-546.
- [2] 齐雅松,吴瑞德,刘红娥,等. Ni-Cr 异形电桥的换能规律研究[J]. 火工品, 2022(2): 1-5.
QI Y S, WU R D, LIU H E, et al. Study on energy conversion property of Ni-Cr special shaped electric bridge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(2): 1-5.
- [3] 齐雅松,吴瑞德,刘红娥,等. 异形电桥发火单元温升特性的数值研究[J]. 火工品, 2021(5): 1-5.
QI Y S, WU R D, LIU H E, et al. Numerical study on the temperature rise characteristics of the firing unit with special shaped electric bridge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(5): 1-5.
- [4] 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.
WANG K W, DUAN B R, JIANG X B, et al. Study on the behavior of Ni-Cr bridge film energy conversion element under DC excitation [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023(6): 21-26.
- [5] 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 Z X, LI L, WEI M Y, et al. Preparation and properties of inkjet printing silver film bridge [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(3): 215-221.
- [6] FARAHANI R D, DUBE M, THERRIault D. Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites: Manufacturing techniques and applications [J]. Advanced Materials, 2016, 28(28): 5794-5821.
- [7] 李春燕,李晨阳,李敏杰,等. 喷墨打印墨滴成形机理及其在含能领域应用进展[J]. 含能材料, 2022, 30(9): 937-951.
LI C Y, LI C Y, LI M J, et al. Review on inkjet printing for ink droplet forming mechanism and its application in energetic materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(9): 937-951.
- [8] 艾沛延,赵婉君,吴琴钟,等. 贴膜式 Ni-Cr 换能元设计及性能研究[J]. 火工品, 2024(5): 46-53.
AI P Y, ZHAO W J, WU Q Z, et al. Design and performance study of film-applied Ni-Cr transducer elements [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2024(5): 46-53.
- [9] 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.
CHU E Y, ZHANG F, ZHANG R, et al. Preliminary discussion of new concepts of the 4th generation pyrotechnics [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(1): 1-5.
- [10] 孙浩峰. 钯合金膜的制备及膜反应器催化性能研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
SUN H F. Preparation of palladium alloy membrane and catalytic performance of membrane reactor [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.
- [11] 中国兵器工业集团有限公司. 钝感电起爆器通用规范: GJB 344A—2020 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2020.
China North Industries Group Corporation Limited. General Specification for insensitive electric-initiators; GJB 344A—2020 [S]. Beijing: National Military Standard Publishing Department, 2020.
- [12] 石蓝,杨安民,张迎春,等. 电火工品桥带温升数学模型及可靠性设计应用[J]. 火工品, 2016(6): 24-27.
SHI L, YANG A M, ZHANG Y C, et al. Temperature rise mathematical model of bridge strip electric initiator and its reliability design [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(6): 24-27.
- [13] 中国兵器工业集团有限公司. 火工品试验方法 第 16 部分: 点火压力-时间曲线测定: GJB 736. 16A—2019 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2019.
China North Industries Group Corporation Limited. Test method for initiating explosive devices Part 16: Measurement of firing pressure-time curve; GJB 736. 16A—2019 [S]. Beijing: National Military Standard Publishing Department, 2019.