

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.05.005

多点非电起爆网络设计与可靠性研究*

单聪明^{①②} 朱顺官^① 张琳^① 李燕^① 牟景艳^① 徐小红^② 吴建平^②

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②中国人民解放军73862部队(江西上饶,334111)

[摘 要] 为了拦截来袭破甲弹,保护重点目标,设计了一套多点非电起爆网络,起爆线型爆炸成型弹丸(LEFP)装药,利用药型罩形成LEFP来拦截破甲弹。设计的多点非电起爆网络由中心起爆元、2级起爆元、高强度导爆管、激发爆管和起爆雷管等组成。通过设计,明确了中心起爆元与2级起爆元的结构、激发爆管的结构及工艺流程;通过试验和结果分析,可得多点非电起爆网络的可靠度为0.993 3($\gamma=0.9$);对4组弹径82 mm破甲弹的动态拦截试验表明,设计的多点非电起爆网络能够满足重点目标的主动防御。

[关键词] 非电起爆网络;破甲弹;设计;可靠性

[分类号] TJ45

Design and Reliability of Multipoint Non-electric Detonation Network

SHAN Congming^{①②}, ZHU Shunguan^①, ZHANG Lin^①, LI Yan^①, MU Jingyan^①, XU Xiaohong^②, WU Jianping^②

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

② Unit 73862, PLA (Jiangxi Shangrao, 334111)

[ABSTRACT] The important targets can be protected by intercepting the incoming high explosive anti-tank cartridge. A set of multipoint non-electric detonation network was designed to detonate LEFP explosive, and to form LEFP projectile to intercept the high explosive anti-tank cartridge. The designed multipoint non-electric detonation network consists of central detonation element, second stage detonation element, high strength nonel tube, percussion explosive tube and initiation detonator. Through the design of multipoint non-electric detonation network, the structure of the central detonation element and the second stage detonation element, the structure of the percussion explosive tube and the assembly process flow were determined. The reliability of the multipoint non-electric detonating network is measured as 0.993 3 when $\gamma=0.9$. Through the four dynamic intercept tests of the 82 mm high explosive anti-tank cartridge, the results show that the designed multipoint non-electric detonation network can actively defend the high explosive anti-tank cartridge and protect the important target.

[KEYWORDS] non-electric detonation network; high explosive anti-tank cartridge; design; reliability

引言

破甲弹是战争中最常见的一种弹药,它具有生产较为简单、成本比较低廉、使用方便和毁伤效果好等特点;因此,战争时广泛用于毁伤坦克、装甲车和一些重要目标。其原理是破甲弹碰到目标时,引信起爆炸药,爆炸的能量使药型罩融化凝聚成一股高温、高速的金属射流,射流穿透装甲或者目标后毁伤人员和设备。现阶段,国内外坦克和装甲车防御破

甲弹的性能越来越好^[1-3],而重点目标防御破甲弹没有特别有效的方法。因此,研究设计一套有效拦截破甲弹的装置具有十分重要的意义。本研究中,设计了一套多点非电起爆网络^[4-5],并对其可靠性进行分析,它具有低成本、布防快捷和可靠度高等特点,用其起爆线型爆炸成型弹丸(linear explosive formed projectile, LEFP)装药,利用药型罩形成LEFP,拦截来袭破甲弹。该起爆网络展开后呈辐射状,由一个中心点起爆后,输出12路冲击波,每路冲击波并列起爆3发雷管,继而引爆3块LEFP装药,可以实现

* 收稿日期:2018-01-03
作者简介:单聪明(1988-),男,硕士,主要从事火工品的性能研究。E-mail:13097363230@163.com

对 36 块 LEFP 装药的可靠起爆,组成一个由外缘向中心的爆炸成型弹丸阵,对来袭破甲弹进行拦截,从而保护重点目标。

1 设计部分

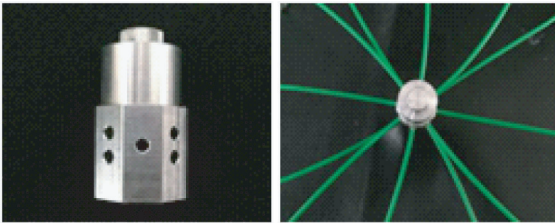
起爆网络也叫爆炸网络,具有单点输入、多点输出的功能。起爆网络的设计是一个关键环节,关系到拦截装置能否成功拦截破甲弹。设计的多点非电起爆网络要把能量传递到各个起爆雷管,用于起爆 LEFP 装药。多点非电起爆网络由高强度导爆管和起爆元件等组成,它布防快捷简便,不受周围电场影响,安全可靠^[6]。为了能达到单点输入、多点输出的功能,多点非电起爆网络设计时采用“1 通 12,再通 3”的结构,实现对 36 块 LEFP 装药的可靠起爆。

1.1 起爆元的设计

起爆元在设计时要充分考虑以后的应用环境,由于多点非电起爆网络可能要在海岛或者沿海地区使用,因此,在设计起爆元时选用 6061 铝合金,它具有抗腐蚀性强、抗氧化性强和加工性能好等特点。多点非电起爆网络需要设计中心起爆元和 2 级起爆元两种。

1.1.1 中心起爆元的设计

设计的中心起爆元要达到冲击波“1 通 12”的目的,即中心起爆元的激发爆管被毫米波近炸探测引信起爆后,冲击波传入 12 路高强度导爆管。中心起爆元如图 1(a)所示,中心起爆元与高强度导爆管的连接方式如图 1(b)所示。



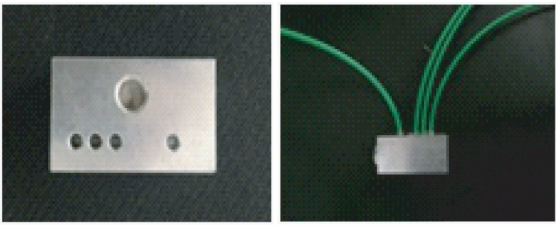
(a) 中心起爆元 (b) 连接方式
图 1 中心起爆元及其与导爆管的连接方式

Fig.1 Central detonation element and its linking method with nonel tube

1.1.2 2 级起爆元的设计

2 级起爆元要达到“再通 3”的目的,即由中心起爆元传出的 12 路冲击波经过高强度导爆管传入 12 个 2 级起爆元,每个 2 级起爆元中的激发爆管起爆后,冲击波再传入 3 路高强度导爆管,引爆高强度导爆管末端的起爆雷管,起爆雷管再引爆 LEFP 装

药。2 级起爆元如图 2(a)所示,2 级起爆元与高强度导爆管的连接方式如图 2(b)所示。其中,2 级起爆元上的大孔是使多点非电起爆网络便于固定在装有 LEFP 装药的支架上。



(a) 2 级起爆元 (b) 连接方式
图 2 2 级起爆元及其与导爆管的连接方式

Fig.2 Second stage detonation element and its linking method with nonel tube

1.2 激发爆管的设计

设计激发爆管时选择的是乙二胺高氯酸盐·三乙烯二胺高氯酸盐共晶起爆炸药(改性 SY 药)和锆系耐水点火药。因为改性 SY 药火焰感度较低,所以选择锆系耐水点火药,提高点火可靠性。另外,需要考虑改性 SY 药与锆系耐水点火药的相容性以及激发爆管的生产工艺等。

1.2.1 改性 SY 药和锆系耐水点火药的制备

根据 SY 药的制备方法^[7-8]制备 SY 药。然后对 SY 药进行改性^[9],配方为: $w(\text{SY 药}):w(\text{铝粉}):w(\text{松香虫胶})=100:3:16$,首先用松虫胶把 SY 药包覆,然后再加入铝粉,混合均匀,晾干之后进行烘干。对 SY 药进行包覆改性,可以克服 SY 药微量吸潮的缺点。

锆系耐水点火药具有很好的耐水能力,火焰感度高,燃烧输出猛烈,用来点燃改性 SY 装药。根据文献^[10]制备锆系耐水点火药。

1.2.2 改性 SY 药与锆系耐水点火药的相容性

改性 SY 药和锆系耐水点火药的相容性直接影响到激发爆管和起爆雷管的安全性、可靠性及使用寿命。已经证实,改性 SY 药和锆系耐水点火药分别与激发爆管管壳材料是相容的^[11];因此,主要考察改性 SY 药和锆系耐水点火药的相容性。相容性测试结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,改性 SY 药试样放气量极差为 $0.30 - 0.30 = 0$,锆系耐水点火药放气量极差为 $0.48 - 0.30 = 0.18 \text{ mL/g}$,均小于 0.20 mL/g 。说明数据是合理的。根据相容性评价标准^[12],SY 药和锆系耐水点火药净增加的气体量为 0.33 mL/g ,小于 0.60 mL/g ,可以看出,改性 SY 药和锆系耐水点火

表 1 相容性试验结果
Tab. 1 Compatibility test results

样品名称	试样 质量/ g	试样 放气/ mL	单位试样 放气量/ (mL · g ⁻¹)	平均值/ (mL · g ⁻¹)
改性 SY 药	0.499 7	0.149	0.30	0.30
	0.502 6	0.153	0.30	
	0.502 9	0.152	0.30	
锆系耐水 点火药	0.509 0	0.227	0.45	0.41
	0.509 7	0.239	0.48	
	0.503 4	0.149	0.30	
改性 SY 药 + 锆系耐水 点火药	1.021 5	0.378	0.37	0.33
	1.026 8	0.377	0.37	
	0.994 9	0.236	0.24	

药相容,说明两种药剂可以一起安全使用。

1.2.3 激发爆管的装配工艺设计

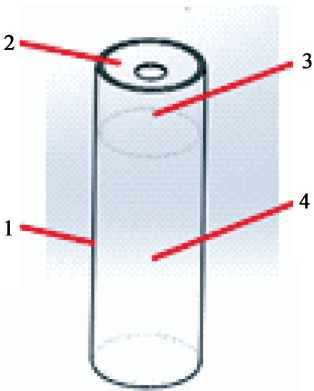
根据起爆元的结构,对激发爆管的结构和装药进行设计,通过“4 装 4 压”完成激发爆管的装配。

材料选择:选用 8# 铝质管壳,长度为 22 mm;铝质加强帽,外径为 6.23 mm,传火孔直径 2.60 mm。

压药工序:1) 铝加强帽装锆系耐水点火药 200 mg,以 20 MPa 进行压药;2)22 mm 长的铝制管壳“2 装 2 压”,改性 SY 药均为 300 mg,压力均为 30 MPa;3) 铝制管壳松装改性 SY 药 200 mg,把加强帽装进铝制管壳,以 30 MPa 进行压合;4) 退模,检查激发爆管的外观和药面高度,外观应没有损伤,药面高度应与管壳上端齐平,合格后包装备用。

操作中应注意:首先,压药过程中,应轻拿轻放,对待药剂时要严防跌落、撞击和摩擦;其次,不要漏装、错装药剂;再次,要注意检查外观是否有损伤;最后,检查激发爆管的药面高度与管壳上端是否齐平,误差不超过 0.5 mm。

激发爆管如图 3 所示。



1 - 管壳;2 - 加强帽;3 - 锆系耐水点火药;4 - 改性 SY 药。

图 3 激发爆管

Fig. 3 Percussion explosive tube

1.3 多点非电起爆网络的设计效果

装配一套多点非电起爆网络需要中心起爆元 1 个,2 级起爆元 12 个,激发爆管 13 发。

首先,用环氧树脂胶涂于激发爆管底部,把激发爆管分别放进中心起爆元和 2 级起爆元中,用圆弧冲以 30 MPa 的压力压合一下,使激发爆管与起爆元紧密结合,再用带有环氧树脂胶的螺栓密封。

其次,截取相应长度的高强度导爆管 25、30、60、90 cm 各 12 根,在高强度导爆管口部附近涂覆环氧树脂胶后,25 cm 的高强度导爆管连接中心起爆元和 2 级起爆元,30、60 cm 和 90 cm 的高强度导爆管连接 2 级起爆元和起爆雷管(其装药工艺流程同激发爆管)。

多点非电起爆网络如图 4 所示。

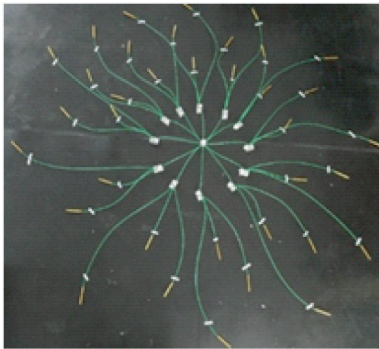


图 4 多点非电起爆网络

Fig. 4 Multipoint non-electric detonation network

把多点非电起爆网络装配在有 LEFP 装药的支架上,直径可达 250 cm,如图 5 所示,支架的底部是可调节高度的,人员可方便快捷地布防,可以在各个高度进行布防,并且每个多点非电起爆网络覆盖的面积比较大,可达 4.9 m²,因此,多点非电起爆网络可以在重点目标周围进行全方位的布防,可对破甲弹进行有效防御。

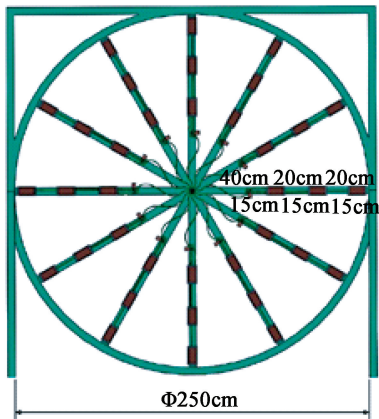


图 5 多点非电起爆网络尺寸

Fig. 5 Size of multipoint non-electric detonation network

2 试验及结果分析

2.1 试验装置与仪器

梅特勒-托利多 TGA/SDTA851 型热重分析仪,梅特勒-托利多 DSC823 型差示扫描量热仪,ZQ-BZ 标准型压力变送器,Tektronix MDO3034 混合域示波器,高速摄影仪。

2.2 起爆元的可靠性试验

多点非电起爆网络的起爆元可靠性包括改性 SY 药的可靠性和锆系耐水点火药的可靠性。由于毫米波近炸探测引信轴向起爆中心起爆元,因此中心起爆元可靠性主要由改性 SY 药的性能决定。2 级起爆元采用高强度导爆管侧向起爆激发爆管,侧向起爆的可靠性主要取决于锆系耐水点火药的点火可靠性,因此需要对其进行侧向点火可靠性分析。

2.2.1 改性 SY 药的可靠性

通过前人的经验,发现改性 SY 药可以直接被导爆管起爆,所以起爆改性 SY 药是否具有高可靠性,主要由它的药剂性能所决定,因此要考察它的各种感度,并与其他药剂进行比较,分析其药剂性能。

2.2.1.1 改性 SY 药的 TG 和 DSC 试验

样品质量为 0.599 mg,升温速率 10 K/min,由 50 ℃ 到 500 ℃,试验测得的 TG 和 DSC 的曲线如图 6 所示。

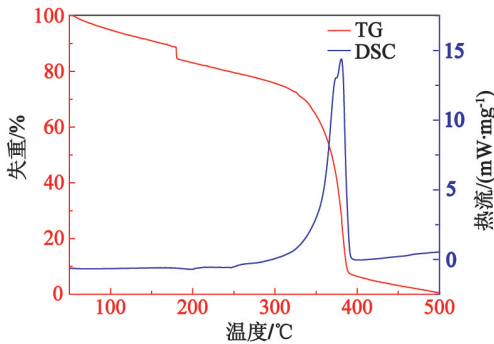


图 6 改性 SY 药的 TG 和 DSC 曲线

Fig.6 TG and DSC curves of modified SY agent

从图 6 中可以看出,在 178 ℃ 时,改性 SY 药 TG 曲线上显示损失了 4% 的质量,是因为 TG 试验时改性 SY 药样品混入少量的三乙烯二胺(沸点为 174 ℃),三乙烯二胺在 178 ℃ 时发生了汽化现象,损失了 4% 的质量。而 DSC 曲线在 178 ℃ 没有发生明显变化,是因为 DSC 试验时改性 SY 药样品没有混入杂质。总的来说,改性 SY 药在 300 ℃ 以前,热分解比较缓慢,质量损失较小;因此,改性 SY 药的耐热

性很好。从 355.10 ℃ 开始,热分解开始加速,在 380.70 ℃ 达到放热峰值,在 388.95 ℃ 放热结束,说明改性 SY 药一旦发生热分解,将会非常迅速,显示出了起爆药的特性。

2.2.1.2 改性 SY 药的机械感度

撞击感度试验条件为:参照 GJB772A—1997《炸药试验方法》的爆炸百分数法测撞击感度,锤质量 10 kg,药量 50 mg,落高 50 cm,测得爆炸百分数为 28%。把改性 SY 药与表 2 几种常用猛炸药撞击感度做对比试验,改性 SY 药由于落高 25 cm 时爆炸百分数为 0,所以落高提高到 50 cm,测得爆炸百分数为 28%,与表 2 中苦味酸相当,苦味酸落高只有 25 cm,所以改性 SY 药的撞击感度要低于苦味酸;同时还可以看出,改性 SY 药的撞击感度比太安、黑索今和特屈儿都要低。

表 2 几种常用猛炸药撞击感度

Tab.2 Impact sensitivity of several high explosives			
名称	锤质量/kg	落高/cm	爆炸百分数/%
黑索今	10	25	75 ~ 80
太安	10	25	100
苦味酸	10	25	24 ~ 32
特屈儿	10	25	50 ~ 60
改性 SY 药	10	25	0

摩擦感度试验条件为:参照 GJB5891.24—2006《摩擦感度试验》,摆角为 50°,表压 0.64 MPa,药量 20 mg,测得改性 SY 药摩擦感度爆炸百分数,与斯蒂芬酸铅作比较,如表 3 所示。

表 3 炸药摩擦感度试验结果

Tab.3 Test results of friction sensitivity of explosives			
名称	表压/MPa	摆角/(°)	爆炸百分数/%
斯蒂芬酸铅	0.64	50	6
改性 SY 药	0.64	50	94

从表 3 中可以看出,改性 SY 药在相同条件下摩擦感度比斯蒂芬酸铅明显要高,可能加入铝粉后,增大了密实药剂时的黏滞力,导致摩擦滑移瞬间形成热点而发火,有待于加以降感处理。

2.2.1.3 改性 SY 药的火焰感度

试验条件:参照 GJB5891.25—2006《火焰感度试验》,样本数 30 个,每个样本药量 20 mg,测得改性 SY 药的 50% 的发火高度为 2.90 cm,与表 4 中几种起爆药的 50% 的发火高度相比,改性 SY 药的火焰感度都要低。

2.2.1.4 改性 SY 药的静电感度

静电感度试验条件:参照 GJB5891.27—2006

表 4 几种起爆药的火焰感度

Tab.4 Flame sensitivity of several initiating explosives

药剂名称	硝酸 胍镍	叠氮 胍镍	斯蒂芬 酸铅	叠氮 化铅	改性 SY 药
H_{50}/cm	20.32	46.27	32.59	12.06	2.90

《静电火花感度试验》,放电电容 10 000 pF,放电电压 25 kV,放电间隙 0.12 mm,试样药量 20 mg,样本数 20 个,测得静电火花感度,与太安、斯蒂芬酸铅作比较,如表 5 所示。

表 5 静电火花感度

Tab.5 Electrostatic spark sensitivity of several agents

名称	药量/mg	数量	结果
改性 SY 药	20	20	16 发发火
太安	20	20	全不发火
斯蒂芬酸铅	20	20	全部发火

从表 5 中可以发现,改性 SY 药的静电火花感度比太安要大,但明显低于斯蒂芬酸铅。

综上所述,改性 SY 药的 DSC 和 TG 测试结果、以及改性 SY 药各种感度的测试结果表明,改性 SY 药撞击时比常见猛炸药要钝感;静电火花感度比太安敏感,但明显低于斯蒂芬酸铅;摩擦感度比斯蒂芬酸铅敏感;火焰感度比常见起爆药钝感;另外,DSC 和 TG 的谱图表明,改性 SY 药具有起爆药特性。因此,改性 SY 药既具有起爆药的特性,又具有猛炸药的特性,属于一种起爆炸药。由于毫米波近炸探测引信可以轴向可靠起爆常规的猛炸药和起爆药,因此,毫米波近炸探测引信可以轴向可靠起爆中心起爆元中的改性 SY 药。说明中心起爆元被毫米波近炸探测引信轴向起爆是可靠的。

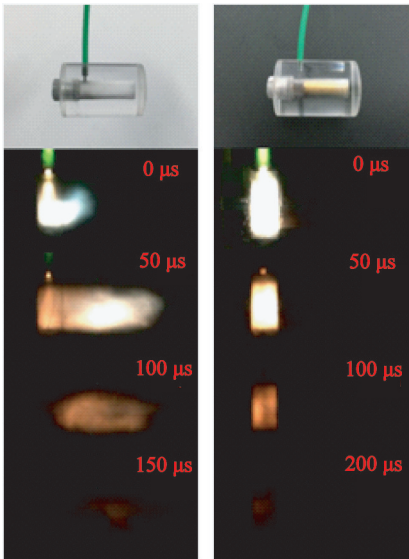
2.2.2 耐水点火药的可靠性

改性 SY 药性能良好,但火焰感度稍低,因此在改性 SY 药上层加锆系耐水点火药,进一步提高可靠性。由于 2 级起爆元是侧向点火,因此,需要对锆系耐水点火药进行可靠性分析。

2.2.2.1 高速摄影试验

锆系耐水点火药的可靠性主要取决于高强度导爆管起爆后喷出火焰的强度和持续时间,若火焰强度高且持续时间长,则高强度导爆管可以点燃锆系耐水点火药,表明锆系耐水点火药的可靠性高。

用透明有机玻璃棒设计加工一套装置,如图 7 所示。该装置孔径与长度均与 2 级起爆元相同,用于观察高强度导爆管起爆后喷出的火焰强度。图 7 (a) 没有装入激发爆管,图 7 (b) 装入一发模拟的激发爆管,用高速摄影仪记录火焰的动态变化。



(a) 无激发爆管 (b) 有激发爆管

图 7 高速摄影图

Fig. 7 High-speed photography

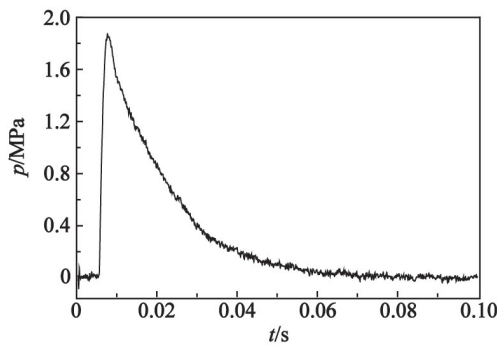
从图 7 (a) 可以看出,火焰从高强度导爆管喷出,碰到管壁后向右运动,直至充满整个腔体;图 7 (b) 由于装入了一发激发爆管,导致腔体体积很小,但是火焰从高强度导爆管喷出后,立刻充满狭小的腔体,由于腔体体积较小,火焰亮度和强度较前者更高;并且前者持续的时间较短,约 150 μs ,后者持续的时间较长,约 200 μs 。由于装有激发爆管的高强度导爆管起爆后喷出的火焰强度很高,并且持续时间更长,说明高强度导爆管足以侧向点燃锆系耐水点火药;因此锆系耐水点火药的可靠性足够高。

2.2.2.2 密闭爆发器试验

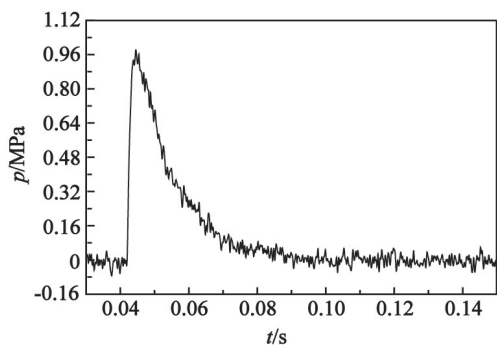
2 级起爆元在设计时侧向定位距离为 3 mm,即长度 25 cm 的高强度导爆管中心处距离 2 级起爆元的激发爆管药面为 3 mm。为了分析侧向起爆的可靠性,设计了一套测压装置。

该装置一侧可以连接压力传感器,另一侧开了一个小孔,可以连接高强度导爆管,底部设计成螺栓结构,可自由调整高强度导爆管与锆系耐水点火药的侧向距离,将与激发爆管同等药量的锆系耐水点火药(200 mg)压成药柱,把药柱放在螺栓上面,慢慢旋入螺栓,调整侧向距离分别为 3 mm 和 10 mm,使用 ZQ-BZ 标准型压力变送器和 Tektronix MDO3034 混合域示波器分别测试高强度导爆管中心处距离锆系耐水点火药药面 3 mm 和 10 mm 处的压力和时间的关系曲线,如图 8 所示。定位距离为 3 mm 时,侧向点燃锆系耐水点火药,在约 2 ms 的时间内,峰值压力达到 1.824 MPa;定位距离为 10 mm 时,侧向点燃锆系耐水点火药,在约 5 ms 的时间内,

峰值压力达到 0.96 MPa。无论定位距离怎么变化,高强度导爆管都能在极短时间内点燃铅系耐水点火药,说明铅系耐水点火药的可靠性高。



(a) 3 mm



(b) 10 mm

图 8 侧向点火的 P-t 曲线

Fig. 8 P-t curve of lateral initiation

综合分析高速摄影下高强度导爆管的点火强度、持续时间和侧向点火的压力曲线,可知铅系耐水点火药可以被高强度导爆管侧向可靠点燃。铅系耐水点火药燃烧后,引爆改性 SY 药,因此,高强度导爆管侧向起爆 2 级起爆元是可靠的。

2.3 起爆网络可靠度评估

根据设计共制作了 148 套多点非电起爆网络,抽取其中 125 套进行起爆试验。由于中心起爆元是由毫米波近炸探测引信起爆的,但试验中使用不便,所以采用高强度导爆管侧向起爆中心起爆元。用高压脉冲起爆器起爆多点非电起爆网络。试验结果表明,125 套多点非电起爆网络均成功起爆。超几何分布评估可靠性的公式:

$$\sum_{x=0}^F \frac{n! (N-n) (N-NR) (NR)!}{N! x! (n-x)! (N-NR-x)! (NR-n+x)!} = 1 - \gamma. \tag{1}$$

式中: $F = 0, N = 148, n = 125, \gamma = 0.9$ 。借助 Mathematica 软件进行多点非电起爆网络的可靠性计算,得到可靠度为 0.993 3 ($\gamma = 0.9$)。

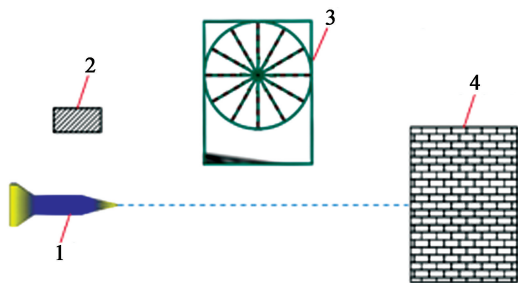
对余下的 23 套多点非电起爆网络也进行了起

爆试验,发现均可靠起爆,说明多点非电起爆网络的可靠性至少为 0.993 3 ($\gamma = 0.9$)。

3 应用部分

对多点非电起爆网络进行弹径 82 mm 破甲弹的动态拦截试验^[13],此次靶场试验是与其他单位合作进行的,笔者主要是负责多点非电起爆网络起爆 LEFP 装药,其他单位主要负责毫米波探测器探测来袭的 82 mm 聚能装药破甲弹,以及利用高速摄影仪拍摄整个拦截过程。

此次试验的原理是多点非电起爆网络起爆 LEFP 装药,利用药型罩形成 LEFP,对来袭破甲弹进行动态拦截,拦截示意图见图 9。其中,破甲弹弹道飞行高约 1.5 m,破甲弹弹径 82 mm;LEFP 装药选取 8701 炸药,药型罩材料为无氧紫铜,药型罩口部宽度为 30 mm、长度为 130 mm,其炸高约为 1.5 m。



1 - 破甲弹; 2 - 探测器; 3 - 多点非电起爆网络; 4 - 目标。

图 9 拦截破甲弹示意图

Fig. 9 Intercept high explosive anti-tank cartridge

把多点非电起爆网络固定在圆形支架上面,然后把 36 发起爆雷管分别插入 36 块分布均匀的 LEFP 装药。试验过程中,首先是毫米波探测器探测来袭破甲弹,当破甲弹进入炸距的有效范围内,毫米波近炸探测引信起爆中心起爆元,接着整个多点非电起爆网络起爆 36 块 LEFP 装药,形成的 LEFP 速度约为 2 140 m/s,起爆瞬间如图 10 所示。

共进行了 4 组试验,第 1 组试验目的是为了确认弹目交汇条件和毫米波探测器的位置,试验过程中将破甲弹的战斗部位置进行填沙处理,并对重点目标(钢筋混凝土靶板)做防护处理;第 2 组试验目的是在第 1 组试验条件下对破甲弹进行拦截,检验拦截效果;第 3 组试验使用未作填沙处理的破甲弹,即是对正常的破甲弹进行拦截,其中重点目标是裸露的。第 4 组试验目的是检验破甲弹对重点目标的侵彻效果,因此,让破甲弹直接撞击重点目标。利用高速摄影仪拍摄整个拦截过程,拍摄频率是 4 000



图 10 多点非电起爆网络起爆瞬间
Fig. 10 Detonated moment of multipoint non-electric detonation network

帧/s,高速摄影仪距离拦截点为 40 m 左右。

试验结果是:第 1 组试验拦截填沙破甲弹失败,因为探测器调试以及弹目交汇位置出现问题,LEFP 未能成功撞击破甲弹;经过调试毫米波探测器,第 2、3 组试验均成功拦截破甲弹;第 4 组试验破甲弹侵彻重点目标的状态如图 11 所示。经过这 4 组试验,发现多点非电起爆网络均能成功起爆 LEFP 装药,并且能成功拦截破甲弹。破甲弹被拦截后如图 12 所示,表明利用多点非电起爆网络拦截破甲弹是可行的。

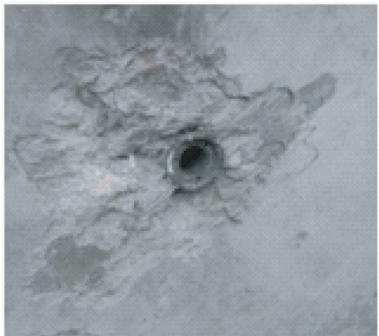


图 11 破甲弹侵彻重点目标
Fig. 11 High explosive anti-tank cartridge penetrating important target



图 12 被拦截后的破甲弹
Fig. 12 High explosive anti-tank cartridge after being intercepted

4 结论

通过对多点非电起爆网络的设计、可靠性研究以及靶场试验,得出以下结论:

- 1) 多点非电起爆网络的设计确定了中心起爆元与 2 级起爆元的结构、激发爆管的结构及装配工艺流程、高强度导爆管与起爆元的连接方式,并且确定了 2 级起爆元侧向起爆的定位距离为 3 mm。
- 2) 通过试验和结果分析,多点非电起爆网络的可靠度为 0.993 3 ($\gamma=0.9$)。
- 3) 通过对 4 组弹径 82 mm 破甲弹的动态拦截试验,表明设计的多点非电起爆网络实用性强,能够满足重点目标的主动防御。

参 考 文 献

[1] MILLER F P, VANDOME A F, MCBREWSTER J, et al. Composite armour [M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2011.

[2] LIBRARY W E. High explosive anti-tank warhead [M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2013.

[3] 陈智刚,侯秀成,李守苍,等. 高速破甲弹破甲稳定性数值模拟与实验研究[J]. 弹箭与制导学报,2009, 29 (1):124-127.

CHEN Z G, HOU X C, LI S C, et al. Numerical simulation and experimental study of high-speed high explosive antitank projectile stability [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(1):124-127.

[4] 郑宇,王晓鸣,黄寅生,等. 多点同步起爆网络的设计及试验研究[J]. 火工品,2008(1):1-4.

ZHENG Y, WANG X M, HUANG Y S, et al. Design and experimental investigation on multi-point synchronous explosive logic circuit [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(1):1-4.

[5] 梁车平,张玉若,金丽,等. 基于冲击片雷管的多点同步起爆系统研究[J]. 爆破器材,2018,47(3):31-36.

LIANG C P, ZHANG Y R, JIN L, et al. Research on a multi-point simultaneous initiation system based on EFI [J]. Explosive Materials, 2018, 47(3):31-36.

[6] 娄德兰. 导爆管起爆技术 [M]. 北京:中国铁道出版社, 1995.

[7] 朱顺官,李燕,张琳,等. 乙二胺高氯酸盐·三乙烯二胺高氯酸盐共晶起爆炸药及其制备方法: CN 101570459 B [P]. 2011-07-20.

[8] 马鹏. 共晶类铵盐含能材料的合成、理论计算与应用研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2013.

- MA P. Synthesis, theoretical calculation and application research on cocrystal ammonium energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
 - [9] 赵凯. SY 装药柔爆索爆轰特性研究及工程应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
 - ZHAO K. Detonation characteristics research and engineering application of SY mild detonating fuse[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
 - [10] 陈太林. 水悬浮法造粒点火药的制备及其性能[J]. 火工品, 1999(3): 43-45.
 - CHEN T L. Ignition powder made from water suspension granulation[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1999(3): 43-45.
 - [11] 朱顺官, 张琳, 李燕, 等. SY 共晶化合物的应用特性[J]. 中国兵器工业总公司. 火工品药剂试验方法相容性试验压力传感器法: GJB737. 13—1994[S]. 1994.
 - [12] 李兵, 陈曦, 杜忠华, 等. LEFP 对带壳装药冲击起爆过程的数值模拟与试验[J]. 含能材料, 2016, 24(11): 1034-1040.
 - LI B, CHEN X, DU Z H, et al. Numerical simulation and experimental study of LEFP on impact initiation process of charge with shell [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(11): 1034-1040.

(上接第 26 页)

 - 1(3): 38-42.
 - [10] 朱继业, 郑纯, 孙晓晖, 等. 杀爆弹破片与冲击波对地面人员目标综合毁伤[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4): 1-4.
 - ZHU J Y, ZHENG C, SUN X H, et al. Integration lethal probability of fragment and shock wave of explosive projectile on attacking personalities[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(4): 1-4.
 - [11] 赵国志, 张运法. 战术导弹战斗部毁伤作用机理[M]. 南京: 南京理工大学, 2000: 130-133.
 - [12] 金丽, 赵捍东, 曹红松, 等. 预制破片对地面人员目标的杀伤威力分析计算[J]. 导弹与制导学报, 2006, 26(4): 157-159.
 - JIN L, ZHAO H D, CAO H S, et al. Analysis and calculation on the lethality of premade fragments to the personnel targets on the ground [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(4): 157-159.
 - [13] BAKER W E, COX P A, WESTINE P S, et al. Explosion hazards and evaluation [M]. Amsterdam: Elsevier Science Pub. Co., 1983.
 - [14] 解立新, 严峰, 苑宏志. 燃料空气炸药爆炸温度场参数实验研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(2): 6-8.
 - XIE L X, YAN F, YUAN H Z. Experimental study on the parameter of FAE's temperature field[J]. Explosive Materials, 2007, 36(2): 6-8.
 - [15] 阚金玲, 刘家骢, 曾秀琳, 等. 温压炸药爆炸火球的特征[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 55-58.
 - KAN J L, LIU J C, ZENG X L, et al. Fireball characteristics of a thermal-baric explosive[J]. Chinese Journal of Explosive and Propellants, 2007, 30(2): 55-58.