

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0046-08

贴膜式Ni-Cr换能元设计及性能研究

艾沛延¹, 赵婉君², 吴琴钟¹, 杨康¹, 郭凯¹, 唐新月², 韩克华^{1, 2}, 焦清介²

(1. 陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061; 2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京, 100081)

摘要: 通过热压工艺将5 μm的Ni-Cr薄膜附着在聚酰亚胺薄膜上制备了贴膜式Ni-Cr薄膜, 采用激光刻蚀加工工艺制备了贴膜式Ni-Cr换能元电桥, 仿真优化设计了蝶形、S形换能元电桥, 并开展了2种形状电桥的贴膜式Ni-Cr换能元的伏安特性、最大不熔断电流、50 ms脉冲恒流电爆特性以及发火特性试验研究。研究表明: 桥区长度为3 mm的换能元电桥在1 A 5 min恒流激励后桥区温度最低; 贴膜式Ni-Cr换能元在33 μF电容放电时, 随着充电电压的升高断桥时间缩短, 蝶形和S形未发生断桥的电压分别为16, 20 V; 蝶形和S形换能元在5 min恒流脉冲输入下的最大不熔断电流分别为1.3, 1.2 A; 在50 ms脉冲恒流电爆时, 随着施加电流幅度的不断增加, 其工作电压也不断增高, 其断桥时间越来越短, S形换能元和蝶形换能元分别在2.4, 2.3 A时电桥未发生爆炸; 33 μF、28 V电容放电下贴膜式Ni-Cr换能元可以点燃斯蒂芬酸铅, 并正常发火。

关键词: Ni-Cr桥膜; 贴膜式Ni-Cr; 换能元; 发火特性; 电爆

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.007

Design and Performance Study of Film-applied Ni-Cr Transducer Elements

AI Pei-yan¹, ZHAO Wan-Jun², WU Qin-zhong¹, YANG Kang¹, GUO Kai¹, TANG Xin-yue², HAN Ke-hua^{1,2}, JIAO Qing-jie²

(1. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: Through the hot pressing process, the 5 μm Ni-Cr film was attached to the polyimide film to prepare a Ni-Cr film, the film-applied Ni-Cr transducer bridge was prepared using laser etching process, the dimensions of butterfly bridge area and S-shaped bridge area were optimized by simulation, and the tests of volt-ampere characteristics, the maximum non-fusing current, 50 ms pulse constant current explosion characteristics and the ignition characteristics of the film-applied Ni-Cr transducer elements with two shapes of bridge area were conducted. The results show that: the temperature of transducer element bridge under 1 A 5 min constant current excitation is the lowest; Under 33 μF capacitor discharge, with the increase of charge voltage, the bridge break time decreases, the non-break voltage for butterfly and S-shaped bridge is 16 V and 20 V, respectively; Under 5 min constant current pulse input, the maximum non-fusing current of butterfly and S-shaped transducer element is 1.3 A and 1.2 A, respectively; In the 50 ms impulse constant current electric explosion test, with the amplitude of the applied current increase, the operating voltage also increases, and the bridge break time is shortened, the S-shaped transducer and the butterfly transducer do not explode at 2.4 A and 2.3 A, respectively; The film applied Ni-Cr transducer can ignite the lead styphnate, and can fire normally under 33 μF, 28 V capacitor discharge.

Key words: Ni-Cr bridge film; Film-applied Ni-Cr; Transducer; Ignition characteristics; Electrical explosion

收稿日期: 2024-04-08

作者简介: 艾沛延 (2000-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事先进火工品技术研究。

通讯作者: 韩克华 (1981-), 男, 研究员, 主要从事高新火工品技术、直列式起爆及点火系统技术研究。

基金项目: 国家技术基金项目 (JZX7J202311BZ003000)。

引用本文: 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.

作为火工品的核心部件,换能元^[1]的性能直接影响着火工品的安全性、可靠性及作用效能,对此国内外学者开展了大量研究。曹建华等^[2]建立了直流和电容放电方式下桥丝升温模型、药剂升温模型及数值求解算法;周庆等^[3]通过电容放电的试验方法,研究了Ni-Cr桥丝在陶瓷和玻璃两种基体上的发火规律;吕旭旭等^[4]研究了桥丝式电火工品的脉冲激励安全性,建立了温升数理模型。随着技术发展,出现了一种基于微电子制造技术的金属桥膜式换能元,相较于桥丝/桥带换能元,金属桥膜换能元具有外形可调、一致性高、易于小型化等优点,因而受到广泛关注。任小明等^[5]利用非平衡磁控溅射设备溅射不同厚度的Ni-Cr薄膜,探究了Ni-Cr薄膜换能元发火感度规律;齐雅松等^[6-7]制备了一种由30 μm厚Ni-Cr薄膜制成的5桥区串联鱼骨形异形结构的钝感薄膜桥,得到了在不同恒流激励下桥膜和桥区的温度分布以及不同桥区宽度的温升曲线;郭凯等^[8]制备了一种由30 μm厚Ni-Cr薄膜制成的“W”型桥带,得到了电容放电和恒流2种不同电激励下起爆桥带换能元的发火规律;王科伟等^[9]采用磁控溅射制备了一种多层复合的Ni-Cr桥膜换能元,探究其在直流激励下的作用规律。

综上所述,目前采用的Ni-Cr换能元厚度大多为30 μm,加工工艺主要采用线切割工艺和磁控溅射工艺。由于线切割工艺和磁控溅射工艺复杂,严重影响电桥成品合格率,从而增加了制造成本,并且30 μm厚的电桥在焊接过程中容易出现断桥。针对此问题,本文通过热压工艺将5 μm的Ni-Cr薄膜附着在聚酰亚胺薄膜上制备了贴膜式Ni-Cr薄膜,采用激光刻蚀加工工艺制备了贴膜式Ni-Cr换能元电桥,开展了贴膜式Ni-Cr换能元的伏安特性、最大不熔断电流、50 ms脉冲恒流电爆特性以及发火特性试验研究,为钝感火工品的可靠性提升及优化设计提供参考。

1 贴膜式Ni-Cr薄膜制备及表征

1.1 制备

采用工业碾压法,将厚度为30 μm的Ni-Cr薄膜进行多次碾压形成厚度为5 μm的Ni-Cr薄膜;将厚

度为25 μm的聚酰亚胺薄膜与5 μm的Ni-Cr薄膜热压4 h,整体形成有机结合体,制备的薄膜样品如图1所示。



图1 贴膜式Ni-Cr薄膜
Fig.1 Film-applied Ni-Cr thin films

1.2 表征

采用Dektak XT型台阶仪测试Ni-Cr薄膜厚度,结果Ni-Cr薄膜平均厚度在 (5 ± 0.2) μm范围之内。采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察Ni-Cr薄膜的截面微观形貌,结果如图2所示;采用X射线光电子能谱分析仪(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)分析Ni-Cr薄膜中的元素组成以及其界面处原子的化学状态,结果如图3所示。

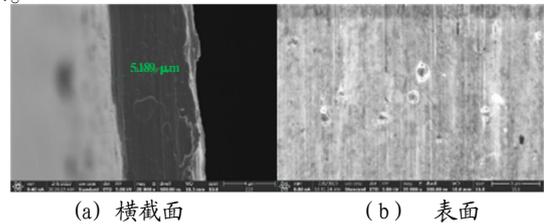


图2 Ni-Cr薄膜SEM图

Fig.2 SEM image of Ni-Cr thin film

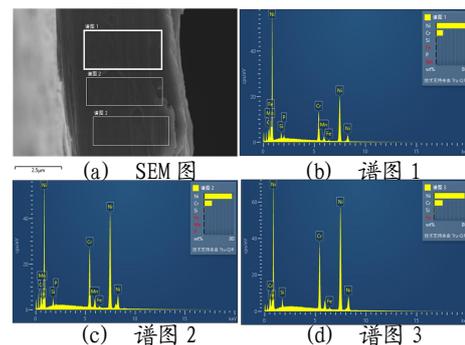


图3 Ni-Cr薄膜的能谱分析图

Fig.3 Energy spectrum analysis of Ni-Cr thin films

由图2(a)可见贴膜式Ni-Cr薄膜的断面较为平整,不存在微孔等结构缺陷,电极材料平均镀层厚度约为5.189 μm,镀层具有较光滑的平面,拥有较大的真实比表面积。由图2(b)可见,贴膜式Ni-Cr薄膜内部没有明显的两相分离现象,也不存在明显的团聚,

薄膜表面形貌分布相对均匀。

由图 3 可见, Ni-Cr 薄膜中 Ni 元素的含量分别为 79.16%、75.96%、76.33%, 平均为 77.15%; Cr 元素的含量分别为 18.16%、21.42%、21.61%, 平均为 20.39%; 存在少量平均值为 1.43% 的 Si 元素, 0.55% 的 P 元素, 0.52% 的 Mn 元素, 0.66% 的 Fe 元素。

2 贴膜式 Ni-Cr 换能元设计及制备

2.1 换能元设计

火工品换能元一般由电桥、基体和电极构成。电桥是能量转换的核心器件, 基体的作用是支撑电桥, 电极的作用是为电桥输入电能。为了开展贴膜式 Ni-Cr 换能元性能研究, 换能元电桥的形状分别采用蝶形、S 形, 其结构设计如图 4 所示。

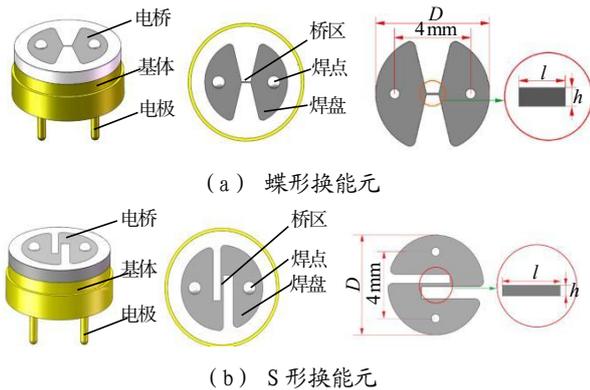


图 4 换能元及电桥结构

Fig.4 Transducer element and bridge structure

根据目前钝感火工品 1 A/1 W/5 min 安全性设计要求, 桥路电阻为 $(1 \pm 0.1) \Omega$, 取 Ni-Cr 薄膜电阻率 ρ 为 $1.09 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$, 厚度 t 为 $5 \mu m$, 为了便于散热, 规定焊点中心距离为 4 mm, 因此桥区长度从 3 mm 开始选取。

电桥电阻值的计算公式为:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{h \times t} \quad (1)$$

式 (1) 中: R 为电桥电阻, Ω ; ρ 为 Ni-Cr 薄膜电阻率, $\Omega \cdot m$; l 为电桥有效长度, mm; S 为电桥有效截面积, mm^2 ; h 为电桥有效宽度, mm; t 为电桥厚度, mm。

针对蝶形、S 形 2 种形状电桥, 设计了 5 种不同

长度和宽度的桥区尺寸, 如表 1~2 所示。

表 1 蝶形桥区尺寸

序号	1#	2#	3#	4#	5#
l/mm	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
h/mm	0.654	0.545	0.436	0.327	0.218

表 2 S 形桥区尺寸

序号	1#	2#	3#	4#	5#
l/mm	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
h/mm	0.654	0.545	0.436	0.327	0.218

2.2 仿真优化设计

采用 COMSOL Multiphysics 中的电分析和瞬态热分析模块, 对表 1~2 不同桥区尺寸的电桥进行仿真优化。基于电热起爆原理, 认为电桥火工品的发火条件为药剂的最高温度达到爆点或者金属电桥的温度达到其熔点。因此, 在分析 1 A/1 W/5 min 安全性时, 由于通电时间较长 (5 min), 可以认为药剂的温度达到 5 s 爆点时发火^[10]。为了模拟空气对流对电桥结构热分布的影响, 对壳体外表面施加对流换热约束; 仿真时参数设置具体如下: 初始温度设置为 $20^\circ C$, 电桥材料采用 Ni80Cr20, 密度为 $8.40 g \cdot cm^{-3}$, 比热为 $120 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, 导热系数为 $15 W \cdot m^{-1}$; 药剂采用斯蒂芬酸铅, 密度为 $3.02 g \cdot cm^{-3}$, 比热为 $686 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, 导热系数为 $5 W \cdot m^{-1}$; 换能元基底采用 Al_2O_3 陶瓷, 密度为 $3.72 g \cdot cm^{-3}$, 比热为 $800 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, 导热系数为 $24 W \cdot m^{-1}$ 。

施加 1 A/5 min 的恒流激励进行仿真, 蝶形、S 形 2 种形状电桥的换能元的温度分布如图 5 所示, 温升曲线如图 6 所示。

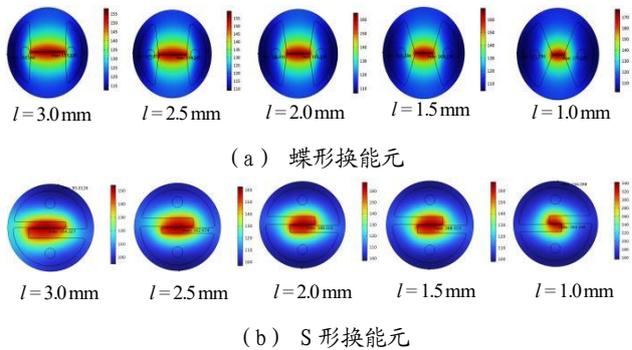


图 5 蝶形和 S 形电桥在 1 A 恒流激励下 300 s 时药剂的温度分布云图

Fig.5 Cloud view of temperature distribution of charge in butterfly and S-shaped bridges at 300 s under 1 A constant current excitation

从图 5~6 的仿真结果得出, 在 1 A/5 min 恒流激励下 S 形换能元长度在 1.0 mm 时桥区温度超过斯蒂酚酸铅 5 s 爆点 (282 °C), 其余均小于 282 °C; 蝶形和 S 形换能元温度随着桥区长度的增加而降低。为了提高火工品的安全性设计, 分别选取桥区长度 $l=3$ mm 的蝶形和 S 形换能元进行制备和研究。

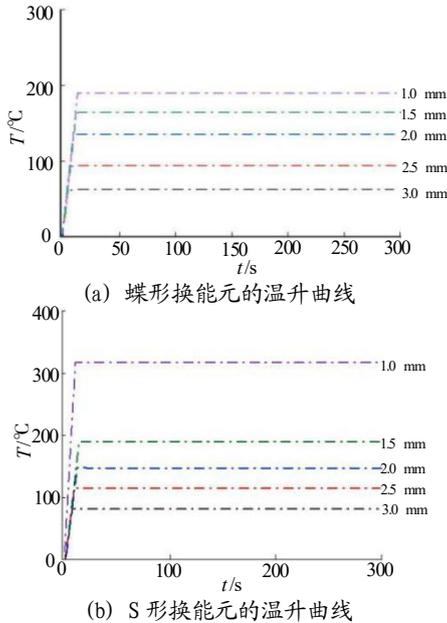


图 6 1A 恒流激励下蝶形及 S 形换能元的温升曲线

Fig.6 Temperature rise curves of butterfly and S-shaped transducer element under 1 A constant current excitation

2.3 换能元制备

采用规格型号为 LPKF Proto Laser U3 的柔性激光精密加工系统进行 Ni-Cr 薄膜电桥加工, 为了避免激光加工时对 Ni-Cr 薄膜的烧蚀, 将激光直对聚酰亚胺薄膜表面进行加工。加工参数设置为: 加工功率 2 W, 频率 50 Hz, 焦距 6.961 mm, 加工次数为 4 次。将加工后的 Ni-Cr 薄膜电桥的焊点与基体表面的 2 个电极进行定位, 通过过孔焊接工艺将薄膜电桥的焊点与基体表面的 2 个电极进行可靠焊接, 制备的 2 种贴片式 Ni-Cr 换能元如图 7 所示。

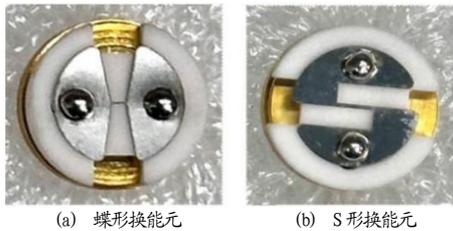


图 7 换能元实物图

Fig.7 Physical diagram of the transducer element

3 试验

3.1 伏安特性测试

换能元伏安特性试验原理框图如图 8 所示。

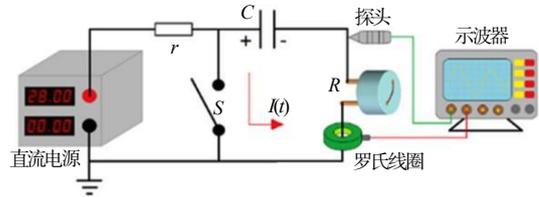


图 8 伏安特性试验原理框图

Fig.8 Schematic diagram of test circuit for volt-ampere characteristics

试验主要由直流电源 (型号为 UTP1310) 通过 1 kΩ 充电电阻给全密封高能复合钽电容 (型号为 CAK33-50V) 进行充电, 在放电开关闭合 (型号为 GQ22) 后, 电容对样品进行放电, 其中放电回路中电流曲线 $I(t)$ 采用罗氏线圈 (型号为 MODEL 5008C) 进行测试, 采用数字示波器 (型号为 MD034) 探头测试换能元两端电压曲线 $U(t)$ 并采用数字示波器进行数据采集, 利用 Origin 软件获取 $U-I-R$ 曲线。

3.2 最大不熔断电流测试

最大不熔断电流试验原理框图如图 9 所示。

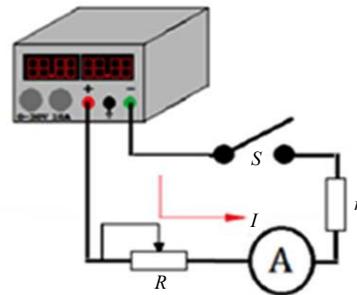


图 9 最大不熔断电流试验原理框图

Fig.9 Schematic diagram of the test circuit for the maximum non-fusing current

首先, 将滑线变阻器调到适合的阻值, 测量其电阻值; 然后, 测量高精度换能元的电阻, 将换能元连接到试验电路中, 将直流电源 (型号为 UTP1310) 电压调至 0 V。通过预设的电流和电路总电阻 (换能元电阻 r 与滑线变阻器电阻 R 之和) 计算直流电源输出电压; 打开电源输出开关, 调节电源输出电压至所需电压, 打开计时器并观察记录电流出现较大幅值波动

及其对应的时间, 试验时间 5 min 或电流表电流变为 0 (小于预设输入电流的 1%) 时试验终止。

3.3 50 ms 脉冲恒流电爆特性

50 ms 脉冲恒流电爆特性试验原理框图如图 10 所示。采用恒流脉冲源 (型号为 AT-NS1132-25) 给换能元施加所设定的电流参数及脉宽, 采用示波器 (型号为 MDO34) 采集换能元两端电压曲线 $U(t)$ 。

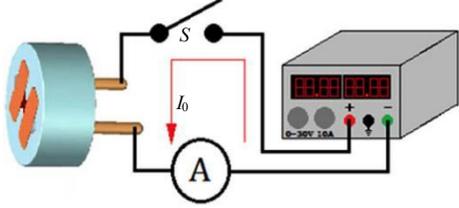


图 10 脉冲恒流试验原理框图

Fig.10 Schematic diagram of pulse constant current test circuit

4 试验结果及分析

4.1 伏安特性

换能元伏安特性是指在电容放电的条件下换能元电桥的电流和电阻随电压的变化情况。在电容放电下, 换能元作用时测试的 $U-I-R(t)$ 曲线如图 11 所示。

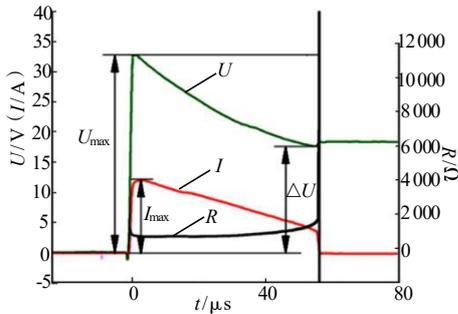


图 11 测得的 $U-I-R(t)$ 曲线

Fig.11 Measured $U-I-R(t)$ curves

如图 11 所示, 当电流 $I(t)$ 瞬间陡降为 0 时, 对应的电压 $U(t)$ 几乎保持不变, 电阻 $R(t)$ 出现陡升, 其峰值超出测量范围, 表明此时电桥由于发生电爆而出现断裂。蝶形和 S 形换能元在不同充电电压下测试的数据如表 3~4 所示。

由表 3~4 可以看出, 随着充电电压增大, 断桥时间逐渐缩短, ΔU 逐渐增大。分析认为由于充电电压越高, 施加在电桥上的电流 I_{max} 越大, 电桥温度上

升越快, 越容易达到电桥熔点, 故断桥时间缩短。由于电容放电时间是常量, 主要与电容容值和换能元阻值的乘积有关, 故断桥时间越短, 断桥后电容剩余能量 ΔU 越大。

表 3 蝶形换能元伏安特性试验数据

Tab.3 Volt-ampere characteristic test data of butterfly transducer element

电阻 / Ω	充电电压/V	U_{max} /V	I_{max} /A	断桥时间/ μs	ΔU /V
1.04	36	33.16	11.15	27.19	28.08
1.09	32	28.79	9.24	33.26	21.80
0.98	28	25.60	9.14	37.95	18.00
1.02	24	21.60	7.41	56.84	11.60
1.08	20	18.40	5.96	107.1	7.20
0.96	16			电桥未爆	

表 4 S 形换能元伏安特性试验数据

Tab.4 Volt-ampere characteristic test data of S-shaped transducer element

电阻 / Ω	充电电压/V	U_{max} /V	I_{max} /A	断桥时间/ μs	ΔU /V
1.07	36	33.20	10.86	28.31	28.02
1.03	32	29.60	10.05	36.84	22.80
1.08	28	25.20	8.16	49.35	17.60
1.02	24	21.60	7.41	67.91	11.20
0.97	20			电桥未爆	

在 33 μF 、28 V 试验条件下对蝶形和 S 形贴膜式 Ni-Cr 换能元进行放电试验, 试验过程中的电桥反应如图 12 所示。

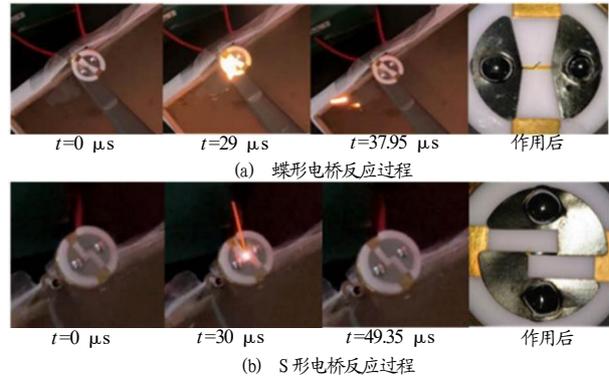


图 12 蝶形及 S 形换能元试验过程中电桥反应变化

Fig.12 Variation of bridge response of butterfly and S-shaped transducer elements during the test

由图 12 (a) 可见, 在 33 μF 、28 V 试验条件下, 当作用时间为 29 μs 时蝶形换能元电桥火光十分明显, 反应非常剧烈, 当作用时间为 37.95 μs 时电桥反应结束, 作用后桥区烧蚀明显; 由图 12 (b) 可见, 在 33 μF 、28 V 试验条件下, 当作用时间为 30 μs 时 S 形换能元电桥火光十分明显, 反应非常剧烈, 当作用时间为 49.35 μs 时电桥反应结束, 作用后桥区有明显断裂现象。研究表明, 随着充电电压升高, 电桥反应变强, 作用时间变短, 反应后电桥烧蚀越明显。

4.2 最大不熔断电流

最大不熔断电流是电桥不熔断所对应的电流上限值，并且换能元试验前后的电阻阻值在测量误差范围 (1 ± 0.1) Ω 之内。测试得到蝶形换能元和 S 形换能元的最大不熔断电流数据如表 5~6 所示。

表 5 蝶形换能元最大不熔断电流试验数据
Tab.5 The maximum non-fusing current test data of butterfly transducer element

序号	电阻 / Ω	施加电流 /A	时间 /s	试验后电阻/ Ω
1	1.06	2.0	162	∞
2	1.09	1.9	300	0.392
3	1.10	1.8	300	0.510
4	0.95	1.7	300	0.451
5	0.92	1.6	300	0.551
6	1.03	1.5	300	0.750
7	0.98	1.4	300	0.830
8	1.03	1.3	300	1.020

表 6 S 形换能元最大不熔断电流试验数据
Tab.6 The maximum non-fusing current test data of S-shaped transducer element

序号	电阻/ Ω	施加电流/A	时间/s	试验后电阻/ Ω
1	1.04	2.0	162	∞
2	1.02	1.8	195	∞
3	1.05	1.7	300	0.451
4	1.03	1.6	300	0.551
5	1.03	1.5	300	0.451
6	0.91	1.4	300	0.690
7	0.93	1.3	300	0.810
8	0.96	1.2	300	0.970

由表 5~6 可知：蝶形换能元的最大不熔断电流为 1.3 A，S 形换能元的最大不熔断电流为 1.2 A。由此可知，蝶形换能元相较于 S 形换能元的散热更好，桥区升温速率较慢。

S 形贴膜式 Ni-Cr 换能元在 1.9, 1.8, 1.7 A 试验条件下的电桥反应如图 13(a) 所示；蝶形贴膜式 Ni-Cr 换能元在 2.0, 1.8, 1.6 A 试验条件下的电桥反应如图 13(b) 所示。

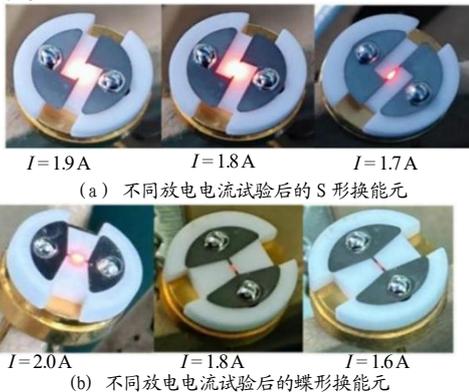


图 13 不同放电电流试验后的蝶形换能元和 S 形换能元
Fig.13 Butterfly transducer element and S-shaped transducer element after applying different discharge currents

从图 13 可知：对于 S 形换能元，随着桥区施加

的电流值不断增大，桥区红光越发明显，且桥区烧蚀面积也随之增大；对于蝶形换能元，随着桥区施加的电流值不断增大，桥区红光也越发明显。但相较于 S 形换能元，蝶形换能元试验时的桥区红光比较微弱，桥区烧蚀区域也较小，说明蝶形换能元的散热能力较好，安全性更高。

4.3 50 ms 脉冲恒流电爆特性

50 ms 脉冲恒流电爆特性是指换能元在 50 ms 特定脉宽下电桥发生电爆炸的电流值。

试验时发现，给换能元施加 50 ms 脉宽的预设电流后，换能元两端的 $U(t)$ 曲线的幅值在一定时间内符合欧姆定律，即换能元两端电压幅值为施加的预设电流幅度与换能元阻值的乘积，在经历一段时间后换能元两端的 $U(t)$ 幅值出现陡升，直至超出测量范围。50 ms 脉冲恒流电爆特性试验采集的 $U(t)$ 曲线如图 14 所示。

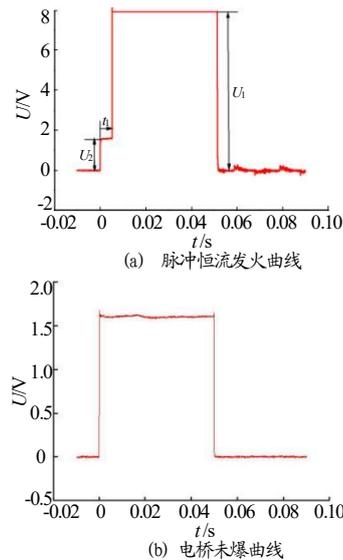


图 14 脉冲恒流电爆曲线

Fig.14 Electrical explosion curve under pulse constant current input

如图 14(a) 所示，换能元两端的 $U(t)$ 曲线从施加 50 ms 脉宽的预设电流起，在经历 t_1 时间后， $U(t)$ 曲线出现拐点后陡升，经测试 U_2 的幅度为加载在桥区上的预设电流与换能元阻值的乘积， U_1 超出测量范围，经分析此时桥区发生电爆炸后断裂，由于示波器阻抗 ($1 \text{ M}\Omega$)，导致陡升后电压 $U(t)$ 曲线的幅度 U_1 超出测量范围。

如图 14 (b) 所示, 换能元两端的 $U(t)$ 曲线未出现拐点, 说明此时桥区未发生电爆炸而断裂, 经测试, 换能元两端电压曲线 $U(t)$ 的幅度为加载在桥区上的预设电流与换能元阻值的乘积。

S 形换能元和蝶形换能元在不同电流下的电爆数据如表 7~8 所示。

表 7 不同 50 ms 脉冲恒流下 S 形换能元电爆数据

Tab.7 Electrical explosion data of S-shaped transducer element under different constant currents with 50 ms pulse width

电阻 / Ω	施加电流/A	工作电压 U_2 /V	断桥时间 t_1 /ms
1.10	5.0	3.36	1.12
1.06	4.5	2.63	7.00
0.98	4.0	2.35	9.40
0.96	3.5	2.00	18.30
1.02	3.0	1.80	24.00
1.09	2.5	1.75	33.00
1.04	2.4		桥未爆

表 8 不同 50 ms 脉冲恒流下蝶形换能元电爆数据

Tab.8 Electrical explosion data of butterfly transducer element under different constant currents with 50 ms pulse width

电阻 / Ω	施加电流/A	工作电压 U_2 /V	断桥时间 t_1 /ms
0.97	5.0	5.37	4.50
1.03	4.5	4.35	4.00
1.08	4.0	2.80	8.30
0.98	3.5	2.97	20.34
1.05	3.0	2.72	25.21
1.09	2.5	1.85	33.00
1.04	2.4	1.64	45.00
0.95	2.3		桥未爆

由表 7~8 的数据可以看出, 在 50 ms 恒流电爆时, 随着施加电流幅度的不断增加, 工作电压 U_2 也增高, 断桥时间 t_1 越来越短。这是由于在 t_1 时间段内加载在桥区上的工作电压 U_2 随着施加电流幅度的不断增加而增加, 使电桥温度达到熔点时间减小, 当电桥桥区热量累积达到电桥熔点时, 电桥发生电爆炸而出现断裂, 故导致电压曲线 $U(t)$ 陡升后出现拐点。

贴膜式 Ni-Cr S 形换能元在 2.4 A 时未发生电爆, 蝶形换能元在 2.3 A 时电桥未发生爆炸。S 形换能元在 5 A、2.5 A 的 50 ms 恒流电爆试验中的电桥反应如图 15 所示。

由图 15 可见在 5 A 电流的作用下桥区火光十分明亮, 发火后桥区烧蚀明显; 在 2.5 A 电流的作用下

桥区火光较弱, 发火后桥区表面没有明显的烧蚀痕迹。

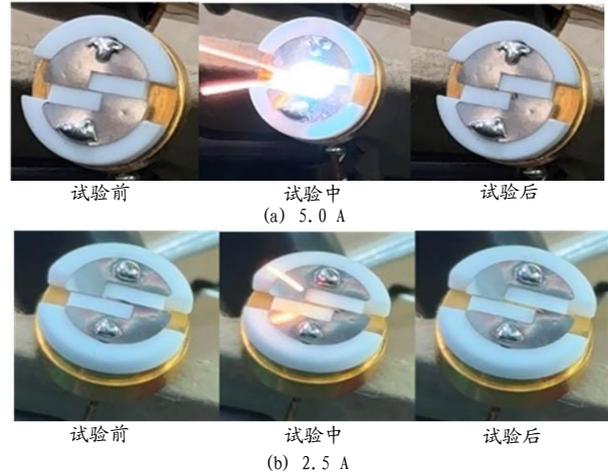


图 15 S 形换能元在 50 ms 恒流电爆试验过程中的桥区变化
Fig.15 The bridge area change of S-shaped transducer element during 50 ms pulse constant current explosion test

贴膜式 Ni-Cr 蝶形换能元在 5 A、2.5 A 的 50 ms 恒流电爆试验中的电桥反应如图 16 所示。

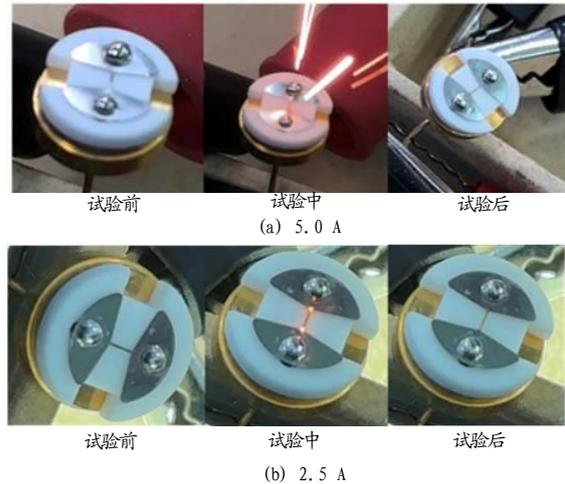


图 16 蝶形换能元在 50 ms 恒流电爆试验过程中的桥区变化
Fig.16 The bridge area change of butterfly transducer element during 50 ms pulse constant current explosion test

由图 16 可见在 5.0 A 电流的作用下, 桥区火光喷射十分明显, 并且试验后桥区已经完全断裂、焊盘表面烧蚀严重; 在 2.5 A 电流的作用下桥区火光微弱, 发火后桥区表面没有明显的烧蚀痕迹。

4.4 发火特性

采用贴膜式 Ni-Cr 蝶形和 S 形换能元制备的发火组件结构如图 17 所示。始发装药采用斯蒂芬酸铅, 考虑试验安全性, 输出装药采用假装药 (洗衣粉)。采用 33 μ F、28 V 电容放电进行发火试验, 测试数据如表 9 所示, 试验后的照片如图 18 所示。

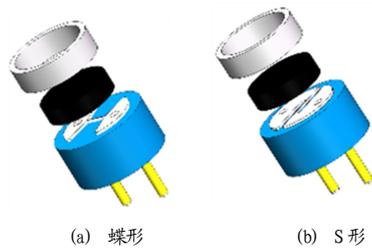


图 17 蝶形及 S 形发火组件示意图

Fig.17 Schematic diagram of butterfly and S-shaped ignition assembly

表 9 蝶形和 S 形发火组件在 33 μF、28 V 电容放电下的发火试验结果

Tab.9 Fire test results of butterfly and S-shaped ignition assembly under 33 μF、28 V capacitor discharge

电桥类型	电阻 /Ω	电压 /V	U_{max} /V	I_{max} /A	t_1 /μs	ΔU /V
蝶形	1.15	28	24.8	9.1	86.8	11.20
S 形	1.23	28	25.6	6.9	58.4	18.60

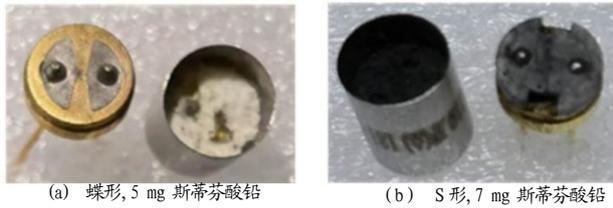


图 18 33 μF、28 V 电容放电发火试验后的发火组件

Fig.18 The ignition assembly after fire test of 33 μF, 28 V capacitor discharge

由图 18 可见，使用蝶形电桥点燃 5 mg 的斯蒂芬酸铅，以及使用 S 形电桥点燃 7 mg 斯蒂芬酸铅，均可以正常发火。

5 结论

采用贴膜式 Ni-Cr 薄膜和激光加工工艺制备了蝶形和 S 形两种换能元结构，利用 Comsol 仿真分析软件分别对 5 种桥区尺寸的 2 种换能元结构进行了仿真优化，仿真结果桥区长度为 3 mm 的换能元在 1 A 5 min 后桥区温度最低；贴膜式 Ni-Cr 换能元在 33 μF 电容放电时，随着充电电压的升高断桥时间缩短，蝶

形和 S 形换能元未发生断桥的充电电压分别为 16, 20 V；蝶形和 S 形换能元在 5 min 恒流脉冲输入下的最大不熔断电流分别为 1.3, 1.2 A；在 50 ms 脉冲恒流电爆时，随着施加电流幅度的不断增加，其工作电压也不断增高，其断桥时间越来越短，S 形换能元在 2.4 A 时未发生电爆，蝶形换能元在 2.3 A 时未发生电爆；33 μF、28 V 电容放电下贴膜式 Ni-Cr 换能元可以点燃斯蒂芬酸铅，实现正常发火。

参考文献：

- [1] 易镇鑫. 两种碳材料火工品的设计/制备与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [2] 曹建华, 蔡瑞娇, 董海平, 等. 电火工品桥丝与药剂升温模型及在可靠性设计中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2004(1): 90-95.
- [3] 周庆, 焦清介. Ni-Cr 桥丝式电火工品发火规律[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 144-147.
- [4] 吕旭旭, 魏光辉, 杜雪, 等. 灼热桥丝式电火工品脉冲电流激励发火规律分析[J]. 含能材料, 2023, 31(6): 589-597.
- [5] 任小明, 解瑞珍, 薛艳, 等. Ni-Cr 薄膜换能元点火性能研究[J]. 火工品, 2011(2): 4-6.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郭凯, 韩克华, 赵婉君, 等. 不同电激励方式对桥带电点火器的性能影响[J]. 火工品, 2024(1): 1-6.
- [9] 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.
- [10] 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.