文章编号：1003-1480（2025）05-0085-06

爆炸箔火工品用冷阴极触发管工作可靠性试验研究

程 翔，海 涵，陈 乐，郑子龙，李秋菊

（中国空空导弹研究院，河南 洛阳，471000）

摘 要：为提升爆炸箔火工品起爆系统的可靠性，本文针对其核心高压开关元件——冷阴极触发管的工作可靠性问题开展试验研究。重点考察触发能量对其最低可靠工作电压、截止电压、导通时间及导通阻抗的影响规律。结果表明：随着触发能量增大，最低可靠工作电压与截止电压显著降低，但两者差值保持稳定；触发电压或工作电压值越高，触发管的导通时间越短；等效电阻随触发能量增大而减小、随工作电压降低而增大，等效电感基本保持恒定。研究确定了触发储能电容在 20~30 μF 范围内，既能保证触发管在 1.3 kV 以下可靠工作，又能维持截止电压在 0.8 kV 以上具备良好的抗干扰能力。同时发现，当触发储能电容为 30 μF 且工作电压为 2.0 kV 时，回路阻抗参数匹配最优，电爆炸性能最佳。本研究为爆炸箔火工品系统选用和优化冷阴极触发管的工作参数提供了关键实验依据，有助于提升直列式起爆系统的工程化可靠性。

关键词：爆炸箔火工品；冷阴极触发管; 触发能量；可靠性；导通时间

中图分类号：TJ450.3；TQ560.5 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.011

Experimental Study on the Operational Reliability of Cold-Cathode Trigger Tubes for Exploding Foil Initiator

CHENG Xiang，HAI Han，CHEN Le，ZHENG Zi-long，LI Qiu-ju

（China Airborne Missile Academy，Luoyang，471000）

Abstract：To enhance the reliability of exploding foil initiation systems(EFIs), this paper conducts an experimental study on the operational reliability of cold cathode trigger tubes—a core high-voltage switching component. The influence of trigger energy on key parameters, including the minimum reliable operating voltage, cut-off voltage, turn-on time, and on-state impedance, was experimentally examined. The results indicate that as trigger energy increases, both the minimum reliable operating voltage and cut-off voltage decrease significantly, while their difference remains stable. Higher trigger voltage or operating voltage values lead to shorter turn-on times. The equivalent resistance decreases with increasing trigger energy but increases with decreasing operating voltage, whereas the equivalent inductance remains nearly constant. The study identifies that a trigger storage capacitance in the range of 20~30 μF ensures reliable operation of the trigger tube below 1.3 kV while maintaining a cut-off voltage above 0.8 kV , thus providing good anti-interference capability. Additionally, optimal matching of circuit impedance parameters and superior electrical explosion performance are achieved when the trigger storage capacitance is 30 μF and the operating voltage is 2.0 kV. This research provides critical experimental guidance for selecting and optimizing the operational parameters of cold cathode trigger tubes in EFI systems, thereby contributing to improved engineering reliability of in-line initiation systems.

Key words：Exploding foil initiation；Cold cathode trigger tube；Trigger energy；Reliability；Turn-on time

基于爆炸箔火工品（Exploding Foil Initiator, EFI） 技术的直列式起爆/点火系统因其高安全性与高可靠

收稿日期：2025-04-24

作者简介：程翔（1983-），男，高级工程师，主要从事固体火箭发动机火工品技术研究。

引用本文：程翔，海涵，陈乐，等. 爆炸箔火工品用冷阴极触发管工作可靠性试验研究[J]. 火工品, 2025(5): 85-90,

性，已广泛应用于空空导弹、空地导弹及地地导弹等战略与战术武器中[1-3]。该系统摒弃传统敏感火工药剂，采用 GJB 2865A-2020[4]规定的许用安全药剂，显著提升了系统在勤务处理、动力环境及强电磁干扰等严苛环境下的本质安全水平。系统采用全程贯通的传爆/传火序列，无机械隔断或错位结构，解除保险过程中无需机械动作，从而避免了因机械故障导致的失效风险，有效提高了系统的工作可靠性[5-7]。其核心部件为高压放电单元，主要由储能电容、高压开关和爆炸箔火工品组成。其中，储能电容用于储存发火能量，爆炸箔火工品用于输出爆轰波或火焰，而高压开关则承担电能快速转换与传输的关键功能。该开关不仅要求具有低电阻、低电感和短导通时间，还需具备良好的工作稳定性与可靠性[8-9]。

目前，爆炸箔火工品中常用的高压开关主要包括基于半导体技术的 MOS 控制晶闸管（MCT）和陶瓷封装的冷阴极触发管[10-11]。相较于 MCT，冷阴极触发管虽存在体积较大、成本较高等不足，但因其具备快速响应、耐受高电压与大电流、抗极端环境能力强等优势，在高功率瞬态开关应用领域具有不可替代性[12-13]。然而，随着其应用范围的扩大，冷阴极触发管在结构设计与制造工艺方面的固有特性也逐渐暴露出潜在的工作可靠性问题，如触发一致性波动、截止电压漂移及导通延迟等。

为此，本文围绕爆炸箔火工品用冷阴极触发管，开展系统性工作可靠性试验研究，重点分析触发能量对关键电学参数的影响规律，旨在为其在直列式起爆系统中的工程化应用提供技术支撑与参数依据。

1 结构特征及工作原理

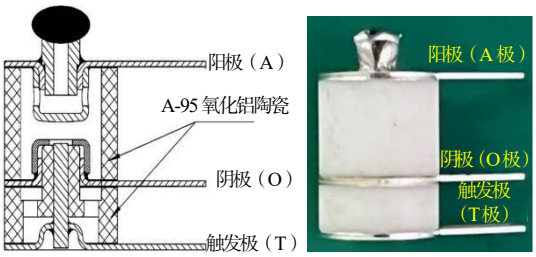
1.1 系统工作过程

基于爆炸箔火工品技术的直列式起爆/点火系统，其工作过程为：首先，高压直流电源通过限流电阻将储能电容充电至设定电压；接收到起爆指令后，高压开关瞬间导通，储能电容经开关回路向爆炸箔桥箔快速放电，在 300 ns 内形成上升至 2 500 A 以上的脉冲尖峰大电流。该电流导致金属桥箔发生电爆炸，产生高温高压等离子体。在加速膛的空间约束下，等离子体迅速膨胀并剪切形成飞片；飞片在加速膛加速后高速撞击预设的始发药剂[14-16]，完成点火或起爆功能。

根据始发药剂类型不同，作用机制如下：若始发药剂为 BPN 点火药，飞片的撞击及伴随的弧光放电效应达到 BPN 的火焰感度阈值，将其点燃，进而逐级点燃后续传火序列；若始发药剂为 HNS，则通过飞片的高速撞击能量达到 HNS 的冲击感度阈值，引发爆轰，并引爆后续的传爆序列。

1.2 冷阴极触发管结构与原理

冷阴极触发管属于充气型气体放电器件，其工作状态位于帕邢（Paschen）曲线的右支区域。其结构示意图和实物外形分别如图 1（a）和（b）所示。



（a）结构示意图　　（b） 实物照片

图 1　冷阴极触发管结构示意图及其外形

Fig.1　Schematic diagram and external view of the cold cathode trigger tube

由图 1 可见，该器件采用陶瓷封装，腔体内充填高压惰性气体，以防止电极氧化并维持高绝缘状态。主要包含 3 个电极：触发极（T 极）、带中心通孔的阳极（A 极）和阴极（O 极）。T 极与 A 极间构成触发间隙（T-A 间隙），O 极与 A 极间构成主放电间隙（A-O 间隙）。主间隙间距及绝缘支撑材料特性共同决定高压开关的工作电压范围。

阴极内部设计有空腔结构，内置触发单元，用于启动初始放电过程。其工作原理如下：当储能电容在 A-O 极间建立稳定工作电压后，向 T 极施加高压触发脉冲，T-A 间隙沿绝缘介质表面发生沿面闪络，产生初始等离子体并激发空心阴极效应；等离子体迅速向主间隙扩散，引发 A-O 间隙气体击穿，形成低阻导电通道。此时阳极电位迅速下降，回路电流呈指数级增长，实现开关快速导通。

从触发脉冲施加至主间隙完全导通的时间称为

导通时间，典型值为数十至数百纳秒，是衡量开关响应速度的关键指标。器件利用气体放电机制导通，具备耐高压、大电流、低电感、自恢复绝缘等优点，且放电后气体快速去离子化，器件可在极短时间内恢复高绝缘状态，展现出绝缘电阻高、静态漏电流极小的特性。

2　试验装置与结果分析

2.1　试验系统与原理

冷阴极触发管工作可靠性试验系统原理框图如图 2 所示。

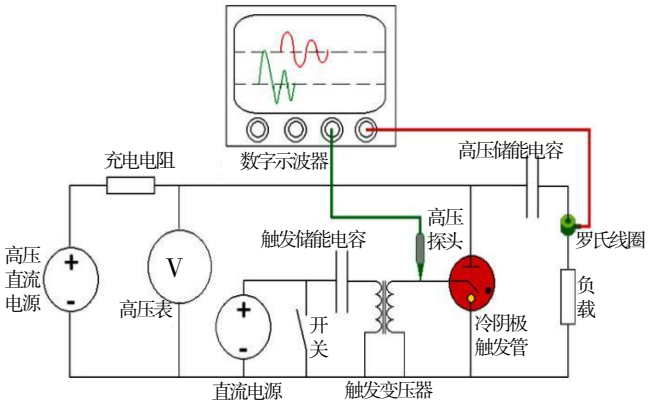


图 2　冷阴极触发管工作可靠性试验原理框图

Fig.2　Schematic diagram of the operational reliability test setup for the cold cathode trigger tube

由图 2 可知，试验系统主要由高压直流电源（DL20P200，威斯曼公司，3.0 pF，100 MΩ）、高压储能电容（0.4 μF，4 kV）、触发储能电容（CT4502R，火炬公司，50 V，226 M）、直流电源（HJR-3FF-S-Z，12 VDC）、触发变压器、冷阴极触发管、负载、高压探头（P6015A，泰克公司）、罗氏线圈（皮尔森 101，变比 0.01）及数字示波器（MDO32，泰克公司，500 MHz）等组成。

试验过程中，高压直流电源通过充电电阻对高压储能电容充电，其电压值由高压表（DF4-D-D，20 kV）实时监测。同时，12 VDC 直流电源为触发储能电容充电。当开关闭合时，触发储能电容经触发变压器放电，在次级产生高压负脉冲并施加于冷阴极触发管的触发极（T 极），引发 T-A 间隙沿面闪络，启动主间隙击穿过程。

主间隙导通后，高压储能电容通过冷阴极触发管向负载快速放电，在回路中形成负向脉冲电流。该电流信号由罗氏线圈采集，触发电压信号由高压探头获取，两路信号均由数字示波器记录并进行后续分析。

依据帕邢定律[10]，冷阴极触发管的静态击穿电压主要由电极间隙结构与绝缘材料性能决定。而其动态工作可靠性（如最低工作电压、截止电压）则与触发能量密切相关。当触发变压器变比固定时，触发能量由式（1）决定。

$$E_{触发}=\frac{1}{2}C_{触发}U_{触发}^{2} \qquad (1)$$

式（1）中：$E_{触发}$为触发能量，mJ；$C_{触发}$为触发储能电容容值，μF；$U_{触发}$为直流电源输出电压，V。

2.2　试验结果

2.2.1　最低可靠工作电压与截止电压

针对某型两种结构（A 和 B）的冷阴极触发管，其中 A 管触发针顶端与阴极表面齐平，B 管触发针顶端距阴极表面 0.15 mm，A、B 两种触发管除触发针位置不同其余结构一致。两种结构的触发管经仿真设计，最低工作电压设计值要求为 1.4 kV，截止电压设计值要求为 0.5 kV。为定量评估触发能量对冷阴极触发管工作可靠性的影响。试验中，直流电源输出电压固定为 18 V，触发储能电容容量在 10 ~ 60 μF 范围内变化，对应触发能量为 1.62 ~ 51.84 mJ。

采用升降法进行测试。最低可靠工作电压是将起始电压设为 1.2 kV，连续 30 次触发试验中若出现一次未导通，则以 10 V 为步长逐步升压，直至实现 100% 可靠导通，该电压即为最低可靠工作电压，用于评估冷阴极触发管的工作可靠性。截止电压是将起始电压设为 1.0 kV，连续 30 次试验中若均能导通，则以 10 V 为步长逐步降压，直至 100%无法导通，该电压即为截止电压，反映冷阴极触发管的抗干扰能力。测试结果如表 1~2 所示。由表 1~2 可见，随着触发能量增加，最低可靠工作电压与截止电压均呈下降趋势，但两者差值基本稳定在 0.33 ~ 0.45 kV 之间，表明触发能量对工作窗口的压缩作用具有一致性。A 型与 B 型触发

管的对比曲线如图 3 所示。

表 1 A 型冷阴极触发管最低可靠工作电压与截止电压测试结果

Tab.1 Test results of minimum reliable operating voltage and cut-off voltage(Type A)

序号	触发储能电容/μF	触发能量/mJ	最低可靠工作电压/kV	截止电压/kV	差值/kV
1	10	1.62	1.50	1.05	0.45
2	20	3.24	1.30	0.90	0.40
3	30	6.48	1.28	0.85	0.43
4	40	12.96	1.15	0.80	0.35
5	50	25.92	1.08	0.75	0.33
6	60	51.84	1.05	0.70	0.35

表 2 B 型冷阴极触发管最低可靠工作电压与截止电压测试结果

Tab.2 Test results of minimum reliable operating voltage and cut-off voltage (Type B)

序号	触发储能电容/μF	触发能量/mJ	最低可靠工作电压/kV	截止电压/kV	差值/kV
1	10	1.62	1.45	1.10	0.35
2	20	3.24	1.28	0.95	0.33
3	30	6.48	1.20	0.83	0.37
4	40	12.96	1.13	0.72	0.41
5	50	25.92	1.06	0.70	0.36
6	60	51.84	1.02	0.68	0.34

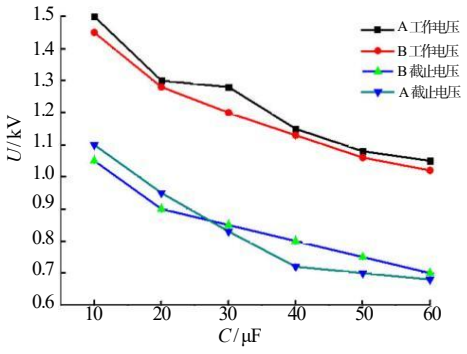


图 3 A 型与 B 型冷阴极触发管最低可靠工作电压与截止电压对比曲线

Fig.3 Comparison curves of minimum reliable operating voltage and cut-off voltage between type A and type B cold-cathode trigger tube

由图 3 可见，当触发储能电容在 20 ~ 60 μF 范围内时，最低可靠工作电压可控制在 1.3 kV 以下，满足系统可靠触发要求；当电容在 10 ~ 30 μF 范围内时，截止电压高于 0.8 kV，具备良好抗干扰能力。综合考虑，推荐触发储能电容选取 20 ~ 30 μF，以兼顾工作可靠性与抗干扰性能。

2.2.2 导通时间

在最低可靠工作电压范围内，测试不同触发能量与工作电压下的导通时间（定义为从触发脉冲施加至主间隙完全导通的时间）。典型波形如图 4 所示。测试数据如表 3~4 所示。

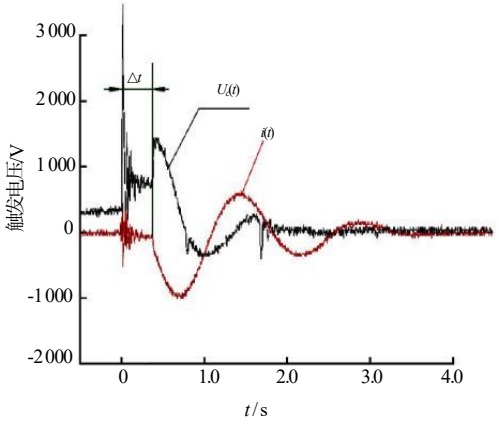


图 4 冷阴极触发管触发电压及回路电流典型波形

Fig.4 Typical waveforms of trigger voltage and loop current for the cold-cathode trigger tube

表 3 A 型冷阴极触发管导通时间测试结果

Tab.3 Test results of conduction time (Type A)

序号	触发储能电容/μF	触发能量/mJ	工作电压/kV	延迟时间/ns	导通时间/ns
1	20	3.24	1.30	5 651	4 503
2	30	6.48	1.30	5 162	3 716
3	20	3.24	1.60	1 566	840
4	30	6.48	1.60	1 307	631

表 4 B 型冷阴极触发管导通时间测试结果

Tab.4 Test results of conduction time (Type B)

序号	触发储能电容/μF	触发能量/mJ	工作电压/kV	延迟时间/ns	导通时间/ns
1	20	3.24	1.30	5 533	3 920
2	30	6.48	1.30	4 795	3 091
3	20	3.24	1.60	1 301	703
4	30	6.48	1.60	1 181	590

结合图 4 波形特征与表 3~4 数据可知，冷阴极触发管的导通时间与触发能量和主间隙工作电压相关。当工作电压固定为 1.30 kV 时，A 型管的触发能量从 3.24 mJ 提升至 6.48 mJ，导通时间从 4 503 ns 显著缩短至 3 716 ns，降幅达 17.5%。相同条件下，B 型管的导通时间从 3 920 ns 降至 3 091 ns，降幅扩大至 21.2%。B 型管因结构优化表现出更强的能量响应特性。在触发能量固定为 3.24 mJ 时，A 型管的工作电压从 1.30 kV 增至 1.60 kV，导通时间从 4 503 ns 急剧缩减至 840 ns，降幅高达 81.3%。在相同条件下，B 型管的导通时间从 3 920 ns 降至 703 ns，降幅达 82.1%。说明提高触发能量或工作电压均有助于加速等离子体生成与扩散，提升开关响应速度。

2.2.3　导通阻抗

针对上述两种结构的冷阴极触发管，在最低可靠工作电压及截止电压范围内进行了导通阻抗试验。通过示波器记录高压储能电容放电回路中的电流信号，并结合式（2）~（3），可以得到冷阴极触发管在不同工作电压下的等效电感和等效电阻参数变化情况。

$$L=\frac{T^2}{C}\left\{4\pi^2+\left[\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)\right]^2\right\}^{-1} \quad (2)$$

$$R=\frac{2L}{T}\times\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (3)$$

式（2）~（3）中：I_1 为第 1 个正向峰值电流，A；I_2 为第 2 个正向峰值电流，A；T 为放电电流周期，μs；C 为高压储能电容器容值，μF；L 为起爆回路总电感，pH；R 为起爆回路总电阻，μΩ。

设置触发电压为 18 V，高压储能电容为 0.4 μF，触发储能电容分别设定为 20 μF 和 30 μF，按照不同工作电压对同一回路进行试验，计算得出导通阻抗结果如表 5 所示。

表 5　冷阴极触发管导通阻抗测试结果

Tab.5　Test results of forward impedance for the cold-cathode trigger tube

序号	触发储能电容/μF	触发能量/mJ	工作电压/kV	I_1/A	I_2/A	L/pH	R/μΩ
1	20	3.24	2.8	3 647	3 134	0.335 14	0.044 18
2	20	3.24	2.0	3 114	2 606	0.335 06	0.051 89
3	20	3.24	1.6	2 800	2 326	0.335 04	0.054 03
4	20	3.24	1.3	2 320	1 841	0.334 88	0.067 34
5	30	6.48	2.8	3 798	3 380	0.335 22	0.033 99
6	30	6.48	2.0	3 225	2 819	0.335 18	0.039 22
7	30	6.48	1.6	2 955	2 456	0.335 04	0.053 89
8	30	6.48	1.3	2 699	2 178	0.334 94	0.062 47

对测试结果分析可知，触发能量和冷阴极触发管的工作电压对起爆回路中的电感、电阻都有一定影响。针对该冷阴极触发管，当触发储能电容为 30 μF 且工作电压为 2.0 kV 时，回路中的电感和电阻可以使电爆炸性能达到最优状态。

3　分析与讨论

冷阴极触发管的工作特性如图 5 所示，可分为 5 个工作区间：截止区、漏击区、工作区、误击区和击穿区。

在截止区内，无论触发信号强弱，主间隙均不导通，截止电压（$U_{截止}$）为最高不工作电压，决定抗干扰能力。

在漏击区内，在干扰信号作用下可能发生误触发，影响系统可靠性。该区域下限为最低可靠工作电压 $U_{op\min}$，上限 $U_{op\max}$ 通常为自击穿电压 U_j 的 80%。

在工作区，触发电压稳定且能够可靠导通；在误击区，工作电压接近 U_j，易发生自击穿，丧失控制性；在击穿区，电压超过 U_j 时则持续自击穿。

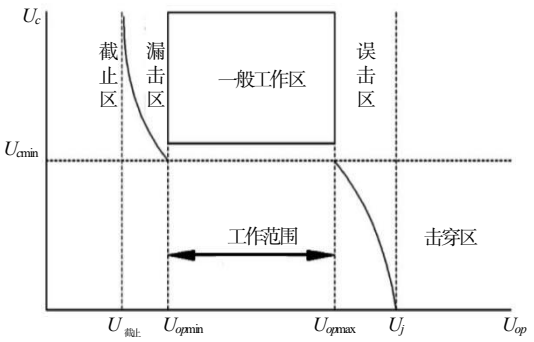


图 5　冷阴极触发管工作特性分区示意图

Fig.5　Operating characteristics zones of the cold-cathode trigger tube

根据触发管的工作原理和工作特性可知：当触发能量不足时，T-A 间隙难以充分击穿，等离子体密度不足，导致主间隙无法可靠导通；而触发能量过大，则截止电压降低，漏击区范围增大，触发管的抗干扰能力减弱。

此外，高触发能量与高工作电压协同作用，可加速等离子体生成与扩散，缩短导通时间。回路等效电阻越小、电感越稳定，电爆炸能量利用率越高。综合试验结果，推荐在 20 ~ 30 μF 触发储能电容与 1.3 ~ 2.0 kV 工作电压范围内优化参数配置。在爆炸箔起爆回路中，回路电阻和回路电感主要与工作电压相关，而触发管的工作电压与触发能量相关。当触发能量增大时，回路中的电感基本不变，电阻减小；当工作电压减小时，回路中的电感减小，电阻增大。

在爆炸箔起爆回路中，为了使电爆炸过程中的能量利用率最高，在选择合适的触发系统的同时，也应

在冷阴极触发管的工作电压范围内选择合适的工作电压。

4 结论

本文针对爆炸箔火工品用冷阴极触发管的工作可靠性问题，系统研究了触发能量、工作电压对其关键性能参数的影响规律，得出以下结论：

（1）随着触发能量的增加，冷阴极触发管的最低可靠工作电压和截止电压均显著降低，但两者之间的差值保持稳定（约 0.33~0.45 kV）。提高触发能量有助于降低起爆系统对工作电压的要求，提升点火可靠性。

（2）导通时间受触发能量和工作电压共同影响。增大触发能量或提高工作电压均可有效缩短导通时间，其中工作电压的提升对导通速度的改善更为显著，可实现导通时间数量级的下降，有利于满足爆炸箔火工品对快速能量释放的需求。

（3）触发能量和工作电压对导通阻抗有显著影响。等效电感基本保持恒定，而等效电阻随触发能量增加而减小，随工作电压降低而增大。回路阻抗特性直接影响电爆炸过程的能量匹配与转换效率。

（4）综合工作可靠性与抗干扰能力考虑，触发储能电容宜选取 20 ~ 30 μF 范围，在此条件下可确保最低可靠工作电压低于 1.3 kV，同时维持截止电压高于 0.8 kV，兼顾系统灵敏度与电磁兼容性。当触发储能电容为 30 μF、工作电压为 2.0 kV 时，起爆回路阻抗匹配最优，电爆炸性能最佳，为冷阴极触发管在爆炸箔火工品系统中的优选工作参数组合。

综上所述，本文通过系统的试验研究，为爆炸箔火工品系统中冷阴极触发管的选型和参数优化提供了关键的实验依据，有助于进一步提升直列式起爆系统的工程化可靠性和抗干扰能力。

参考文献：

[1] 王端,李帅,等. 强电磁环境下火箭发动机直列式安全点火系统[J].探测与制导学报, 2020 (4): 85-91.

[2] 简昊天,等.直列式爆炸箔点火及相关技术研究进展[J]. 含能材料,2022,30(4):396-411.

[3] 宁政,等.多点起爆技术及应用研究进展[J].含能材料, 2024 32(1):102-115.

[4] GJB 2865A-2020.导弹与火箭固体发动机点火系统安全性设计准则[S].北京:国防科技工业委员会, 2020.

[5] 王凯民.火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社,2014.

[6] 经福谦, 陈俊祥.动高压原理与技术[M].北京: 国防工业出版社,2006.

[7] 袁士伟.固体火箭发动机直列式点火系统设计[J].宇航学报, 2006,27(5):1 059-1 062.

[8] 何光林,黄科伟.引信电子安全系统高压反馈电路研究[J].北京理工大学学报,2009,29(1):47-49.

[9] 王朋,马铁华,崔春生.微型高效冲击片雷管起爆系统设计研究[J]. 电子器件,2017,40(2):486-489.

[10] 程翔,黄少波,邢国强,等.某直列式点火器双路瞎火故障分析与改进[J].火工品,2024(1):38-42.

[11] 韩克华,王丽萍,任西,等.高压脉冲功率源与冲击片雷管发火能量匹配关系特性试验方法[J].火工品, 2012(3): 45-49.

[12] 田伟静,等.小型化冷阴极触发管的研究[J].真空电子技术, 2024 (3):85-90.

[13] 郑松,等.冷阴极触发管工作稳定性研究[J].真空电子技术, 2024(4):37-41.

[14] 杨振英,党瑞荣,任玲,等.冲击片雷管作用时间的估算与测定[J].火工品,2002(3):18-20.

[15] 郝世荣,等.电爆炸箔断路开关的理论和实验研究[J].强激光与粒子束,2004(8):1 071-1 074.

[16] 曾庆轩,袁士伟,等. 爆炸箔起爆系统初始电阻对爆发电流和飞片速度影响的数值模拟[J].火工品,2002(1):43-45.