

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.04.005

一种直列式起爆装置的结构设计与性能研究*

袁玉红^{①②} 张 胜^③ 昂 扬^② 黄寅生^① 李 瑞^④ 韩保良^⑤ 张艳涛^② 李诗慧^②

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②安徽红星机电科技股份有限公司(安徽合肥,231135)

③安徽军工集团控股有限公司(安徽合肥,231135)

④安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

⑤南京军事代表局驻合肥地区军事代表室(安徽合肥,230041)

[摘 要] 为了满足现代武器对火工品的高安全性和高可靠性的需求,对一种直列式起爆装置的结构进行了优化设计,并通过仿真计算和试验测试研究了爆炸箔组件、发火件工艺、装药结构、起爆电路等对起爆装置相关性能的影响。结果表明:通过桥箔-基板一体化、原位合成飞片及光刻无限加速腔设计,提高了起爆装置中冲击片雷管爆炸箔的能量利用率。采用 HNS-IV + JO-9 两级输出装药结构与起爆系统匹配后,能够满足预设 1.3 kV 电压可靠起爆、输出钢凹深度不小于 0.3 mm 的要求。

[关键词] 直列式;起爆装置;冲击片雷管;爆炸箔

[分类号] TJ450.2

Structural Design and Performance Study on an In-Line Detonation Device

YUAN Yuhong^{①②}, ZHANG Sheng^③, ANG Yang^②, HUANG Yinsheng^①, LI Rui^④, HAN Baoliang^⑤,
ZHANG Yantao^②, LI Shihui^②

①School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Anhui Hongxing Electrical Polytron Technologies Co., Ltd. (Anhui Hefei, 231135)

③Anhui Military Industry Group Holdings (Anhui Hefei, 231135)

④School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

⑤Military Representative Office in Hefei Area, Nanjing Military Representative Bureau (Anhui Hefei, 230041)

[ABSTRACT] In order to meet the high safety and reliability requirements of modern weapons for initiating explosive devices, the structure of an in-line detonation device was optimized and designed. The effects of exploding foil components, igniter process, charging structure, and detonating circuit on the performances of the detonating device were studied by simulation calculations and experiments. The results show that the design of bridge foil-substrate integration, in-situ synthesis of flyers, and photolithography infinite acceleration chamber has improved energy utilization efficiency of the exploding foil of the slapper detonator in the detonation device. Adopting a two-stage output charging structure of HNS-IV and JO-9, matched with the detonation system, it can meet the requirements of reliable detonation with a preset 1.3 kV voltage and an output steel concave of no less than 0.3 mm.

[KEYWORDS] in-line; detonation device; slapper detonator; exploding foil

0 引言

现代战争的应用环境日趋复杂,对火工品的安全性、可靠性等相关性能的要求不断提升。与此同

时,随着制造技术的发展,国内外新型火工品也有了较大的突破。其中,直列式起爆装置因高安全性、高可靠性和高瞬发度的特点,在各型号装备中得到了广泛的应用^[1-2]。

1976 年,Stroud^[3]首次提出将爆炸箔起爆器

* 收稿日期:2023-03-22

第一作者:袁玉红(1985-),男,博士研究生,高工,主要从事钝感起爆器材的研究设计。E-mail:28891855@qq.com

通信作者:黄寅生(1962-),男,教授,博导,主要从事点火与起爆技术、爆炸技术的研究。E-mail:huangyinsheng@sina.com

(Exploding foil initiator,EFI)作为实现直列式爆炸箔起爆技术的关键元件。国内常称 EFI 为冲击片雷管。它具有价格低、体积小、易于引信电子安保系统集成的优点,是未来起爆器的发展趋势^[4-5]。国外从传统的机械加工、组装发展到以微机电系统(MEMS)集成为基础,实现了冲击片雷管的微型化、多样化,在各种战略武器中得到了广泛应用^[6-7]。

目前,国内在利用 MEMS 技术制造冲击片雷管的参数匹配、起爆机理、理论模型等方面已取得了初步成就^[8-9]。有关爆炸箔材料工艺及对应飞片速度的研究为集成制造冲击片雷管提供了依据^[10-11]。但受成本等各方面限制,我国尚未实现全军装备的普及应用,仅部分电子引信逐步选用冲击片雷管作为起爆初始元件。虽然起爆机理等被广泛研究,但是工程应用过程中的工艺参数和起爆性能优化还需进一步探究。

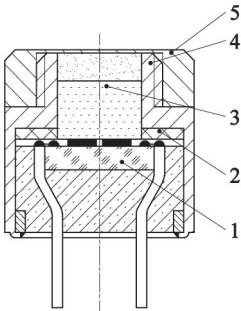
本文中,介绍了一种应用冲击片雷管的直列式起爆装置。通过模拟计算和试验测试相结合的方法研究了爆炸箔组件、发火件工艺、装药结构、起爆电路等各工艺参数设计对该装置起爆性能的影响规律,为爆炸箔起爆技术的优化以及工程应用提供了参考。

1 直列式起爆装置组成设计

直列式起爆装置主要由冲击片雷管和起爆系统组成。系统指标要求为:起爆系统预设电压 1.3 kV 放电时应可靠起爆冲击片雷管,且输出钢凹深度不应小于 0.3 mm。

1.1 冲击片雷管

作为新型钝感雷管,冲击片雷管不含任何敏感起爆药剂,主装药为钝感炸药,主要由发火件、绝缘环、药柱、壳体、压螺组成;发火件包含爆炸箔组件及电极塞。冲击片雷管结构见图 1。



1 - 发火件;2 - 绝缘环;3 - 药柱;4 - 壳体;5 - 压螺。

图 1 冲击片雷管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the slapper detonator

1.2 起爆系统

起爆系统包含起爆电路及控制软件两部分。起爆电路主要由电路板、升压组件、高压电容、放电开关 4 部分组成;控制软件主要通过系统电压供给和三级保险控制起爆电路,实现发火起爆。

2 冲击片雷管优化设计

2.1 爆炸箔组件

爆炸箔组件主要由基板、桥箔、飞片、加速膛组成。冲击片雷管爆炸箔组件采用 MEMS 工艺一体化设计。该工艺可以使桥箔在保证功能可靠性和一致性的前提下,减小桥箔体积,从而使冲击片雷管更加小型化。

2.1.1 基板-桥箔

基板位于冲击片雷管桥箔下方,质量远大于桥箔与飞片质量。基板可以防止爆炸气体膨胀至自由空间而导致能量损失,可将大部分能量反射回去。

基板通常选择致密绝缘材料,且光滑易于桥箔附着。一般密度大的材料具有更好的反射性能。表面越光滑,桥箔电爆炸损失的能量越少。常见的基板材料如表 1 所示。

表 1 常见的基板材料及性能

Tab. 1 Materials and properties of common substrate

材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	性能
聚酰亚胺	1.4	反射性能较差
聚四氟乙烯	2.0	外观暗淡,粗糙,反射性能一般
玻璃	2.2	光滑平整,反射性能好
陶瓷	2.4	硬度高,较光滑,反射性能好

从表 1 中可以看出,玻璃和陶瓷的密度相对较大,具有较好的反射性能。它们作为基板,可使得冲击片雷管通入的电能向飞片动能转换的效率更大。为简化工艺,选用玻璃作为基板材料。

通过磁控溅射镀膜及化学刻蚀法在基板上制备铜桥箔。铜桥箔选择典型的 X 型桥箔结构。桥箔厚度不大于 4 μm ,桥区尺寸为 0.25 mm \times 0.25 mm。桥箔桥区拐角处的最佳圆弧半径为 0.178 mm。

2.1.2 飞片

采用聚酰亚胺薄膜作为飞片材料。传统的聚酰亚胺胶带通过黏合剂黏结在桥箔上,飞片与桥箔接触不完全,部分能量被黏合剂气化消耗,能量利用率偏低。本文中,采用新型原位合成飞片,通过 LTC9305 光敏型负性聚酰亚胺光刻胶在桥箔原位制

备一层厚度满足要求的聚酰亚胺薄膜,作为飞片层。两种飞片工艺的爆炸箔如图 2 所示。

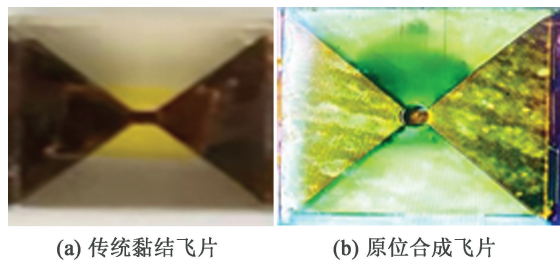


图 2 两种飞片工艺的爆炸箔
Fig. 2 Exploding foil

2.1.3 加速膛

桥箔电爆炸会产生上千安的电 流,因此加速膛选用绝缘材料。通过 SU8 负性光刻胶制备加速膛,由光刻机曝光成形。该制备过程比传统的玻璃、陶瓷、蓝宝石等材料加工工艺简单,且产品外观尺寸一致性优良,更适合批量化生产。

基于无限加速膛的原理^[12],将加速膛直径设计为桥区尺寸的 1.2 倍,相较于有限加速膛剪切形成的飞片,飞片撞击炸药柱的能量利用率更高。

2.2 主装药设计

冲击片雷管起爆用炸药需满足爆轰成长期短、冲击片窄脉冲起爆感度高的要求。为此,按照 MIL—STD—1316E《引信安全设计准则》^[13]规定的直列式传爆序列许用炸药要求,选择细化后的高纯度、超细六硝基芪-IV (HNS-IV) 作为冲击片雷管主装药。

HNS-IV 的最大理论密度为 1.74 g/cm³。对不同密度的 HNS-IV 药柱在该冲击片雷管中的起爆性能进行了对比,结果如表 2 所示。

表 2 不同密度药柱的发火率

Tab. 2 Fire rate of charges with different densities			
样品	药柱密度/ (g · cm ⁻³)	起爆电压/ kV	发火率/ %
1 [#]	1.45 ~ 1.49	1.3	0
2 [#]	1.50 ~ 1.54		50
3 [#]	1.55 ~ 1.59		100
4 [#]	1.60 ~ 1.64		100
5 [#]	1.65 ~ 1.69		70
6 [#]	1.70 ~ 1.74		40

由表 2 可知,此冲击片雷管的 HNS-IV 药柱最佳装药密度为 1.55~1.64 g/cm³,为最大理论密度的 90% 左右。

冲击片雷管内部装药尺寸为 φ4.0 mm × 4.5 mm,为满足输出钢凹深度不小于 0.3 mm 的威力要

求,对选择的 HNS-IV、HNS-IV + JO-9 (炸药型号)、HNS-IV + JH-14 (炸药型号) 的不同装药结构进行了对比分析,其中 HNS-IV 密度为 (1.60 ± 0.2) g/cm³,JO-9 与 JH-14 密度均为 (1.70 ± 0.2) g/cm³。常温起爆输出试验结果见表 3。

表 3 不同装药结构对应的输出钢凹深度

Tab. 3 Depth of output steel concave corresponding to different charge structures					
样品	起爆装药		二级装药		最小输出 钢凹深度/ mm
	尺寸/ (mm × mm)	种类	尺寸/ (mm × mm)	种类	
1 [#]	φ4.0 × 4.5	HNS-IV			0.25
2 [#]	φ4.0 × 3.0	HNS-IV	φ4.0 × 1.5	JO-9	0.51
3 [#]	φ4.0 × 3.0	HNS-IV	φ4.0 × 1.5	JH-14	0.43

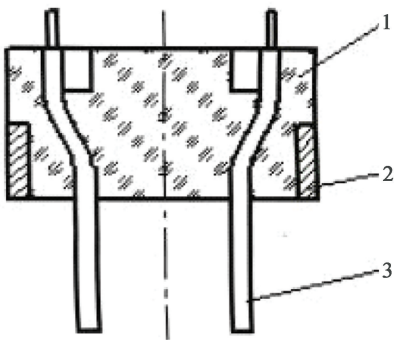
由表 3 可以看出,采用二级装药结构的雷管爆轰输出钢凹大于只存在起爆装药结构的雷管。其中,二级装药为 JO-9 炸药的雷管输出威力最大,最小输出钢凹深度为 0.51 mm,相比于只有 HNS-IV 起爆装药的雷管提高了 50%。因此,冲击片雷管的装药使用两级装药结构,二级输出装药选择 JO-9 药柱可满足输出钢凹深度不小于 0.3 mm 的威力要求,同时相较于 JH-14 具有更大的输出裕度。

2.3 发火件设计

2.3.1 电极塞

冲击片雷管要求电极塞具有尺寸小、抗震能力强、密封性高、脚线抗拉力大等特性。采用烧结结构陶瓷连接环电极及脚线,具有良好的电性能。

电极塞上端面中心设计有一矩形槽作为爆炸箔腔体,腔体两侧面四针脚线用于与桥箔焊接,结构如图 3 所示。



1 - 结构陶瓷;2 - 环电极;3 - 脚线。

图 3 电极塞结构

Fig. 3 Structure of the electrode plug

2.3.2 发火件工艺优化

爆炸箔与电极塞合装后成为发火件,为保证冲击片雷管的起爆性能,需控制发火件接触电阻。在

脚线长度为 15 mm 的条件下,对发火件工艺进行了对比测试,结果如表 4 所示。

表 4 不同发火件工艺对应的起爆性能

Tab. 4 Initiation performances corresponding to different firing process

序号	脚线类型	导电工艺	平均电阻/ mΩ	全起爆电压/ kV
1 [#]	单路	锡焊	108	1.30
2 [#]	双路	锡焊	68	1.21
3 [#]	双路	导电胶黏结	82	1.28

从表 4 中可以看出,脚线类型选用双路脚线,导电工艺选择锡焊的发火件电阻最小,所需要的全起爆电压最小。因此,发火件选用双路脚线和锡焊的工艺有利于电阻控制,同时可以提高起爆性能。

3 起爆系统设计优化

3.1 电容

为保证雷管的可靠起爆电压不大于 1.3 kV,选择高压电容为 0.22 μF 及 0.44 μF,利用软件 PSpice 的仿真结果与试验件测试结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出,仿真回路充电电压与试验电压测量值一致性较好。电容增大有利于增加峰值电流,但回路电流变化率减小,电流上升变慢,上升沿时间变大,不利于雷管起爆。因此,在增加电容时需保证回路电流在规定时间内上升至相应值。

表 5 电压及电流仿真与测试结果

Tab. 5 Simulation and test results of voltage and current

序号	数据来源	充电电压/V	电容/ μF	峰值电流/A	上升沿时间/ ns	150 ns 时刻电流/A
1 [#]	仿真 试验	1 200	0.22	1 942	182	1 669
		1 178		1 920	174	1 650
2 [#]	仿真 试验	1 200	0.44	2 910	205	2 582
		1 182		2 885	212	2 550

在放电电流满足 150 ns 时上升至不小于 1 900 A 的条件下,为了保证冲击片雷管能够可靠起爆,在起爆电压为 1.3 kV 的条件下选择 0.44 μF 的高压电容。此时,冲击片雷管具有一定的发火裕度。

3.2 高压开关

高压开关与电容、爆炸箔组成一个放电回路,需满足以下要求^[14]:

1)能够承受 1~3 kV 的高电压。经受高电压

时,开关不能发生自击穿而导通。

2)具有瞬间高导通能力。在触发瞬间,高压开关电极两端会通过一个快速上升沿电流脉冲(上升沿时间为 30~60 ns,峰值电流为 1~7 kA,峰值功率为 1~15 MW),高压开关必须保证该脉冲电流瞬间顺利通过。

3)电阻和电感小。高压开关的电感和电阻若过大,会降低输入能量利用率,导致桥箔电爆炸不完全,飞片冲击起爆钝感装药不可靠。

目前,在直列式起爆系统中应用的高压开关主要有三电极火花隙开关(包括气体开关和真空开关)、半导体开关、平面开关和一次性开关^[15]。

本文中,选择真空开关作为起爆电路的高压开关。真空开关耐压值高,耐辐射性高,触发电压较低,受环境影响小,性能可靠;虽然成本较高,但可进一步优化。

3.3 起爆电路设计

印制电路板面积约 25 cm²,高压变压器、陶瓷电容、高压开关分布在电路板上。高压变压器主要为磁芯绕组,可将 24 V 电压升至 2 kV,通过均匀绕线和绝缘处理,尺寸约 2 cm³;陶瓷电容为 0.44 μF,可耐高压 3 kV;选用低阻值、低感度、耐高压 3 kV 的高压开关,接受信号后闭合,电容快速放电,实现起爆。印制板采用 FR-4 材料,双层板设计,铜箔厚度 70 μm。根据陈名等^[16]对 PCB 导体的计算,通过控制走线的长度、宽度,可控制电路板走线电感 L 在 15 nH 以内。目前,该电路的设计使用寿命为 50 次以上。

3.4 起爆系统控制逻辑设计

起爆电路接受系统提供的 5 V 回路电压,进入工作状态。随后,依据操作界面发出的指令,系统供给 24 V 升压电压,依次解除后两级保险,将电压升至预设电压,并给高压电容充电;此时,控制放电,即可起爆冲击片雷管。

4 试验验证

4.1 起爆系统解保安全性试验

控制系统设置有三级环境保险,为验证控制逻辑安全性,使用测试系统模拟三级环境解保指令(D1、D2、D3),通过示波器波形显示不同时序下输入放电起爆指令的起爆情况,起爆试验结果见表 6。表 6 中,样品个数为 5。

表 6 表明,该直列式起爆装置在异常时序的解保信号下接收到起爆指令不会起爆,控制逻辑的安

表 6 解保安全性试验结果

Tab.6 Results of arming security test

序号	起爆时序	试验结果
1 [#]	上电→放电起爆	未起爆
2 [#]	上电→D1→放电起爆	未起爆
3 [#]	上电→D1→D2→放电起爆	未起爆
4 [#]	上电→D1→D2→D3→放电起爆	正常起爆
5 [#]	上电→D1→D3→放电起爆	未起爆
6 [#]	上电→D1→D3→D2→放电起爆	未起爆
6 [#]	上电→D1(时域在范围外) →D3→D2→放电起爆	未起爆

全性满足系统使用要求。

4.2 起爆感度测试

根据 GJB/Z 377A—1994《感度试验用数理统计方法》中的升降法^[17],对设计的冲击片雷管进行了起爆感度测试,测试结果如表 7 所示。

表 7 起爆感度试验结果

Tab.7 Results of initiation sensitivity test

样本	50%起爆电压/ kV	全起爆电压/ kV	标准偏差/ kV
1 [#]	1.10	1.22	0.021
2 [#]	1.06	1.18	0.018

从表 7 中可以看出,该冲击片雷管的起爆阈值为 1.10 kV,可靠起爆电压为 1.22 kV,具有极强的抗环境干扰能力,安全性满足现代武器的要求。

4.3 回路参数及电性能测试计算

直列式起爆装置在使用前需对起爆性能及能量利用率进行验证。以可靠起爆电压 1.3 kV 为基础,通过放电试验测试电流参数,如表 8 所示。表 8 中, I_1 为第一峰值电流; I_2 为第二峰值电流; T_1 为第一峰值时间; T_2 为第二峰值时间。

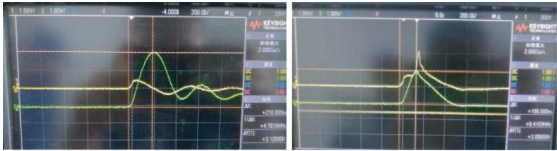
表 8 电流参数测试结果

Tab.8 Results of current parameter test

测试类型	I_1 /A	T_1 /ns	I_2 /A	T_2 /ns
扁平电缆	3 125	210	1 300	640
扁平电缆	3 120	205	1 350	635
扁平电缆+冲击片雷管发火件	2 050	156		
扁平电缆+冲击片雷管发火件	2 100	150		

示波器波形如图 4 所示。

经 Origin 软件计算,爆炸箔起爆装置爆发时间为 150.2 ns,与实际测试结果相符合;爆发电压与电



(a) 扁平电缆 (b) 扁平电缆+雷管发火件

图 4 电流波形测试结果

Fig.4 Results of current waveform test

流略小于测试结果,在误差范围内。

依据测试结果计算电流曲线的第一周期 $T = T_2 - T_1 \approx 430$ ns。

电流为:

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{\frac{R}{2L}(T_2 - T_1)}。$$

(2)

式中: R 为回路电阻; L 为回路电感。

可得回路电阻

$$R = \frac{2L \ln \frac{I_1}{I_2}}{T}。$$

(3)

电流振荡周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \left(\sqrt{\frac{1}{LC}} - \frac{R^2}{4L^2} \right)^{-1}。$$

(4)

式中: T 为电流振荡周期; C 为电容。

可得回路电感

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

(5)

将 $T \approx 430$ 代入计算得:回路电阻 R 约为 46.8 mΩ;回路电感 L 约为 11.5 nH。

当起爆回路通过扁平电缆焊接冲击片雷管进行测试时,受电缆与雷管本身的电阻和电感等各方面影响,经测量与估算得:实际电阻 R_0 约为 80 mΩ,实际电感 L_0 约为 100 nH。

对于 HNS-IV 在窄脉冲下的起爆判据,郭俊峰等^[18]根据大量文献和仿真,建立了如下所示参考公式:

$$p^{2.08} \tau = 1.38。$$

(6)

式中: p 为飞片入射压力; τ 为冲击过程的脉冲作用时间。

该冲击片雷管选用原位飞片起爆单元,在适配前对飞片的结构尺寸与高电压的飞片速度进行了验收测试。以工作电压为 1.3 kV 作为验证电压,此时飞片冲击能量远超过起爆阈值。因此,该冲击片雷管符合设计预期。

$$E_f = \int_0^{t_1} I(t) U(t) dt。$$

(7)

利用仿真软件结合电压、电流函数,计算 1.3 kV 充电电压下冲击片雷管正常作用时桥箔沉积的

能量 $E_c=0.176\text{ J}$ 。
电容能量输出

$$E_c=\frac{1}{2}CU^2。$$
 (8)

式中: E_c 为电容输出能量; C 为电容; U 为充电电压。
计算得 $0.44\text{ }\mu\text{F}$ 电容输出能量为 0.338 J 。因此,测试条件下起爆装置电容能量利用率 $\eta=52\%$ 。此计算可作为雷管、电源与不同回路间适配性验证的参考。

直列式起爆装置用冲击片雷管通过接插座与起爆回路直接相连,无连接电缆,实际回路电阻、电感小于测试状态,能量利用率更高,系统适配性更好。

4.4 电安全性试验

依据爆炸箔起爆器电安全性试验方法要求,将起爆装置预设电压设置为 $75、500\text{ V}$,放电试验结果如表 9 所示。

表 9 电安全性试验结果

Tab.9 Results of electrical safety test				
样品 序号	放电 电压/V	试验前 电阻/mΩ	试验后 电阻/mΩ	起爆 状态
1 [#]	75	62	62	未起爆
2 [#]		61	62	未起爆
3 [#]		65	63	未起爆
4 [#]	500	68	断路	未起爆
5 [#]		64	断路	未起爆
6 [#]		64	断路	未起爆

由表 9 试验结果可知,直列式起爆装置 75 V 与 500 V 时电安全性试验均满足设计要求。

4.5 环境试验

将直列式起爆装置预设电压设置为 1.3 kV ,在高温、低温及常温下进行起爆验收试验,结果如表 10、表 11、表 12 所示。

环境试验后起爆试验结果表明,该直列式起爆装置在 1.3 kV 充电电压下起爆可靠,输出威力满足钢凹深度不小于 0.3 mm 的要求。

表 10 高温工作试验结果

Tab.11 Results of high-temperature working test				
序号	温度 /℃	保温时 间/h	起爆 情况	钢凹深度/mm
1 [#]	70 ± 2	4	正常起爆	0.58
2 [#]			正常起爆	0.63
3 [#]			正常起爆	0.59
4 [#]			正常起爆	0.55
5 [#]			正常起爆	0.59

表 11 低温工作试验结果

Tab.11 Results of low-temperature working test				
序号	温度 /℃	保温时 间/h	起爆 情况	钢凹深度/mm
1 [#]	-40 ± 2	4	正常起爆	0.49
2 [#]			正常起爆	0.54
3 [#]			正常起爆	0.51
4 [#]			正常起爆	0.49
5 [#]			正常起爆	0.52

表 12 常温工作试验结果

Tab.12 Results of room-temperature working test				
序号	温度 /℃	保温时 间/h	起爆 情况	钢凹深度/mm
1 [#]	0	-	正常起爆	0.52
2 [#]			正常起爆	0.54
3 [#]			正常起爆	0.55
4 [#]			正常起爆	0.60
5 [#]			正常起爆	0.57

5 结论

提出了一种直列式起爆装置的结构设计与性能优化方案。从爆炸箔组件、发火件工艺、装药结构、起爆电路、控制系统等方面进行了设计,并进行了相关性能研究,得到主要结论如下:

1)爆炸箔组件采用经典 X 型铜桥箔与玻璃基板一体化设计,优化原位合成飞片、光刻加速膛等工艺,电极塞采用双脚线,与爆炸箔锡焊形成发火件。与传统爆炸箔相比,具有更好的工艺性,提高了炸药的起爆性能。

2)选择 HNS-IV + JO-9 两级装药结构,较 HNS-IV 一级装药结构或 HNS-IV + JH-14 两级装药结构提高了输出威力,满足输出钢凹深度不小于 0.3 mm 的要求,且具有较大的裕度。

3)起爆电路选择 $0.44\text{ }\mu\text{F}$ 高压电容和真空开关,回路电阻及电感较低,经试验验证,该回路下直列式安全起爆装置可靠起爆电压为 1.22 kV ,配套系统仅需供给 $24、5\text{ V}$ 电压即可完成预设 1.3 kV 升压、充电、放电起爆等功能,且具备可操控性。

4)经解保安全性、回路适配性、电安全性及环境试验验证,该直列式起爆装置具有能量利用率高、安全性高且输入、输出性能可靠等优点,满足战斗部等武器装备使用要求。

参 考 文 献

- [1] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
WANG K M. Engineering of initiators & pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [2] 简昊天, 汪柯, 高峰, 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.
JIAN H T, WANG K, GAO F, et al. Review on in-line exploding foil ignition and related technologies[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(4): 396-411.
- [3] STROUD J R. A new kind of detonator-the slapper; UCRL-7739[R]. Livermore, CZ, USA: Lawrence Livermore Laboratory, 1976.
- [4] 尹强, 耿春余. 冲击片雷管研究与发展[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(4): 8-11, 15.
YIN Q, GENG C Y. Research and development of slapper detonator [J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(4): 8-11, 15.
- [5] 伊若, 任丽萍. 直列式爆炸序列标准需求分析[J]. 火工品, 2013 (1): 53-56.
YI R, REN L P. The analysis on the demand of standards for non-interrupted explosive train [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013 (1): 53-56.
- [6] PRAY D. Exploding foil initiator[C]//64th Annual Fuze Conference. 2021.
- [7] YANG Z, ZHU P, CHU Q Y, et al. A micro-chip exploding foil initiator based on printed circuit board technology [J]. Defence Technology, 2022, 18(8): 1435-1444.
- [8] 刘鹏, 汪柯, 朱朋, 等. 低成本爆炸箔起爆器系统技术研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(4): 13-20.
LIU P, WANG K, ZHU P, et al. Low-cost exploding foil initiator system technology [J]. Explosive Materials, 2020, 49(4): 13-20.
- [9] 韩克华, 周俊, 任西, 等. 高压脉冲功率源等效参数对桥箔电爆性能影响规律[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 828-833.
HAN K H, ZHOU J, REN X, et al. Effect of high voltage pulse power source equivalent parameter on exploding performance of foil bridge [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6): 828-833.
- [10] 曾庆轩, 郑志猛, 李明愉, 等. 冲击片雷管集成制造方法研究[J]. 火工品, 2012 (5): 1-3.
ZENG Q X, ZHENG Z M, LI M Y, et al. Research on fabrication method of integrated slapper detonator [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012 (5): 1-3.
- [11] 郭菲, 施志贵, 蒋小华, 等. 硅集成爆炸箔组件起爆 HNS-IV 试验研究[J]. 火工品, 2009 (6): 5-7.
GUO F, SHI Z G, JIANG X H, et al. The test research on the initiation of HNS-IV by an integrated silicon exploding foil assembly [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009 (6): 5-7.
- [12] 张玉若, 金丽, 高艳, 等. 爆炸箔特征参数匹配关系研究[J]. 火工品, 2011(1): 20-22.
ZHANG Y R, JIN L, GAO Y, et al. Study on matching relationship of characteristic parameter of exploding foil [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(1): 20-22.
- [13] Fuze design, safety criteria for: MIL—STD—1316F [S]. 2017.
- [14] 曾庆轩, 李守殿, 袁士伟, 等. 爆炸箔起爆器用高压开关研究进展[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(1): 202-205.
ZENG Q X, LI S D, YUAN S W, et al. Research progress of high-voltage switches in exploding foil initiators [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(1): 202-205.
- [15] 吕军军, 李明愉, 曾庆轩, 等. 爆炸箔起爆系统的发展[J]. 科技导报, 2011, 29(36): 61-65.
LÜ J J, LI M Y, ZENG Q X, et al. Development research of exploding foil initiator system [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(36): 61-65.
- [16] 陈名, 孙旭东, 黄立培. PCB 导体电感的简化计算方法[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(3): 45-49.
CHEN M, SUN X D, HUANG L P. A simplification method to calculate inductance of PCB conductor [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(3): 45-49.
- [17] 中国兵器工业标准化研究所. 感度试验用数理统计方法: GJB—Z377A—1994 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1994.
China Ordnance Industrial Standardization Research Institute. Sensitivity tests, statistical methods for: GJB—Z377A—1994 [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1994.
- [18] 郭俊峰. 微爆炸起爆系统作用机制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.