

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0001-05

一种高输出威力的同步起爆网络研究

郭宇轩¹, 冀小刚¹, 王端¹, 张丽莎², 郭伟¹, 王云鹏¹, 王伟¹

(1.中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2.西北工业大学, 陕西 西安, 710072)

摘要: 为可靠起爆定向战斗部, 设计了一种刚性基板和柔性导爆索结合的“一入三出”新型起爆网络, 输入端采用半导体桥雷管与JO-11C药柱紧密接触, 在刚性基板沟槽内放置的银制导爆索连接输入端JO-11C药柱和输出药柱。经过仿真模拟对比毁伤效果, 设计了传爆药柱直径分别为10, 20, 50 mm的三级输出传爆序列; 理论分析起爆网络的同步性, 计算得出起爆网络同步性误差为253 ns, 同步性试验表明起爆网络的3路时间误差最大为290 ns; 起爆能力测试表明三点同步起爆网络的输出威力满足定向战斗部的使用要求。

关键词: 多点同步起爆网络; 同步性精度; 传爆序列; 输出威力

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.001

Research on A High Output Power Synchronous Detonation Network

GUO Yu-xuan¹, JI Xiao-gang¹, WANG Duan¹, ZHANG Li-sha², GUO Wei¹, WANG Yun-peng¹, WANG Wei¹

(1.School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

Abstract: In order to reliably detonate directional warheads, a new type of initiation network with "one in, three out" combining rigid substrate and flexible detonating cord was designed. In this initiation network, the semiconductor bridge detonator at the input end is in close contact with the JO-11C column, and a silver detonating cable is placed in the groove of rigid substrate to connect the JO-11C column at the input end and the output column. After simulating and comparing of damage effects, three-stage output detonation transmission train with diameters of 10, 20 and 50 mm output column was designed. The synchronicity of the initiation network was analyzed theoretically, and the calculated synchronous time difference is 253 ns, meanwhile, the synchronous test result show that the three-way time difference of the initiation network is up to 290 ns. The initiation ability test indicates the output power of the three-point synchronous initiation network can meet the requirements of directional warheads.

Key words: Multi-point synchronous initiation network; Synchronicity accuracy; Detonation transmission train; Output power

起爆网络是一种由爆炸元件构成并通过爆轰信号传递起爆指令的新型起爆技术^[1]。随着起爆网络的研究发展, 出现了以单点输入、多点同步输出的多点同步起爆网络, 其通过调整爆轰波形来达到提高战斗部威力的目的^[2-5]。多点同步起爆网络分为刚性起爆网络与柔性起爆网络, 刚性起爆网络是以刚性基板为载

体的沟槽型起爆网络, 柔性起爆网络是以柔性爆炸元件为主要装药的同步起爆网络。为研究起爆网络的同步性, 许碧英等^[6]根据多点排布的原则进行分析, 得出了装药的爆速是影响刚性爆炸网络起爆同步性的重要因素。邵玲等^[7]在此基础上提出了多点起爆网络的新型装药结构, 得出影响同步性的最主要因素是机

收稿日期: 2023-03-27

作者简介: 郭宇轩 (1999-), 男, 在读硕士研究生, 从事火工品技术研究。

通讯作者: 王端 (1973-), 男, 研究员级高级工程师, 从事火工品技术研究。

械加工精度、装药密度的一致性以及爆轰波拐角的偏差。白颖伟等^[8]计算了柔性爆炸网络的同步性误差,研究表明当输入端起爆点放置在多点同步起爆网络系统中心时可以有效地减少输入引起的同步性误差,但只进行了静态实验,没有在动态实验中验证起爆网络的可靠性。吴艳萍等^[9]设计了一种“一入八出”的柔性爆炸网络,采用在输出端灌胶的方法密封银制导爆索来保证作用后起爆装置的结构完整性。前人的大量研究主要是围绕提升起爆网络同步性来调整爆轰波形,从而提升战斗部威力开展的^[10-12]。

为应对提升战斗部毁伤能力的更高需求,不仅需要大幅增加装药量,还需要更可靠地起爆定向战斗部,基于此需求本研究设计了一种刚性基板和柔性导爆索结合的“一入三出”式新型起爆网络,通过仿真模拟设计了输出端传爆序列,计算了起爆网络同步性精度,并且对该起爆网络进行了试验测定。

1 起爆网络设计

1.1 起爆网络总体结构设计

起爆网络壳体由刚性基板、盖板、转接套、传爆筒4部分构成,如图1所示。

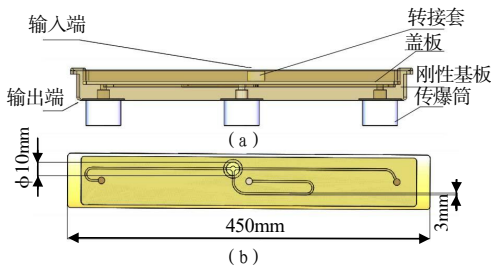


图1 同步起爆网络结构图

Fig.1 Structure diagram of synchronous initiation network

采用6061-T6铝合金刚性基板为主体,内部切出长方形凹槽,其上刻3条长度均为245mm的沟槽,导爆索压装于沟槽内,3根等长的导爆索连接末端的输出药柱,作为起爆网络的输出端;盖板中心设置定位孔用于插入固定半导体桥雷管的转接套,作为起爆网络的输入端。

起爆网络的输入端由雷管以及施主装药组成。雷管选用半导体桥雷管;施主装药指爆炸网络中的传爆药柱,它主要用于将半导体桥雷管的起爆能量接收并

传递引爆导爆索,如图2所示。结合实际情况,选择了密度为 1.6 g/cm^3 的JO-11C制成具有足够强度的 $\Phi 8\text{ mm}$ 传爆药柱。

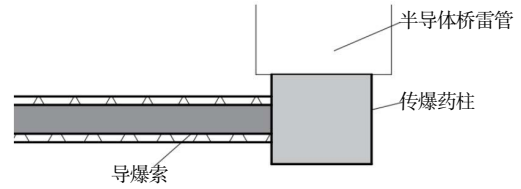


图2 输入接口模块装配示意图

Fig.2 Assembly diagram of input interface module

图2所示结构中半导体桥雷管先和传爆药柱接触,随后传爆药柱和导爆索接触,这样两级接触相比半导体桥雷管直接和导爆索捆扎而言,接触稳定、面积大、起爆效率高,是更可靠、更安全稳定起爆方式;其次,与半导体桥雷管的起爆能量相比,输入接口处有足够大的能量起爆导爆索,选用的JO-11C传爆药爆速高、爆轰感度好,有利于保证爆轰波输出同步性;此外,传爆药柱的长度可保证形成连续平滑的爆轰波,提高对下一级装药的起爆能力。

1.2 同步性分析

起爆网络传爆时间包含从输入端到输出端爆轰波传播的时间,以及爆轰波通过拐角由于爆速差导致的时间延迟。对设计的起爆网络进行同步性分析时,首先假设该起爆网络传爆时间为 t ,则:

$$t = \frac{L}{D} + nt_{\pi/2} \quad (1)$$

式(1)中: L 为输入端到输出端的长度,mm; D 为传爆药的爆速,m/s; n 为爆轰波由中心输入端传播至输出端所经过的拐角个数; $t_{\pi/2}$ 为爆轰波拐过直角的时间延迟,s。

刚性基板的加工精度、传爆药的装药密度、传爆药的爆速误差以及爆轰拐角误差等都是起爆网络同步性产生偏差的主要因素。本文设计的起爆网络将导爆索截取后放置于沟槽内,将其沿着沟槽线路进行弯曲,这样产生的时间误差极其微小,可以忽略不计。

因此,根据公式(1)起爆网络的同步误差主要由长度 L 、爆速 D 的偏差 ΔL 、 ΔD 所决定的,可以用误差分析公式进行计算:

$$\Delta t = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial t}{\partial L} \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial D} \Delta D\right)^2} \quad (2)$$

式(2)中: ΔL 为输入端到输出端沟槽的长度误差, mm; ΔD 为炸药爆速差, m/s, 取决于沟槽装药均匀性、装药截面尺寸以及装药密度。

对公式(2)求偏导有:

$$\frac{\partial t}{\partial L} = \frac{1}{D} \quad (3)$$

$$\frac{\partial t}{\partial D} = -\frac{L}{D^2} \quad (4)$$

对于设计的三点刚性同步起爆网络, 从输入端到输出端的长度 $L=245\text{mm}$ (刚性基板厚度 $H=25\text{mm}$)。裁剪导爆索时精度控制在 0.05mm 以内, 即 $\Delta L=0.05\text{mm}$ 。沟槽装药为 $\Phi 1.58\text{mm}$ 的导爆索, 爆速 D 为 $7.1\text{mm}/\mu\text{s}$, 假设其爆速偏差 $\Delta D=0.052\text{mm}/\mu\text{s}$ 。将式(3)~(4)代入式(2)有:

$$\Delta t = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{D}\right)^2 + \left(\frac{L \cdot \Delta D}{D^2}\right)^2} \quad (5)$$

将参数 $L=245\text{mm}$ 、 $\Delta L=0.05\text{mm}$ 、 $\Delta D=0.052\text{mm}/\mu\text{s}$ 、 $D=7.1\text{mm}/\mu\text{s}$ 代入式(5), 理论上可以计算出设计的起爆网络的同步性误差时间为:

$$\Delta t = \pm 253\text{ ns} \quad (6)$$

1.3 输出端毁伤效应研究

为可靠起爆装药增大后的定向战斗部, 输出端采用多级药柱的传爆序列来放大爆轰能量, 如图3所示。

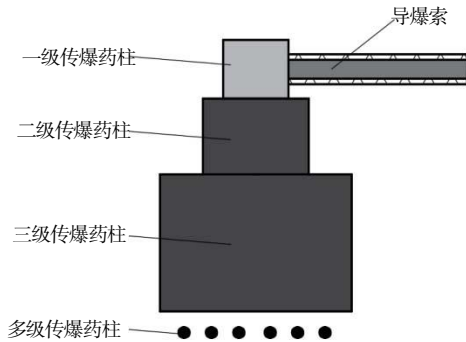


图3 输出端传爆序列结构示意图
Fig.3 Structural schematic diagram of detonation transmission train at output end

利用 workbench 有限元分析软件模拟不同药柱尺寸、序列级数的爆轰威力。由于起爆网络中选用银制导爆索作为爆轰传递介质, 为传爆可靠以及安装方便、安全, 一级传爆药柱选用与传爆药柱相同的 JO-11C 药柱, 直径为 10mm ; 下级输出药柱选用爆轰能量高、爆轰性能好的 JH-14 药柱, 建立三维模型如图4所示。

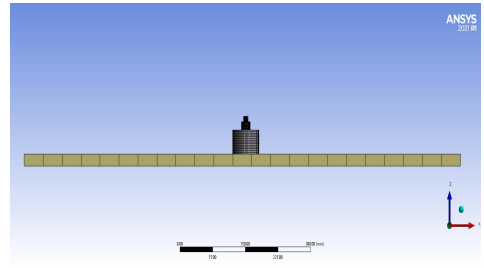
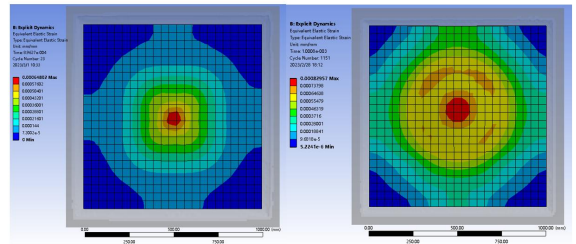


图4 传爆序列有限元模型
Fig.4 Finite element model of detonation transmission train

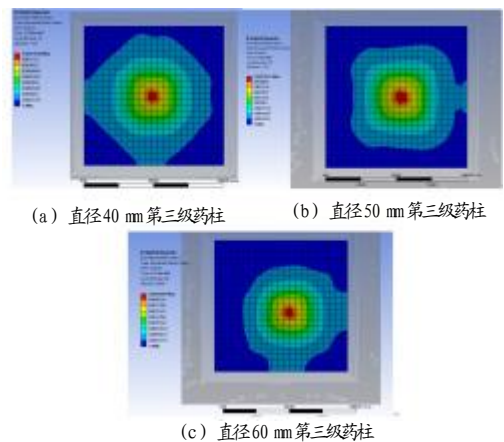
首先选用二级传爆序列来放大爆轰威力, 二级传爆药柱直径分别为 $50, 60\text{mm}$, 结果如图5所示。



(a) 直径 50mm 第二级药柱 (b) 直径 60mm 第二级药柱

图5 二级传爆序列仿真结果图
Fig.5 Simulation results of secondary detonation transmission train

从图5中可以看出当选用二级传爆序列时, 直径 10mm 的一级传爆药柱直接起爆直径较大的二级传爆药柱时, 会造成能量的分散, 爆轰能量并不集中, 所以选择增加一级传爆药柱变为三级传爆序列来传递爆轰能量, 即在直径 10mm 一级传爆药柱下增加一级直径 20mm 的传爆药柱, 使爆轰能量传递稳定、可靠。第三级传爆药柱直径分别为 $40, 50, 60\text{mm}$, 仿真结果如图6所示, 数据如表1所示。



(a) 直径 40mm 第三级药柱 (b) 直径 50mm 第三级药柱 (c) 直径 60mm 第三级药柱

图6 三级传爆序列仿真结果图
Fig.6 Simulation results of three-stage detonation transmission train

由表1结果可以看出, 当增加二级直径 20mm 传爆药柱后, 爆轰能量传递稳定, 输出集中; 50mm 药

柱与 60mm 药柱输出能量更高且能量相差不大。

表 1 不同传爆序列结果对比

Tab.1 Comparison of results of different detonation transmission train

传爆序列	传爆药柱直径/mm	同步性/ns	最大等效应变/mm	能量是否分散
放大前	-	200	0.000 224	否
放大后 (二级传爆)	50 60	220 275	0.000 722 0.000 829	是 是
放大后 (三级传爆)	40 50 60	260 290 290	0.001 364 0.002 254 0.002 287	否 否 否

根据图 6 及表 1, 为适应战斗部毁伤能力要求, 将输出接口设计为“导爆索→一级传爆药柱(Φ10 mm JO-11C)→二级传爆药柱(Φ20 mm JH-14)→三级传爆药柱(Φ50 mm JH-14)→战斗部主装药”逐级放大能量的传爆序列, 放大后的传爆序列输出能量是放大前的 10 倍左右, 可以满足战斗部装药量增加的要求, 提高定向战斗部起爆可靠性。

2 起爆网络性能测试及结果分析

2.1 同步性试验

设计的 3 点同步起爆网络实物如图 7 所示, 针对 3 点同步起爆网络开展同步性试验。

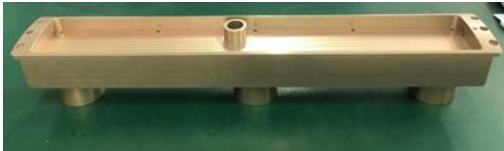


图 7 同步起爆网络实物图

Fig.7 Physical drawing of synchronous initiation network

测试方式采用“断-通靶”形式, 每个通道都选择“通触发”启动逻辑。起爆前每个回路都处于断开状态。恒流源开关打开后, 当达到触发电压, 示波器开始采集信号, 当爆轰波传到最后一级传爆药柱末端时, 爆炸产生电离将回路导通, 采集结束。采用采集精度为 0.1ns 的 4 通道示波器采集试验过程中的电压信号, 测量 3 点同步起爆网络中的输出点, 如图 8 所示, 产生的变化曲线如图 9 所示。

示波器通道 4 达到触发电压后, 开始计时, 同时示波器通道 1、2、3 通道记录二靶信号, 采集结束时刻由爆轰波传到最后一级药柱的爆炸瞬间决定, 通过比较计时结束值即可考察多点起爆网络的同步性。测

量结果如表 2 所示。

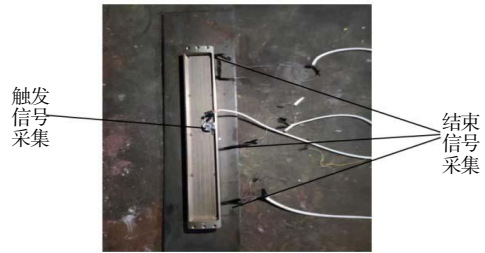


图 8 传爆网络测试线路连接图

Fig.8 Connection diagram of initiation network

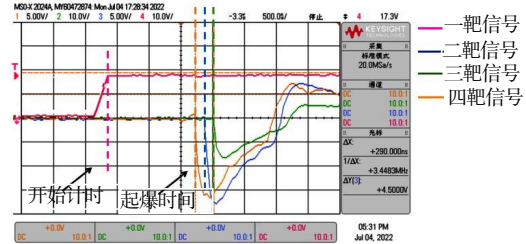


图 9 示波器曲线图

Fig.9 Oscilloscope diagram

表 2 同步性测量结果

Tab.2 Synchronization measurement results

试验次数	爆炸时间/ns		
1	3 700	3 990	3 920
2	3 750	3 885	3 955

从表 2 两次试验数据可以发现, 由于机械加工及压药工艺等原因, 起爆网络的 3 个输出端的爆炸时间都不相同, 但跳动不大, 2 组数据中最大偏差时间为 290 ns, 满足要求。表明使用导爆索很好的控制了输出端药柱增多带来的时间误差增大, 使时间误差在合理的范围内并增大了输出威力。

2.2 起爆能力测试

采用钢凹法对起爆网络的起爆能力进行测试。首先在钢板上放置装配好的起爆网络组件, 放置过程中使起爆网络的 3 个传爆筒正对钢板。从中心点处引爆沟槽中的导爆索, 爆轰波通过沟槽分别传播至 3 个输出端药柱上端面, 然后逐级起爆药柱。

GJB 5309.16-2004 钢块凹痕试验中通过钢块对火工品输出威力进行测试, 基于此, 本试验选择 10, 20 mm 厚度的钢板对放大前后的 4 组起爆网络的输出威力进行测试, 通过钢板上留下的炸痕来判断起爆网络装药的起爆能力。试验结果如表 3 所示。

表 3 传爆序列放大前后钢凹法试验结果

Tab.3 Test results of steel concave method before and after amplification of detonation transmission train

传爆序列	钢板厚度/mm	
	10	20
放大前	未击穿	未击穿
放大后	击穿	击穿

由表 3 可知, 对于 10 mm 钢板, 放大前的起爆

网络的钢板底部垫有试验场地的石板，而未能打穿钢板，如图 10 所示。而将放大后的起爆网络的钢板放置在空地上后，成功打穿钢板。

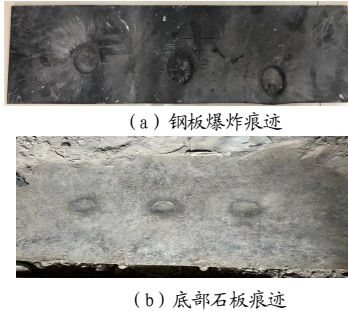


图 10 10mm 钢板爆炸痕迹以及底部石板痕迹

Fig.10 Explosion marks on steel plate with 10mm thickness and bottom stone slab marks

对于 20 mm 钢板，放大前的起爆网络未能击穿钢板，放大后的起爆网络成功击穿，如图 11 所示。通过试验可以发现放大后的起爆网络在保证同步性的基础上增加了输出威力，可以适应战斗部毁伤能力要求，有利于提高起爆稳定性。

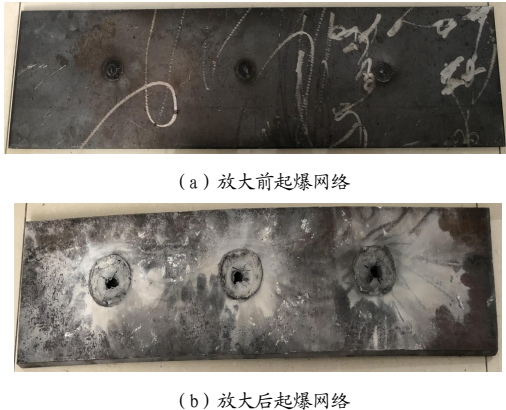


图 11 20mm 钢板爆炸痕迹

Fig.11 Explosion trace of steel plate with 20mm thickness

3 结论

(1) 设计了一种三点同步起爆网络，该起爆网络采用刚性基板为主体、填充柔性导爆索相结合的结构，输出端采用三级传爆序列放大爆炸威力，安装时更加方便、安全，爆轰输出能量更大。

(2) 对输出端的传播序列进行了模拟分析，设计一级输出药柱 ($\Phi 10$ mm JO-11C) \rightarrow 二级输出药柱 ($\Phi 20$ mm JH-14) \rightarrow 三级输出药柱 ($\Phi 50$ mm JH-14)

的传爆序列，模拟及起爆能力测试结果均表明该传爆序列起爆能量集中，威力较大。

(3) 对起爆网络同步性进行理论计算，在网络线路拐角处使用柔性导爆索弯曲成半圆后进行填充，计算得到起爆网络整体同步性为 253 ns，同步性试验结果表明起爆网络整个传输过程 3 点误差最大为 290 ns。计算与试验均证实在输出端使用三级传爆序列的起爆网络的 3 点同步性在合理的范围内，可以产生稳定的 3 点爆轰波以提高输出威力，满足现代战争中定向战斗部的使用要求。

参考文献:

- [1] 沈慧铭.多点起爆方式作用机理及其在战斗部中的应用研究[D].南京:南京理工大学,2018.
- [2] 韩克华,任西,张玉若,等.定向战斗部直列式多点起爆系统设计[J].弹箭与制导学报,2013,33(6):78-81.
- [3] 单聪明,朱顺官,张琳,等.多点非电起爆网络设计与可靠性研究[J].爆破器材,2018,47(5):27-34.
- [4] 施春成,王保国,陈亚芳,等.聚能装药用多点同步起爆网络设计[J].火工品,2014(6):1-4.
- [5] 崔银锋,周伟江,康乐.引信传爆序列能量匹配性设计与试验[J].水下无人系统学报,2020,28(3):337-344.
- [6] 许碧英,李公法,高桂萍.平面多点同时起爆网络的设计[J].火工品,2004(3):1-4.
- [7] 邵玲,胡双启,曹雄.环锥形传爆药的多点同步起爆网络的设计[J].火工品,2004(2):30-32.
- [8] 白颖伟,张蕊,李哲,等.柔性多点同步爆炸网络设计技术研究[J].含能材料,2009,17(2):225-228.
- [9] 吴艳萍,魏华男,薛润华,等.柔性多点同步起爆装置设计与试验研究[J].火工品,2022(3):14-17.
- [10] 樊龙.柔性爆炸网络用无起爆药起爆接头研究[J].舰船电子工程,2015,35(9):176-179.
- [11] 张郑伟,李晓刚,温玉全,等.一种柔性线同步起爆网络的设计与实验研究[J].含能材料,2014,22(3):401-405.
- [12] 胡华权,裴明敬,张德志,等.曲面多点同步起爆网络研制[J].火工品,2008(6):5-8.