

文章编号: 1006-9941(2018)05-0390-08

多点起爆网络装药及性能

李瑞¹, 李伟兵¹, 郭效德², 黄寅生³, 梁力², 张冬冬³, 李文彬¹, 王晓鸣¹

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心, 江苏 南京 210094; 3. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究多点起爆网络装药对爆轰波输出同步性及起爆能力的影响,以超细奥克托今(HMX)为主体炸药,硝化棉(NC)为粘结剂,(HMX/NC=95:5)为沟槽传爆药装药,设计了一种3点同步刚性起爆网络,理论分析和测定了起爆网络在不同装药密度下的同步误差,对比试验了沟槽压装装药技术,对传爆药进行了表征,测试了起爆网络相关的爆轰性能,优化了起爆网络装药结构。结果表明,提高起爆网络装药密度能够增加起爆可靠性和降低同步误差,装药密度从 $1.17\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.47\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,起爆网络的同步误差从300 ns降低到150 ns。以JH-2压装药柱作为输出端装药,超细HMX/NC传爆药作为沟槽装药,采用沟槽压装装药技术,可以使同步起爆网络的爆轰波输出同步性约为100 ns。

关键词: 多点起爆网络; 起爆同步误差; 压装装药; 超细奥克托今(HMX)

中图分类号: TJ410.51; O385

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.05.003

1 引言

多点同步起爆网络是实现“单点输入、多点同步输出”的爆炸网络,主要用于战斗部的多点同步起爆,以达到调整爆轰波形来提高战斗部威力的作用。依其载体不同分为柔性和刚性两类:柔性起爆网络是以柔性爆炸元件为主的同步起爆网络,刚性起爆网络是以刚性基板为载体的沟槽型爆炸网络^[1]。当采用多点同步起爆网络来起爆成型装药战斗部,起爆网络的同步误差对毁伤元成型及侵彻能力影响非常大,研究表明要保证小炸高下侵彻体不发生弯曲变形,侵彻体成型参数保持不变,要求同步误差小于200 ns^[2]。而要使爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)在大炸高情况下发挥很好的侵彻威力,弹丸需有较好的飞行稳定性,通常要求同步偏差不大于100 ns^[3-4]。

对于柔性爆炸网络,张郑伟等^[5]提出了导爆索分束的方法,分束结构可以减少转换接头的尺寸和内部装药量,有助于提高输出的同步性。白颖伟等^[6]提出

输入端起爆点应位于多点同步起爆网络系统中心,可以减少输入引起的同步性误差。对于刚性爆炸网络,在机械加工精度一定的条件下,沟槽装药是影响同步性重要因素,为此研究人员提出了不同的装药方法,如Gibbons等^[7]提出采用爆炸油墨-丝网漏印技术制作爆炸网络,这种技术具有装药均匀一致和容易检测等优点,但此技术装药密度低,作用可靠性差。An等^[8]采用微注射工艺将3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)/聚叠氮基缩水甘油醚(GAP)基传爆药装填于起爆网络沟槽中,对传爆药的传爆性能和安全性进行了测试,但没有对起爆网络同步性及起爆可靠性进行测定。温玉全等^[9]采用精密压装法将传爆药压入沟槽中,以提高同步性,但此方法所用炸药须是粗细适中、流散性好的球形化造型粉,且装药感度高,药体边缘相对粗糙。段卓平等^[10]采用橡胶炸药刻条填充法将RDX基的橡胶炸药压在沟槽中,此方法对药条尺寸要求极为严格,所切割的药条须与沟槽通道大小相当,药量和尺寸不易控制,药条填充后与沟槽壁面易存在间隙。沈慧铭等^[11]采用手工挤抹法将传爆药压入沟槽中,操作简单,但装药密度低,分布的一致性差、随机性大,试验测得最大偏差为210 ns,同步误差较大。

本研究在前期对多点起爆网络的研究基础上^[4,11],设计一种实现中心一点起爆输入,三点同步输出的3点刚性起爆网络,以超细奥克托今(HMX)为主

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202103),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16-0481),江苏高校“青蓝工程”资助

作者简介: 李瑞(1987-),男,博士研究生,主要从事爆炸力学方向研究。e-mail: lirui_89@126.com

通信联系人: 李伟兵(1982-),男,博导,副研究员,主要从事爆炸力学、高效毁伤技术研究。e-mail: njstlwb@163.com

体炸药,硝化棉(NC)为粘结剂作为传爆药。对起爆网络同步误差进行理论分析和试验测定,对起爆网络爆轰性能进行测试,最后对起爆网络装药结构进行优化。

2 试验部分

2.1 材料与试剂

主炸药选取超细 HMX,南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心提供。粘结剂选取 NC,南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心提供,NC 属于含能高聚物,在传爆药中加入 NC 作为粘结剂,既可以改善混合炸药的氧平衡,还可以减少因粘结剂所占主体炸药造成的能量损失。溶剂选取乙酸乙酯($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$),分析纯,国药集团化学试剂有限公司,乙酸乙酯对 NC 的溶解性好,易挥发,药体干燥快,两者是比较理想的搭配。

2.2 药浆制备

传爆药(HMX/NC=95:5)的混合制备在容量约 50 mL 的烧杯中完成,混合流程为:(1)将 NC 溶解于乙酸乙酯溶剂;(2)将超细 HMX 炸药分批倒入烧杯,同时充分搅拌,使各组分相互混合均匀,保证装药密度的一致性,至药剂为较稠的粘流状态。

2.3 装药方法

首先将制备的药浆均匀涂入起爆网络基板的沟槽中,然后置于 D2F-6050 型真空水浴烘箱(上海精宏实验设备公司),温度设定在 $60\text{ }^\circ\text{C}$,真空度为 0.07 MPa ,固化烘干约 10 h。取出常温冷却,用刻刀修平药体。为了增大沟槽装药密度,提高爆速,使用特制的压药模具对沟槽装药进行压药。

2.4 传爆药表征与同步性测试方法

激光粒度分析表征:用 Malvern Master Sizer 激光粒度分析仪对超细 HMX 粒径分布情况进行表征,操作温度 $5\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 。

扫描电镜(SEM)表征:用 Hitachi S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜观察配方中的炸药组分的粒度和形貌情况,测试条件:加速电压 15 kV ,发射电流 $10\text{ }\mu\text{A}$ 。

X 射线衍射仪(XRD)表征:用德国布鲁克公司的 D8 Advance 型射线粉末衍射系统对超细 HMX 和传爆药的组分进行晶型对比表征。测试条件:Cu 靶 K_α 辐射,射线管电压 40 kV ,电流 30 mA ,测试范围 2θ 为 $10^\circ\sim 45^\circ$,扫描速度步长 0.050257° 。

起爆网络同步性:采用 PXIS-2508 多通道高速动态测试系统中的 PXI-1412 计时模块(测试精度为 2 ns)进行测试。

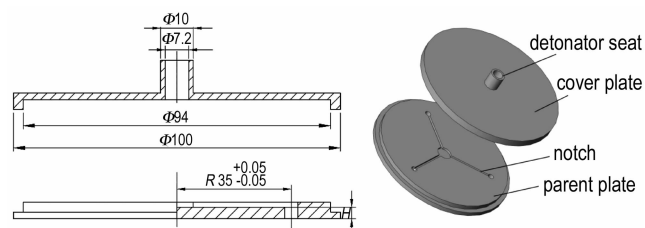
2.5 感度性能测试

撞击感度测试按照 GJB772A-1997 炸药试验方法 601.3 12 型工具法^[12]进行,测试条件:落锤质量 $(5.0\pm 0.005)\text{ kg}$,药量 $(35\pm 1)\text{ mg}$,温度 $10\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 $\leq 80\%$ 。冲击波感度采用 GJB2178.1A-2005 中的小隔板实验^[13]测试,隔板厚度的升降步长为 0.2 mm 。

3 多点起爆网络设计

3.1 多点起爆网络结构

起爆网络采用典型的板式结构,主要由基板、端盖和传爆药三部分组成,端盖和基板材料均为 $45^\#$ 钢,如图 1 所示。在基板上刻有三个长度相同,槽宽和槽深均为 1.5 mm 的方形槽,在输出端由底部打穿。



a. structure of the initiation circuit (mm) b. the 3D diagram

图 1 典型三点刚性起爆网络示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of typical rigid three-piont initiation circuit

3.2 基板厚度(H)

起爆网络在形成三点起爆时必须保证沟槽装药被起爆后形成的冲击波在基板中衰减不能引爆被发装药。因此,要求起爆网络基板要有一定的厚度,具备一定的隔爆能力。利用 AUTODYN-2D 有限元分析软件模拟不同基板厚度 H ($1, 2, 3, 4, 5\text{ mm}$) 下冲击波压力的衰减情况。仿真中采用流固耦合方法计算,将起爆网络整体结构简化为二维模型,从而将炸药单元细分,以获得较精细的数值计算结果,如图 2 所示。传爆药为 HMX/NC (这里选用 LX-10 炸药参数),基板为 $45^\#$ 钢,被发装药为 8701 炸药,计算中使用材料模型和参数见表 1。将结构简化为二维模型放大了起爆网络基板中的冲击波压力,所以对起爆网络基板厚度设计而言是偏安全的。

为了判断被发装药是否被引爆,设置了多个历史变量测点,将测点的压力值与被发装药的临界起爆压力比较,来判断被发装药是否被引爆。图 3 为基板厚度 $H=4\text{ mm}$ 时各测量点的压力历程曲线,可以看出,传爆药中心起爆后,爆轰波径向传播到被发装药所用

时间为 $4.10 \mu\text{s}$, 同时轴向应力波传播驱动基板向被发装药运动, 在被发装药中心位置 (gauge1) 首先与装药碰撞, 产生峰值约为 1.34 GPa 的脉冲, 随着爆轰波的传播, gauge 2~7 相继产生压力峰值, 最大压力峰值不超过 2.8 GPa , 小于 8701 炸药的临界起爆压力 $p_c = 2.9 \text{ GPa}$ ^[14], 被发装药不会被起爆。在 $4.10 \mu\text{s}$ 时刻爆轰波到达爆炸网络的输出端, 此时位于输出端处的测点 8, 压力增长至 20.92 GPa , 被发装药形成环起爆。之后, 爆轰波在被发装药向内径向、向前轴向传播, 可看出在 $5.5 \mu\text{s}$ 以后, 测点 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 先后形成的压力曲线峰值大于 38 GPa 的脉冲, 说明被发装药此时被起爆, 爆轰波在被发装药中向轴汇聚, 也说明 4 mm 厚的基板能够有效隔爆。

表 1 材料参数及材料模型

Table 1 Material parameters and material models

materials	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	strength model	equation of state
45# steel	7.83	Johnson Cook	Linear
air	0.001225	None	Ideal Gas
LX-10	1.865	Hydro	JWL
8701 explosive	1.667	Von Mises	Lee-Tarver

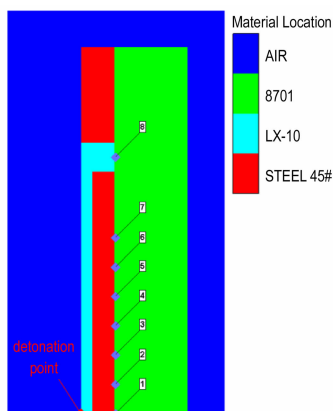


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

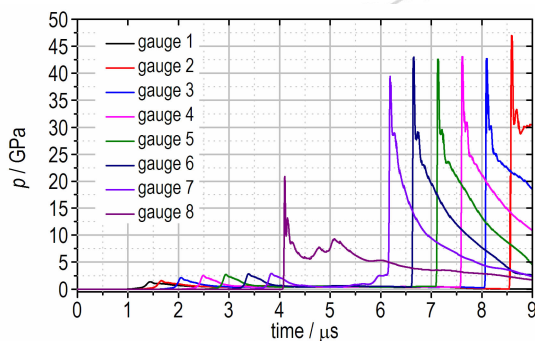


图 3 测点的压力历程曲线

Fig. 3 Pressure-time curves of the measured points

表 2 为不同基板厚度下各测点的最大压力值, 可以发现当基板厚度小于 4 mm 时, 测点 1~7 的最大压力为 $3.32 \sim 5.35 \text{ GPa}$, 均高于 8701 炸药的临界起爆压力 p_c 。当基板厚度增加到 4 mm 时, 测点压力值为 2.76 GPa , 小于临界起爆压力 p_c , 传爆药不会在中心点处引爆被发主装药, 所以设计起爆网络中 45# 钢基板的厚度至少取 4 mm , 为了保证起爆网络隔爆可靠, 试验中基板厚度设计为 5 mm 。

表 2 不同基板厚度下测量点的压力值

Table 2 Pressure values of the measured points under different thickness of substrate

H/mm	pressure/GPa	
	gauges 1-7	gauge 8
1	5.35	19.37
2	4.21	19.40
3	3.32	20.43
4	2.76	20.92
5	2.38	21.34

为了验证起爆网络基板的隔爆能力, 在钢验证板上中心处放置一个 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 8701 压装药柱 (密度为 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 然后在药柱上放置起爆网络, 使起爆网络中心位于药柱上端面, 插入雷管起爆, 如图 4 所示。从图 4b 中爆炸网络起爆后验证板上留下的痕迹可以看出, 在起爆网络基板中衰减的冲击波没有起爆 8701 压装药柱, 说明厚度为 5 mm 的 45# 钢板能够有效隔爆。



a. pre-detonation

b. post-detonation

图 4 基板隔爆验证

Fig. 4 Parent plate explosion resistance verification

起爆网络爆轰波传爆所用时间分为两部分: 第一部分为从输入端到输出端爆轰波传播所需要的时间, 第二部分为爆轰波通过拐角由于爆速差导致的延迟时间, 对于图 1 中的起爆网络爆轰波传爆时间 t :

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

式中, L 为输入端到输出端的长度, mm; D 为传爆药爆速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; $t_{\pi/2}$ 为拐角效应造成的延迟时间, μs 。因此, 起爆网络的同步误差主要由长度 L 、爆速 D 、 $t_{\pi/2}$ 的偏差 ΔL 、 ΔD 、 $\Delta t_{\pi/2}$ 所决定的, 可以用误差分析公式^[15] 进行计算:

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

对式(1)求偏导有:

$$\frac{\partial t}{\partial L} = \frac{1}{D}; \quad \frac{\partial t}{\partial D} = -\frac{L}{D^2}; \quad \frac{\partial t}{\partial t_{\pi/2}} = 1 \quad (3)$$

对于图 1 的三点刚性同步起爆网络, 输入端到输出端的长度 $L = 40 \text{ mm}$ (起爆半径 $R = 35 \text{ mm}$, 基板厚度 $H = 5 \text{ mm}$)。基板加工精度为 0.05 mm , 即 $\Delta L = 0.05 \text{ mm}$ 。沟槽装药为 HMX 基传爆药, 假设其爆速偏差 $\Delta D = 0.052 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 拐角效应偏差 $\Delta t_{\pi/2} = 0.01 \mu\text{s}$ ^[16]。将 $L = 40 \text{ mm}$ 、 $\Delta L = 0.05 \text{ mm}$ 、 $\Delta D = 0.052 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、 $\Delta t_{\pi/2} = 0.01 \mu\text{s}$ 和(3)式代入(2)式有:

$$\Delta t = \pm \sqrt{\frac{2.5 \times 10^{-3}}{D^2} + \frac{4.3264}{D^4} + 1.0 \times 10^{-4}} \quad (4)$$

对于配比一定的传爆药, 爆速 D 与实际装药密度 ρ_0 之间的关系^[17]:

$$D = 0.001 \times \left(\frac{D_{\max}}{4} + \frac{3}{4} \frac{D_{\max}}{\rho_{\max}} \rho_0 \right) = \frac{D_{\max}}{4000} \left(1 - \frac{3\rho_0}{\rho_{\max}} \right) \quad (5)$$

式中, D_{\max} 为理论爆速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ_{\max} 为混合炸药的理论密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。理论爆速 D_{\max} 和理论密度 ρ_{\max} 可用 Urizar 公式进行计算^[17]:

$$\begin{cases} D_{\max} = \sum D_i \omega_{Vi} \\ \omega_{Vi} = \rho_{\max} \frac{\omega_{mi}}{\rho_{i,\max}} \\ \rho_{\max} = \frac{\sum \omega_{mi}}{\sum (\omega_{mi} / \rho_{i,\max})} \end{cases} \quad (6)$$

式中, D_i 为 i 组分的理论爆速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ω_{Vi} 为 i 组分的体积分数, %; ω_{mi} 为 i 组分的质量分数, %; $\rho_{i,\max}$ 为传爆药中 i 组分的理论密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 联立式(4)~(6) 计算出 HMX/NC 传爆药在不同装药密度 ρ_0 下起爆网络的同步误差, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 随着 HMX/NC 传爆药装药密度 ρ_0 的增大, 起爆网络同步误差减小。试验中为了增大沟槽装药密度, 使用特制的压药模具对沟槽装药进行压制, 如图 6 所示。

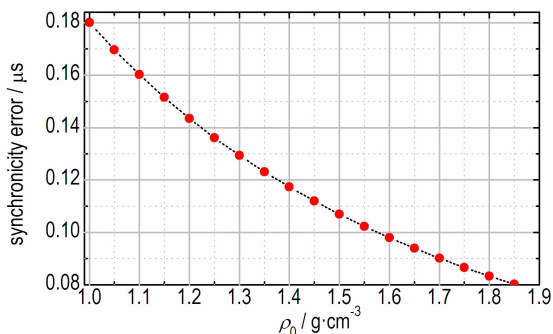


图 5 起爆网络同步性误差与装药密度的关系
Fig. 5 Initiation circuit synchronicity error vs charge density

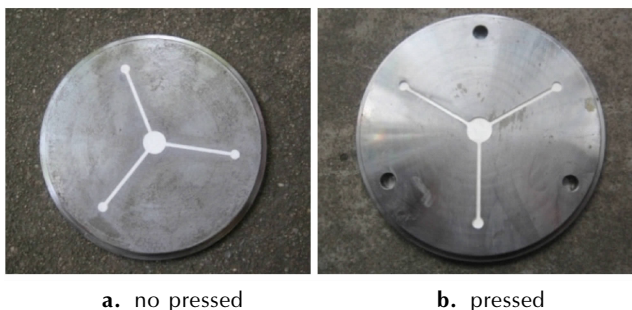


图 6 三点起爆网络成品图
Fig. 6 Three-point initiation circuit finished product maps

4 性能测试及结果分析

4.1 传爆药相关性能表征

超细 HMX 的粒径分布如图 7 所示。由图 7 可以看出, 超细 HMX 的粒径 d_{50} 为 $2 \mu\text{m}$ 左右, 粒度分布较窄, 介于 $0.3 \sim 90 \mu\text{m}$ 之间, 说明 HMX 为超细炸药。HMX/NC 传爆药形貌如图 8 所示, 可以明显看出 NC 作为粘剂将炸药颗粒粘结成一体形成高聚物粘结炸药。

超细 HMX 和 HMX/NC 传爆药的 XRD 如图 9 所示, 可以看出传爆药的衍射角与超细 HMX 的衍射角基本一致, 表明在传爆药制备过程中 HMX 保持晶型

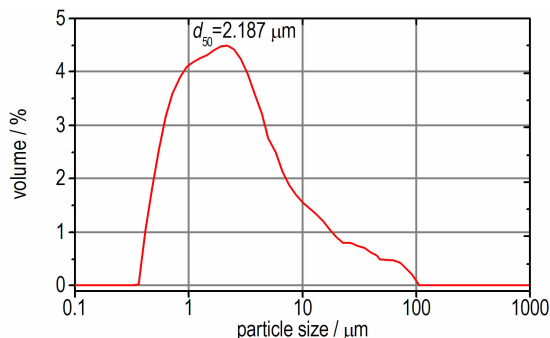


图 7 超细 HMX 的粒度分布曲线
Fig. 7 Particle size distribution of ultrafine HMX

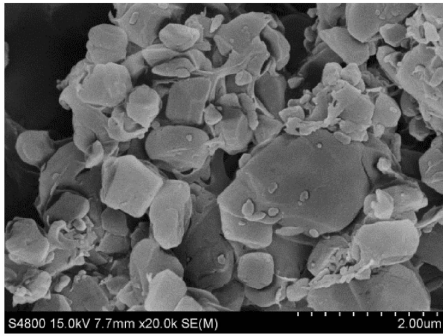


图 8 HMX/NC 传爆药的 SEM 图

Fig. 8 SEM image of HMX/NC booster

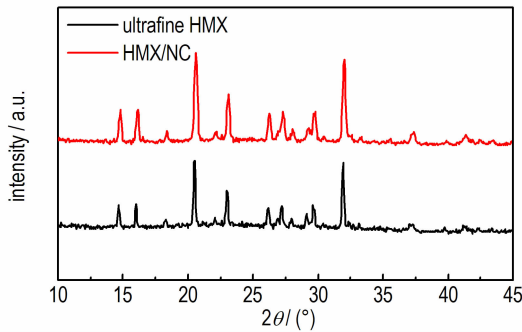


图 9 超细 HMX 和 HMX/NC 的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of ultrafine HMX and HMX/NC

不变。这是因为在所选定的 NC 粘结剂体系中,超细 HMX 以固体颗粒形式存在于传爆药中,不存在溶解后重结晶的问题。常温常压下,HMX/NC 传爆药中的粘

表 4 三点起爆网络装药密度

Table 4 Charge density of three-point initiation circuit

n	m_0/g	m_1/g	m/g	V_1/cm^3	H/cm	V_2/cm^3	$\rho_1/g \cdot cm^{-3}$	$\bar{\rho}_1/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_2/g \cdot cm^{-3}$	$\bar{\rho}_2/g \cdot cm^{-3}$
1	337.027	337.659	0.632		0.04	0.436	1.19		1.45	
2	338.077	338.701	0.624	0.533	0.05	0.412	1.17	1.17	1.51	1.47
3	337.980	338.606	0.626		0.05	0.412	1.17		1.52	
4	337.658	338.275	0.617		0.04	0.436	1.16		1.42	

Note: m_0 and m_1 represent the mass of patent plate before and after charging. m represents the mass of charger. V_1 and V_2 , ρ_1 and ρ_2 , $\bar{\rho}_1$ and $\bar{\rho}_2$ represent the volume, the density, and the average density of charger before and after pressing, respectively. H represents the charge drop distance after pressing.

4.4 起爆能力测试

采用钢凹法^[18]对起爆网络的起爆能力进行测试。首先在钢板上放置三个 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 8701 压装药柱(密度为 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),然后在药柱上端放置起爆网络,放置过程中使起爆网络的 3 点输出端分别对准三个药柱中心。从中心点处引爆沟槽中的传爆药,爆轰波通过沟槽分别传播至三个药柱上端面,起爆药柱。试验中通过钢板上留下的炸痕来判断起爆网络

结剂和溶剂分子的极性作用也不足以使 HMX 发生晶型改变。

4.2 撞击感度与冲击波感度

超细 HMX 和固化后的 HMX/NC 传爆药的撞击感度与冲击波感度见表 3。可以看出,与超细 HMX 相比,HMX/NC 传爆药由于粘结剂的粘合作用可以使撞击感度和冲击波感度显著降低,使所研究的配方作为起爆网络装药具备很好的安全性能。

表 3 超细 HMX 及 HMX/NC 的撞击感度与冲击波感度

Table 3 Impact sensitivity and shock wave sensitivity of ultrafine HMX and HMX/NC

samples	impact sensitivity		shock wave sensitivity	
	H_{50}/cm	S	card gap thickness/mm	S
ultrafine HMX	26.3	0.10	20.7	0.12
HMX/NC	40.3	0.11	9.2	0.13

Note: H_{50} is the characteristic drop height. S is the standard deviation.

4.3 装药密度

通过测量装药前后网络基板的质量差得到沟槽装药质量 m ,计算出沟槽总体积 V_1 即压药前沟槽装药体积,通过测量压药前后沟槽装药下降的深度 H 计算得到压药后沟槽装药体积 V_2 ,由密度计算公式计算出压药前后沟槽装药密度,试验中共测了 4 发,如表 4 所示。从表中可以看出,未压药之前起爆网络装药密度为 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,压药以后密度增大到 $1.47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

装药的起爆能力。试验中选择 5 组未压和 5 组压药后的起爆网络进行测试,结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出 5 组未压药的起爆网络有一组未能起爆下端药柱,而 5 组经过压药后的起爆网络能够全部起爆下端药柱,这可能是由于未压药的起爆网络装药中存在孔隙,密度低,使得起爆能力下降,进而不能起爆压装药柱。经过压药后的起爆网络,沟槽及输出端的传爆药孔隙减小,密度大,使得传爆药的传爆可靠性及起爆能

力增大。因此对起爆网络装药进行压药有利于提高起爆网络的起爆可靠性。图 10 为三点起爆网络未能和能够起爆压装药柱后钢板上留下的痕迹。

表 5 三点起爆网络起爆能力测试结果

Table 5 Measurement results of three-point initiation circuit detonating capacity

n	no pressed					pressed				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
test result	O	O	O	×	O	O	O	O	O	O

Note: O and × represent detonation and detonation failure respectively.



a. detonation failure b. detonation

图 10 三点起爆网络起爆 8701 药柱后钢板留下的痕迹

Fig. 10 Traces on the steel plate after circuit initiation 8701 cylinder explosive

4.5 同步误差测试

使用 PXIS-2508 多通道高速动态测试系统中的 PXI-1412 计时模块对起爆网络的同步性进行测量。测试采用断-通法,使用 4 根探针,分别设为 0[#]、1[#]、2[#]、3[#]探针,如图 11 所示。

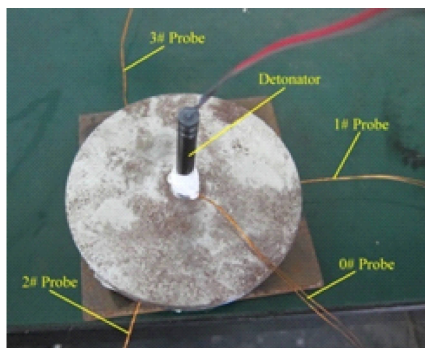


图 11 三点起爆网络同步性试验

Fig. 11 Experiments on synchronicity of the three-point initiation circuit

测试时将 0[#]探针接入起爆网络输入端,雷管起爆后发生电离导通 0[#]探针,产生触发信号,开始计时,当爆轰波沿沟槽装药传至输出端,1[#]、2[#]、3[#]探针导通,分

别产生触发信号,计时停止。通过比较计时的结束值即可考察起爆网络的同步性,取用时最少的一路作为标准值,其他各路与其作差比较得到表 6 中的相对时间,即起爆网络的同步误差。从表 6 中可以看出,未压药的起爆网络同步误差在 300 ns 以上,而对基板的沟槽传爆药进行压药以后,同步精度约为 150 ns。

表 6 三点起爆网络的同步性误差

Table 6 Synchronicity error of the three-point initiation circuit

method	n	delay time/ns			relative time/ns		
		t ₁	t ₂	t ₃	Δt ₁	Δt ₂	Δt ₃
no pressed	1	7576	7216	7336	360	0	120
	2	7352	7048	7200	304	0	152
	3	7224	7072	7408	152	0	336
pressed	4	6436	6284	6396	152	0	112
	5	6212	6148	6300	64	0	152

5 起爆网络优化

5.1 起爆网络优化设计

对基板沟槽装药进行压药以后,起爆网络的同步精度较未压药有所提高,但同步误差约为 150 ns 仍然较大。这可能是由于基板较厚,起爆网络输出端装药可能出现密度不均匀,导致起爆网络同步性较差。为此对起爆网络装药结构进行如图 12 的改进设计。要保证起爆网络输出端装药密度的一致性,同时保证隔爆的可靠性,保持基板厚度 5 mm 不变,采用预先压制的三个密度相同($\rho_0 = 1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),尺寸均为 $\Phi 6.5 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 的压装 JH-2 药柱作为输出端装药。鉴于传爆药与输出端装药的连接方式,在输出装药上端预留高 1.0 mm 的空间由 HMX/NC 传爆药填充,确保沟槽装药和输出端装药连接紧密,提高爆轰波传播的可靠性。最后使用特制的压药模具对沟槽中的 HMX/NC 传爆药进行压制以增大装药密度。

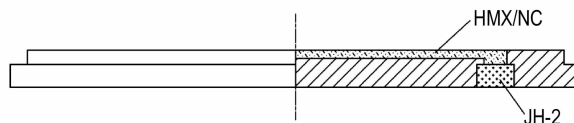


图 12 三点起爆网络优化结构

Fig. 12 Optimization structure of the three-point initiation circuit

5.2 同步性测试

同样采用 PXIS-2508 多通道高速动态测试系统对优化后的起爆网络同步性进行测量。共 2 发试验,如

表7所示。可以看出优化后的起爆网络的同步误差最大为104 ns, 小于优化前起爆网络同步误差150 ns。因此, 采用预先压装的药柱作为输出端装药, 以传爆药作为沟槽装药, 再使用压药模具对起爆网络沟槽装药进行压药能够消除传爆药和输出端药柱之间的界面空气间隙, 增加了传爆可靠性, 同时也增大传爆药装药密度, 大大提高了起爆网络的同步性。

表7 优化的三点起爆网络的同步性误差

Table 7 Synchronicity error of the optimized three-point initiation circuit

n	delay time/ns			relative time/ns		
	t_1	t_2	t_3	Δt_1	Δt_2	Δt_3
1	6246	6144	6194	102	0	50
2	6208	6132	6226	86	0	104

6 结论

(1) 设计了“一入三出”的三点刚性同步起爆网络。综合考虑了沟槽装药密度、爆速、安全性以及基板隔爆性能, 确定以超细 HMX/NC=95:5 传爆药作为沟槽装药, 确定起爆网络基板厚度为5.0 mm。

(2) 对起爆网络同步性进行理论分析, 认为提高起爆网络沟槽装药密度是提高同步性的有效途径, 试验结果也表明装药密度从 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 后, 起爆网络的同步性从300 ns降低到150 ns。

(3) 采用沟槽压装装药技术, 起爆网络装药密度增大, 均匀性提高, 起爆网络的同步误差降低, 起爆可靠性增大。

(4) 以 JH-2 压装药柱作为输出端装药, 以超细 HMX/NC 传爆药作为沟槽装药, 采用沟槽压装装药技术, 可以使起爆网络的爆轰波输出同步性约为100 ns。

参考文献:

[1] LI Yuan, LI Yan-hua, WEN Yu-quan. A method for estimating the synchronization of a mild multipoint synchronous initiation circuit [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(2):179-187.

[2] LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37: 414-424.

[3] 罗健, 蒋建伟, 朱宝祥. 多点起爆对 EFP 形成的影响研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2004, 24(2): 27-29.

LUO Jian, JIANG Jian-wei, ZHU Bao-xiang. The effect of multipoint initiation on the explosively formed penetrator formation [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2004, 24(2):27-29.

[4] 李瑞, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 三点起爆同步误差对尾翼 EFP 成型性能的影响 [J]. *含能材料*, 2016, 24(11): 1041-1047.

LI Rui, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. The effect of three-point initiation synchronization error on formation performance of EFP with Fins [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(11): 1041-1047.

[5] 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.

ZHANG Zheng-wei, LI Xiao-gang, WEN Yu-quan, et al. Design and tests of a flexible liner synchronous explosive circuit [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3):401-405.

[6] 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.

BAI Ying-wei, ZHANG Rui, LI Zhe, et al. Design on mild multipoint synchronous explosive circuit [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 225-228.

[7] Gibbons G, Finksburg J, Denis A M, et al. Manufacture of explosive circuits using silk screening techniques and explosive inks; US, US5046425 [P]. 1991.

[8] AN Chong-wei, WEN Xiao-mu, WANG Jing-yu, et al. GAP/DNTF based PBX explosives: a novel formula used in small sized explosive circuits [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(2): 397-410.

[9] 温玉全, 焦清介. 同步起爆网络精密压装装药技术研究 [J]. *兵工学报*, 2006, 27(3): 410-413.

WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie. A study on the precision press loading technique of a synchronous multi-point explosive circuit [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(3): 410-413.

[10] 段卓平, 温丽晶, 申健, 等. 聚能装药用多点环形起爆器的设计 [J]. *兵工学报*, 2011, 32(1): 101-105.

DUAN Zhuo-ping, WEN Li-jing, SHEN Jian, et al. Design of multipoint ring initiator for shaped charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(1): 101-105.

[11] 沈慧铭, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 多点起爆网络结构参数设计及其同步误差分析 [J]. *含能材料*, 2016, 24(3): 238-243.

SHEN Hui-ming, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Design and synchronization analysis of structural parameter of a multipoint explosive circuit [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(3): 238-243.

[12] GJB 772A-1997: 炸药试验方法 [S]. 国防科学技术工业委员会, 1997.

[13] GJB 2178.1A-2005: 传爆药安全性试验方法 [S]. 国防科学技术工业委员会, 2005.

[14] 孙元虎, 黄风雷. 冲击条件下三种典型炸药临界起爆条件的实验研究 [J]. *含能材料*, 2004, 12(增刊): 359-361.

SUN Yuan-hu, HUANG Feng-lei. Experimental study on critical initiating of three typical explosive in shock condition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12 (Suppl): 359-361.

[15] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 第六版. 北京: 机械工业出版社, 2010.

FEI Ye-tai. Error theory and data processing [M]. 6th edition. Beijing: China Machine Press, 2010.

[16] HU Li-shuang, HU Shuang-qi, CAO Xiong. Application of the multipoint of synchronous circuit of the annular booster pellet [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2013, 12(6): 475-485.

[17] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL explosives handbook proper-

ties of chemical explosives and explosive stimulants[M]. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.

[18] 张立. 爆破器材性能与爆炸效应测试[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.

ZHANG Li. Blasting equipment performance and explosion effect test[M]. 1st edition. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006.

Experimental and Performance Test of a Multi-point Initiation Synchronicity Charge

LI Rui¹, LI Wei-bing¹, GUO Xiao-de², HUANG Yin-sheng³, LIANG Li², ZHANG Dong-dong³, LI Wen-bin¹, WANG Xiao-ming¹

(1. Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. National Special Superfine Powder Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

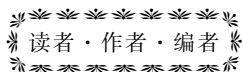
Abstract: To study the effect of multi-point initiation circuit charge on detonation wave output synchronicity and initiation capability, a rigid three-point synchronous initiation circuit was designed using ultrafine Octogen (HMX) as main explosive, nitrocellulose (NC) as binder, 95/5-HMX/NC as groove booster charge. The synchronicity error of initiation circuit at different charge density was theoretically analyzed and experimentally measured. The groove press loading charge technique was compared and tested. The booster explosive was characterized, the detonation performances related to initiation circuit were tested and the initiation circuit charge structure was optimized. Results show that increasing circuit charge density can increase the initiation reliability and reduce the synchronicity error. The synchronicity error of initiation circuit decreases from 300 ns to 150 ns when the charge density increases from $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $1.47 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Taking pressed JH-2 cylinder charge as output charge and ultrafine HMX/NC as groove booster, use of groove press loading charge technique can make the detonation wave output synchronicity of synchronous initiation circuit as about 100 ns.

Key words: multi-point initiation circuit; initiation synchronicity error; press loading charge; ultrafine Octogen(HMX)

CLC number: TJ410.51; O385

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.05.003



《含能材料》“损伤与点火”专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。