

文章编号: 1003-1480(2024)05-0091-06

电阻性换能元电爆特性与最大不熔断电流特性试验方法研究

樊龙龙¹, 马骏², 艾沛延², 赵婉君³, 石敏科², 郭莉晴², 韩克华², 焦清介³

(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; 3. 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: 针对火工品电阻性换能元作用的可靠性和安全性问题, 提出了电阻性换能元电爆特性及最大不熔断电流特性的试验方法, 并采用该试验方法进行了桥膜换能元及桥带换能元的相关试验。试验结果表明: 桥膜换能元最小爆发电压为 20 V, 最小爆发电流为 1.5 A; 桥带换能元最小爆发电压为 22 V, 最小爆发电流为 2.0 A。桥膜换能元的最大不熔断电流为 1.6 A, 经历 1.7~1.9 A 的 5 min 不熔断电流试验后, 换能元电阻显著减小; 而桥带换能元的最大不熔断电流为 1.2 A, 在相同条件下未观察到电阻减小现象。

关键词: 电阻性换能元; 电爆特性; 不熔断电流; 爆发电压; 爆发电流

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.014

Test Method Study of Electrical Explosion Characteristics and Maximum Non-Fusing Current Characteristics of Resistive Transducer Elements

FAN Long-long¹, MA Jun², AI Pei-yan², ZHAO Wan-jun³, SHI Min-ke², GUO Li-qing², HAN Ke-hua², JIAO Qing-jie³

(1. Navy Equipment Department of PLA, Xi'an, 710043; 2. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: According to the reliability and safety issues of the resistive transducer elements in initiating explosive devices, a test method for the electrical explosion characteristics and the maximum non-fusing current characteristics of resistive transducer elements has been proposed, and the relative tests for bridge film transducer and bridge strip transducer were carried out by the test method. The test results show that the bridge film transducer has a minimum burst voltage of 20 V and a minimum burst current of 1.5 A; the bridge strip transducer has a minimum burst voltage of 22 V and a minimum burst current of 2.0 A. The maximum non-fusing current for the bridge film transducer is 1.6 A, and after undergoing a 5 minute non-fusing current test at 1.7 A to 1.9 A, the transducer resistance is significantly decreased; while the bridge strip transducer has a maximum non-fusing current of 1.2 A, and no significant resistance decrease is observed under the same conditions.

Keywords: Resistive transducer element; Electrical explosion characteristics; Non-fusing current; Burst voltage; Burst current

电阻性换能元作为火工品中的始发元件, 承担着激发能量转换、引发爆炸反应的重要作用。根据结构和材料的不同, 电阻性换能元主要可分为: 桥丝、桥

带、桥膜和半导体桥等类型。这些换能元的性能直接决定了火工品的发火可靠性和安全性, 因而对其性能参数的准确评估至关重要^[1-6]。

收稿日期: 2024-05-08

作者简介: 樊龙龙(1984-), 男, 工程师, 主要从事火工品质量监督工作。

通讯作者: 赵婉君(1992-), 女, 特别副研究员, 主要从事先进火工品与特种燃料技术研究。

基金项目: 国家技术基础项目(JZX7J202311BZ003000)。

引用本文: 樊龙龙, 马骏, 艾沛延, 等. 电阻性换能元电爆特性及最大不熔断电流特性试验方法研究[J]. 火工品, 2024(5): 91-96.

传统的火工品性能评估多侧重于静态参数的测量,而对于动态工作条件下的性能变化研究尚显不足。电阻性换能元的电爆特性测试是指在不损坏桥区性能参数和外观的前提下,评估其在电容放电和恒流脉冲输入下的临界爆发电压和电流;最大不熔断电流试验则用于评估电阻性换能元在持续直流电流输入下的熔断电流。已有的大量研究关注于电阻性换能元的桥区形状、尺寸、材料、厚度和桥翼形状等对其温度特性以及火工品的性能影响^[7-14],但关于其电爆特性和最大不熔断电流特性研究尚未见报道。因此,本文通过构建一套系统的试验方法,对电阻性换能元在不同条件下的电爆特性和最大不熔断电流特性进行了深入研究。通过试验验证,旨在为电阻性换能元的设计、优化和应用提供科学依据,进而推动火工品技术的发展和革新。

1 试验方法

1.1 试验原理及设备

1.1.1 最小爆发电压测试

采用规格型号为 UTP1310 直流电源,通过 1 k Ω 充电电阻给全密封、高能量密度的复合钽电容进行充电。在放电开关 GQ22 闭合时,电容器随即对电阻性换能元进行放电。放电过程中,采用型号为 MODEL 5008C 的罗氏线圈来测量放电回路中的电流曲线 $I(t)$,同时使用示波器探头记录电阻性换能元两端电压曲线 $U(t)$ 。数据采集工作由 MDO34 型号的数字示波器完成,并通过 Origin 软件绘制出 $U-I-R(t)$ 曲线。电阻性换能元的最小爆发电压试验原理框图如图 1 所示。

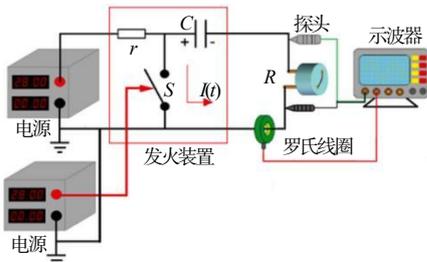


图1 最小爆发电压试验原理框图

Fig.1 Block diagram of minimum burst voltage test

1.1.2 最小爆发电流测试

在最小爆发电流的测定中,采用脉冲恒流源对电

阻性换能元施加 50 ms 的恒流脉冲,电压曲线 $U(t)$ 的测量和数据采集采用与最小爆发电压测试同样的设备和方法,试验的原理框图如图 2 所示。

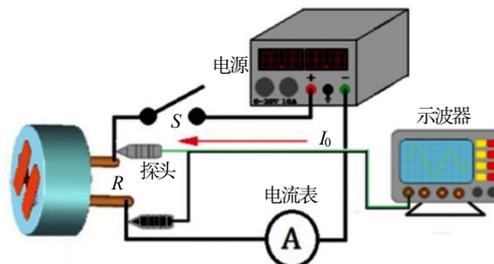


图2 最小爆发电流试验原理框图

Fig.2 Block diagram of minimum burst current test

1.1.3 最大不熔断电流测试

最大不熔断电流测试是将 1 个 10 Ω 的滑线变阻器与电阻性换能元串联,并使用 UTP1310 直流电源提供预设电压。电流的测量通过 FLUKE 15B+ 型号的电流表完成检测。最大不熔断电流试验原理框图如图 3 所示。

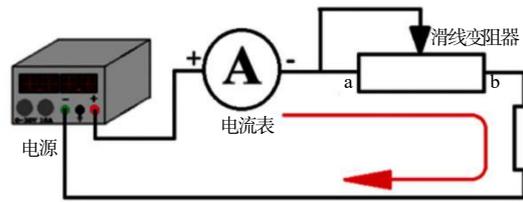


图3 最大不熔断电流试验原理框图

Fig.3 Block diagram of maximum non-fusing current test

1.2 试验方法及要求

1.2.1 最小爆发电压试验

在规定电容的条件下,按一定充电电压步长给电阻性换能元放电,观察其试验过程并获取 $U-I-R(t)$ 曲线。放电后,对换能元的桥路电阻进行测试,依据得到的曲线来判断电阻性换能元是否作用。最后,对试验结果进行综合评估和分析,以确定换能元的最小爆发电压。

1.2.2 最小爆发电流试验

在 50 ms 的脉冲宽度规定下,通过脉冲恒流源按一定电流步长向电阻性换能元施加恒定电流,观察试验过程并获取 $U(t)$ 曲线。试验结束后,同样对换能元的桥路电阻进行测试,并根据获得的曲线判断其是否作用;最后,对试验数据进行评估和分析,求取最小爆发电流值。

1.2.3 最大不熔断电流试验

首先, 设定一定的电流步长, 通过预设的电流值和串联回路的总电阻 (即换能元电阻 r 与滑线变阻器电阻 R 之和, 通常将滑线变阻器的电阻设定为 $10\ \Omega$ 以提高试验精度) 来确定对应的电压值。然后, 向串联回路施加 5 min 对应电压, 确保电流维持在预设值。观察换能元在最大不熔断电流试验过程中是否发生熔断, 并在试验后测试其桥路电阻。最后, 对试验结果进行评估和分析, 以确定换能元的最大不熔断电流。

1.2.4 试验状态要求

由于电阻性换能元在进行最小爆发电压、最小爆发电流和最大不熔断电流试验过程中会产生热量, 并且电桥与换能元引脚直接相连, 为避免引脚与散热装置接触, 确保试验结果的准确性和可靠性, 试验过程中换能元应保持裸露状态, 不得安装在散热装置上。

1.2.5 试验次数要求

考虑到试验过程中产生的电流会对电阻性换能元电桥造成热损伤或者氧化, 影响试验结果的正确性和可靠性, 对同一样品只进行 1 次试验。

1.2.6 试验环境要求

为避免外界环境温度对试验结果的影响, 规定所有试验应在环境温度 (23 ± 10) $^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行。

1.2.7 试验结果判定要求

在最小爆发电压、最小爆发电流和最大不熔断电流试验后, 若电阻性换能元的桥路电阻大于试验前初始阻值的 10 倍以上, 则认为试验过程中换能元发生了作用, 试验结果可按照异常作用处理, 否则, 按正常未作用处理。

2 试验验证及结果分析

2.1 样品制备

本文选用桥膜和桥带两种类型的电阻性换能元进行试验验证。桥膜换能元电桥采用 $5\ \mu\text{m}$ 厚度的 Ni-Cr 薄膜, 通过激光精密加工工艺制备, 其电桥两端电极间距 h 为 $4.0\ \text{mm}$, 桥区长度 l 为 $3.0\ \text{mm}$, 宽度 w 为 $0.65\ \text{mm}$, 桥路电阻为 $(1 \pm 0.1)\ \Omega$ 。桥带换能元电

桥采用厚度为 $30\ \mu\text{m}$ 的 Ni-Cr 薄膜, 通过线切割加工工艺加工, 其电桥两端电极间距 h 为 $3.0\ \text{mm}$, 桥区长度 l 为 $3.0\ \text{mm}$, 宽度 w 为 $0.17\ \text{mm}$, 桥路电阻同样为 $(1 \pm 0.1)\ \Omega$ 。两种换能元样品分别如图 4 (a) ~ (b) 所示。

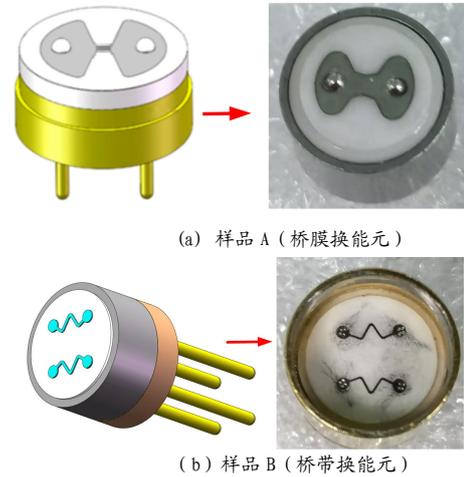


图 4 电阻性换能元样品

Fig.4 Resistive energy transducer samples

如图 4 (a) ~ (b) 所示, 电阻性换能元的金属引脚通过玻璃密封烧结工艺与陶瓷基底进行连接, 电桥两端焊盘通过焊接分别与引脚相连。

2.2 最小爆发电压试验

根据最小爆发电压试验原理, 电桥在电爆炸时放电回路会形成开路, 导致电流瞬间降至 0, 而电容两端仍保有一定的剩余电压。试验过程中所测试的 $U-I-R(t)$ 曲线如图 5 (a) 所示, 换能元爆发时刻即为电流 $I(t)$ 曲线陡降为 0 的时刻, 对应的电压 $U(t)$ 曲线开始保持恒定值。未发生电爆炸时, 测试的回路曲线为电容放电曲线, 如图 5 (b) 所示。桥膜换能元采用 $33\ \mu\text{F}$ 的发火电容, 桥带换能元采用 $1.5\ \text{mF}$ 的发火电容。不同电压下测试的数据如表 1~2 所示。

表 1 桥膜换能元最小爆发电压试验数据

Tab.1 Minimum burst voltage test data of bridge film transducer

序号	试验前 电阻/ Ω	充电 电压/ V	U_{max} / V	I_{max} / A	Δt / μs	ΔU / V	试验后 电阻/ Ω
1	1.07	22	19.95	18.07	89.32	12.17	∞
2	0.99	21	18.83	17.72	94.33	11.49	∞
3	1.09	20	18.40	16.04	107.1	11.22	∞
4	1.06	19					0.98
5	1.09	18					0.96
6	1.04	17					0.97

表2 桥带换能元最小爆发电压试验数据

Tab.2 Minimum burst voltage test data of bridge strip transducer

序号	试验前电阻/ Ω	充电电压/V	U_{max} / V	I_{max} / A	Δt / ms	ΔU / V	试验后电阻/ Ω
1	1.09	24	20.46	18.77	4.85	10.15	∞
2	0.99	23	19.53	17.92	5.11	9.69	∞
3	0.99	22	18.62	17.06	6.32	9.23	∞
4	1.07	21					桥未爆 0.95
5	1.06	20					桥未爆 0.97
6	1.05	19					桥未爆 0.97

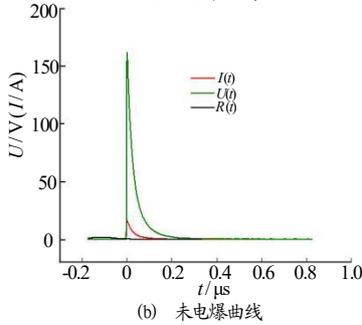
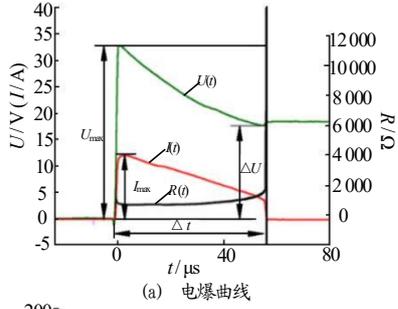
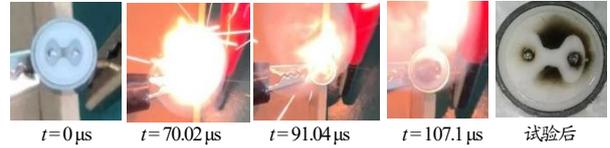


图5 最小爆发电压试验 $U-I-R(t)$ 曲线

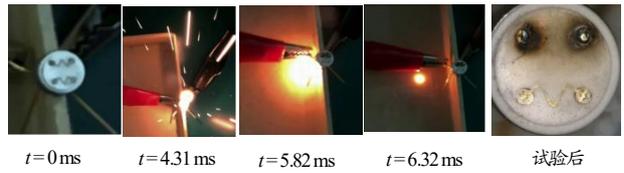
Fig.5 $U-I-R(t)$ curve of minimum burst voltage test

从表1~2可以看出，桥膜换能元最小爆发电压为20V，而桥带换能元最小爆发电压为22V。在电爆炸发生后，无论是桥膜换能元还是桥带换能元，其桥路电阻都变为无穷大；若未发生电爆炸，则桥路电阻会有所降低。在电爆炸过程中，峰值电压 U_{max} 和峰值电流 I_{max} 会随着充电电压的增大而提高，同时，爆发时间 Δt 变小，剩余电压 ΔU 增大。这表明，在电桥质量固定的情况下，电桥发生电爆反应时所需的能量是恒定的。当加载的能量增大，达到热平衡的速度加快，导致爆发时间缩短，电容放电后剩余电压增加。在 $33 \mu F/20 V$ 和 $1.5 mF/22 V$ 的放电试验中，电桥的反应如图6(a)~(b)所示。如图6(a)所示，在 $33 \mu F/20 V$ 的条件下对桥膜换能元放电时，电桥在 $91.04 \mu s$ 时火光明亮，反应最为剧烈，而在 $107.1 \mu s$ 时反应结束，电桥明显断裂。如图6(b)所示，在 $0 ms$ 时桥带未反应，在 $4.31 ms$ 时桥带发生剧烈的电爆炸， $5.82 ms$ 时电爆炸接近结束，电爆炸后的残渣已完全脱离换能

元基体。桥带的反应时间较长，这是由于其发火电容较大，导致放电时间较长。同时，由于桥带换能元的电桥质量较大，在相同电压下，电桥桥区反应红光面积相对较大，散热速度快于桥膜，因此断桥时间较长。



(a) 桥膜换能元反应过程图 ($33 \mu F/20 V$)



(b) 桥带换能元反应过程图 ($1.5 mF/22 V$)

图6 爆发电压试验电桥反应变化

Fig.6 Initiation process of bridge during burst voltage test

2.3 最小爆发电流试验

电阻性换能元最小爆发电流试验中所测试的 $U(t)$ 曲线如图7所示。图7(a)为换能元发生电爆炸时的 $U(t)$ 曲线，而图7(b)为换能元未发生电爆炸的曲线。

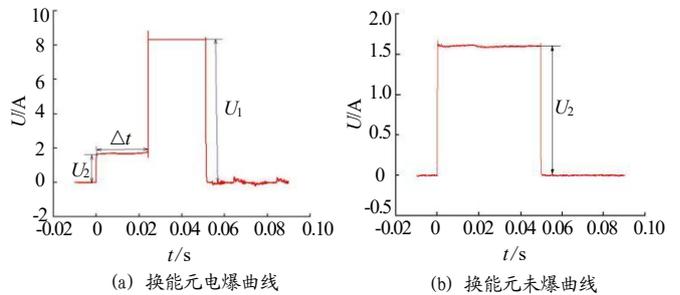


图7 最小爆发电流试验电爆曲线

Fig.7 Electrical explosion curve of minimum burst current test

如图7(a)~(b)所示，所测试的电压曲线幅度 U_2 遵循欧姆定律，即幅度等于施加脉冲恒流幅值与换能元桥路电阻的乘积。当电桥发生电爆炸而导致回路开路时，由于示波器的输入阻抗为 $10 M\Omega$ ，测试电压 $U(t)$ 曲线会出现陡升现象，其幅度 U_1 为示波器输入阻抗 ($10 M\Omega$) 与施加电流的乘积。从加电时刻至电压曲线出现陡升的时间为爆发时间 Δt 。未发生电爆炸时，电压曲线幅度 U_2 为施加脉冲恒流幅值与桥路电阻的乘积。桥膜换能元和桥带换能元最小爆发电流测试数据如表3~4所示。

表3 桥膜换能元最小爆发电流测试数据

Tab.3 Minimum burst current test data of bridge film transducer

序号	试验前 电阻/ Ω	施加电流 /A	U_2 /V	Δt /ms	试验后 电阻/ Ω
1	0.99	1.7	1.68	28.32	∞
2	1.03	1.6	1.65	30.21	∞
3	1.05	1.5	1.58	33.07	∞
4	1.08	1.4	桥未爆		1.05
5	1.07	1.3	桥未爆		1.04
6	1.02	1.2	桥未爆		1.00

表4 桥带换能元最小爆发电流测试数据

Tab.4 Minimum burst current test data of bridge strip transducer

序号	试验前 电阻/ Ω	施加电流 /A	U_2 /V	Δt /ms	试验后 电阻/ Ω
1	1.07	2.2	2.35	14.21	∞
2	1.02	2.1	2.14	15.92	∞
3	1.05	2.0	2.12	28.06	∞
4	1.09	1.9	桥未爆		1.07
5	1.02	1.8	桥未爆		0.99
6	1.03	1.7	桥未爆		1.01

从表3~4的数据可以看出,桥膜换能元的最小爆发电流为1.5 A,而桥带换能元的最小爆发电流为2.0 A。并且桥膜换能元和桥带换能元发生电爆炸后桥路电阻为无穷大,未发生电爆炸后桥路电阻有所减小。在50 ms恒流电爆试验中,随着施加电流幅度的增加,工作电压 U_2 升高,爆发时间逐渐缩短。在施加脉冲恒流激励时,电压 U_2 是加载在桥区上的工作电压,属于热量累积过程。当热量累积到电桥的熔点时,会发生电爆炸现象。随着施加电流幅度的增加,产生的热量也越高,热量累积速度越快,更容易达到熔点。在1.5 A/50 ms的试验条件下桥膜换能元电桥反应如图8(a)所示,在2.0 A/50 ms试验条件下桥带换能元电桥反应如图8(b)所示。



图8 50 ms 脉冲恒流爆发试验的换能元照片
Fig.8 Photographs of transducer during 50 ms pulse constant current burst test

2.4 最大不熔断电流试验

桥膜换能元和桥带换能元最大不熔断电流试验结果如表5~6所示。

表5 桥膜换能元最大不熔断电流试验数据

Tab.5 Maximum non-fusing current test data of bridge film transducer

序号	初始电阻/ Ω	施加电流/A	时间/s	试验后电阻/ Ω
1	0.92	2.0	162	∞
2	1.03	1.9	300	0.39
3	0.99	1.8	300	0.51
4	0.97	1.7	300	0.45
5	0.98	1.6	300	1.02

表6 桥带换能元最大不熔断电流试验数据

Tab.6 Maximum non-fusing current test data of bridge strip transducer

序号	初始电阻/ Ω	施加电流/A	时间/s	试验后电阻/ Ω
1	0.99	2.0	2	∞
2	0.95	1.5	5	∞
3	0.96	1.3	203	∞
4	0.91	1.2	300	0.93

由表5~6的数据可见,当桥膜换能元施加2.0 A电流、持续时间162 s时,电流表显示回路电流为0,换能元发生剧烈反应,试验后桥路电阻为无穷大;在1.7~1.9 A范围内施加电流时,电流表显示回路电流逐渐增大,经历5 min试验后,换能元桥路电阻由0.97, 0.99, 1.03 Ω 降低至0.45, 0.51, 0.39 Ω ;在1.6 A电流下经过5 min试验,桥路电阻为1.02 Ω ,属于正常测试范围。桥带换能元在2.0 A电流、持续时间2 s时,电流表显示回路电流为0,换能元发生剧烈反应,试验后电阻为无穷大;在1.5 A和1.3 A电流下,分别在5 s和203 s时电桥发生熔断,试验后电阻为无穷大;在1.2 A电流下经过5 min试验,换能元电阻增大至0.93 Ω ,属于正常测试范围。

从表5~6可以看出,在经过1.7~1.9 A、持续5 min的不熔断电流试验后,桥膜换能元电阻降低到了0.45, 0.51, 0.39 Ω ,而桥带换能元则没有此现象。分析认为,因为桥膜换能元的电桥厚度为5 μm ,在达到热平衡后积累的热量较少,试验结束后熔断的电桥重新凝固,导致电桥金属内部发生相变,从而改变了电阻值。相比之下,桥带换能元的电桥厚度为30 μm ,在达到热平衡后积累的热量更多,反应更为剧烈,导致电桥迅速断裂。表5~6的数据表明,桥膜换能元的最大不熔断电流为1.6 A,而桥带换能元的最大不熔断电流为1.2 A。桥膜换能元和桥带换能元在进行

最大不熔断电流试验时的电桥反应过程如图9所示。

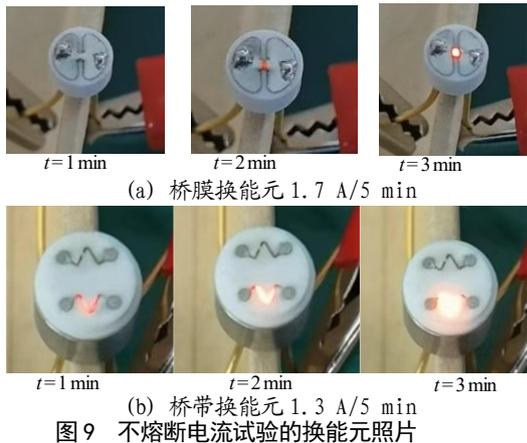


图9 不熔断电流试验的换能元照片

Fig.9 Photographs of transducer during non-fusing current test

从图9(a)~(b)可以明显地看出,由于桥带换能元的电桥质量相对较大,其施加不熔断电流后,电桥桥区反应红光面积相对较大,故导致其最大不熔断电流相对较低。

3 结论

本研究通过建立一套系统的试验方法,对电阻性换能元的电爆特性及最大不熔断电流特性进行了试验研究。试验结果表明,所建立的试验方法能够有效指导电阻性换能元的电爆特性及最大不熔断电流试验。具体结论如下:

(1) 桥膜换能元的最小爆发电压为 20 V,最小爆发电流为 1.5 A;桥带换能元的最小爆发电压为 22 V,最小爆发电流为 2.0 A。

(2) 桥膜换能元的最大不熔断电流为 1.6 A,而桥带换能元的最大不熔断电流为 1.2 A。在 1.7~1.9 A 的 5 min 不熔断电流试验后,桥膜换能元的电阻显著降低,而桥带换能元则未观察到此现象。

本研究不仅为电阻性换能元的设计和 optimization 提供了依据,也为火工品的安全性和可靠性设计提供了重

要的参考数据。

参考文献:

- [1] GJB 344A-2020 钝感电起爆器通用规范[S].中央军委装备发展部,2020.
- [2] 李便花,潘会平,肖友霖,等.某型电点火具安全电流试验发火研究[J].新技术新工艺,2015(4):134-137.
- [3] 郑子龙,张文超,秦志春,等.高钝感半导体桥发火性能研究[J].兵工学报,2019,40(5):954-961.
- [4] 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.
- [5] 樊龙,曾祥涛.敏感 Ni-Cr 金属桥膜制备及性能研究[J].装备制造技术,2021(1):220-222.
- [6] 李晨铭,冀小刚,王云鹏,等.高钝感半导体桥安全性能研究[J].火工品,2023(3):7-13.
- [7] 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(04):144-147.
- [8] 吕旭旭,魏光辉,杜雪,等.灼热桥丝式电火工品脉冲电流激引发火规律分析[J].含能材料,2023,31(06):589-597.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.