

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.05.006

两种含铝炸药水中近场冲击波传播规律研究^{*}

沈 飞 王 辉 余 然 张 磊

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为揭示 RS211 和 GUHL 两种含铝炸药水中爆炸近场冲击波的传播特性,采用高速扫描相机和阴影照相技术记录了近场冲击波沿柱形装药轴向的传播轨迹,结合 Rankine-Hugoniot 关系推算出了近场冲击波传播速度及阵面压力随传播距离的衰减规律,并与 TNT 炸药的结果进行了对比。同时,还结合近场冲击波的初始参数和 Goranson 关系式计算出了炸药的爆压值。结果表明,初始冲击波阵面压力由大到小的顺序为 RS211、TNT、GUHL,在压力的衰减过程中,铝粉的反应使得冲击波的压力衰减速率得到降低,且 GUHL 炸药近场冲击波阵面压力的衰减最为平缓。

[关键词] 爆炸力学;含铝炸药;水中爆炸;近场冲击波;高速扫描相机

[分类号] TD235.2⁺1 O389

引言

水中爆炸的近场冲击波对于目标的破坏具有重要作用,尤其是在精确打击过程中,能产生较强的毁伤效果,因此近场冲击波的传播特性成为水中兵器设计人员关注的一个重要因素^[1]。

由于水中爆炸近场的压力较高,超出一般压力传感器的测量范围,且测试结果也会受到较大的干扰,所以这方面的试验研究较少。目前主要采用高速扫描或分幅相机、锰铜计、PVDF 压力计等开展这方面试验工作,如 Kira 等^[2]利用高速扫描相机观测了球形 SEP 炸药水中爆炸近场冲击波轨迹线;Dorsett 等^[3]利用分幅和扫描相机获得了含铝炸药水中爆炸时清晰的图片及冲击波阵面的运动轨迹;Itoh 等^[4]采用扫描相机研究了柱形装药水中爆炸时沿径向的近场冲击波传播特性;赵继波等^[5-6]利用转镜式高速相机观测了圆柱形 TNT 及 RDX/Al 体系炸药水中爆炸时冲击波沿药柱轴向的传播轨迹,并推导出其近场阵面压力沿轴向的衰减规律;池家春等^[7]尝试利用锰铜计和 PVDF 压力计测量了 B 炸药水中爆炸近场冲击波的阵面压力。而对于水中兵器常采用的 RDX/TNT/Al 及 RDX/AP/Al 体系的炸药,这方面的研究却鲜见报道。

本研究针对这两种体系中的 RS211 (RDX/TNT/Al/Wax:60.8/19/17/3.2) 和 GUHL (RDX/AP/Al/黏结剂:35/32/23/10) 炸药(均以质量比),采用高速扫描相机观察水中爆炸近场冲击波的传播轨

迹,并分析了这两种炸药近场冲击波阵面压力衰减规律的差异。此外,作为参照,对 TNT 炸药进行了类似的试验研究。

1 试验部分

1.1 样品准备

试验样品为 TNT、RS211 和 GUHL 柱形装药,其质量均为 215 g,底面直径为 50 mm,长径比为 (1.2~1.4):1。TNT 药柱为铸装,密度为 1.59 g/cm³,RS211 和 GUHL 药柱均为浇注成型,其密度分别为 1.74 g/cm³ 和 1.82 g/cm³。传爆药为 JH-14 压装药柱,尺寸为 Ø25 mm×25 mm,密度为 1.67 g/cm³,将传爆药柱粘接在主装药上方的中心位置处。

1.2 光学测试原理

炸药在水中爆炸以后产生的冲击波在传播过程中,由于水介质受到较大压力,导致冲击波阵面所到之处,水的密度增大,而使得透明度大大降低。此时,若在水箱的后面设置一个很强的闪光灯,则随着冲击波的传播,移动的暗层能在高速扫描相机的底片上留下相应的轨迹,该轨迹即为水中冲击波传播的轨迹。

1.3 试验装置及布局

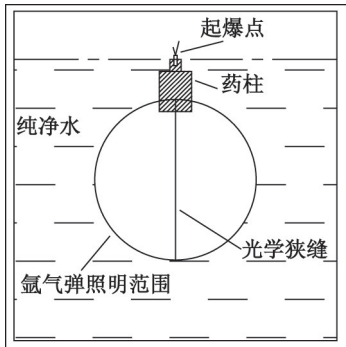
试验在 400 mm×400 mm×400 mm 的正方体水箱中进行,为保证试验底片的清晰度,在水箱的制作过程中尽可能选用厚度小的玻璃,但同时也要使其

^{*} 收稿日期:2014-02-24

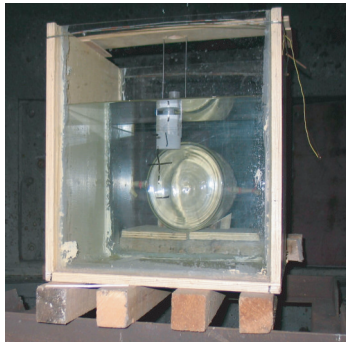
基金项目:国家安全重大基础研究项目

作者简介:沈飞(1983~),男,硕士,工程师,主要从事炸药爆轰性能试验与理论研究。E-mail: shen02@163.com

能够承受水的静态压力。采用两根细铁丝将药柱悬挂在水箱的盖板上,调节盖板,使得药柱处于水箱的中部,且药柱轴线与水面垂直,药柱全部没入水中。试验所用相机为 SJZ-15 型转镜式高速扫描相机,速度定为 3 mm/μs,采用 Ø200 mm × 300 mm 氩气弹作为试验的照明设备。试验时,相机的狭缝对准药柱的轴线,氩气弹放置于水箱后方,其轴线与相机光轴重合。试验布局及照片如图 1 所示。此外,为了获得试验底片的放大比,可在水箱前端玻璃上粘贴一个标尺,然后采用高速相机拍摄静止圆孔像,起爆前将标尺取回。



(a) 示意图



(b) 试验装置

图 1 试验测试布局

Fig. 1 Layout of test

2 结果与讨论

2.1 数据处理

通过对冲击波传播迹线的扫描底片(其典型形状如图2所示,横向表示时间,纵向表示传播距离)进行数字化判读,并结合图像的放大比及相机扫描速度,便得到冲击波传播距离随时间变化的一系列数据点(其曲线如图3所示),然后对其进行拟合。

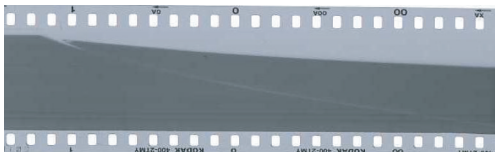


图 2 典型扫描迹线(GUHL)

Fig. 2 Typical scanning beam (GUHL)

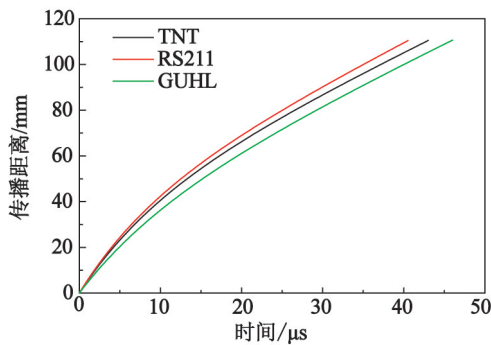


图 3 冲击波传播距离随时间变化的曲线

Fig. 3 Distance-time curves of shock wave

本研究采用一种非线性函数对试验数据进行拟合,其具体形式如下^[4]:

$$y = \sum_{i=1}^n A_i [1 - \exp(-B_i t)] + c_0 t. \quad (1)$$

式中: y 为冲击波沿装药轴向的传播距离,mm; c_0 为水中的声速,1.483 mm/μs; t 为时间,μs; A_i 、 B_i 均为拟合参数。将式(1)对时间 t 求导,可获得冲击波的传播速度 u_s :

$$u_s = \sum_{i=1}^n A_i B_i \exp(-B_i t) + c_0. \quad (2)$$

从式(2)可以看出,随着 t 的增大,冲击波的传播速度不断下降,且逐渐趋向于 c_0 ,这也符合冲击波在水中的传播规律。在数据处理过程中,一般 $n = 2$ 时,就具有很好的拟合精度,其具体拟合系数列于表 1 中。

表 1 拟合系数

Tab. 1 Fitting coefficients

炸药	A_1 / mm	$B_1 \times 10^{-1} / \mu\text{s}^{-1}$	A_2 / mm	$B_2 \times 10^{-3} / \mu\text{s}^{-1}$
TNT	35.216	1.038	76.267	3.950
RS211	35.316	1.096	110.878	3.710
GUHL	28.330	0.984	40.527	9.560

2.2 近场冲击波参数的变化

由于狭缝方向与冲击波阵面垂直,则 u_s 为波阵面上的法向速度。根据水的冲击绝热方程及动量守恒关系,可以获得冲击波的阵面压力 p_s ^[2]:

$$u_s = c_0 + 25.306 \lg(1 + u_p/5.19); \quad (3)$$

$$p_s = \rho_{w0} u_s u_p. \quad (4)$$

式中: u_p 为冲击波后的粒子速度,mm/μs; ρ_{w0} 表示水的初始密度,取 1.0 g/cm³。此外,该试验所得数据还可以根据 Goranson 公式(5)计算出被测炸药的爆压 p_{CJ} :

$$p_{CJ} = \frac{1}{2} u_{p0} (\rho_{w0} u_{s0} + \rho_0 D). \quad (5)$$

式中: u_{s0} 和 u_{p0} 分别表示 $y = 0$ 时水中的初始冲击波

传播速度和波后的粒子速度; ρ_0 为炸药的密度, g/cm^3 ; D 为炸药的爆速, $\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

结合式(1) ~ 式(5), 可计算出水中爆炸近场范围内, 轴向冲击波的传播速度及冲击波阵面压力的变化曲线, 分别如图 4 和图 5 所示, 而初始参数及炸药的爆压则列于表 2 中。

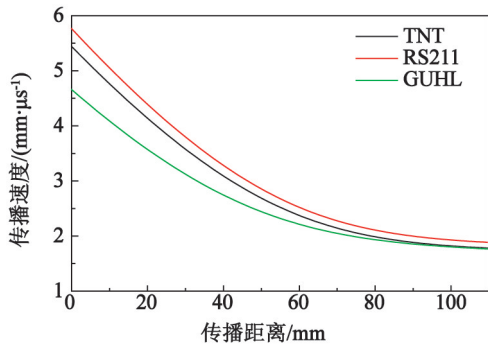


图 4 冲击波传播速度随距离变化的曲线

Fig. 4 Propagation velocity of shock wave as a function of distance

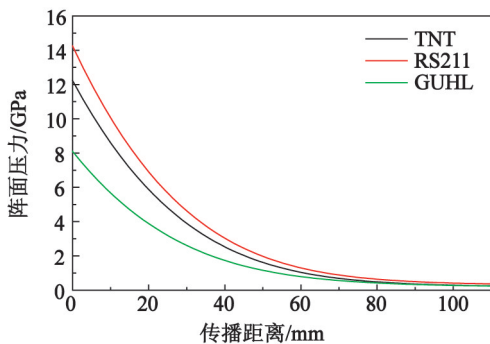


图 5 冲击波阵面压力随距离变化的曲线

Fig. 5 Shock front pressure as a function of distance

表 2 水中爆炸近场冲击波的初始参数

Tab. 2 Initial parameters of near-field shock wave by underwater explosion

炸药	$D/$ ($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	$u_{s0}/$ ($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	$u_{p0}/$ ($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	$p_{s0}/$ GPa	$p_{c3}/$ GPa
TNT	6.86	5.44	2.25	12.24	18.38
RS211	7.68	5.76	2.47	14.24	23.64
GUHL	6.62	4.66	1.74	8.10	14.52

注: p_{s0} 为水中初始冲击波阵面压力。

水中冲击波的初始阵面压力主要与炸药的爆压有关, 而传播速度则主要是由阵面压力的由大到小决定的。由于这 3 种炸药爆压的由大到小顺序为 RS211、TNT、GUHL, 所以它们在水中爆炸初期, 其冲击波阵面压力和传播速度的大小顺序也是一样的(图 4 和图 5)。此外, 在冲击波的传播过程中, 波阵面上存在不可逆的能量损耗, 主要是冲击波部分动

能转换成了介质的热能, 且冲击波的阵面压力越大, 能量的不可逆损失量越大^[8], 这也使得阵面压力衰减速率存在较大的差异(图 6)。

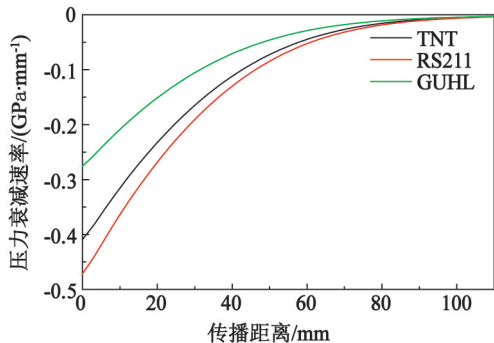


图 6 阵面压力衰减速率随距离变化的曲线

Fig. 6 Pressure attenuation rate of shock front as a function of distance

从图 4、图 5 和图 6 中可以看出, GUHL 炸药由于含有大量的 AP, 其爆速和爆压相对较低, 导致其初始冲击波压力及传播速度较低, 但这也降低了传播过程中的热损失能, 且该炸药的铝氧比约为 0.4, 其水中爆炸的冲击波能在 RDX/AP/Al 体系的炸药中相对较高^[9-10], 铝粉与爆轰产物的后续反应为冲击波的传播提供了持续的能量补充, 使得冲击波阵面压力的衰减相对平稳、缓慢。

虽然 TNT 炸药的初始冲击波压力比 GUHL 高一些, 但是其传播过程中的热损失能也相应增加, 且后续缺乏能量补充, 导致冲击波传播速度及压力衰减较快, 在传播距离约为 80 mm 时, 其阵面压力已下降至 0.48 GPa, 传播速度下降至 1.99 mm/ μs , 而该距离处 GUHL 炸药产生的冲击波阵面压力为 0.42 GPa, 传播速度为 1.93 mm/ μs , 两者差距已较小。

RS211 炸药中的 RDX 和 TNT 成分比例相对较高, 其初始冲击波压力达到 14.24 GPa, 在冲击波传播初始阶段, 衰减速率相对较快, 与 TNT 炸药比较接近, 但由于铝粉的后续反应, 使得其传播至 60 mm 后, 压力的衰减速率比 TNT 明显变慢, 而逐渐与 GUHL 接近, 这一点从图 4 的冲击波传播速度曲线可以更清晰地看出, 传播至 80 mm 后, RS211 和 TNT 的波速曲线之间的差距变化较小。虽然 RS211 炸药水中爆炸的近场冲击波阵面压力高于 GUHL 炸药, 但文献[9]的试验结果显示, RS211 炸药的水中爆炸冲击波能仅为 1.35 倍 TNT 当量, 而铝氧比约为 0.4 的 RDX/AP/Al 体系炸药约达到 1.7 倍 TNT 当量。这也表明 AP 的加入可以使 GUHL 炸药中的铝粉反应更充分、持续释能时间更长, 使得冲击波在传播至一定距离后, 其压力甚至可能高于 RS211 炸

药,这方面的试验研究可以通过增大相机的观测视场或者采用压力传感器进行。

3 结论

1)水中冲击波的初始阵面压力及传播速度主要与炸药的爆压有关,其由大到小的顺序均为 RS211、TNT、GUHL。

2)在冲击波的传播过程中,其阵面压力迅速衰减,但由于含铝炸药中的铝粉与爆轰产物存在后续反应,从而减缓了阵面压力的衰减速率。GUHL 炸药同时还含有大量的 AP,使得其反应周期较长,铝粉反应更充分,其衰减速率比 RS211 和 TNT 更为缓慢。

参 考 文 献

- [1] 李金河,赵继波,谭多望,等.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[J].高压物理学报,2012,26(3):289-293.
Li Jinhe, Zhao Jibo, Tan Duowang, et al. Effect on the near field shock wave pressure of underwater explosion of aluminized explosive at different initiation modes [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(3): 289-293.
- [2] Kira A, Fujita M, Itoh S. Underwater explosion of spherical explosives [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1-3):64-68.
- [3] Dorsett H, Cliff M D. Detonation front curvature measurements and aquarium tests of tritonal variants[R]. Defence Science and Technology Organisation Edinburgh (Australia) Weapons Systems Division, AMRL, DSTO-TR-1411, 2003.
- [4] Itoh S, Suzuki O, Nagano S, et al. Investigations of fundamental properties of underwater shock waves by high speed photography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(3):226-230.

- [5] 赵继波,谭多望,李金河,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.

Zhao Jibo, Tan Duowang, Li Jinhe, 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.

- [6] 赵继波,李金河,谭多望,等.铝氧比对水中爆炸近场冲击波的影响[J].含能材料,2009,17(4):420-423.

Zhao Jibo, Li Jinhe, Tan Duowang, et al. Effect of ratios of aluminum to oxygen on shock wave of cylindrical charge at underwater explosive close-field [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(4):420-423.

- [7] 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.

Chi Jiachun, Ma Bing. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B-3 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(3):199-204.

- [8] Л П 奥尔连科. 爆炸物理学(下册)[M]. 孙承纬,译. 北京:科学出版社,2011.

Л. П. ОПЛЕХКО. Explosion Physics [M]. Beijing: Science Press, 2011.

- [9] 周霖,杨启先.铝氧比对含铝炸药水中爆炸冲击波的影响[J].兵工学报,2008,29(8):916-919.

Zhou Lin, Yang Qixian. The effect of Al/O ratio on underwater explosion shock waves of aluminium-containing explosives [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(8):916-919.

- [10] 黄兴中,王志军.水下爆炸气泡脉动的数值研究[J].爆破器材,2013,42(6):19-23.

Huang Xingzhong, Wang Zhijun. Numerical study of underwater explosion bubble pulse [J]. Explosive Materials, 2013, 42(6):19-23.

Propagation Characteristics of Close-field Shock Wave for Two Aluminized Explosives by Underwater Explosion

SHEN Fei, WANG Hui, YU Ran, ZHANG Lei

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] To understand the propagation characteristics of close-field shock waves for aluminized explosives RS211 and GUHL by underwater explosion, propagation paths along the longitudinal direction of charge cylinder were recorded by shadow photography using a high speed scanning camera and processed to distance-time curves of close-field shock wave. Their attenuation laws of propagation velocity and front pressure were deduced using the Rankine-Hugoniot relationship and compared with these of TNT. Furthermore, with the initial parameters of shock wave the detonation pressures of these explosives were calculated based on Goranson relation. The results show the decreased initial pressures of shock wave in the order of RS211, TNT and GUHL, decreased speed of front pressure attenuation due to the reaction of aluminum which is minimal in GUHL.

[KEY WORDS] explosion mechanics; aluminized explosive; underwater explosion; shock wave at close-field; high speed scanning camera