

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.014

深水炸弹引信传爆序列设计研究^{*}

张世林 王清华

中船重工第 710 研究所(湖北宜昌, 443000)

[摘 要] 为了提高深水炸弹引信传爆序列的可靠性,设计了两种方案的传爆序列结构,其中方案Ⅰ是典型的垂直式传爆序列结构,方案Ⅱ为改进型搭接式传爆序列结构。应用非线性有限元软件 AUTODYN 对两种方案的传爆序列的可靠性进行了数值模拟分析,结果表明:方案Ⅱ提高了传爆的可靠性,缩短了爆轰波稳定转向的时间,对装药间隙值的控制要求相对较低。通过高温、低温和常温环境试验对比分析了两种传爆序列结构的传爆可靠性,结果表明:方案Ⅰ的传爆率为 87%,而方案Ⅱ传爆率为 100%,方案Ⅱ相比方案Ⅰ传爆率提高了 13%。

[关键词] 引信;传爆序列;数值模拟

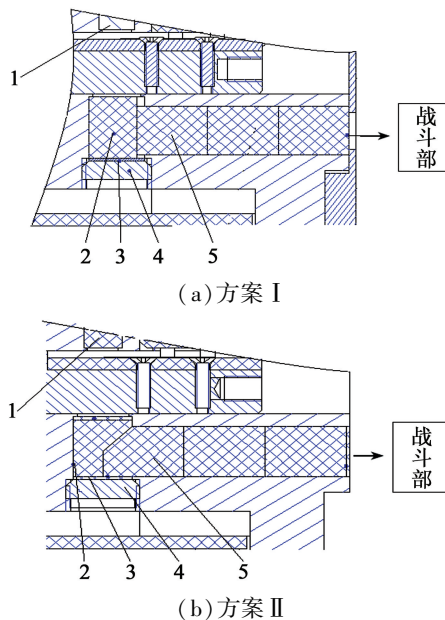
[分类号] TJ43+1.7

引言

引信作为弹药战斗部的重要组成部分,是激发弹药产生毁伤作用的执行机构,主要功能是把微小的初始能量有控制性地逐级放大到适当的爆轰能量以可靠地起爆战斗部主装药,实现弹药的高效毁伤作用。而传爆序列作为爆轰能量传递的关键部件,其传爆可靠性直接决定引信功能的发挥。因此,传爆序列的设计直接影响着引信的性能和结构设计乃至战斗部能否正常引爆。国内外学者为此进行了大量的研究;武双章^[1]对传爆序列输入端界面的引传爆可靠性的设计方法进行了研究,为其他传爆序列的界面引传爆可靠性试验方法的选择、数据分析和处理提供了参考;胡立双等^[2-3]提出了一种异形传爆药柱并对其传爆能力进行了研究,发现异形传爆药柱的起爆能力受到面积效应系数的影响,后续又设计出半球形反射板传爆序列,对提高传爆可靠性具有现实意义;美国海军水面武器中心的 Spahn^[4]发明了两种新型爆炸序列:环形传爆药爆炸序列和在主装药中埋有反射板的爆炸序列,提高了用钝感传爆药引爆极钝感主装药的可靠性。目前,各国在直列式传爆序列上进行了大量研究^[5],但因其成本高昂,直列式传爆序列主要用于高价值弹药的引信。

由于引信可利用的空间位置有限,在传爆序列设计时存在诸多的限制因素,约束了设计方案的选取。本文为解决某型深水炸弹引信传爆序列的可靠性,实现传爆序列爆轰波的 90°转向,以便快速安全可靠地完成传爆序列的工作,依据典型传爆序列的

基本结构特点^[6-11],设计了两种传爆序列:方案Ⅰ和Ⅱ(图 1)。方案Ⅰ是典型的垂直式传爆序列结构,方案Ⅱ为改进型搭接式传爆序列结构。依据两种方案下的传爆设计进行数值模拟计算和不同温度下传爆试验的对比分析,选择最优传爆序列结构,确保了产品功能发挥,实现战斗部的高效毁伤。



1 - 雷管;2 - 药柱 A;3 - 纸垫;4 - 堵盖;5 - 药柱 B

图 1 传爆序列方案

Fig. 1 Schemes of explosive trains

1 传爆序列方案

两种传爆序列结构中(图 1),传爆药柱主要由药柱 A 和药柱 B 两部分组成,炸药采用 JH-14C,压

^{*} 收稿日期:2014-05-22

作者简介:张世林(1986~),男,工程师,硕士,主要从事弹药工程的研究。E-mail:zsl.31@163.com

药密度为 $(1.65 + 0.02) \text{ g/cm}^3$, 爆速为 8182 m/s 。爆轰波在传输过程中实现一次 90° 转向, 逐级放大爆轰强度, 实现对战斗部的可靠起爆。

2 炸药冲击引爆爆轰机理

非均质炸药会在炸药某些局部点产生热点效应^[3], 最终引起爆轰。本文引入非均质炸药冲击起爆临界判断理论, 采用临界起爆能量和 G. C. M. Foan 积分能量作为爆轰判断依据^[3]; 当引信解除保险后, 电雷管点火工作, 炸药 A 爆轰后, 其波阵面压力为 p , 当爆轰波传播至药柱 B 端面时, 压力角为 α , 则药柱 B 端面受到的冲击压力为 p_1 。炸药 B 受到的冲击压力值达到其临界能量值, 才可实现爆轰。

传爆药柱的结构尺寸不同, 起爆能力也不同, 主要是因为传爆药柱和主装药的接触面积不同。起爆能力 N 和临界起爆能量 E_c 可表示为^[8]:

$$N = \frac{\beta}{Z} \int_0^t p_1^2(t) dt; \quad (1)$$

$$E_c = p_1^2 t / \rho \mu_s; \quad (2)$$

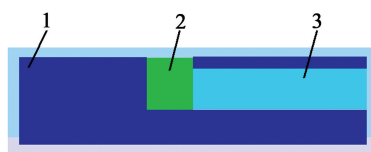
$$p_1 = p_{cj} \cos \alpha. \quad (3)$$

式中: β 为面积效应系数; Z 为被发炸药的冲击阻抗; p_1 为作用在药柱表面法线方向的冲击压力; t 为入射冲击波的脉冲持续时间; ρ 为传爆药柱的密度; μ_s 为炸药爆轰后的冲击波速度; p_{cj} 为波阵面压力; α 为压力角。

由式(1)、式(2)可知, N 随着 β 和 p_1 的增大而变强, 传爆药和主装药的接触面积对传爆药柱的起爆能力影响很大。方案 I 的面积效应系数要小于方案 II, 并且当药柱 A 以面起爆后, 爆轰波近似平面爆轰波沿着药柱轴向运动, 同时也向径向方向以稀疏波的形式高速膨胀, 方案 I 中药柱 B 主要受到径向爆轰压力, 方案 II 中药柱 B 主要受到轴向爆轰波压力, 且作用在主装药 B 上的波阵面压力角 α 小于方案 I, 根据式(3)知: $p_{1(I)} < p_{1(II)}$ 。被发炸药的冲击阻抗 Z 相同, 作用于药柱 B 的波阵面冲击压力持续时间近似相同时, 则方案 I 的起爆能力 N 要小于方案 II, 即方案 II 可提高深水炸弹引信传爆可靠性。

3 数值模拟

采用 AUTODYN 软件, 依据产品尺寸建立相应的二维有限元模型(图 2), 进行数值模拟分析。为简化模型, 计算模型只包括 JH-14C 炸药和引信部分基座。采用拉格朗日算法模拟冲击引爆, 为保证药柱 B 的计算精确性, 将其网格尽可能加密处理。炸药选择 JH-14C 猛炸药, 药柱 A 采用 High_Explosive_Burn 材料模型和 JWLL 状态方程, 药柱 B 采用点火增



1 - 基座; 2 - 药柱 A; 3 - 药柱 B

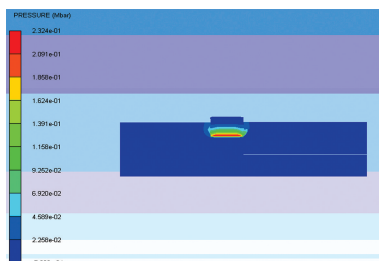
图 2 传爆有限元模型

Fig. 2 Finite element model of detonation

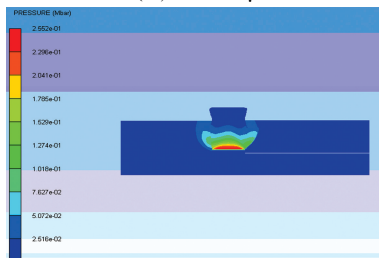
长方 Lee-Tarver, 引信基座选用 T4 硬铝, 采用 Shock 冲击方程, 参考值见文献[12-14]。为了观测药柱 B 端面压力变化情况和是否正冲击引爆, 在其端面沿径向等间距设置 5 个高斯观测点。

3.1 方案 I 数值模拟结果

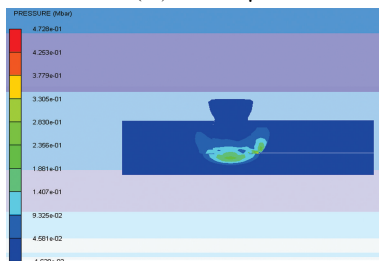
计算采用线起爆, 药柱 B 距药柱 A 间距分别为 0、1、2、3 mm 和 5 mm。图 3 和图 4 为药柱 B 距药柱



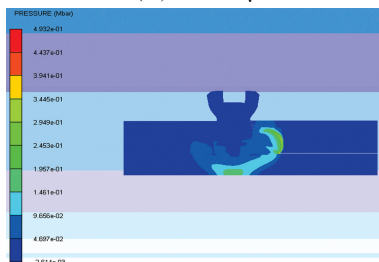
(a) $t = 0.5 \mu\text{s}$



(b) $t = 1.0 \mu\text{s}$



(c) $t = 1.5 \mu\text{s}$



(d) $t = 2.0 \mu\text{s}$

图 3 方案 I 不同时刻爆轰波传播波形

Fig. 3 Propagation of detonation wave at different times for Project I

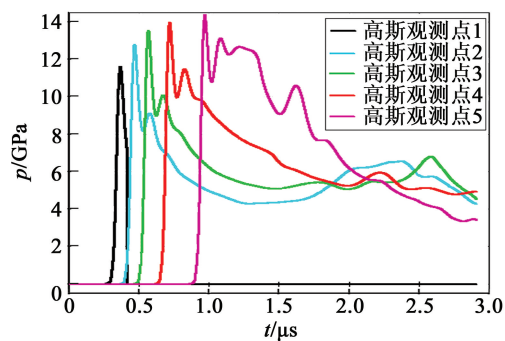


图 4 方案 I 高斯观测点压力曲线图

Fig.4 Pressure-time curves of Gauss observation points for Project I

A 为 0 mm 时,不同时刻的爆轰波传播波形和观测点的压力变化。

由图 4 知,高斯观测点的平均压力值为 13 GPa,根据文献[15-16] 知,该值大于药柱 B 的临界起爆压力值,满足起爆条件;同时根据不同时刻爆轰波传播过程可知,药柱 B 实现了稳定爆轰。

通过 5 种间距的冲击引爆的爆轰波形分析,药柱间距为 0、1、2、3 mm 时均可起爆,但起爆时间和形成爆轰时的热点位置有所不同。药柱 B 爆轰后完成 90°转向的时间和位置也不相同,随着距离的增加,稳定爆炸中心点形成的距离和时间也随之增大;药柱间距为 5 mm 时,药柱 B 只是发生了冲塞、开星等剪切现象,没有发生爆轰。统计结果如表 1 所示。

表 1 方案 I 不同间距药柱 B 殉爆状态

Tab.1 Detonation state of charge B with different distances for Project I				
药柱间距/ mm	是否 殉爆	距爆炸中 心/mm	时间/ μs	爆轰波转向状态 ($t = 2.5 \mu s$)
0	是	1	1.5	
1	是	2	1.6	
2	是	3	2.5	
3	是	8	3.0	
5	否	—	—	—

由于药柱 A 端面起爆后,爆轰波近似平面爆轰波沿着药柱轴向运动,同时也向径向方向以稀疏波

的形式高速膨胀,随着药柱 B 间距的增大,径向稀疏波衰减也越快,则作用在药柱 B 端面的压力也越低,能量衰减也越快;随着轴向爆轰波传播至药柱底端面,爆轰产物在贴近基座表面积聚堆积,爆轰产物大部分质点速度突然变为零,部分向药柱 B 端面处膨胀运动,基座表面压力和密度快速增大,当压力和密度增加到一定程度时便向相反方向运动,形成反射冲击波。爆轰波一部分以应力波的形式穿透基座,形成透射波,另一部分则为反射冲击波。反射波和后续运动至底端面的稀疏波叠加,在药柱底面形成一超压区域,药柱 B 受到的冲量快速增大,温度也快速升高,达到临界起爆能量时实现爆轰。

3.2 方案 II 数值模拟分析

计算采用线起爆,药柱 B 距药柱 A 间距 0、1 mm。图 5 和图 6 为药柱 B 距药柱 A 为 0 mm 时,不同时刻的爆轰波传播波形和观测点的压力变化。

药柱 B 在受到爆轰冲击后,和药柱 A 接触的端面压力值瞬间到达 17 GPa 左右,受到的冲击能量达到冲击引爆的能量临界值,从而在端面处快速形成

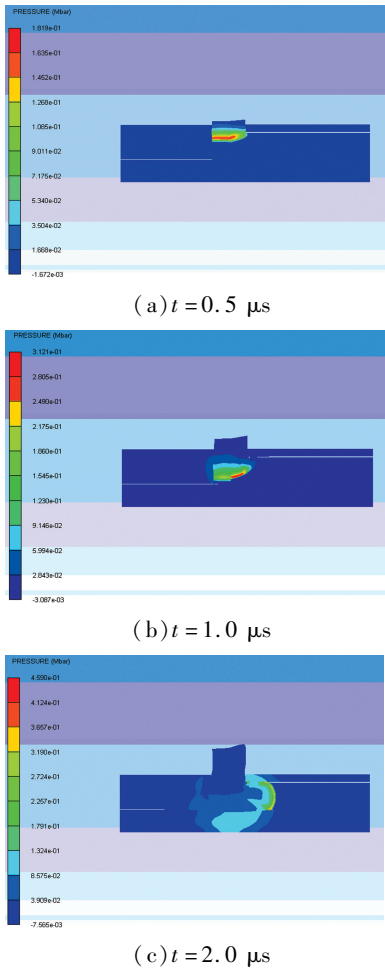


图 5 方案 II 不同时刻爆轰波传播波形
Fig.5 Propagation of detonation wave at different times for Project II

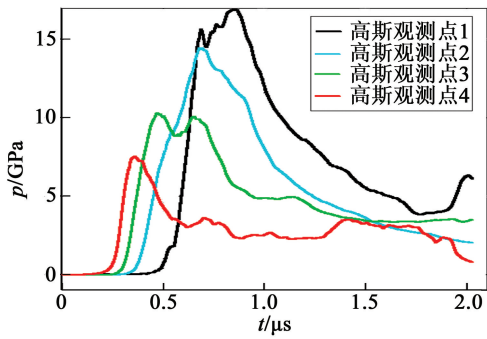


图 6 方案 II 高斯观测点压力曲线图

Fig. 6 Pressure-time curves of Gauss observation points for Project II

一热点,发生爆轰。从开始爆轰到爆轰波的90°稳定转向时间也很短暂(表 2),间距 0 mm 时大约 1.7 μs ,间距 1 mm 时大约 2.1 μs 。这是由于沿着药柱 A 轴向运动的爆轰波压力与药柱 B 面法线间的夹角比较小,药柱 B 主要受到轴向爆轰波的冲击,作用在端面处的冲量和能量很大,能够快速实现爆轰。

表 2 方案 II 不同间距药柱 B 爆轰状态

Tab. 2 Detonation state of charge B with different distances for Project II

药柱间距/mm	是否殉爆	时间/ μs	爆轰波转向状态 ($t = 1.7 \mu\text{s}$)	爆轰波转向状态 ($t = 2.1 \mu\text{s}$)
0	是	0.7		
1	是	0.8		

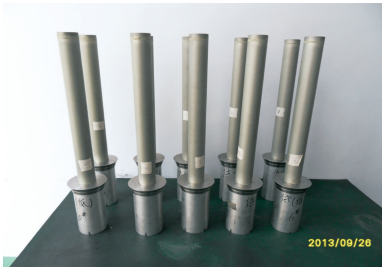
4 试验及结果分析

将设计的两种传爆序列,分别进行高温 65 $^{\circ}\text{C}$ 、低温 -28 $^{\circ}\text{C}$ 和常温 3 种状态下的试验验证,考核其传爆可靠性。每种温度下利用 5 枚样机进行试验。传爆药柱采用 JH-14C,压药密度为 $(1.65 \pm 0.02) \text{ g/cm}^3$,雷管采用 39 号瞬发电雷管,装药间距均为 0 mm。结果表明:方案 I 低温和高温下各有 1 枚样机未正常引爆,而方案 II 有 15 枚样机全部引爆,见证板严重变形,变形长度约 480 mm,与扩爆药柱长度相当,证明 12 节扩爆药柱均可靠起爆。因此,采用斜面设计的传爆药柱能够可靠地完成爆轰波 90°转向,确保传爆序列传爆可靠。试验及其结果见图 7。试验后拆卸 2 枚未爆引信发现,电雷管和药柱 A 均

可靠完成爆轰,药柱 B 存在冲蚀但未发生爆轰,分析认为是:药柱 B 装药间隙超过了极限殉爆距离,导致传爆序列爆轰中断。结合仿真分析可知:装药间隙值相比方案 II,对方案 I 影响较大,在实际装配过程中更应严格控制装配间隙。



(a) 药柱状态



(b) 试验引信样机



(c) 引信放置状态



(d) 见证板毁伤状态

图 7 传爆试验及其结果

Fig. 7 Detonation experiment and its results

5 结论

- 1) 方案 I 利用径向稀疏波和反射波叠加后形成的超压在药柱底端面形成热点来冲击引爆药柱,随着药柱间距的增大,热点形成的时间和离端面的距离也随之增大,爆轰波实现 90°转向时间也加大,当间距超过极限值后,药柱不能正常爆轰。在实际产品中,如果装药密度未满足技术要求,或者底盖处漏气发生泄爆导致爆轰能量降低,则不能正常引爆药柱。
- 2) 方案 II 改变了爆轰波的波形,使波阵面压力与药柱面法线之间的夹角变小,提高了作用在药柱上的冲击能量,增加了爆轰的可靠性,缩短了药柱爆轰的时间。
- 3) 方案 II 提高了爆轰的可靠性,缩短爆轰转向时间,对装药间隙值要求相对较低,传爆率提高了

13%。因此,方案Ⅱ的设计优于方案Ⅰ。

参 考 文 献

- [1] 武双章. 某传爆序列输入端界面引传爆可靠性设计方法研究[J]. 火工品, 2008(6): 35-38.
Wu Shuangzhang. The design method of the detonation and boost reliability of boost alignment input-side interface[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(6): 35-38.
- [2] 胡立双, 胡双启, 曹雄, 等. 异形传爆药柱的起爆能力[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 207-211.
Hu Lishuang, Hu Shuangqi, Cao Xiong, et al. Initiation capacity of a special shape booster pellet [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 207-211.
- [3] 胡立双, 胡双启, 曹雄, 等. 埋入式半球形反射板传爆序列技术研究[J]. 火工品, 2012(1): 4-6.
Hu Lishuang, Hu Shuangqi, Cao Xiong, et al. Study on explosive sequence technology of embedded hemispherical booster with reflector[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(1): 4-6.
- [4] Spahn P F. Embedded can booster: USA, 5221810[P]. 1993-08-10.
- [5] 金丽, 杨振英, 张玉若, 等. 一种直列式传爆序列的装药传爆性能试验研究[J]. 含能材料 2012, 20(1): 105-108.
Jin Li, Yang Zhenying, Zhang Yuruo, et al. Performance of an in-line explosive trains [J]. Chinses Journal of Energetic Materials, 2012, 20(1): 105-108.
- [6] 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 Ruo, Ren Liping. The analysis on the demand of standards for non-interrupted explosive train [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(1): 53-56.
- [7] 胡双启, 曹雄. 高起爆能力的新结构传爆药柱研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(2): 188-190.
Hu Shuangqi, Cao Xiong. A study on the structure of booster pellets having high initiating capacity [J]. Acta

Armamentarii, 2002, 23(2): 188-190.

- [8] 曹雄, 胡双启, 张建忠. 装药结构对传爆药柱起爆能力的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(增刊1): 200-204.
Cao Xiong, Hu Shuangqi, Zhang Jianzhong. Study on the effect of charge structure of booster pellet had on its initiation capacity[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(suppl. 1): 200-204.
- [9] 北京工业学院触发引信教研室. 引信设计(上册)[M]. 北京: 北京工业学院, 1976.
- [10] 张合. 引信机构学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [11] 陈庆生. 引信设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [12] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [13] 时党勇, 李裕春, 张胜明. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] 石少卿. AUTODYN 工程动力分析及应用实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 孙华, 郭志军. 高能聚黑类传爆药在水中兵器中应用研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(3): 111-113.
Sun Hua, Guo Zhijun. Study on the application of high energy hexogen booster in undersea weapons[J]. Journal of the Academy of Equipment Command Technology, 2010, 21(3): 111-113.
- [16] 张子敏, 许碧英, 仲凯, 等. 冲击载荷下 JH-14C 传爆药的动态响应实验研究[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 57-59, 63.
Zhang Zimin, Xu Biying, Zhong Kai, et al. Experimental study on the dynamic response of booster explosive JH-14C under impact load[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(1): 57-59, 63.

Sequence Design and Research on Deepwater-charged Fuze Booster

ZHANG Shilin, WANG Qinghua

710th Institute, China Shipbuilding Industry Corporation (HuBei Yichang, 443003)

[ABSTRACT] In order to improve the reliability of deepwater-charged fuze booster, two projects of fuze explosive trains with different structures were designed. Project I has a typical vertical detonation sequence structure, and Project II was equipped with the improved lapped structure. A nonlinear finite element analysis software AUTODYN was applied to perform the numerical simulation of the reliability of these two explosive trains. The results show that Project II can improve the reliability of the detonation transmission, shrink the time of detonation wave steering and loosen the requirement of the charge gap. Reliability experiments of these two explosive trains were performed under low temperature, room temperature and high temperature conditions, respectively. Project II increases the detonation transmission reliability by a rate of 13%, reaching 100%, compared to the explosive rate of Project I (87%).

[KEY WORDS] fuze; explosive trains; numerical simulation