文章编号:1000-5773(2012)03-0289-05

不同起爆方式对含铝炸药水中爆炸近场冲击波压力的影响*

李金河,赵继波,谭多望,王彦平,张远平

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621900)

摘要:采用 SJZ-30 和 GSJ-15 型高速扫描相机,对端面点起爆、侧边点起爆和中心点起爆方式下,HLZY-1 含铝炸药水中爆炸近场冲击波传播过程进行了实验观测,通过数字化方法得到了炸药近场冲击波沿狭缝方向的扫描曲线和冲击波压力变化曲线。研究表明,起爆方式对炸药水中爆炸初始冲击波峰值压力以及近场冲击波峰值压力的衰减有重要的影响。研究结果可以为水中兵器战斗部的设计以及毁伤效能评估提供参考。

关键词:起爆方式;水中爆炸;近场;冲击波;含铝炸药
中图分类号:O383.1;TJ55 **文献标识码**:A

1 引 言

炸药水中爆炸是水中兵器设计技术、破坏效应研究的基础问题。炸药水中爆炸大体可分为 3 个阶段:炸药的爆轰,冲击波的产生和传播,气泡的形成和脉动。炸药水中爆炸初期,其能量主要以冲击波的形式向外传播,对目标的破坏起决定性作用。为了对舰船、潜艇等目标形成良好的毁伤效果,应尽量使冲击波在近场范围内发挥作用。即水中兵器对目标的作用方式为近场爆炸作用,使爆炸能量在未大量损耗之前直接作用于目标,从而增强其破坏效果,因此,炸药水中爆炸近场冲击波特性的研究显得尤为重要。

过去几十年,由于实验技术等限制,对炸药水中爆炸冲击波的研究多局限于采用电气石压力传感器等测试远场冲击波压力的实验研究[1-6],如 Bocksteiner、Bjarnholt 等人的工作。而对于近场冲击波的实验研究工作开展较少,主要是 Kira、Dorsett、Liddiard 以及池家春等应用高速分幅相机、高速扫描相机和锰铜计、PVDF 压力计等开展了一些实验工作[7-11],使水中爆炸冲击波的研究工作得以进一步发展。现代水中兵器战斗部一般为柱形,且多采用含铝炸药作为主装药。由于柱形装药在水中爆炸后,近场冲击波流场呈现各向异性。而对具有相同几何形状、物理参数的炸药,当起爆位置不同时,由于产物流场的分布不同,各个方向分散的能量会产生较大的变化。因此,不同的起爆方式将对柱形装药水中爆炸近场产物流动产生一定的影响,从而使冲击波阵面的形状发生改变,使近场冲击波流场的分布更加复杂。含铝炸药是典型的非理想炸药,其爆轰性能不同于 TNT 等理想炸药[12-14],其水中爆炸冲击波近场特性非常复杂,容易受到起爆方式的影响。因此,研究不同起爆方式对含铝炸药水中爆炸近场的冲击波特性,尤其是近场冲击波压力的影响,对水中兵器战斗部的设计具有重要的参考价值。

2 实验研究

实验采用高速扫描相机对近场冲击波传播轨迹进行扫描。由于柱形炸药水中爆炸近场冲击波流场的各向异性和复杂性,无法预知冲击波阵面的形状和发展过程,因此,无法对近场任意方向的冲击波传播进行扫描测试,而只能在特定方向(如起爆轴线方向)进行扫描。因为只有该方向扫描结果才能计算得到冲击波传播的法向速度和峰值压力,而其它方向扫描结果计算的速度只是法向速度的一个分量。

实验采用柱形含铝炸药 HLZY-1,其长径比约为 2,主要成份为 RDX、Al、AP 和粘结剂。炸药密度约为

* **收稿日期**:2010-10-15;**修回日期**:2010-12-09
作者简介:李金河(1979—),男,学士,主要从事炸药爆轰基础研究工作. E-mail:lijinhe103@21cn.com

1.803 g/cm^3，尺寸约为∅71 mm×142 mm，质量约为 1 kg。采用端面点起爆、侧边点起爆和中心点起爆 3 种起爆方式。其中，端面点起爆和侧边点起爆时，采用一台 SJZ-30 型扫描相机对炸药起爆轴向方向进行扫描；采用两台 GSJ-15 型扫描相机，对中心点起爆时起爆轴向(炸药径向)和炸药轴向同时进行扫描，见图 1。

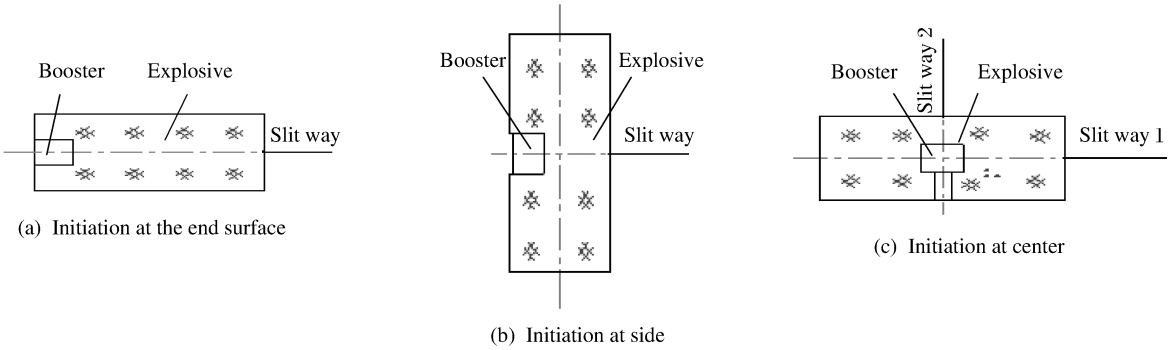


图 1 不同起爆方式扫描示意图

Fig. 1 Slit sketch at different initiation modes

3 图像分析方法

根据静止图像确定实验放大比。图 2 给出了中心起爆实验中的静止图像，由静止图像和已知的标尺尺寸，可以确定高速摄影拍摄时的放大比。

对扫描波形的边界进行提取，并进行数字化处理。典型的炸药冲击波沿狭缝方向传播的扫描波形及其边界检测结果见图 3。图 4 为扫描波形的数字化曲线，图中横坐标代表扫描记录冲击波传播的时间，纵坐标代表冲击波出炸药表面的距离。

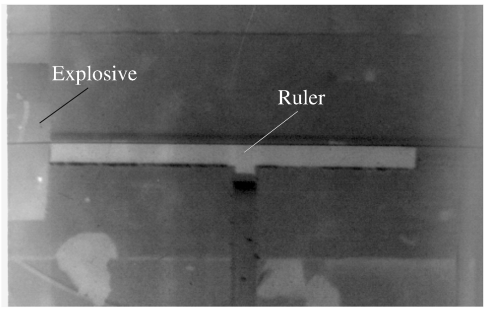


图 2 静态图像

Fig. 2 Static picture

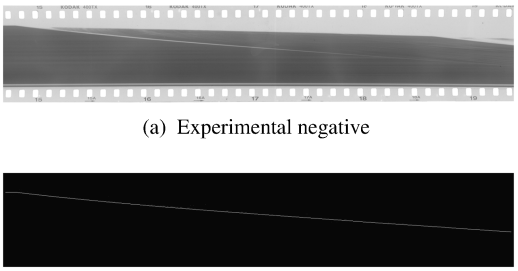


图 3 扫描波形及其检测结果

Fig. 3 Experimental picture and detected results

在数字化后的扫描曲线上任意时刻附近取一对坐标点(t,x)，可得任一时刻的平均速度。由实验条件可知，所得冲击波速度为波阵面的法向速度。对若干离散的速度点进行拟合，可得冲击波在水中传播的速度曲线。将法向速度和 Rankine-Hugoniot 结合起来，可得冲击波阵面上各点的压力

$$\begin{cases} p_s = \rho_0 u_s u_p \\ u_s = 1.483 + 25.306\lg(1 + u_p/5.19) \end{cases} \tag{1}$$

式中：p_s 为冲击波阵面上各点的压力，GPa；u_p 为冲击波速度，km/s。

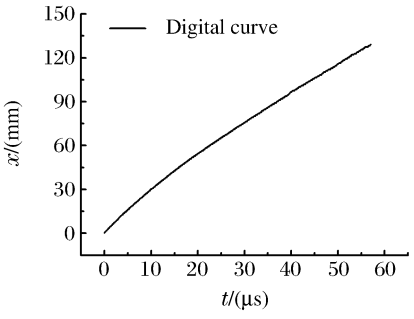


图 4 实验曲线数字化结果

Fig. 4 Digitized results of experimental picture

4　实验结果与讨论

4.1　初始冲击波峰值压力比较

根据上述数据处理方法,得到了不同起爆方式下,含铝炸药 HLZY-1 近场冲击波压力随距离变化的拟合曲线,见图 5。

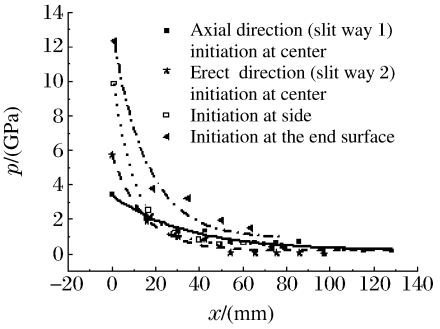


图 5　不同起爆方式冲击波压力变化曲线

Fig. 5　Pressure attenuation of shock wave at different initiation modes

总体看来,端面点起爆时,初始冲击波峰值压力最高,约为 13.20 GPa,其冲击波峰值压力在传播过程保持着较快的衰减速率。侧边点起爆时,初始冲击波峰值压力介于端面点起爆和中心点起爆之间,约为 9.93 GPa,其峰值压力的衰减过程呈先急剧下降后缓慢下降的趋势。中心点起爆时,位于起爆轴线上(竖直方向)的冲击波初始峰值压力比水平方向高,但都比端面点起爆和侧边点起爆时的压力低,沿起爆轴向的初始冲击波压力约为 5.83 GPa,沿炸药轴线方向的初始冲击波压力约为 3.54 GPa,其峰值压力的衰减速率相对较慢且比较平稳。在距离炸药表面约 120 mm 之后,不同起爆方式下压力基本趋于一致,即不同起爆方式对炸药水中爆炸冲击波压力的影响可能在一定距离后消失,存在一定的“区域效应”。此区域之外可能对应了炸药水中爆炸冲击波的球形化。

端面点起爆时的初始冲击波峰值压力比侧边点起爆时高 3.37 GPa,高约 34%;比中心点起爆竖直方向高约 134.1%。这主要是由于炸药起爆后,端面起爆时爆轰发展的过程约为 143 mm,而侧边点起爆和中心点起爆竖直方向爆轰的发展过程约为 70 mm 和 35 mm。对于 HLZY-1 非理想炸药,在水中爆炸时,其发展到稳定爆轰的距离和时间较长,侧边点起爆和中心点起爆竖直方向,炸药爆轰波在出炸药表面时,仍然未达到稳定爆轰,处于爆轰成长过程。因此,当炸药处于爆轰成长过程时,沿起爆轴线方向炸药的长度越长,其水中爆炸产生初始冲击波的峰值压力越高。

中心点起爆时,沿起爆轴向的初始冲击波压力比沿炸药轴线方向的初始冲击波压力高约为 1.29 GPa,即虽然沿起爆轴向炸药爆轰的发展和传播的距离更短,但是该方向的压力却相对较高。这主要是由于起爆时,其能量主要集中在起爆轴线方向,而在与起爆轴向垂直的炸药轴线方向,其起爆能力相对较弱,因此,沿起爆轴线方向炸药向爆轰的转变更快。

4.2 峰值压力衰减速率比较

将拟合得到的冲击波压力随距离的衰减曲线进行微分,可得不同起爆方式情况下冲击波压力衰减速率曲线,见图 6。

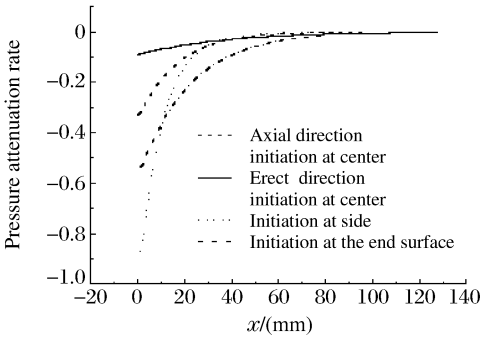


图 6　不同起爆方式冲击波压力衰减速率曲线

Fig. 6　Pressure attenuation rate of shock wave at different initiation modes

由图 6 可以看出,侧边点起爆时,在 0～11 mm 之间,其峰值压力衰减速率最快,11 mm 之后端面点起爆产生的冲击波压力衰减速率反而较快。分析认为,在 0～11 mm 之间,端面点起爆时炸药中铝粉与爆轰产物产生了比较充分的反应,其能量的释放使沿起爆轴线方向上压力的衰减变慢。而侧边点起爆时,起爆轴线方向爆轰产物较少,铝粉与爆轰产物反应的能量释放与补充不足,从而导致其峰值压力下降较快。但是在约 11 mm 后,侧边点起爆时,其

峰值压力比端面起爆时低得多,同时由于铝粉与爆轰产物之间的反应相对较慢,仍然可能与炸药中的爆轰产物发生反应,释放能量,因此,其衰减速率变慢,并低于端面点起爆。

中心起爆时,沿炸药轴线方向初始冲击波峰值压力较低,且炸药的长度更长,炸药中铝粉和爆轰产物反应比较充分。因此,该方向冲击波峰值压力的衰减速率更慢。在经过约 17 mm 后,其冲击波峰值压力反而比沿起爆轴线方向更高。

同理,由于侧边点起爆时沿起爆轴线方向炸药爆轰发展和传播的距离更长,其初始冲击波峰值压力比中心点起爆竖直方向更高,因此,其压力衰减更快。而在约 30 mm 后,侧向点起爆时沿冲击波传播方向产生的爆轰产物更多,铝粉的反应更充分,因此,其峰值压力下降速率明显降低。同样,端面点起爆和中心点起爆炸药轴线方向的压力变化情况与之类似。但是,中心点起爆炸药轴线方向不在炸药的起爆轴线上,其初始冲击波峰值压力更低,峰值压力的衰减速率也更慢。

5 结 论

采用高速扫描相机测量了不同起爆方式下含铝炸药 HLZY-1 水中爆炸近场冲击波传播情况,得到了其水中爆炸冲击波压力的变化曲线。研究表明,不同起爆方式对长径比约为 2 的非理想含铝炸药水中爆炸近场初始冲击波压力、峰值压力的衰减和爆轰产物的分布,以及与铝粉的反应过程都有较大影响。

(1) 一般情况下,非理想炸药水中爆炸时,位于起爆轴向的初始冲击波压力最高,但同时受到炸药爆轰成长过程的影响,炸药长度越长,其可能成长至更高的爆轰压力,从而使初始冲击波压力提高。

(2) 冲击波峰值压力的衰减速率主要受到初始冲击波峰值压力的影响,初始冲击波峰值压力越高,衰减越快;同时,也受到爆轰产物的分布和铝粉反应程度的影响。在冲击波传播方向,爆轰产物越多,铝粉反应越充分,能量的释放和补充越充足,越有利于降低冲击波的衰减速率。

(3) 起爆方式只是在近场一定距离内影响冲击波压力,存在一定“区域效应”。

由于实验数量有限,关于不同起爆方式对含铝炸药水中爆炸近场冲击波的影响有待在理论和实验上做进一步研究,如不同起爆方式下炸药中铝粉的反应情况、爆轰产物的分布、“区域效应”范围等。

References:

[1] Bocksteiner G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115(AUST), DSTO-TR-0297 [R]. Melbourne, Vic: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1996.

[2] Bjarnholt G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test [J]. Propell Explos Pyrot, 1980, 5(2-3): 67-74.

[3] Satyavratan P V, Vedam R. Some aspects of underwater testing method [J]. Propell Explos Pyrot, 1980, 5(2-3): 62-66.

[4] Yu T C, Wang X F, Wang J L. Underwater shock wave performance of explosives [J]. Energ Mater, 2003, 11(4): 182-186. (in Chinese)
俞统昌,王晓峰,王建灵. 炸药的水中爆炸冲击波性能 [J]. 含能材料, 2003, 11(4): 182-186.

[5] Li J H, Zhao J B, Tan D W, et al. The experimental study on the shock wave performance of underwater explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2): 172-176. (in Chinese)
李金河,赵继波,谭多望,等. 炸药水中爆炸冲击波性能实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 172-176.

[6] Murata K, Takahashi K, Kato Y. Precise measurements of underwater explosion phenomena by pressure sensor using fluoropolymer [J]. J Mater Process Tech, 1999, 85(1): 39-42.

[7] Kira A, Fujita M, Itoh S. Underwater explosion of spherical explosives [J]. J Mater Process Tech, 1999, 85(1): 64-68.

[8] Dorsett H, Cliff M D. Detonation front curvature measurements and aquarium tests of tritonal variants, DSTO-TR-

1411 [R]. Edinburgh, S Aust: Defence Science and Technology Organisation, 2003.

[9] Liddiard T P, Forbes J W. Shockwaves in fresh water generated by the detonation of pentolite spheres, A880231 [R]. Columbus, US: Defense Technical Information Center OAI-PMH Repository, 1983.

[10] Chi J C, Ma B. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B-3 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(3): 199-204. (in Chinese)
池家春, 马　冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(3): 199-204.

[11] Zhao J B, Li J H, Tan D W, et al. Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater-explosion field [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 539-543. (in Chinese)
赵继波, 李金河, 谭多望, 等. TNT 药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 539-543.

[12] Guiruis R H, Miller P J. Time-dependent equations of state for aluminized underwater explosives [A]//Tenth Symposium(International) on Detonation [C]. Boston, Massachusetts, 1993: 675-682.

[13] Goldstein S, Johnson J N. Aquarium tests on aluminized ANFO [A]//Seventh Symposium(International) on Detonation [C]. Dahlgren, Virginia, 1980: 1016-1023.

[14] Cowperthwaite M, Pastine D J, Enig J W. Energetics of late chemical reactions in nonideal underwater detonations: Phase 1, preliminary theoretical model development, A880903 [R]. Columbus, US: Defense Technical Information Center OAI-PMH Repository, 1995.

Effect on the Near Field Shock Wave Pressure of Underwater Explosion of Aluminized Explosive at Different Initiation Modes

LI Jin-He, ZHAO Ji-Bo, TAN Duo-Wang,
WANG Yan-Ping, ZHANG Yuan-Ping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The underwater explosion near field shock waves propagation process of aluminized explosive HLZY-1 were observed by SJZ-30 and GSJ-15 high speed streak cameras. The explosives were initiated at the end surface, the side and the center. The streak curves of near field shock waves were digitized, and the pressure attenuation curves of shock wave were achieved. The experimental results indicate that the initiation mode has great effect on the original magnitude and the attenuation of near field shock waves peak pressure, which can provide some reference for design of warheads of underwater weapon and the evaluation of destroy efficiency.

Key words: initiation mode; underwater explosion; near field; shock wave; aluminized explosive