DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0157-05

铝粉含量和粒度对 CL-20 含铝炸药水中爆炸反应特性的影响*

胡宏伟[1],严家佳[1],陈 朗[2],郭 炜[1],宋 浦[1]
(1. 西安近代化学研究所,陕西 西安 710065;
2. 北京理工大学,北京 100081)

摘要: 为了研究 CL-20 基含铝炸药的爆炸反应机理,利用水中爆炸实验,测量了不同铝粉含量和粒度的 CL-20 炸药水中爆炸的冲击波参数、二次压力波参数,计算了冲击波能和气泡能。结果表明,水中爆炸的冲击波能和气泡能表征了爆轰和二次反应两个阶段的炸药爆炸能量分配,CL-20 炸药中的铝粉主要在二次反应阶段发生反应,只有少部分的铝粉参与了早期的爆轰反应。气泡脉动形成的二次压力波能描述铝粉含量和粒度对二次反应过程的影响,铝粉含量对炸药的二次反应有显著的影响;铝粉粒度对炸药的水下爆炸的初始冲击波参数、冲击波能和气泡能的影响很小,对铝粉与爆轰产物的二次反应速率影响较大。

关键词: 爆炸力学;气泡冲量;水中爆炸;CL-20 炸药;铝粉含量;二次反应;含铝炸药
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)能量密度高、化学与热安定性好,是一种具有重要应用前景的高能量密度化合物。近年来,已成功研制了多种含 CL-20 混合炸药,如 PAX-12[1-2]、PBXW-16[3]、LX-19[4]、PAX-11[5]和 PAX-29[6]等,这些配方已接近或达到实用水平,在高爆战斗部和反装甲战斗部中都得到了应用。

含铝炸药是一种典型的非理想炸药,广泛应用于水中和空中爆炸的武器中,深入研究含铝炸药的爆轰反应机理,对含铝炸药的研制和使用具有重要的意义。M. A. Cook[7]认为,含铝炸药爆轰时在 CJ 面之前,铝粉并不参加化学反应,即使铝粉参与了化学反应,但在到达 CJ 面时也远远没有完全反应,因为铝粉的反应是当爆轰产物膨胀时才开始并逐渐完成的。P. J. Miller[8]提出了一种含铝炸药爆轰反应模型,该模型把反应过程主要分为两个阶段:第 1 阶段(CJ 反应区内),含铝炸药的炸药组分爆轰分解形成中间产物,同时少部分铝粉参加反应;第 2 阶段(CJ 面以后),大部分铝粉与中间产物反应形成最终产物。D. J. Pastine 等[9]发现,含铝炸药的爆轰是稳定的 ZND 结构后面跟一个非稳定的反应区,铝粉在稳定区内和后面的非稳定区内都参加反应。薛再清等[10]研究了主要成份为 RDX/TNT/Al 的含铝炸药的爆轰,认为铝粉在反应区内不参加反应或者反应很少,在 CJ 面后才与爆轰产物进行二次反应释放能量。陈朗等[11]用激光速度干涉仪测量了 RDX 基含铝炸药加速金属过程和与透明窗口界面的粒子速度,发现铝粉主要在爆轰反应后期同爆轰产物反应释放能量,铝粉尺寸和装药条件对炸药爆轰性能有显著影响。

虽然对 RDX、HMX 基含铝炸药的反应机理进行了大量的研究,但 CL-20 作为一种新型高能量密度化合物,具有更高的能量、爆速和爆压,还需研究 CL-20 基含铝炸药的爆轰机理,有效指导该炸药的使用及研制新型的含铝炸药。本文中,利用水下爆炸冲击波与高压气团的脉动开展 CL-20 基含铝炸药水下爆炸的能量释放特性的研究,测试其水中爆炸的冲击波、二次压力波和气泡参数,研究铝粉含量和粒度对 CL-20 基含铝炸药爆炸反应的影响,拟为 CL-20 炸药的研制及其在武器中的应用提供参考。

* **收稿日期**: 2015-04-23; **修回日期**: 2015-07-13
基金项目: 总装重大预先研究专项项目(00401030701)
第一作者: 胡宏伟(1982—),男,硕士,副研究员; **通信作者**: 宋 浦,songpu73@163.com。

1 实 验

1.1 样品

样品是以 CL-20 炸药为主体的含铝炸药,铝粉为圆球形。共设计了 7 种样品,样品 1、4～6 中的铝粉平均直径为 17 μm,样品 7 中的铝粉平均直径为 3 μm,样品 3 不含铝粉,样品 2 以粉状氟化锂(LiF)代替 Al 粉。LiF 的热力学性能与铝相似,但在爆轰中保持惰性,能够反映铝粉没有参加反应下炸药的爆轰性能。

样品 1、2 具有相同的密度和质量,用于对比样品在相同性能参数条件下的反应特性。LiF 代替 Al 粉后,由于 LiF 的密度(2.635 g/cm^3)略低于铝粉的密度,为了保持相同密度,样品 1 未压制成较大的密度,因此,样品 1 的密度略低于样品 4。样品 4～6 所含铝粉逐渐增大,用于研究铝粉含量对 CL-20 基炸药反应特性的影响。样品 7 与样品 4 密度、组分相同,铝粉的粒度不同,是为了对比不同粒度的铝粉对炸药爆炸反应特性的影响。样品全部为压装柱形炸药,具体炸药组分见表 1。

表 1 炸药组分

Table 1 Explosives formulation

样品	ρ/(g·cm^{-3})	m/g	ω(CL-20)/%	ω(Al)/%	ω(LiF)/%	ω(黏结剂)/%
1	1.94	12.04	80.0	15.0	0	5
2	1.94	12.05	80.0	0	15	5
3	1.94	18.20	95.0	0	0	5
4	2.00	19.20	81.5	13.5	0	5
5	2.06	19.80	70.0	25.0	0	5
6	2.11	20.50	60.0	35.0	0	5
7	2.00	19.20	81.5	13.5	0	5

1.2 布局

水池∅12 m×10 m,水深 9.5 m,试样入水深度 4.7 m,可近似为无限水域[12]。冲量传感器和水下激波压力传感器距离爆心的水平距离均为 0.45 m,依据气泡半径的计算公式[13],传感器刚好处于气泡半径的边界外,使传感器不影响气泡脉动过程。传感器的入水深度与炸药试样一致。

测试系统包括美国 PCB 公司的 138 型 ICP 压电式电气石水下激波传感器(测量冲击波参数)、耐压硅压阻式压力传感器(测量二次压力波参数)和 482A 型信号适配器,微测公司的高低频数据记录仪。冲击波信号的采样频率为 10 MHz,气泡脉动信号的采样频率为 100 kHz。

2 结果与分析

2.1 铝粉对水中爆炸能量输出结构的影响

CL-20 基含铝炸药的水中爆炸冲击波与气泡参数和能量见表 2,表中 $p_{s,max}$ 为冲击波峰值压力,I_s 为冲击波的冲量,e_s 为冲击波能,e_b 为气泡能。

表 2 CL-20 基炸药的水下爆炸冲击波与气泡参数和能量

Table 2 Shock wave and bubble parameter and energy of underwater explosion for CL-20-based explosives

样品	$p_{s,max}$/MPa	I_s/(Pa·s)	e_s/(MJ·kg^{-1})	e_b/(MJ·kg^{-1})
1	24.25	916.4	1.229	3.319
2	23.11	797.5	1.039	1.919

由表 2 可知,相同比例距离时,用惰性组分 LiF 代替 Al 粉后,在实验误差范围内,可认为二者的冲击波峰值压力基本一致,铝粉在 CJ 面上没有参与反应。冲击波冲量和冲击波能降低了约 15%,这表明,在 CJ 面后的爆轰产物的快速膨胀初期,少部分的铝粉发生反应支持了冲击波。气泡能降低了 70%

以上，这是由于炸药爆轰的反应时间为微秒量级，铝粉的反应时间在百微妙量级，该装药量下气泡脉动周期在几十毫秒量级，铝粉的反应过程发生在气泡的膨胀期内，因此铝粉反应释放的能量主要通过二次反应贡献给了气泡能，即铝粉主要是同炸药的爆轰产物反应，增加了炸药爆轰后期的能量。

2.2　铝粉含量对水中爆炸反应的影响

样品 4 的水中爆炸的冲击波压力曲线和气泡脉冲波形如图 1～2 所示，这里的气泡脉冲波形是指水中爆炸第 1 次气泡脉动产生的压力波。

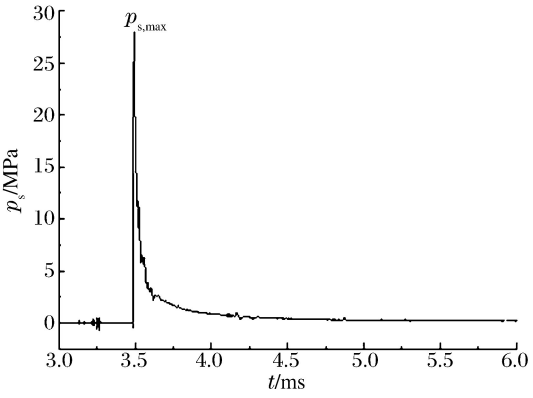

图 1　冲击波压力波形

Fig. 1　Shock wave pressure history

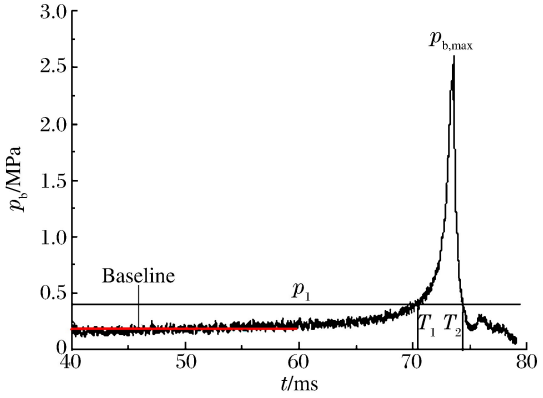

图 2　气泡脉冲波形

Fig. 2　Bubble pulse profile

气泡脉冲的峰值压力（$p_{b,max}$）由气泡脉冲的波形读取，数据处理以初始冲击波的基线为基准。基线为 40～60 ms 之间平滑曲线的压力平均值（见图 2 中红色直线）。当冲击波经过后，水下压力传感器测量的气泡脉冲波形会产生偏移，基线向负压偏移，文献[14-15]中取 p_1 为气泡脉冲峰值压力的 5%。考虑到测量时的噪声以及传感器性能的影响，本文中取 p_1 为气泡脉冲峰值压力的 10%。

气泡脉冲的冲量为：

$$I_b = \int_{T_1}^{T_2} p_b(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：I_b 为气泡脉冲冲量；T_1 和 T_2 分别为气泡压力上升和下降到压力 p_1 的时间，二次压力波脉冲宽度 $\Delta T_b = T_2 - T_1$；$p_b(t)$ 为任意时刻二次压力波的压力；t 为时间。

CL-20 基炸药的水中爆炸参数见表 3。由表 3 可知，第 1 次气泡脉动产生的二次压力波的峰值压力仅为冲击波峰值压力的 7.0%～9.0%，但其冲量是初始冲击波冲量的 2.1～2.9 倍，明显大于冲击波的冲量。随着铝粉含量的增加，二次压力波的峰值压力逐渐降低，冲量和脉冲宽度不断增加，二次压力波主要受到气泡的膨胀收缩速率和膨胀程度的影响。对于含铝炸药，铝粉的能量主要在气泡的膨胀过程中释放，气泡的膨胀过程中，铝粉在释放出大量能量或爆轰产物温度升高的同时，爆轰产物气体组分的分子量显著减少（达百分之几十），从而导致在比容不变的条件下爆轰产物压力下降[16]。因此，当铝粉含量不断增加时，爆轰产物气体的分子量逐渐减少，爆轰产物压力下降，导致气泡的膨胀速率降低，二次压力波的峰值压力逐渐降低，但铝粉含量较大时，铝粉与爆轰产物二次反应时间较长，同时释放了较多的能量，气泡的膨胀程度大，冲量和脉冲宽度变大。

表 3 CL-20 基炸药的水中爆炸参数

Table 3　Parameters of underwater explosion for CL-20-based explosives

样品	ΔT_b/ms	$p_{s,max}$/MPa	$p_{b,max}$/MPa	$p_{b,max}/p_{s,max}$	I_s/(kPa·s)	I_b/(kPa·s)	I_b/I_s
3	2.98	29.25	2.60	0.089	1.10	2.36	2.15
4	4.39	28.00	2.44	0.087	1.12	3.23	2.88
5	5.25	27.36	2.03	0.074	1.71	3.79	2.22
6	7.52	25.70	1.78	0.069	1.64	4.21	2.57

2.3 铝粉尺寸对水中爆炸反应的影响

含两种不同规格铝粉的 CL-20 基炸药的水下爆炸参数见表 4。由表 4 可知,与样品 4 相比(铝粉粒度为 17 μm),样品 7(铝粉粒度为 3 μm)的冲击波峰值压力、冲量、冲击波能、气泡周期、气泡能都基本一致,未受到铝粉尺寸的影响;二次压力波峰值压力变大,脉冲宽度和冲量变小。

表 4 含两种粒度铝粉的 CL-20 基炸药的水下爆炸参数

Table 4 Parameters of underwater explosion for CL-20-based explosives containing powders with two particle sizes

样品	$p_{s,max}$/MPa	I_s/(kPa·s)	e_s/(MJ·kg^{-1})	t_b/ms	e_b/(MJ·kg^{-1})	$p_{b,max}$/MPa	ΔT_b/ms	I_b/(kPa·s)
4	28.00	1.116	1.503	69.98	2.927	2.44	4.39	3.227
7	27.62	1.136	1.543	69.84	2.907	2.79	3.51	3.088

即使在高温高压的极端条件下,铝粉发生氧化还原反应的时间(数百微秒)也远长于爆轰时间(数微秒)[17],虽然铝粉粒度较小时,铝粉颗粒比表面积增加,但参加前期爆轰反应的铝粉数量并未增加,冲击波能和气泡能的分配比例、冲击波超压和冲量基本没有变化。因此,铝粉颗粒的平均直径由 17 μm 降低到 3 μm 时,对炸药的爆轰反应和能量输出结构影响很小。

铝粉主要是在爆轰产物与铝粉的二次反应时参加反应,铝粉粒度对炸药爆炸反应的影响主要体现在二次压力波上。铝粉粒度小时,铝粉颗粒比表面积增加,爆轰产物与铝粉的二次反应的速率提高,气泡的膨胀速率变快,使二次压力波的峰值压力增大。但爆轰产物与铝粉的二次反应的速率提高,导致其二次反应时间变短,气泡的膨胀程度变小,二次压力波的冲量和脉冲宽度略低。

3 结 论

(1)水中爆炸实验能够用来研究含铝炸药的爆炸反应特性,冲击波和气泡膨胀过程分别表征了炸药爆轰和二次反应的能量释放过程。对于 CL-20 含铝炸药,铝粉主要是在二次反应时与爆轰产物反应释放能量,铝粉的能量主要贡献给了气泡能,少部分在 CJ 面后膨胀扩散时贡献给了冲击波冲量。

(2)铝粉含量对 CL-20 炸药的二次反应过程有显著的影响,气泡膨胀过程反映了铝粉与爆轰产物的二次反应速率和时间,可从时间和空间二维角度描述铝粉与爆轰产物二次反应过程的能量释放过程。

(3)铝粉粒度对炸药的水下爆炸的初始冲击波参数、冲击波能和气泡能的分配比例影响很小,对二次压力波有较大的影响,小尺寸铝粉更容易与炸药爆轰产物反应,导致二次反应的反应速率变快。

参考文献:

[1] Nicolich S M. Performance and hazard characterization of CL-20 formulations[C]// The 29th Internationl Annual Conference of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer ICT, 1998:1-10.

[2] Donald A, Geiss J. Additional characterization of high performance CL-20 formulation[C]// Proceedings of 30th Internationl Annual Conference of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer ICT, 1999:167-180.

[3] Kneisl P. PBXW-16, an insensitive pressed explosive[C]// Proceedings of 30th Internationl Annual Conference of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer ICT, 1999:264-267.

[4] Hoffman D M. Fatigue of LX-14 and LX-19 plastic bonded explosives[J]. Journal of Energetic Materials, 2000,18(1):1-27.

[5] Balas W, Nicolish S, Capellos C. CL-20 PAX explosives formulation developmentt, characterization, and testing[C]// NDIA 2003 IM/EM Technology Symposium. Miami, 2003:181-185.

[6] Lee K E, Hatch R L, Braithwaite P. Method for making high performance explosive formulations containing CL-20: US, US 6217799 B1[P]. 2001-04-17.

[7] Cook M A, Filler A S, Keyes R T, et al. Aluminized explosives[J]. Journal of Physical Chemistry, 1957,61(2):189-196.

[8] Miller P J. 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.

[9] Pastine D J, Cowperthwaite M, Solomon J M, et al. A model of non-ideal detonation in aluminized explosives[C]// The 11th International Detonation Symposium. Colorado: Department of Energy, 1998:204-213.

[10] 薛再清，徐更光，王延增. 用 KHT 状态方程计算炸药爆轰参数[J]. 爆炸与冲击，1998，18(2)：172-176.
Xue Zaiqing, Xu Gengguang, Wang Yanzeng. Using KHT equation of state to calculated detonation parameters of explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(2):172-176.

[11] 陈朗，张寿齐，赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究[J]. 爆炸与冲击，1999，19(3)：250-255.
Chen Lang, Zhang Shouqi, Zhao Yuhua. Study of the metal acceleration capacaities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of fidderent diameter[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(3):250-255.

[12] 王建灵，赵东奎，郭炜，等. 水下爆炸能量测试中炸药入水深度的确定[J]. 火炸药学报，2002，25(2)：30-31；44.
Wang Jianling, Zhao Dongkui, Guo Wei, et al. Determination of reasonable depth of explosives in water to measure underwater explosion energy[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002,25(2):30-31;44.

[13] Bjarnholt G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test[J]. Propellants Explosives, Pyrotechnics, 1980,5(2/3):67-74.

[14] Murata K, Takahashi K, Kato Y. Precise measurements of underwater explosion phenomena by pressure sensor using fluoropolymer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999,85:39-42.

[15] Murata K, Takahashi K, Kato Y. Measurements of underwater explosion performances by pressure gauge using fluoropolymer[C]// The 12th International Detonation Symposium. San Diego: Department of Energy, 2002:336-343.

[16] 奥尔连科 Л П. 爆炸物理学[M]. 3 版. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011：347-364.

[17] Arnold W, Rottenkolber E. Thermobaric charges: Modelling and testing[C]// The 38th Internationl Annual Conference of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer ICT, 2007:26-29.

Effect of aluminum powder content and its particle size on reaction characteristics for underwater explosion of CL-20-based explosives containing aluminum

Hu Hongwei[1], Yan Jiajia[1], Chen Lang[2], Guo Wei[1], Song Pu[1]

(1. *Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*;
2. *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *Beijing*, *China*)

Abstract: In the present work, the parameters of shock wave and secondary pressure wave with different aluminum powder content and particle size of CL-20-based aluminized explosives were measured by underwater explosion testing, the shock wave energy and bubble energy were calculated, and the explosion reaction mechanism of CL-20-based aluminized explosives was analyzed. The results show that the shock wave energy and the bubble energy of the underwater explosion represent the energy distribution in the early detonation period and the secondary reaction period, with only a minor portion of the aluminum powder participating in the early detonation period. The secondary pressure wave formed by the bubble pulsation can describe the effect of the aluminum and detonation products on the secondary reaction. The amount of the aluminum content has a significant influence on the process of the secondary reaction and, while the aluminum particle size has little effect on the initial shock wave parameters, shock wave energy and bubble energy, its effect is great on the secondary reaction rate of the aluminum power and detonation products.

Key words: mechanics of explosion; bubble impulse; underwater explosion; CL-20 explosives; aluminum powder content; secondary reaction; aluminized explosives

（责任编辑　丁　峰）