

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.001

# 纳米铝粉对炸药水下爆炸能量的影响研究<sup>\*</sup>

封雪松 田 轩 冯 博 徐洪涛 赵 娟 冯晓军 王晓峰

西安近代化学研究所(陕西西安,710165)

[摘 要] 为了研究铝粉颗粒尺度对炸药爆炸能量的影响,分别对含纳米铝粉和微米铝粉的 RDX 基炸药进行水下试验,获得了不同组成下含纳米铝粉和含微米铝粉炸药水下爆炸的冲击波能和气泡能,分析了纳米铝粉的含量对炸药水下爆炸能量输出的影响规律。试验发现(以质量分数计):当铝粉的含量为20%~40%时,含纳米铝粉的炸药在水下冲击波能和气泡能方面始终低于相同铝粉含量的含微米铝粉的炸药,且差值随铝粉含量的增加而增大;当铝粉总含量为30%和35%时,纳米铝粉与微米铝粉混合使用可使炸药具有较大的水下爆炸总能量,纳米铝粉的最优加入量为10%。结果表明,当混合铝粉总质量分数为35%,且  $m(\text{微米铝粉}):m(\text{纳米铝粉})=25:10$  时,炸药具有最大的水下爆炸能量。

[关键词] 含铝炸药;纳米铝粉;微米铝粉;水下爆炸能量;反应机理

[分类号] TJ55

## 引言

铝粉常用作添加剂以提高炸药能量。研究表明<sup>[1]</sup>,铝粉的加入量、粒度、比表面积和形状等物理性能与含铝炸药的性能密切相关<sup>[2]</sup>,其中纳米铝粉因具有不同于微米铝粉的化学和物理性质,在推进剂、炸药和铝热剂中的应用研究受到广泛关注<sup>[3]</sup>。

Brousseau 等<sup>[4]</sup>认为,对 TNT-Al 混合炸药,纳米铝粉配方的爆速和板痕深度有明显提高;但对于 HMX 基的含铝炸药,含微米铝粉炸药的爆速仍高于含纳米铝粉炸药的爆速。Lefrancois 等<sup>[5]</sup>制备了分别含 5  $\mu\text{m}$  铝粉、100 nm 铝粉和氟化锂的高能炸药 RDX-AP-Al(LiF)-WAX(质量比为 20:43:25:12),结果发现,含纳米铝粉的炸药水下爆炸冲量和气泡周期比含氟化锂的炸药分别提高 60% 和 18%,但作者并未给出含微米铝粉炸药具体的能量值,也未与相应含微米铝粉的炸药配方进行比较,无法准确获得纳米铝粉对炸药水中爆炸能量输出结构的影响。Miller 等<sup>[6]</sup>用金属板爆痕试验和爆速试验测量了炸药性能,结果表明:在浇注 PBX 配方中,含纳米铝粉与含微米铝粉无明显差异,并认为原因是超细铝粉的氧化层较厚,使活性铝含量比普通铝粉低。

本文采用水下试验方法,研究了纳米铝粉含量对 RDX 基炸药水下爆炸能量输出结构的影响,并与含微米铝粉炸药的性能进行了对比。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

以 RDX 为主炸药;以氟橡胶 F 2641 作黏结剂;微米铝粉的粒度为 4~5  $\mu\text{m}$ ;纳米铝粉粒度为 60~80 nm。铝粉含量(本文均以质量分数计)分别为 20%、25%、30%、35%、40%。采用直接法制备了含纳米铝粉的炸药、含纳米铝粉与微米铝粉混合物的炸药,并分别压制成  $\varnothing 30\text{ mm} \times 30\text{ g}$  的炸药药柱。

### 1.2 含铝炸药的水下爆炸能量测试

#### 1.2.1 试验原理

当炸药在水下爆炸时,首先是冲击波在水中迅速传播,然后是高压气态产物向四周扩散、膨胀,达到气泡的最大半径,此时气泡内的压力低于周围水的静压,因此,周围的水再反向中心聚合,压缩气泡形成气泡脉动。炸药的能量分为两部分——冲击波能和气泡能,前者表征炸药爆炸的动作用,后者表征炸药爆炸的静作用。通过测量不同试样的水下爆炸冲击波峰值压力、气泡脉动周期,可计算炸药水下爆炸的比冲击波能和比气泡能,分析纳米铝粉的含量对水下爆炸的能量输出结构的影响。

#### 1.2.2 试验仪器

采用 PCB138A 自由场传感器,灵敏度为 6.937 MPa/V,压力测量范围为 0~69 MPa。每组样品至少获取 2 发有效数据,取其平均值计算炸药的比冲

\* 收稿日期:2015-06-09

作者简介:封雪松(1972-),女,高级工程师,主要从事压装混合炸药技术研究。E-mail:xuan110@163.com

通信作者:田轩(1987-),男,工程师,主要从事炸药爆炸化学研究。E-mail:aaaxuanyuan@163.com

击波能、比气泡能和总能量。

1.2.3 试验装置和布局

试验水池直径为 3.2 m,水深为 2.4 m,池底和池壁均由 8 mm 钢板焊接而成。以十字钢支架作为压力传感器和药柱悬挂支撑,为保持传感器和药柱垂直水平面,防止因水的浮力和湍流给测试造成影响,使用重物悬挂,使得两者保持在同一水平面上,具体布局见图 1 所示。

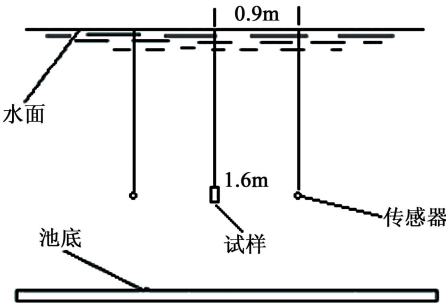


图 1 小水池试验布局示意图  
Figu. 1 Layout of under-water test

2 结果与讨论

2.1 炸药的水下爆炸试验结果

通过水下爆炸试验,获得了含微米铝粉炸药和含纳米铝粉炸药的能量分布,见表 1。

由表 1 可知,含纳米铝粉的炸药,在水下冲击波能和气泡能方面均低于相同铝粉含量的含微米铝粉的炸药,且差值随铝粉含量的增加而增大。

2.2 铝粉对炸药水下爆炸能量的影响

2.2.1 水下爆炸冲击波能

图 2 记录了含纳米铝粉炸药和含微米铝粉炸药的水下爆炸冲击波能的曲线。

由图 2 可知,当铝粉含量在 20% ~ 40% 时,含不同粒度铝粉的炸药的比冲击波能变化趋势相同:比冲击波能随铝粉含量的增加而增加,在含量为 25% 左右时达到最大值,之后,比冲击波能随铝粉含量的增加而迅速降低。

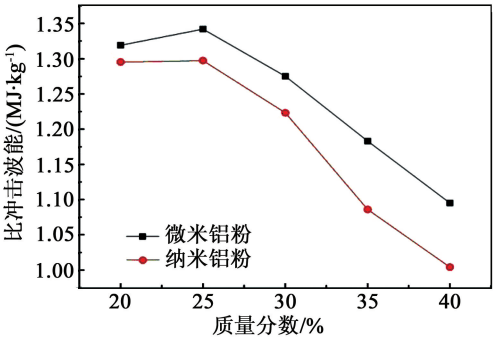


图 2 铝粉的质量分数与含铝炸药的冲击波能的关系  
Fig. 2 Relationship between mass fraction of aluminum powder and shock wave energy of the aluminized explosive

值得注意的是:含微米铝粉炸药的比冲击波能大于含纳米铝粉的炸药,当铝粉含量为 20% 时,二者差值最小,当铝粉含量为 25% ~ 35% 时,比冲击波能差值随铝粉含量的增加而增加,当铝粉含量为 40% 时,比冲击波能差值最大。原因在于:

1) 纳米铝粉中活性含量为 85%,低于微米铝粉 99% 的活性含量,随着铝粉含量增加,比冲击波能的差值逐渐增大;

2) 纳米铝粉参与爆轰反应的时间早于微米铝粉,且反应的速率高于微米铝粉,对紧跟波阵面后的冲击波能的贡献在含量较低时优于微米铝粉的能量贡献。

2.2.2 水下爆炸气泡能

图 3 记录了含纳米铝粉的炸药和含微米铝粉炸药的水下爆炸气泡能曲线。由图 3 可知,含微米铝粉炸药的平均比气泡能随铝粉含量的增加而增大;而含纳米铝粉炸药的平均比气泡能呈现先增大后减小的趋势,并在铝粉含量为 35% 时具有最大值。当铝粉含量相同时,含微米铝粉炸药的平均比气泡能高于含纳米铝粉的炸药,当铝粉含量为 20% 时,微

表 1 含微米铝粉炸药和含纳米铝粉炸药的水下能量对比

Tab. 1 Comparison of under-water detonation energy between explosive containing nano-aluminum and explosive containing micron aluminum

$w$ (微米 Al)/%	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比冲击波能/ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	比气泡能/ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$w$ (纳米 Al)/%	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比冲击波能/ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	比气泡能/ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	比冲击波能 降低率/%	比气泡能 降低率/%
20	1.758	1.320	4.156	20	1.723	1.296	3.784	1.85	9.83
25	1.786	1.343	4.670	25	1.737	1.298	4.154	3.46	12.42
30	1.812	1.253	5.104	30	1.774	1.211	4.543	3.47	12.35
35	1.844	1.126	5.373	35	1.745	1.087	4.727	3.46	13.67
40	1.866	1.096	5.535	40	1.772	1.005	4.571	8.30	21.08

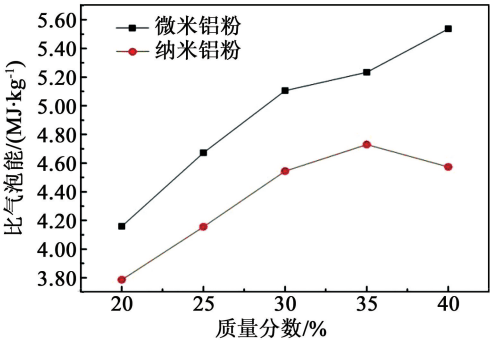


图3 铝粉的质量分数与含铝炸药的气泡能的关系

Fig.3 Relationship between mass fraction of aluminum powder and bubble energy of the aluminized explosive

米铝粉的比纳米铝粉的高 9.8% ;当铝粉含量增至 25%、30%、35% 时,含微米铝粉炸药的比气泡能比含纳米铝粉炸药的比气泡能高 12% ~ 13% ;当铝粉含量为 40% 时,比气泡能差值最大,达到 21% 。

产生这种现象的原因在于:

- 1)由于纳米铝粉在早期参与爆轰反应,且在短时间内反应完全,能够与爆轰气体产物和水作用的铝粉很少,对气泡能的贡献极小;而微米铝粉反应速率较慢,大量与气体产物和水作用而释放能量;
- 2)当炸药在水下爆炸后,在气泡边界处会形成大量的水蒸气(由周围水介质产生),爆炸产物中过量的铝粉将与水蒸气反应,从而提高混合炸药整体的能量。综上,含纳米铝粉的炸药与含微米铝粉的

炸药相比,水下气泡能的差距远高于冲击波能的差距,且随着铝粉含量增加,差距不断增大。

对比含纳米铝粉的炸药与含微米铝粉的炸药的水下爆炸能量可知,含纳米铝粉的炸药在水下冲击波能和气泡能方面均低于相同铝粉含量的含微米铝粉的炸药,且差值随铝粉含量的增加而增大。

2.3 含纳米铝粉和微米铝粉混合物炸药的水下爆炸能量

为了同时发挥微米铝粉单质铝含量高和纳米铝粉反应速率高的优势,将纳米铝粉和微米铝粉混合使用,研究其对水下作功能力和能量输出结构的影响,铝粉总含量分别为 30%、35%,见表 2、表 3。

当铝粉总含量为 30% 时,纯微米铝粉的比冲击波能、比气泡能和总能量分别为 1.253、5.104 MJ/kg 和 6.357 MJ/kg,其中当  $m(\text{微米铝粉}):m(\text{纳米铝粉})=10:20$  时,配方具有最大的比冲击波能;当  $m(\text{微米铝粉}):m(\text{纳米铝粉})=20:10$  时,配方具有最大的比气泡能和水下爆炸总能量。当铝粉总含量为 35% 时,纯微米铝粉的比冲击波能、比气泡能和总能量分别为 1.126、5.373 MJ/kg 和 6.499 MJ/kg,其中当  $m(\text{微米铝粉}):m(\text{纳米铝粉})=25:10$  时,配方具有最大的比冲击波能、比气泡能以及最大的总能量。

2.4 机理分析

纳米金属粉粒度较低、氧化活泼性较高,在炸药爆轰过程中,纳米铝粉参与爆轰反应的时间远远早

表 2 混合铝粉质量分数为 30% 的炸药的水下能量

Tab.2 Under-water detonation energy of the explosive with 30% (mass fraction) aluminum powder

$m(\text{微米 Al}):m(\text{纳米 Al})$	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比冲击波能/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	比气泡能/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	总能量/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
25:5	1.814	1.278	5.010	6.288
20:10	1.807	1.195	5.310	6.505
15:15	1.803	1.302	5.100	6.402
10:20	1.792	1.326	4.920	6.246
5:25	1.763	1.300	5.020	6.320

表 3 混合铝粉质量分数为 35% 的炸药的水下能量

Tab.3 Under-water detonation energy of the explosive with 35% (mass fraction) aluminum powder

$m(\text{微米 Al}):m(\text{纳米 Al})$	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比冲击波能/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	比气泡能/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	总能量/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
30.0:5.0	1.848	1.155	5.270	6.425
25.0:10.0	1.838	1.282	5.530	6.812
17.5:17.5	1.823	1.170	5.190	6.360
10.0:25.0	1.793	1.170	4.970	6.140
5.0:30.0	1.768	1.153	4.880	6.033

于微米铝粉,这与点燃试验中纳米铝粉的燃点(600 ℃)远低于微米铝粉是一致的;而且,由于活性金属粉的反应速率高,其在较短的时间内即可反应完全,能量释放主要在爆轰波阵面之前完成,在爆轰波阵面之后释能较少,难以在波阵面之后与爆轰气体产物继续反应释放能量,因此,对炸药的长期爆炸效应不利,即对爆轰波阵面之后所需要的冲击波效应、气泡效应、后燃效应等没有明显贡献。

由于炸药在水介质中爆炸时,产生比冲击波能的时间先于比气泡能,粒度低、比表面积更大的纳米铝粉能够更多、更快地参与爆轰反应,支持前沿冲击波的能量;但超过一定含量后,高活性铝单质铝含量偏低、氧化膜较厚的劣势开始显现,超压和比冲击波能开始降低。由于气泡作用在冲击波之后产生,时间较晚,纳米铝粉先行反应而难以对其贡献能量,只能一定程度提高微米铝粉的反应速率,而对气泡能产生影响,加之纳米铝粉氧化层厚,因而在含量 10% 时气泡能即达到最高,随后即开始下降。

因此,利用纳米铝粉能够更活泼、更快速地参与反应的性质,将其少量替代微米铝粉,能够在不降低密度的前提下,提高铝粉的整体反应速率,减少铝粉的整体反应时间,提高铝粉的整体反应完全率,最终实现整体能量释放的提高。

### 3 结论

1) 当铝粉质量分数在 20% ~ 40% 时,含纳米铝粉的炸药在水下冲击波能和气泡能方面始终低于相同铝粉含量的含微米铝粉的炸药,且差值随铝粉含量的增加而增大。纳米铝粉在水下爆轰反应中的后效作用远低于微米铝粉;纳米铝粉的高反应速率和

高反应完全率,使其提前参与了炸药的爆轰反应,对爆轰波阵面后作用时间较长的冲击波能和气泡能贡献少。

2) 当铝粉总含量为 30% 和 35% 时,纳米铝粉与微米铝粉混合使用可使炸药具有较大的水下爆炸总能量,此时纳米铝粉的加入量为 10%。当混合铝粉总含量为 35%,且  $m(\text{微米铝粉}) : m(\text{纳米铝粉}) = 25 : 10$  时,炸药具有最大的水下爆炸能量。

### 参 考 文 献

- [1] 王晓峰. 军用混合炸药的发展趋势[J]. 火炸药学报, 2011, 34(4): 1-4.  
WANG X F. Developmental trends in military composite explosive [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2011, 34(4): 1-4.
- [2] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [3] 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.
- [4] BROUSSEAU P, ANDERSON C J. Nanometric aluminum in explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2002, 27(5): 300-306.
- [5] LEFRANCOIS A, BAUDIN G, LE GALLIC C, et al. Nanometric aluminum powder influence on the detonation efficiency of explosives [C]// Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, California, 2002: 22-32.
- [6] MILLER P J, BEDFORD C D, DAVIS J J. Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives [C]// Proceedings of 11th International Detonation Symposium. Colorado, USA, 1998: 214-220.

## Effect of Nano-aluminum on the Under-water Detonation Energy of Explosive

FENG Xuesong, TIAN Xuan, FENG Bo, XU Hongtao, ZHAO Juan, FENG Xiaojun, WANG Xiaofeng  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to investigate the influence of nano-aluminum on the detonation energy of explosive, RDX-based explosive containing nano-aluminum and micron aluminum were prepared and used in the under-water detonation experiment. Shockwave energy and bubble energy of explosives with different components of nano-aluminum and micron aluminum were measured. Effect of nano-aluminum content on the energy output in under-water detonation was also analyzed. It can be found that shockwave energy and bubble energy of explosives containing 20% -40% (mass fraction) nano-aluminum are lower than those of explosives containing 20% -40% (mass fraction) micron aluminum, and the difference increases with the raise of aluminum content. When the mass fraction of aluminum powder is 30% or 35%, explosives with the mixtures of nano-aluminum and micron aluminum have higher total energy in underwater detonation, and the optimal mass fraction of nano-aluminum is 10%. Results also show that when the mass fraction of aluminum powder is 35% [ $m(\text{micron aluminum}) : m(\text{nano-aluminum}) = 25 : 10$ ], underwater detonation energy of the explosive is the highest.

[KEY WORDS] aluminized explosives; nano-aluminum; micron aluminum; under-water detonation energy; reaction mechanism