

doi: 10.7690/bgzdh.2020.07.017

# 铝氧比对 CL-20 基含铝炸药水下能量输出结构的影响

孙晓乐, 万力伦, 杨琢钧, 刘平, 彭继武, 刘海伦  
(重庆红宇精密工业有限责任公司, 重庆 402760)

**摘要:** 为增强摧毁舰艇的能力, 对 CL-20 基含铝炸药的铝氧比 (Al/O) 对水下能量输出结构的影响进行研究。设计不同 Al/O 的 CL-20 基含铝炸药配方, 采用水下爆炸威力实验, 对几种混合炸药配方的水下能量输出结构进行分析, 剖析了 Al/O 对 CL-20 基含铝炸药的水下冲击波能、水下气泡能以及水下能量输出结构的影响规律。实验结果表明: CL-20 基含铝炸药水下的冲击波能、气泡能和总能量随 Al/O 的增加呈现先增加后减少, 且水下爆炸总能量在 Al/O 为 0.75 左右时有一个最大值, 约为 6.43 MJ/kg。

**关键词:** CL-20; 含铝炸药; 铝氧比; 水下能量

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Influence of Al/O on Underwater Energy Output Structure of CL-20-based Aluminized Explosives

Sun Xiaole, Wan Lilun, Yang Zhuojun, Liu Ping, Peng Jiwu, Liu Hailun  
(Chongqing Hongyu Precision Industry Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** In order to enhance the ability to destroy ships, the effect of aluminum-oxygen ratio (Al/O) of CL-20-based aluminum-containing explosives on the underwater energy output structure was investigated. Design different Al/O CL-20 based aluminum explosive formulations, use underwater explosion power test, analyze the underwater energy output structure of several mixed explosive formulations and influence principle of the Al/O to CL-20 based aluminized explosives on underwater shock wave energy, underwater bubble energy and underwater energy output structure. The experimental results show that the underwater shock wave energy, bubble energy and total energy of CL-20-based aluminized explosives increase first and then decrease with the increase of Al/O, and the total energy of underwater explosion has an Al/O of about 0.75. The maximum value is approximately 6.43 MJ/kg.

**Keywords:** CL-20; aluminized explosive; Al/O; underwater energy

### 0 引言

CL-20 是当今能量密度最高、具有实用价值的一种新型第三代含能材料, 其密度为  $2.04 \text{ g/cm}^3$ , 相比于 HMX 密度提高 7%; 其理论爆速为  $9\ 600 \text{ m/s}$ , 相比于 HMX 提高 5%; 其爆热为  $6.23 \text{ MJ/kg}$ , 相比于 HMX ( $6.03 \text{ MJ/kg}$ ) 提高 3.5%; 综合毁伤能力相比 HMX 提高 15.8%<sup>[1]</sup>。含铝炸药作为一种非理想炸药, 主要用于增加对目标的破坏作用, 如侵彻武器、水中武器、爆破武器装药等。含铝炸药应用于水中武器中, 可大幅增加水中爆炸的冲击波能及气泡能, 大幅度增强摧毁舰艇的能力<sup>[2-3]</sup>。

水下能量输出结构和铝氧比的关系一直是水中武器研究的重要方面。周霖等<sup>[4]</sup>分析研究了铝氧比对 RBUL-2 (DNAN/RDX/Al/AP) 炸药水下爆炸能量输出结构的影响, 研究结果表明: RBUL-2 炸药水中爆炸的冲击波能在铝氧比为 0.35~0.40 时达到

最大, 水中爆炸的气泡能则随着铝氧比的增加而增大。Stromsoe E 等<sup>[5]</sup>研究了 RDX/Al 体系中 Al 粉含量对水中爆炸冲击波能和气泡能的影响。Keicher T 等<sup>[6]</sup>研究了在高氯酸铵 (AP) 中分别加不同粒径、不同含量的铝粉时, 含铝 AP 冲击波能与气泡能的变化。项大林等<sup>[7-8]</sup>研究了铝氧比对不同炸药体系的水中爆炸能量输出结构规律影响。

笔者设计了不同 Al/O 的浇注型 CL-20 基含铝混合炸药配方, 测试了不同配方的水中爆炸威力, 分析了 Al/O 对 CL-20 基含铝炸药水中能量输出结构的影响。该研究可为第三代高能水下炸药的配方设计提供重要的参考。

### 1 实验

#### 1.1 材料及仪器

笔者分别选取 3 种材料: 辽宁庆阳特种化工有限公司的 CL-20、天元新材料科技有限公司的 AP、

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-04-27

作者简介: 孙晓乐 (1985—), 男, 陕西人, 硕士, 高工, 从事混合炸药的应用研究。E-mail: Sunxiaole060420122@126.com。

鞍钢实业集团有限公司的 Al、黎明化工研究院的粘合剂。

美国泰克公司的 Tektronix TDS3054B 数值示波器, 美国 PCB 公司的 PCB138M131 压力传感器。

## 1.2 样品制备

采用立式混药机进行浇注型 CL-20 基含铝炸药不同配方的实验样品制备, 捏合温度(53±3)℃, 捏合时间总长 110 min; 通过精密装药装置将捏合好的 CL-20 基含铝炸药真空浇注到试验模具中, 经 4~6 d 固化, 得到实验样品。不同铝氧比 CL-20 基含铝炸药配方如表 1 所示。

表 1 不同铝氧比 CL-20 基含铝炸药配方

含铝炸药配方	粘合剂/ %	CL-20/ %	Al/%	AP/%	Al/O
GWUL-1	10	20	16	54	0.25
GWUL-2	10	20	25	45	0.45
GWUL-3	10	20	31	39	0.60
GWUL-4	10	20	35	35	0.75
GWUL-5	10	20	40	30	0.95
GWUL-6	10	20	47	23	1.30

## 1.3 实验方法

如图 1 所示, CL-20 基含铝炸药水下能量实验的爆炸水池直径为 100 m, 水池深 15 m, 药柱质量为 1.5 kg。

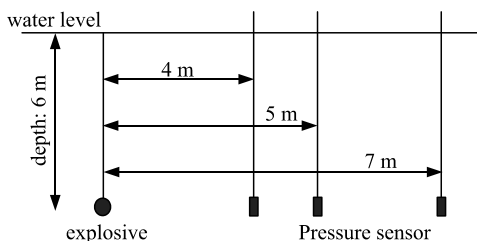


图 1 水下爆炸实验

CL-20 基含铝炸药的水下冲击波能可由下式计算得到:

$$E_s = k_1 \frac{4\pi R^2}{w\rho_0 C_0} + \int_{\alpha}^{\tau_{\alpha}+6.7\theta} P^2(t) dt \quad (1)$$

CL-20 基含铝炸药的水下气泡能可由下式计算得到:

$$E_b = k_2 T^3 / w \quad (2)$$

CL-20 基含铝炸药水下总能量可由下式得到:

$$E_{\text{总}} = E_s + E_b \quad (3)$$

式中:  $R$  为测点到爆心的距离;  $\rho_0$ 、 $C_0$  分别为水密度和声速;  $t_a$  为冲击波到达时间;  $\theta$  为时间常数;  $p(t)$  为压力时程;  $w$  为试样质量;  $k_1$ 、 $k_2$  为测试系统的修正系数, 由 TNT 药柱的实验结果和理论结果比值标定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铝氧比对炸药水下冲击波能的影响

CL-20 基含铝炸药水下冲击波能实验结果如表 2 所示。图 2 为水下冲击波能随铝氧比的变化曲线。

表 2 水下冲击波能试验结果

含铝炸药配方	Al/O	冲击波能/(MJ/kg)
C-1	0.25	1.27
C-2	0.45	1.70
C-3	0.60	1.64
C-4	0.75	1.60
C-5	0.95	1.55
C-6	1.30	0.68

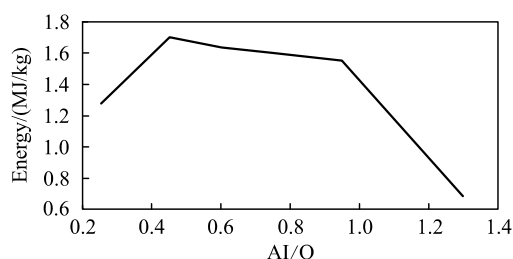


图 2 水下冲击波能随铝氧比的变化

从图中可以看出: 在一定的范围内, CL-20 基含铝炸药的水下冲击波能呈现先增加后减小的趋势; 当铝氧比在 0.45 时, 水下冲击波能达到最大, 这是由于冲击波主要受 CL-20 和 AP 反应的影响, 铝氧比越大, CL-20 与 AP 的含量越少, 冲击波能越小; 铝氧比从 0.25 增加到 0.45 时, 冲击波峰值衰减不明显, 部分铝粉参与反应释放的能量会支持冲击波传播, 缓解冲击波的衰减, 从而增加冲击波能, 故在 0.45 时冲击波能出现最大值。

### 2.2 铝氧比对炸药水下气泡能的影响

CL-20 基含铝炸药水下气泡能实验结果如表 3 所示。图 3 为气泡能随铝氧比的变化曲线。

表 3 水下气泡能实验结果

含铝炸药配方	Al/O	气泡能/(MJ/kg)
C-1	0.25	3.48
C-2	0.45	4.10
C-3	0.60	4.60
C-4	0.75	4.83
C-5	0.95	4.70
C-6	1.30	4.52

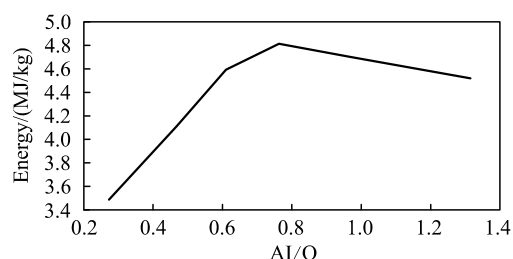


图 3 水下气泡能随铝氧比的变化

从图中可以看出：CL-20 基含铝炸药的水下气泡能在铝氧比为 0.75 时达到最大，水下气泡能呈现先增加后减小的趋势。这主要是因为水下气泡能由铝粉二次反应提供的能量支持，随着铝氧比的增加，铝粉反应释放的能量越多，气泡能越大；但是，当铝氧比大于 0.75 后，配方及水中提供的氧不足，铝粉释放的能量减少，故气泡能会降低。

### 2.3 铝氧比对炸药水下能量输出结构的影响

不同配方 CL-20 基含铝炸药的水下能量输出如表 4 所示。图 4 为水下总能量随铝氧比的变化曲线。

表 4 水下能量输出结构实验结果

含铝炸药 配方	Al/O	冲击波能/ (MJ/kg)	气泡能/ (MJ/kg)	总能量/ (MJ/kg)
C-1	0.25	1.27	3.48	4.75
C-2	0.45	1.70	4.10	5.80
C-3	0.60	1.64	4.60	6.24
C-4	0.75	1.60	4.83	6.43
C-5	0.95	1.55	4.70	6.25
C-6	1.30	0.68	4.52	5.20

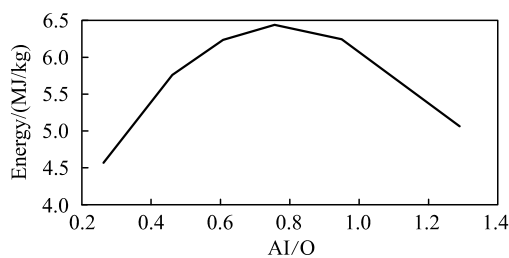


图 4 水下总能量随铝氧比的变化

从图中可以看出：当铝氧比为 0.75 左右时，CL-20 基含铝炸药水下爆炸的总能量有一个最大值，约为 6.43 MJ/kg。Al 的燃烧以及 Al 粉与爆轰产物的二次反应均为放热反应，可以大幅度提高含铝炸药的爆热值，但是当 Al/O 摩尔比大于 0.75 后，由于 Al 粉含量已经超过爆轰产物中可能与 Al 粉发生放热化学反应的物质的量，此后，Al 粉就会完全作为一种惰性吸热物质而存在，消耗大量热量而使总能量降低。故在保证总能量最大的情况下，通过

\*\*\*\*\*

(上接第 64 页)

### 参考文献：

[1] 尹云玉, 吕海波, 李宁, 等. 潜射火箭出水过程横向响应载荷研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(6): 12-16.  
 [2] 覃东升, 方勇. 水下垂直发射出筒载荷响应分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 112-115.  
 [3] 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 等. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理分析[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 39-48.

调节铝氧比，可改变含铝炸药的能量输出结构。在一定的范围内，铝氧比增大，冲击波能减少，气泡能所占比重增加，对不同水下炸药配方设计具有参考价值。

### 3 结论

笔者测试了 CL-20 基含铝炸药不同铝氧比配方的水下冲击波能、水下气泡能、水下总能量，分析得出了 Al/O 对其水中能量的影响规律：

- 1) CL-20 基含铝炸药的水下冲击波能、水下气泡能、水下总能量均随铝氧比的上升先增加后减少；
- 2) CL-20 基含铝炸药的水下爆炸总能量在铝氧比为 0.75 时有一个最大值，约为 6.43 MJ/kg。

### 参考文献：

[1] 董海山. 高能量密度材料的发展及对策[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 1-12.  
 [2] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 6-7.  
 [3] 周俊祥, 徐更光, 王廷增. 铝化炸药水下爆炸冲击波特异性分析[J]. 爆破, 2005, 22(1): 41-51.  
 [4] 周霖, 许少辉. 炸药水下爆炸能量输出特性研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 235-238.  
 [5] STROMSOE E, ERIKSEN S W. Performance of high explosives in underwater application. Part II: Aluminized explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1990, 15: 52-53.  
 [6] KEICHER T, HAPP A, KRETSCHMER A, et al. Influence of Aluminium/Ammonium Perchlorate on the Performance of Underwater Explosives[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1999, 24(3): 140-143.  
 [7] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 黑索今基含铝炸药的铝氧比对爆轰性能及其水下爆炸性能的影响[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 45-50.  
 [8] 冯晓军, 韦国平, 徐洪涛, 等. Al/AP 对 RDX 基复合炸药水中爆炸参数的影响[J]. 火炸药学报, 2012(4): 10-14.  
 [4] 刘海军, 王聪, 邹振祝, 等. 潜射导弹出筒过程肩空泡形态和水阻动力特性研究[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 313-319.  
 [5] 王英华. 轴向载荷对潜射导弹横向振动特性影响分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(6): 9-15.  
 [6] 王建丽, 张渭育. 统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 215-220.  
 [7] 李晓斌, 郭小威, 袁刚. 基于逻辑靶场技术的导弹内外场联合试验训练系统[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 9-13.