

文章编号: 1006-9941(2009)04-0420-04

铝氧比水中爆炸近场冲击波的影响

赵继波, 李金河, 谭多望, 孙永强, 张光升

(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重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要:为揭示铝氧比水中爆炸近场冲击波压力的影响,对三种不同铝氧比的 RDX/Al 体系柱形装药进行了水中爆炸实验,通过高速扫描方法求解了水中爆炸近场冲击波峰值压力随传播距离的衰减规律,分析了所含铝氧比对冲击波初始压力峰值和压力峰值衰减的影响。结果表明,Al/O = 0 时,初始冲击波峰值压力达到了 18.95 GPa, Al/O = 0.4 时初始冲击波峰值压力约为 13.66 GPa,而 Al/O = 0.7 时初始冲击波峰值压力约为 8.35 GPa,而峰值压力的衰减速率也随着铝含量的增加而降低。铝粉参加反应的时间、反应的程度等因素对近场冲击波初始峰值压力和峰值压力的衰减影响显著。

关键词:爆炸力学; 含铝炸药; 水中爆炸; 铝氧比; 近场冲击波

中图分类号: TJ55; O382.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.011

1 引言

炸药在水中爆炸时,其能量释放的特点及对目标的毁伤机理与陆地、空中爆炸有很大区别。因为衡量水中兵器所用炸药能量的标准不能仅局限于高爆速、高爆压的传统概念^[1],还要求装药具有高爆热的属性,目前所使用的高爆热炸药都是非理想含铝炸药。在炸药中掺入一定的铝粉,可以降低炸药的爆速、爆压。但铝粉在后期的放热反应却能明显提高爆炸威力,这种独特性质使它在水中兵器战斗部的装药方面得到广泛应用。

Baudin 和 Bergues^[2]认为常用水中战斗部的高能含铝炸药,具有与铝的氧化有关系的特殊性质,并分析了以奥克托今(HMX)和高氯酸铵(AP)为基的含铝炸药爆轰中铝的反应特征。Goldstein^[3]进行了加入铝粉之后的铵油炸药(ANFO)的水箱实验。测试结果表明,将标准 ANFO 装药的铝粉含量提高到 11% 后,冲击波压力将大幅度提高;当铝粉的含量超过 19% 后,冲击波压力只有轻微的提高,这说明铝粉含量对于提高装药的水中爆炸性能有一个最大值。Deiter 等^[4]为了解释含铝炸药在水中爆炸的反应机理和爆炸产物,对一系列含铝量为 0~20% 的 PETN/Al 炸药在水中和惰性气体下的密闭容器进行了爆轰实验,分析了气相和固相爆炸产物,认为未反应铝的数量随炸药的铝含量增加而增加,在水中爆炸比在惰性气体中爆炸的

未反应铝的数量稍多。Philip^[5]提出了含铝炸药爆轰反应模型,CJ 反应区内少部分铝粉参加反应,CJ 面后大部分铝粉与中间产物反应形成最终产物。辛春亮等^[6]用水中爆炸实验数据拟合出了 Miller 能量释放模型参数,能够较好地表达含铝炸药水中爆炸时的尺度效应。Swisdak^[7]证实了铝粉的加入将会对水中冲击波能和气泡能产生影响。其中 Al/O 为炸药中铝原子和氧原子的摩尔比,当 Al/O = 0.4 左右时,冲击波能达到最大。对于冲击波起决定破坏作用的水中兵器战斗部装药来说,应选择适当的铝氧比,得到最大的冲击波能,以求达到对舰船的最佳毁伤效果。

本研究对三种不同铝氧比的 RDX/Al 体系柱形装药进行了水中爆炸实验,分析了所含铝氧比例对冲击波初始压力峰值和压力峰值衰减的影响,为水中兵器战斗部装药提供实验基础。

2 测试原理及实验方法

2.1 水中爆炸近场峰值压力的光学测试原理

尽管可以在装药近场布置传感器进行压力测试,但近场情况复杂,同时单个传感器只进行某一测点的测量,信息比较离散。利用高速摄影技术记录水中冲击波的传播轨迹,可以得到冲击波传播及压力变化的连续信息,进而较准确地研究含铝炸药水中爆炸的近场冲击波特性的。

水中爆炸产生的冲击波使水层受到突然压缩,并形成一移动的暗层。在水箱背面设置强光源,冲击波传到之处,光源发出的亮光被暗层挡掉,冲击波传播轨迹被记录下来。利用高速扫描相机记录近场冲击波的运动迹线,图像经数字化后由非线性曲线拟合技术

收稿日期:2008-12-30;修回日期:2009-05-13

基金项目:国家安全重大基础研究项目(51335010201)

作者简介:赵继波(1977-),男,助理研究员,硕士,主要从事爆炸与冲击方面的研究。e-mail: abcdef_z@163.com

得到冲击波阵面法向速度,结合水介质的 Rankine-Hugoniot 关系^[8],推算出近场的冲击波阵面压力。

2.2 实验状态及测试项目

水中冲击波的初始参数与炸药/水界面处爆轰产物参数遵循连续条件,因此,初始冲击波与炸药的爆轰参数有关,通过改变炸药中各成分的比例,观测爆轰参数的变化对初始冲击波及近场冲击波的影响。本实验选用典型的含铝炸药 RDX/Al,其质量为 300 g,长径比为 1.2 : 1,采用 PETN 作为传爆药,端面一点起爆,铝氧比的变化主要是通过调节炸药中 Al 和 RDX 的含量而实现。实验所用炸药的 Al/O 比例分别为 0、0.4、0.7,其相关参数见表 1。

表 1 RDX/Al 炸药的相关参数

Table 1 Parameters of explosive consisting of RDX and Al

No.	proportion of Al/O	density /g · cm ⁻³	size /mm	mass /g
1	0	1.655	Φ68.79 × 60.13	299
2	0.4	1.804	Φ58.43 × 60.09	300
3	0.7	1.880	Φ56.39 × 60.17	300

采用 SJZ-30 型高速扫描相机,对柱形装药轴向上的近场冲击波传播迹线进行高速记录。图 1 给出了实验现场照片,整个实验装置位于 0.5 m × 0.25 m × 0.5 m 的透明玻璃水箱里,采用氙灯线光源照明。图中标尺长度为 170 mm,根据静止像可得到放大比,便于对扫描图像进行数字化处理;同时标尺还确定了扫描的位置和方向,为狭缝与氙灯的调节提供参考。调整狭缝、标尺和氙灯位于同一平面上,起爆前将标尺从水箱中取出。

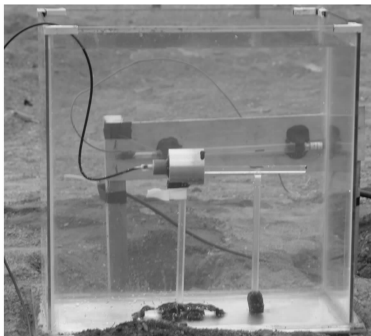


图 1 实验照片

Fig. 1 Photograph of experimental set-up

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

图 2 显示了沿炸药轴向扫描后得到的冲击波迹线典型图像,其中胶片长度方向表示扫描记录冲击波传

播的时间,垂直于胶片长度方向表示狭缝方向上冲击波偏离药柱表面的距离。数据处理时首先根据放大比和扫描迹线的边界提取对图像进行数字化处理,然后对数字化后的曲线进行拟合,根据结果得到冲击波速度。再通过法向速度和 Rankine-Hugoniot 关系,即可得到冲击波阵面压力 p_s 。

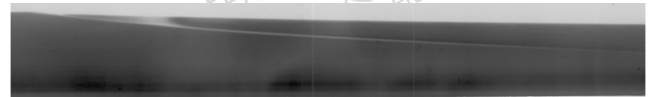


图 2 典型扫描迹线

Fig. 2 Typical scanning beam

Itoh^[9]等采用非线性拟合曲线作为扫描迹线的距离-时间函数,其形式如下:

$$x = \sum_{i=1}^n A_i [1 - \exp(-B_i t)] + \frac{C_0}{D} t \quad (1)$$

式中, t 为时间; x 为在装药轴向上冲击波偏离药柱端面的距离; A_i 、 B_i 均为拟合系数, A_i 为冲击波强度大小, B_i 为冲击波衰减时间长短; C_0 为水中声速, $1.46 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; D 为炸药的爆速,已知 TNT 密度为 $1.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,根据爆速-密度关系曲线, $D = 6.844 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该式具有如下优点:一是它的导数单调,不会产生不合理的波动;二是它能很好地表现冲击波在水中传播的规律。当 t 趋于 0 时,其导函数迅速增加,符合爆轰产物撞击水时产生冲击波并迅速达到其最大速度值的物理规律;当 t 趋于无穷大时,其导函数趋于一恒定值,符合冲击波传到无穷远处后衰减为水中声速的物理规律。由此可判定式(1)中的最后一项是为了描述冲击波远场传播而引入的,在近场冲击波传播的研究范围内可以对式(1)进行简化,得到式(2)。

$$x = x_0 + \sum_{i=1}^n a_i [1 - \exp(-b_i t)] \quad (2)$$

式中, a_i 、 b_i 为简化后的拟合系数; x_0 为一常数,表示数字化底片时的偏差调整项,使数据拟合更精确。一般来说式(2)取前两项就能较好地数字化曲线进行拟合。

由于选择的相机狭缝方向与冲击波阵面垂直,所以得到的冲击波速度可认为是波阵面上轴对称处的法向速度。通过法向速度和 Rankine-Hugoniot 关系,可以得到冲击波阵面压力 p_s ,见式(3)。其中, ρ_0 为水的密度, u_x 为冲击波速度, u_p 为冲击波后流场粒子速度。

$$\begin{cases} p_s = \rho_0 u_x u_p \\ u_x = 1.483 + 25.306 \lg(1 + u_p/5.19) \end{cases} \quad (3)$$

结合式(2)和式(3),可求得爆炸近场冲击波在沿

狭缝方向传播时,冲击波压力峰值随传播距离的变化规律。根据上述方法可得到不同铝氧比条件下RDX/Al含铝炸药水中爆炸近场冲击波沿相机狭缝方向(药柱轴线方向)传播时,峰值压力随传播距离的变化规律,见图3所示。

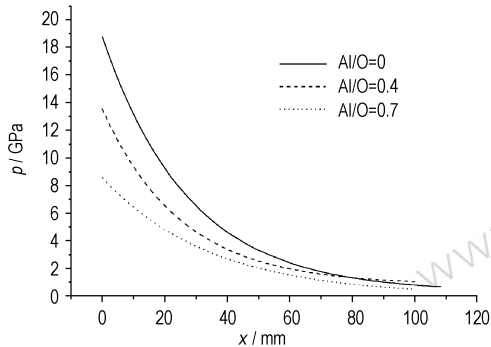


图3 不同铝氧比RDX/Al炸药的峰值压力曲线对比

Fig.3 Comparison of peak pressure curves of RDX/Al explosive with various ratios of aluminum to oxygen

3.2 结果分析

从图3中可看出,Al/O=0时,初始冲击波压力最高,达到了18.95 GPa,Al/O=0.4时初始冲击波峰值压力约为13.66 GPa,而Al/O=0.7时初始冲击波峰值压力约为8.35 GPa。可见,不同铝氧比炸药的初始冲击波压力具有很大差别。分析认为,对于不同铝氧比的炸药,其中RDX含量以及反应程度决定了初始冲击波峰值压力的大小,当Al/O=0时,RDX的含量最大,并且发生了充分反应,因此,其初始冲击波峰值压力最高。而Al/O=0.7 RDX含量最少,因此其初始冲击波峰值压力最小。

Al/O=0.7的炸药水中爆炸时,峰值压力衰减平稳、缓慢,这主要是由于初始冲击波峰值压力较低,且铝粉与RDX爆轰产物进行了比较长时间的持续反应,在冲击波衰减过程中为其提供了能量补充。而Al/O=0的炸药爆炸时,峰值压力衰减较快,这主要是由于炸药的初始峰值压力较高,没有铝粉的反应为冲击波提供能量支持,因此,其压力衰减速率较快。在约100 mm处,其峰值压力和Al/O=0.7的炸药更加接近。Al/O=0.4的炸药爆炸时,由于初始冲击波峰值压力较高,因此,在其冲击波传播初始阶段,衰减速率相对较快,和Al/O=0的炸药比较接近,但是在约40 mm后,其衰减速率比Al/O=0的炸药明显变慢,逐渐低于Al/O=0的炸药,可能是由于铝粉在后期反应为冲击波提供了能量补充,在约80 mm之后,其冲击波峰值压力反而大于Al/O=0炸药在相同距离处产

生的冲击波峰值压力。

可见,炸药中铝氧比对近场冲击波压力有很大影响。不同铝氧比炸药在水中爆炸存在较大的差异,铝氧比越大,铝含量越多,RDX的含量减少,必然会影响炸药的爆轰性能,使近场初始冲击波峰值压力降低。Al/O=0.7时初始冲击波峰值压力比Al/O=0时下降约55.9%,这是因为此时存在着未反应的铝粉,未反应铝粉是惰性的,起到稀释作用,大大降低了冲击波的初始压力值。初始冲击波峰值压力越低,其冲击波的衰减速率越慢。另外,炸药水中爆炸时,铝粉在后期的反应可为水中爆炸冲击波的传播提供能量补充,进一步降低冲击波的衰减速率。一般地,炸药中铝含量越多,初始冲击波峰值压力越低,峰值压力的衰减速率越慢。

4 结论

(1) 对于含不同铝氧比的RDX/Al体系的含铝炸药来说,其中RDX含量以及反应程度决定了初始冲击波峰值压力的大小,Al/O=0时RDX含量最高,得到的峰值压力最大;Al/O=0.7时RDX含量最少,得到的峰值压力最小。

(2) 铝粉能在后期与RDX爆轰产物进行比较充分的持续反应,在冲击波衰减过程中为其提供能量补充,并能减缓冲击波峰值压力的衰减速率,且随着Al/O比例的增大,这种减缓压力衰减速率的效应越明显。

参考文献:

- [1] 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.
YU Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling. Underwater shock wave performance of explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 182-186.
- [2] Baudin G, Bergues D. A reaction model for aluminized PBX applied to underwater explosive calculation [C] // Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts: Office of Naval Research, 1993: 855-863.
- [3] Goldstein S, Johnson J N. Aquarium tests on aluminized ANFO [C] // Proceedings Seventh International Detonation Symposium. Annapolis, Maryland: Naval Surface Weapons Center. 1980: 624-633.
- [4] Deiter J S, Wilmot G B. Detonation chemistry of underwater explosives [C] // Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts: Office of Naval Research. 1993: 142-152.
- [5] Philip J M. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives [J]. *Materials Research Society*, 1996, 21(2): 413-420.
- [6] 辛春亮,徐更光,刘科种,等. 含铝炸药Miller能量释放模型的应用[J]. 含能材料,2008,16(4): 436-440.
XIN Chun-liang, XU Geng-guang, LIU Ke-zhong, et al. Application of

- Miller energy release model for aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 436-440.
- [7] Swisdak M M. Explosion effects and properties: Part II. Explosion effect in water[R]. Naval Surface Weapons Center Technical Report, NSWC/NOL TR 76-116: 1997.
- [8] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 324-325.
- [9] Itoh S, Suzuki O, Nagano S, et al. Investigations on fundamental properties of underwater shock waves by high speed photography[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 85(3): 226-230.

Effects of Ratios of Aluminum to Oxygen on Shock Wave of Cylindrical Charge at Underwater Explosive Close-field

ZHAO Ji-bo, LI Jin-he, TAN Duo-wang, SUN Yong-qiang, ZHANG Guang-sheng

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Three kinds of cylindrical charges based on RDX with different ratios of aluminum to oxygen were tested through underwater explosion. Attenuation law of shock wave peak pressure versus transmission distance at close-field underwater explosion was resolved by high-speed scanning. The effects of Al/O ratios on initial shock wave peak pressure and attenuation were analyzed. Results show that the initial shock wave peak pressure achieves 18.95 GPa, 13.66 GPa and 8.35 GPa respectively when the Al/O ratios are 0, 0.4 and 0.7. The speed of peak pressure attenuation decreases with the increasing of aluminum content. The factors, such as the time of aluminum beginning to react and the degree of reaction, have remarkable effects on shock wave peak pressure at close-field and attenuation of peak pressure.

Key words: explosion mechanics; aluminiferous explosive; underwater explosion; ratio of aluminium to oxygen; shock wave at close-field



读者·作者·编者

Dr. Manfred Held 和 Dr. Paul Wanninger 来绵讲学

报告人: Dr. Manfred Held, Dr. Paul Wanninger

时间: 2009年9月7日~11日 地点: 绵阳市绵州酒店

联系人: 高晓敏 电话: 0816-2485376

time	presentation	presenter
9月7日	Detonation Phenomena	Manfred Held
	Raw Materials for High Explosives (RDX, HMX, PETN, CL20, NTO, NQ, HNS, TATB)	Paul Wanninger
	Desired High Explosive Performances	Manfred Held
	High Explosive Components (Plastisizers, Binders, Curry Agents, Bonding Agents, Burning Modifier, Flame Depression Agents, Metal Powders)	Paul Wanninger
9月8日	Introduction in Production of High Explosives (Melt Cast, Cure Cast, Pressed)	Manfred Held
	More Details to the High Explosive Production Requirements	Paul Wanninger
	Sensitivity, Survivability, Initiability Tests	Manfred Held
	Test Results with PBX Charges and Warheads	Paul Wanninger
9月9日	Propellants (NG, NC, AND, Degon, AP, AN, GAP, Nitramins)	Paul Wanninger
	High Explosives Used as Ejection Charges	Manfred Held
	MIL STD1205 (Fast Cookoff, Slow Cookoff, Bullet Impact, Projectile Impact, Shaped Charge Jet Impact, SC Secondary Fragments)	Manfred Held
	Detmatimbehaviour (Detonation Velocities, Guerney Velocities, Critical Diameter, GAP Tests)	Paul Wanninger
9月10日	High Explosive Charges for Shaped Charges	Manfred Held
	Initiation Threshold by Fragments	Manfred Held
	Initiation Thresholds by Shaped Charge Jets	Manfred Held
	Dual Composition Explosives	Manfred Held
9月11日	Introduction into Corner Turning Distance	Manfred Held
	Corner Turning Distance Test Methods	Manfred Held
	Diagnostic with FXR of Detonation Events	Manfred Held
	Demilitarisation High Explosives and Propellants	Paul Wanninger