

文章编号:1006-9941(2021)10-0948-09

# HMX基含硼铝炸药的释能特性和作功能力

李兴隆<sup>1,2</sup>,王德海<sup>1</sup>,刘清杰<sup>1,2</sup>,花成<sup>1,2</sup>,曹威<sup>1,2</sup>,宋清官<sup>1,2</sup>,王翔<sup>1,2</sup>,高大元<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院安全弹药研发中心, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 如何有效地运用活性金属来提高炸药的爆炸威力和作功能力是设计金属化炸药的关键问题。为探索B/Al复合粉在增爆炸药和温压炸药中的应用,设计并制备了3种HMX基含硼铝炸药。对 $\Phi 100\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ 样品,用空中爆炸试验和水中爆炸试验研究其能量释放特性;用 $\Phi 50\text{ mm}$ 圆筒试验评价其作功能力,讨论了微米金属粉含量对含硼铝炸药的释能过程和作功能力的影响。结果表明,空爆和水中爆炸中,在HMX的爆轰作用下,铝粉燃烧能够促进硼粉的后燃效应,释放出大量的燃烧热,形成高温高压的膨胀产物,增加空中爆炸火球的持续时间和水中爆炸的总能量。圆筒试验中,在爆轰产物驱动铜管膨胀破裂之前,有足够的氧和硼反应,未能体现含硼铝炸药中B的燃烧能量优势。当铜管壁膨胀破裂后,空气中的氧可进一步与B/Al复合粉反应释放大量的燃烧热,增强后效作功能力。

**关键词:** HMX基含硼铝炸药;空爆试验;水下爆炸试验;圆筒试验;冲击波超压;气泡能;格尼能

中图分类号: Tj55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021165

## 1 引言

活性金属粉在燃烧过程中会释放大量热,在高能炸药中加入氧化剂、金属粉和黏结剂制成增爆炸药(Enhanced Blast Explosive, EBX)和温压炸药(Therobaric explosive, TBX)后能显著提升其爆热和爆炸威力<sup>[1-3]</sup>。从理论上分析,硼(B)的质量和体积燃烧热( $58.9\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $137.8\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ )分别是铝(Al)质量和体积燃烧热( $31.3\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $84.5\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ )的1.9和1.6倍,属于人们非常关注的高燃烧热金属燃料<sup>[4-6]</sup>。一百多年的研究表明,含铝炸药中Al粉燃烧释放的能量非常有限,若要进一步提高含铝炸药的能量,则需要添加燃烧热更高的金属粉。硼的熔点和沸点较高,且燃烧初期形成的液态 $\text{B}_2\text{O}_3$ 包住硼粒子,致使B粉的点火和燃烧特性较差,含硼炸药中B难于完全燃烧释放其高

燃烧热<sup>[7-8]</sup>。单一组分金属中虽然可以使用不同尺度级配,如纳米和微米级配来降低粘度、便于浇注成型和增加样品密度。但是,仅添加单一组分金属粉的混合炸药其能量释放效应变化不大。目前,国内外正在研究新型金属化炸药,即在炸药中加入两种或两种以上的金属粉,炸药爆炸时金属粉之间发生协同或合金化反应,释放出大量热量,从而大幅度提高毁伤效应。

复合金属粉的制备以及在含能材料中的应用,国内外已有文献报道。P.Q. Flower<sup>[9]</sup>开展了改善金属化炸药功效的相关研究,探索了两种方法制备硼铝机械合金(Mechanical Alloys)。方法一是制备微米尺度的纳米相机械合金,即纳米尺度硼均匀分散在微米铝金属中。这种合金的金属键断裂和破损等有助于提高体系的能量;方法二是以松散混合的微米铝和微米硼为原料,使用等离子体蒸发浓缩工艺(Plasma Evaporation-Condensation Process)制备纳米合金。美国曾报道在高威力炸药中加入质量比Al/Mg=1:1混合金属粉,可以提高炸药的作功能力<sup>[10]</sup>。国外专利<sup>[11]</sup>曾报道在RDX中加入两种以上的金属粉制成金属化炸药,其爆炸威力比RDX明显提高。如果用于水下炸药装药,则能够大幅度提高气泡能。徐森<sup>[12]</sup>开展了Al/B粉的燃烧热以及金属化炸药在水下爆炸中的应

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-07-31

网络出版日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11572359)资助

作者简介: 李兴隆(1988-),男,高级工程师,博士,从事弹药工程与数值模拟研究。e-mail:lixinglong@caep.cn

通信联系人: 高大元(1962-),男,高级工程师,博士,研究方向为含能材料的爆轰和安全性能、弹药工程。e-mail:gaody466@163.com

引用本文: 李兴隆,王德海,刘清杰,等. HMX基含硼铝炸药的释能特性和作功能力[J]. 含能材料, 2021, 29(10):948-956.

LI Xing-long, WANG De-hai, LIU Qing-jie, et al. Energy Output Characteristics and Power Ability of HMX-based Explosives Containing B/Al[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(10):948-956.

用研究,表明随着硼粉含量增加,混合金属粉的燃烧热增加,而硼的燃烧效应降低。RDX 基含硼铝炸药((RDX/Al/B/AP)比含铝炸药((RDX/Al/AP)具有更大的爆轰能量。曹威<sup>[13]</sup>开展了添加 B 和 MgH<sub>2</sub> 含铝炸药的爆轰特性研究,表明添加 B 和 MgH<sub>2</sub> 后,含铝炸药的爆热稍微增加,爆压没有明显变化,早期加速能力(壁速和格尼能)稍微减弱,却表现出强劲的后效燃烧潜能。

针对如何提高炸药爆轰产物温度和改善硼的燃烧环境,使液态 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的蒸发速度接近生成速度,促进硼的二次反应释放高燃烧热的问题<sup>[14-16]</sup>,本研究以 HMX 为基,加入 B/Al 复合粉和黏结剂制备含硼铝炸药。用  $\Phi 100\text{ mm}\times 105\text{ mm}$  样品的空中爆炸和水中爆炸试验研究其能量释放特性,用  $\Phi 50\text{ mm}$  圆筒试验评价其作功能力,探讨了不同微米金属粉含量对含硼铝炸药的释能过程和作功能力的影响,为钝感高能含硼铝炸药在武器和弹药中的应用提供指导。

## 2 实验部分

### 2.1 材料与样品制备

HMX:甘肃白银银光化学材料有限公司,纯度 99.9%, $D_{50}=6.7\ \mu\text{m}$ ;钝化 HMX:中物院化材所,颗粒尺寸 20~30  $\mu\text{m}$ ;Al 粉:辽宁鞍钢实业微细铝粉有限公司,纯度 99%,颗粒尺寸 1~5  $\mu\text{m}$ ;B 粉:河北保定硼达新材料科技有限公司,纯度 99.9%,颗粒尺寸 1~5  $\mu\text{m}$ ;B/Al 复合粉:河北保定硼达新材料科技有限公司,质量比 1:1,颗粒尺寸范围 5~20  $\mu\text{m}$ ;端羟基聚异丁烯(HTPB):洛阳黎明化工研究院,平均分子量 2000,羟值 0.76  $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

通过大量试验筛选出三种机械感度满足加工要求的含硼铝炸药,见表 1。经过配料、升温熔化、捏合和搅拌均匀后制成药浆,在真空振动浇注机上依次装入一批  $\Phi 100\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ 、 $\Phi 50\text{ mm}\times 110\text{ mm}$  的金属模具中。然后,在 50  $^{\circ}\text{C}$  固化 120 h,冷却至室温开模,

表 1 含硼铝炸药配方及性能参数

Table 1 Formulations and performance parameters of explosives containing B/Al

sample	HMX / %	B	Al	binder	I / %	F / %	Q / $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$
ME-1	64	0	20	16	4	10	5.8387
ME-2	64	6	14	16	12	20	6.5657
ME-3	64	10	10	16	24	32	6.1849

Note: I is the impact sensitivity; F is the friction sensitivity; Q is the heat of detonation.

对浇注药柱进行加工得到试验样品,编号分别为 ME-1~ME-3,其装药密度由排水法测量。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 空爆试验

将  $\Phi 100\text{ mm}\times 105\text{ mm}$  的样品置于距离地面 1.5 m 高的支架上,用上端面中心点起爆。空爆试验中,ME-1、ME-2 和 ME-3 样品的药量分别为 1.356,1.354 kg 和 1.339 kg。超压传感器为 PCB 137B23B,试验前,通过两次  $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$  TNT 药柱的空爆试验进行标定。超压传感器布置在距离起爆点 3,4,5 m 和 6 m 的直线位置处,高度 1.3 m,两列超压传感器成 45 $^{\circ}$  角。用 PCB 冲击波超压传感器和数据采集仪测试冲击波超压<sup>[17-18]</sup>,用 Fastcam SA-X2 高速摄影机拍摄样品爆炸过程中火球形貌及演变历程,640 $\times$ 488 像素下拍摄速度 10000 帧/s。试验样品、超压测试和高速摄影布置现场见图 1。

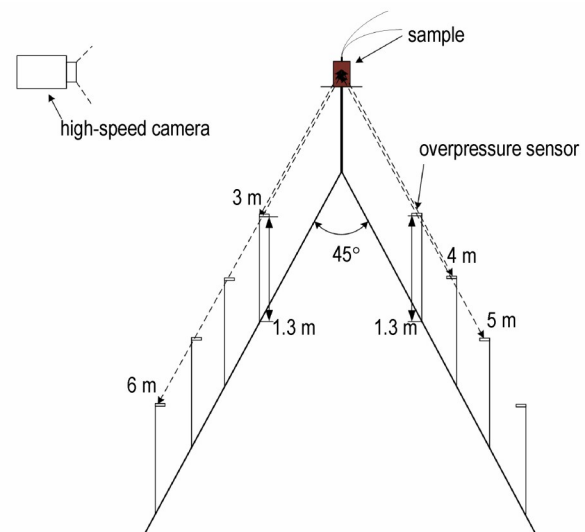


图 1 空爆试验布置图

Fig.1 Sketch of air blast test

#### 2.2.2 水下爆炸试验

水下爆炸试验中,样品尺寸  $\Phi 100\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ ,ME-1、ME-2 和 ME-3 样品的药量分别为 1.368,1.344 kg 和 1.339 kg。用网袋和绳索将样品放入水下 10 m,两侧布置压力传感器。水池上端面直径 48 m,底部直径 32 m,水深 23 m,水下爆炸试验布置情况见图 2。其中,右侧 6 个传感器距爆心距离分别为 2,3,4,5,6 m 和 7 m,用于测量冲击波压力时程;左侧 2 个传感器距爆心距离分别为 3 m 和 4 m,用于测量第一次气泡脉动周期。炸药爆炸释放的能量在水中表现为气泡能、冲击波能和热损耗能三部分。测定远场冲击波压力时

程曲线,计算出远场冲击波能,再经过修正计算出初始冲击波能(包含热损耗能及远场冲击波能);测定气泡脉动周期计算出气泡能。气泡能与初始冲击波能之和为炸药水中爆炸的总能量<sup>[19-20]</sup>。

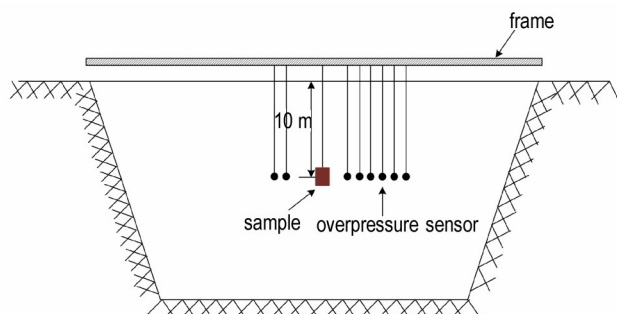


图2 水下爆炸试验布置图

Fig.2 Sketch of underwater explosion test

### 2.2.3 圆筒试验

$\Phi 50$  mm圆筒试验中,ME-1、ME-2和ME-3样品的密度分别为 $1.708, 1.689 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.673 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。试验系统由13个 $\Phi 50 \text{ mm}\times 50 \text{ mm}$ 药柱、 $\Phi 60.2 \text{ mm}\times 500 \text{ mm}$ 紫铜圆筒管(内径 $50.2 \text{ mm}$ ,长度 $500 \text{ mm}$ ,壁 $5 \text{ mm}$ )、电探针、氩气弹、光学窗口、示波器和高速转镜扫描相机等组成,其试验布置见图3。其中,两列电探针用于测量炸药的爆速;相机的转动速度为 $7.5\times 10^3 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,用于获得炸药爆轰驱动铜管膨胀曲线的实验底片,作功能力用 $300 \text{ mm}$ 长度处铜管外径径向膨胀到 $12 \text{ mm}$ 和 $38 \text{ mm}$ 的壁速和格尼能来表征。壁速和格尼能越大,则炸药的作功能力越强<sup>[21-22]</sup>。

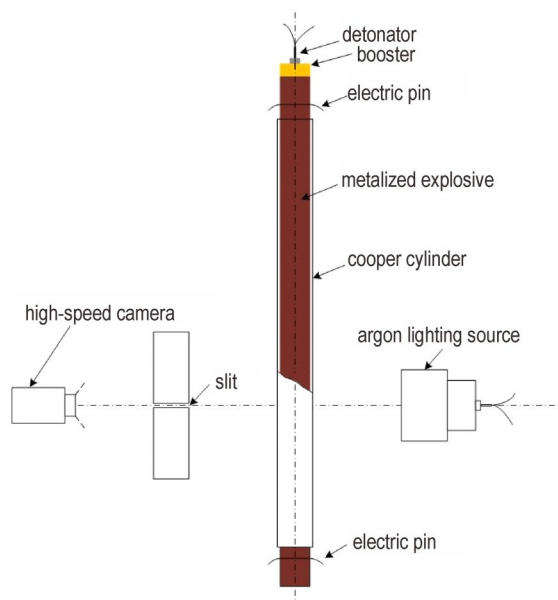


图3  $\Phi 50$  mm圆筒试验装置

Fig.3 Experimental setup of  $\Phi 50$  mm cylinder test

## 3 结果与讨论

### 3.1 空爆冲击波超压

含硼铝炸药空爆后,爆轰产物具有极高的压力,迅速向四周膨胀并推挤周围的空气,形成空气冲击波。B/Al复合粉具有后燃效应,所以在爆炸后期仍具有较大的冲击波超压。通过超压测试系统实测获得三种样品的冲击波超压衰减趋势。同时,采用Henrych公式<sup>[23-24]</sup>计算三种样品空爆产生的冲击波超压。

$$\begin{cases} \Delta p_{\max} = \frac{0.662}{\bar{R}} + \frac{4.05}{\bar{R}^2} + \frac{3.288}{\bar{R}^3} & (1 \leq \bar{R} \leq 10) \\ \bar{R} = R / \left( m \cdot \frac{Q}{Q_{\text{TNT}}} \right)^{1/3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\bar{R} = R / \sqrt[3]{m_e}$ 为比例距离; $R$ 为测试点距离爆心距离, $m$ ;  $m_e$ 为等效TNT质量,kg; $m$ 为样品质量,kg; $Q_{\text{TNT}}$ 为TNT爆热, $4.070 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $Q$ 为样品爆热,ME-1、ME-2和ME-3的爆热值分别为 $5.8387 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $6.5657 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $6.1849 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

对比实测超压与Henrych公式计算的超压,获得含硼铝炸药空爆冲击波超压随距离衰减趋势见图4。

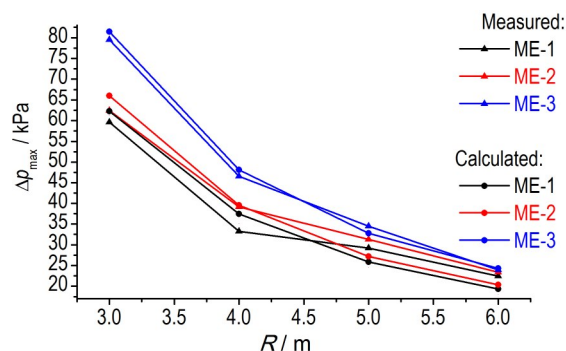


图4 冲击波超压实测值与Henrych经验公式计算值的对比

Fig.4 Comparison between the measured shock wave overpressures and the calculated values

从图4得知,三种炸药样品无约束空间中爆炸时,在 $3, 4, 5 \text{ m}$ 和 $6 \text{ m}$ 位置处空中超压值从大到小排序为 $\text{ME-3} > \text{ME-2} > \text{ME-1}$ ,含硼铝炸药(ME-3和ME-2)比含铝炸药(ME-1)冲击波超压值更高,表明B/Al复合粉燃烧反应释放的热量比Al粉更大,对远距离处超压的增强效果更显著。在HMX爆轰作用下,Al粉和B粉并不是严格按照金属活性的先后次序进行反应,而是Al粉先进行部分燃烧反应,提供一个较高的温度环境,随后在高温环境中Al粉和B粉同时进行燃烧反应。ME-3



样品(硼铝质量比 1:1)参与反应的 B 粉比 ME-2 样品(硼铝质量比 3:7)反应的 B 粉更多,释放的热量更大。因此,在各测量位置的 ME-3 样品的超压值比 ME-2 样品更高。

上述分析表明,实测的冲击波超压值与 Henrych 经验公式的计算值,其总体趋势一致,表明三种炸药样品的空爆冲击波超压满足爆炸相似率。实测的冲击波超压值与 Henrych 经验公式计算值有一定偏差,但最大偏差不超过 3.5 kPa。经验公式是根据等效 TNT 装药量计算的,其近距离处计算超压值较高。

### 3.2 燃烧和能量释放

采用高速摄影拍摄三种样品爆炸过程中火球形貌及演变历程,对比三种含硼铝炸药在不同时刻的爆炸和燃烧图像见图 5。

样品起爆后,HMX 在极短时间内发生爆轰反应,形成爆炸火球。从 0.1 ms 开始,爆炸火球尺寸逐渐增大。Al 粉比 B 粉更易与 HMX 爆轰产物和空气中氧气发生燃烧反应。经过 23.2 ms,含铝炸药 ME-1 燃烧火焰为黄色;含硼铝炸药 ME-2 和 ME-3 爆炸火球中心附

近颜色为黄色,而四周有微弱的蓝绿色火焰,样品中有少量 B 粉开始参与反应。随后蓝绿色火焰从边缘扩散到整个火球表面,火球四周的蓝绿色火焰更加明显,表明在 Al 粉燃烧带动下,B 粉正剧烈发生燃烧反应<sup>[25]</sup>。经过约 88.4 ms,ME-1 的放热燃烧反应趋于结束,黄色火焰即将消失,而含硼铝炸药还在继续发生燃烧反应,仍有较大的蓝绿色发光区域。特别是 ME-3,微米 B 粉燃烧产生的蓝绿色火焰仍波及整个火球表面,表明在燃烧反应后期,B/Al 复合粉中 Al 粉基本反应完全,而 B 粉仍继续参与反应。B/Al 复合粉的后续反应时间大于 Al 粉,且 B/Al 复合粉含量越大,后续反应时间越长。该阶段 B 粉燃烧释放出大量能量,延长了爆轰反应的高温高压持续时间,增强了后效作功能力<sup>[26-27]</sup>。

### 3.3 水下爆炸能量

#### 3.3.1 冲击波能

含硼铝炸药水下爆炸后,爆轰产物具有极高的压力,迅速向四周膨胀,在爆轰产物和水界面处形成初始冲击波并在水中传播,其能量在传播过程中部分转化为热耗散能<sup>[28-29]</sup>。由于 B/Al 复合粉与爆轰产物和水

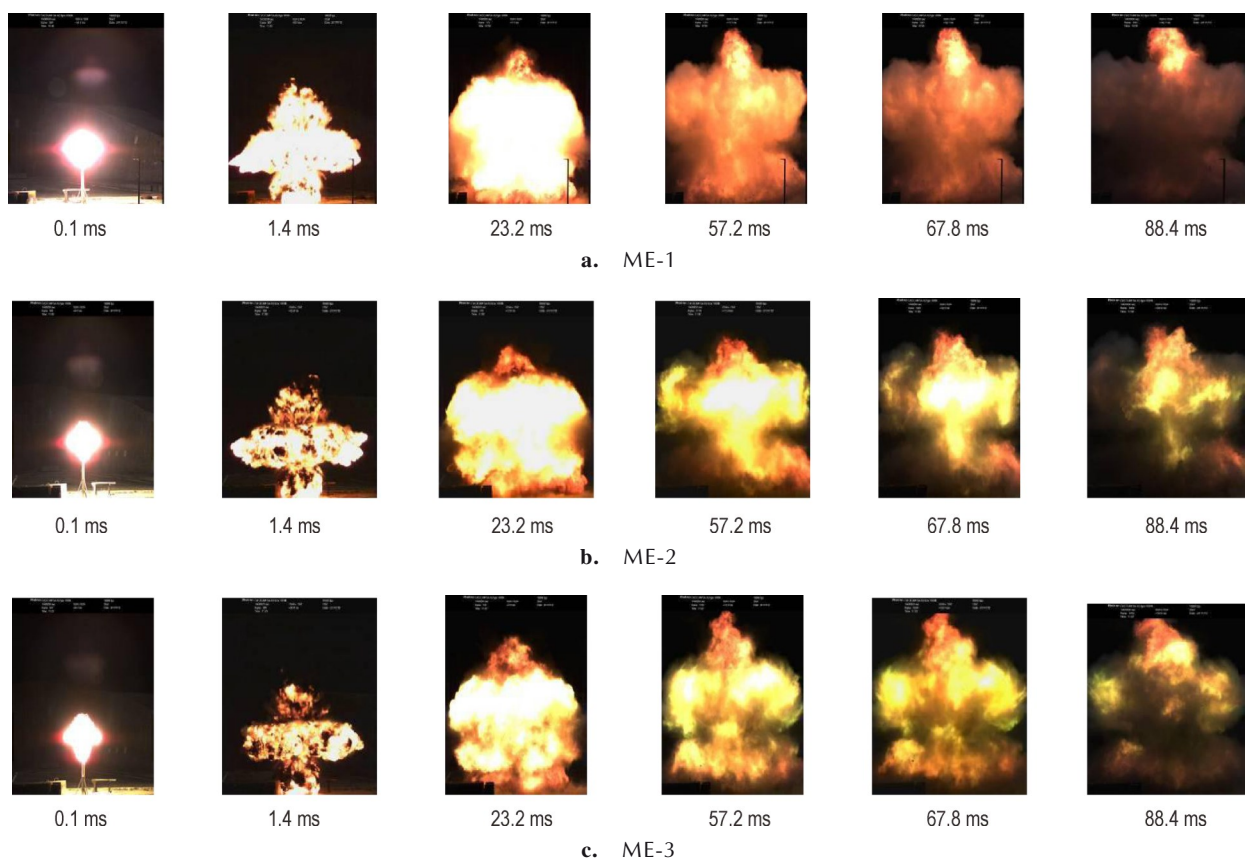


图 5 3 种含硼铝炸药空中爆炸高速照片对比

Fig.5 Comparison of high speed photographs of air blast for three explosives containing B/Al

蒸汽的二次反应,在爆炸后期仍有较大的冲击波超压。通过超压测试系统获得样品在不同位置的冲击波超压。根据水下爆炸相似律,用公式组(2)计算不同测量位置的冲击波能  $E_s$  和初始冲击波能  $E_{s0}$  [30]。

$$\begin{cases} E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 C_0 m} \int_0^t p(t)^2 dt \\ E_{s0} = \mu E_s \\ \mu = 1 + 0.13328 p_{cj} - 6.775 \times 10^{-3} p_{cj}^2 + 1.2594 \times 10^{-4} p_{cj}^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $E_s$  为距离装药中心  $R$  处的冲击波能,  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\rho_0$  为水的密度,  $1.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $C_0$  为水的声速,  $1460\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $m$  为样品质量,  $\text{kg}$ ;  $p(t)$  为测点处  $t$  时刻冲击波压力,  $\text{MPa}$ ;  $t$  为积分上限,  $\mu$ ;  $E_{s0}$  为初始冲击波能,  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\mu$  为冲击波修正因子;  $p_{cj}$  为装药爆压,  $\text{GPa}$ 。根据参考文献[1], ME-1、ME-2 和 ME-3 的爆压计算值分别为 24.73、25.53 GPa 和 25.93 GPa, 计算获得其冲击波修正因子  $\mu$  分别为 2.178、2.211 和 2.229。根据不同位置测试的冲击波压力时程计算的冲击波能和初始冲击波能见表 2。

表 2 三种含硼铝炸药的冲击波能和初始冲击波能

Table 2 Shock wave energy and initial shock wave energy of explosives containing B/Al

$R / \text{m}$	ME-1			ME-2			ME-3		
	$p(t)/\text{MPa}$	$E_s/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_{s0}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$p(t)/\text{MPa}$	$E_s/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_{s0}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$p(t)/\text{MPa}$	$E_s/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_{s0}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
2.0	25.02	1.031	2.246	25.00	1.023	2.262	26.17	1.121	2.499
3.0	15.82	0.961	2.093	15.62	1.004	2.220	15.21	1.039	2.316
4.0	12.19	1.135	2.472	10.33	1.087	2.403	12.17	1.128	2.514
5.0	8.56	0.904	1.969	9.96	0.982	2.171	9.58	1.013	2.258
6.0	7.27	0.951	2.071	7.41	0.952	2.105	7.57	0.965	2.151
7.0	6.52	0.978	2.130	6.27	1.014	2.242	6.51	1.021	2.276
mean		0.993	2.164		1.010	2.234		1.048	2.336

从表 2 可知,在 6 个测量位置, ME-1、ME-2 和 ME-3 冲击波能的平均值分别为 0.993、1.010  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 1.048  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 含硼铝炸药 (ME-2 和 ME-3) 的冲击波能均稍大于含铝炸药 (ME-1) 的冲击波能。这表明 B 粉与 HMX 的爆轰产物和水蒸汽发生的二次反应比 Al 粉二次反应释放出较大的热能, 对冲击波能有一些贡献。经过修正因子  $\mu$  计算的初始冲击波能为理论值, 设计的三种金属化炸药的初始冲击波能表现出与冲击波能相同的变化规律。

### 3.3.2 气泡能

气泡脉动周期  $T_b$  是第一次气泡脉动压力峰值对应时间与冲击波到达时间的差值, 由气泡脉动压力周期曲线得到。气泡能  $E_b$  用公式组(3)计算 [30]。

$$\begin{cases} T_b = T_f - T_s \\ E_b = (0.6842 P_h^{5/2} \rho_0^{-3/2} T_b^3) / (m \cdot 10^6) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $T_b$  为气泡脉动周期,  $\text{ms}$ ;  $T_f$  为第一次气泡脉动压力峰值对应时间,  $\text{ms}$ ;  $T_s$  为冲击波到达时间,  $\text{ms}$ ;  $E_b$  为每公斤样品的气泡能,  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $E_m$  为炸药样品气泡能,  $\text{MJ}$ ;  $P_h$  为炸药中心处静水压和试验时当地大气压之和,  $\text{Pa}$ ;  $h$  为炸药中心入水深度,  $10\text{ m}$ 。根据 3 m 和 4 m 处传感器测试的第一次气泡脉动周期计算的气泡能见表 3。

从表 3 可知,在测量位置 3 m 和 4 m 处, ME-1、ME-2 和 ME-3 气泡能的平均值分别为 1.807、1.946  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 1.968  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 含硼铝炸药 (ME-2 和 ME-3) 的气泡能

表 3 三种含硼铝炸药的气泡能

Table 3 Bubble energy of explosives containing B/Al

sample	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$m/\text{kg}$	$h/\text{m}$	$R/\text{m}$	$T_f/\text{ms}$	$T_s/\text{ms}$	$T_b/\text{ms}$	$E_m/\text{MJ}$	$E_b/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
ME-1	1.704	1.368	10	3	189.84	1.941	187.90	2.474	1.807
				4	190.50	2.610			
ME-2	1.691	1.344	10	3	193.50	1.934	191.52	2.615	1.946
				4	194.20	2.634			
ME-3	1.676	1.339	10	3	194.18	1.933	192.32	2.635	1.968
				4	194.88	2.634			

均大于含铝炸药(ME-1)的气泡能。其中,含 20% B/Al 复合粉的 ME-3 气泡能最大,比含铝炸药(ME-1)大 0.161 MJ·kg<sup>-1</sup>,这进一步表明 B 粉与 HMX 的爆轰产物和水蒸汽发生的二次反应比 Al 粉二次反应释放出更大的热量,对气泡能有较大贡献。含硼铝炸药水下爆炸能量  $E$  等于初始冲击波能  $E_{s0}$  和气泡能  $E_b$  之和,计算结果见表 4。

表 4 3 种含硼铝炸药的水下爆炸总能量

Table 4 Total energy in underwater explosion of explosives containing B/Al

sample	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$m/\text{kg}$	$E_{s0}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_b/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
ME-1	1.704	1.368	2.164	1.807	3.971
ME-2	1.691	1.344	2.234	1.946	4.180
ME-3	1.676	1.339	2.336	1.968	4.304

从表 4 可知,3 种炸药样品中,水下爆炸总能量从大到小的次序依次为 ME-3、ME-2 和 ME-1,含硼铝炸药(ME-2 和 ME-3)的水下爆炸总能量比含铝炸药(ME-1)大。结果表明,HMX 基含硼铝炸药中,使用 B/Al 复合粉时,HMX 的爆热提高爆轰产物的温度和改善金属粉的燃烧环境,Al 粉与爆轰产物和水蒸汽的二次反应能够进一步促进 B 粉的二次反应,释放出大量的反应热,分别通过冲击波和气泡脉动提高冲击波能和气泡能,从而提高水下爆炸的总能量。

3.4 作功能力评价

$\phi 50\text{ mm}$  圆筒试验是测量金属化炸药爆速和评价作功能力的有效方法之一<sup>[31-32]</sup>。试验时,通过在外露铜管上下药柱安装电探针测量爆速。爆轰产物对铜管的加速过程采用高速相机进行拍摄和记录,获得圆筒 300 mm 处铜管膨胀曲线实验底片,根据公式组(4)先拟合膨胀距离与膨胀时间数据获得系数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$ ,然后分别计算不同膨胀距离的壁速和格尼能随爆轰产物相对体积的变化<sup>[33-34]</sup>,计算结果见图 6 和图 7;3 种含硼铝炸药作功能力的比较结果见表 5。

$$\begin{cases} t = a_1 + a_2(R - R_0) + a_3 e^{a_4(R - R_0)} \\ U = \frac{1}{a_2 + a_3 a_4 e^{a_4(R - R_0)}} \\ \frac{V}{V_0} = \left( \frac{R - d}{R_0 - d} \right)^2 \\ E_G = \frac{U^2}{2} \left( \frac{m}{c} + \frac{1}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $t$ 为圆筒壁膨胀的时间, $\mu\text{s}$ ;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为待定系数; $R$ 为圆筒外壁距圆筒中心轴线的距离, $\text{mm}$ ;  $R_0$ 为圆筒外壁距圆筒中心轴线的初始距离, $\text{mm}$ ;  $U$ 为圆筒壁的速度, $\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ;  $V/V_0$ 为爆轰产物的相对体积; $d$ 为圆筒壁厚, $\text{mm}$ ;  $E_G$ 为格尼能, $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $m$ 和  $c$ 分别为铜管和炸药单位长度的质量, $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

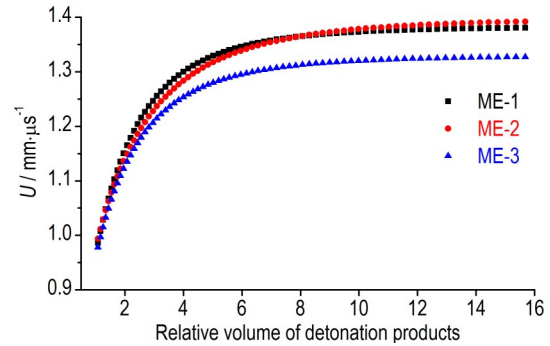


图 6 铜管壁速随爆轰产物相对体积的变化

Fig.6 Variation of the copper wall velocity with the relative volume of detonation products

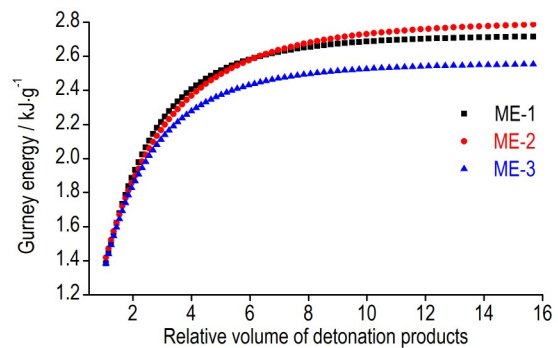


图 7 格尼能随爆轰产物相对体积的变化

Fig.7 Variation of Gurney energy with the relative volume of detonation products

表 5 在不同膨胀距离三种含硼铝炸药的壁速和格尼能

Table 5 Copper wall velocity and Gurney energy of explosives containing B/Al at different expansion distances

sample	$D$ /mm·us <sup>-1</sup>	$\rho$ /g·cm <sup>-3</sup>	$R-R_0=12\text{ mm}$		$R-R_0=38\text{ mm}$		$R-R_0=70\text{ mm}$	
			$U$ /mm·μs <sup>-1</sup>	$E_G$ /kJ·g <sup>-1</sup>	$U$ /mm·μs <sup>-1</sup>	$E_G$ /kJ·g <sup>-1</sup>	$U$ /mm·μs <sup>-1</sup>	$E_G$ /kJ·g <sup>-1</sup>
ME-1	7.812	1.708	1.179	1.980	1.351	2.600	1.380	2.713
ME-2	7.845	1.689	1.162	1.942	1.345	2.602	1.390	2.780
ME-3	7.855	1.673	1.147	1.907	1.300	2.448	1.327	2.550

从图 6、图 7 和表 5 可知,在早期阶段(爆轰产物的相对体积小于 2)所有炸药的壁速和比动能曲线是相似的,这是由炸药中 Al 粉的反应引起的。膨胀距离  $R-R_0=12\text{ mm}$  时,爆轰产物的相对体积为 2.190。在大约爆轰产物的 2 倍比体积之后,ME-2 和 ME-3 的壁速



比ME-1低,表明未消耗足够的Al粉并带动B粉反应驱动铜管壁膨胀,这是因为炸药中B的反应速率比Al低。膨胀距离 $R-R_0=38$  mm时,爆轰产物的相对体积为6.350。在大约爆轰产物的6倍比体积之后,ME-2的比动能大于ME-3,表明ME-2中B粉消耗的数量逐渐增加。膨胀距离 $R-R_0=70$  mm时,爆轰产物的相对体积为14.44,ME-2的比动能 $2.780\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 稍高于ME-1的比动能 $2.713\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ,表明B的燃烧热比Al高,金属粉含量20%(B 6%+Al 14%)的ME-2比含铝炸药ME-1(Al 20%)具有更强的后燃效应。可是,金属粉含量20%(B 10%+Al 10%)的ME-3比动能 $2.550\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 最低,这是因为在ME-3的铜管破裂之前,爆轰产物中没有足够的氧和B粉反应,在密闭环境中未能体现含硼铝炸药中B粉的燃烧能量优势。然而,当铜管壁膨胀破裂后,空气中的氧可以与B/Al复合粉反应释放燃烧热,增强后效作功能力,这使得含硼铝炸药在高效毁伤弹药中具有广阔的应用前景<sup>[35-36]</sup>。

#### 4 结论

(1)空爆试验中,在HMX的爆轰作用下由Al粉燃烧带动B粉燃烧,释放出大量的燃烧热。在相同测量位置,含硼铝炸药(ME-2和ME-3)空中爆炸的冲击波超压大于含铝炸药(ME-1),且爆炸火球的持续时间更长。特别是,含20%硼铝复合粉的ME-3爆炸火球持续时间最长。这表明B粉比Al粉具有更强的燃烧强度和更大的能量释放。B/Al复合粉的燃烧延长了含硼铝炸药二次反应的高温高压持续时间,增强了后效作功能力。

(2)水下爆炸中,炸药爆轰的能量表现为冲击波能和气泡能。3种炸药样品中,水下爆炸总能量从大到小的次序依次为ME-3、ME-2和ME-1,含硼铝炸药(ME-2和ME-3)的水下爆炸总能量比含铝炸药(ME-1)大。这表明HMX基含硼铝炸药中,使用B/A复合粉时,HMX的爆热能提高爆轰产物的温度和改善金属粉的燃烧环境,B/A复合粉的二次反应释放出大量的反应热,通过气泡脉动提高气泡能,从而提高水下爆炸的总能量。

(3) $\Phi 50$  mm圆筒试验用壁速和格尼能评价含硼铝炸药的作功能力,只能表征铜管壁未破裂前状态,初始爆轰产物与空气互相隔离,时间尺度仅几十微秒。膨胀距离 $R-R_0=70$  mm(相对体积14.44)时,ME-2的比动能 $2.780\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 稍高于ME-1的比动能 $2.713\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ,

而ME-3的比动能 $2.550\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 最低。因为在铜管破裂之前,ME-3的爆轰产物中没有足够的氧和B粉反应,在密闭环境中未能体现含硼铝炸药中B粉的燃烧能量优势。

#### 参考文献:

- [1] 李兴隆,刘清杰,高大元,等.用弹簧探针法测试含硼铝炸药的爆轰性能[J].火炸药学报,2017,40(12):59-65.  
LI Xing-long, LIU Qing-jie, GAO Da-yuan, et al. Detonation property measurement of explosive containing B/Al by spring electric pin method[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(12): 59-65.
- [2] 蒋秋黎,罗一鸣,吕玺,等. DNTF基含铝炸药的爆轰能量和安全性[J].含能材料,2021,待发表.  
JIANG Qiu-li, Luo Yi-ming, LV Xi, et al. Detonation energy and safety of DNTF based aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, To be published.
- [3] 牛磊,曹少庭,金大勇,等.含 $\alpha$ -AlH<sub>3</sub>的HMX基凝聚相炸药的安全性和爆轰性能[J].含能材料,2021,10.11943/CJEM2021079.  
NIU Lei, CAO Shao-ting, JIN Da-yong, et al. Safety and detonation performance of HMX based condensed phase explosives containing  $\alpha$ -AlH<sub>3</sub>[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 10.11943/CJEM2021079.
- [4] Song Qingguan, Gao Dayuan, Zheng Baohui, et al. Preparation and characterization of metalized explosive containing B and Al powder [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5), 384-390.
- [5] GAO Da-yuan, SONG Qing-guan, et al. Study on sensitivity and detonation property of explosive containing B/Al[C]// The 21st Seminar on NTREM, Pardubice, the Czech Republic, April 18-20, 2018: 125-133.
- [6] 王德海,林国忠,高大元,等.硼铝复合粉在含能材料中的应用[J].兵器装备工程学报,2018,39(8):157-163.  
WANG De-hai, LIN Guo-zhong, GAO Da-yuan, et al. Application of B/Al compound powde in energetic materials [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(8): 157-163.
- [7] C. Badiola, R.J. Gill, E.L. Dreizin. Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(10): 2064-2070.
- [8] Young G, Sullivan K, Zachariah M R, et al. Combustion characteristics of boron nanoparticles [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(2): 322-333.
- [9] Flower P Q, Steward P A. Improving the efficiency of metalized explosives[C]//Symposium on Energetic Materials and Insensitive Munitions, USA, 2006.
- [10] Joslph R. Explosive composition containing a light metal sensitizer [P]. USP 936042, 1909.
- [11] Lotsvanger C S Y, Ravasgatan S H V. Method for increasing the effect of high-energy explosives mixtures, and explosives mixtures produced in accordance with this method [P]. USP 0487 472A1, 1991.
- [12] Xu S, Chen Y, Chen X, et al. Combustion heat of the Al/B pow-

- der and its application in metalized explosives in underwater explosions [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2016, 52(3): 342-349.
- [13] Cao W, Song Q, Gao D, et al. Detonation characteristics of an aluminized explosive added with boron and magnesium hydride [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(11): 1393-1399.
- [14] Cao W, Guo W, Ding T, et al. Laser ablation of aluminized RDX with added ammonium perchlorate or ammonium perchlorate boron magnesium hydride [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 221: 194-200.
- [15] Li X, Cao W, Song Q, et al. Study on energy output characteristics of explosives containing B/Al in the air blast [J]. *Combustion, explosion, and shock waves*, 2019, 55(6): 723-731.
- [16] Yang Y, Duan Z P, Zhang L S, et al. Measurements of reaction zone and determination of the equation of state parameters of DNAN-based melt-cast aluminized explosive [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2020, 38(2): 240-251.
- [17] S. A. Formby, R. K. Wharton. Blast characteristics and TNT equivalence values for some commercial explosives detonated at ground level [J]. *J. Hazard. Mater*, 1996, 50(2-3): 183-198.
- [18] N. H. Yen, L. Y. Wang. Reactive metals in explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(2): 143-155.
- [19] 封雪松, 赵省向, 刁小强, 等. 含硼金属炸药水下能量的实验研究 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(5): 21-24.  
FENG Xue-song, ZHAO Sheng-xiang, DIAO Xiao-qiang, et al. Experimental research of underwater energy of explosive containing boron/metal [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 21-24.
- [20] 陈愿, 陈相, 蒋伟, 等. 硼含量对含铝炸药水下爆炸能量的影响 [J]. *爆破材料*, 2015, 44(6): 1-4.  
CHEN Yuan, CHEN Xiang, JIANG Wei, et al. Influence of boron content on underwater explosion energy of aluminized explosive [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(6): 1-4.
- [21] 韩勇, 黄辉, 黄毅民, 等. 含铝炸药圆筒试验与数值模拟 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(4): 14-17.  
HAN Yong, HUANG Hui, HUANG Yi-min, et al. Cylinder test of aluminized explosives and its numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(4): 14-17.
- [22] 卢校军, 王蓉, 黄毅民, 等. 两种含铝炸药作功能力与JWL状态方程研究 [J]. *含能材料*, 2005, 13(3): 144-147.  
LU Xiao-jun, WANG Rong, HUANG Yi-min, et al. Study on work ability and JWL equation of state of two aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 144-147.
- [23] J Henrych, R Major. The dynamics of explosion and its use [M]. Elsevier, New York, 1979.
- [24] GJB 6390.3-2008. 面杀伤导弹战斗部静爆威力试验方法 第3部分: 冲击波超压测试 [S]. 中华人民共和国国家军用标准, 2008.  
GJB 6390.3-2008. Static power method for anti-surface missile warhead—Part 3: measurement of blast wave overpressure [S]. The military standard of the People's Republic of China, 2008.
- [25] D. Liang, R. Xiao, Y. Wang. Ignition and heterogeneous combustion of aluminum boride and boron-aluminum blend [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 1081-1091.
- [26] P. Liu, L. Liu, G. He. Effect of solid oxidizers on the thermal oxidation and combustion performance of amorphous boron [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 124(3): 1587-1593.
- [27] Y. Zhou, J. Liu, J. Wang, et al. Experimental study on dynamic combustion characteristics of aluminum particles [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(8): 1-12.
- [28] E. L. Baker, W. Balas, C. Capellos, et al. Combined effects aluminized explosives [R]. 2010, AD-E403 299.
- [29] Da-yuan Gao, Wei Cao, et al. Energy output characteristics of explosives containing B-Al in air blast and underwater explosion [C]//The 32nd International Symposium on shock waves, Singapore, July 15-19, 2019.
- [30] GJB 7692-2012. 炸药爆炸相对能量评估方法—水中爆炸法 [S]. 中华人民共和国国家军用标准, 2012.  
GJB 7692-2012. Evaluation method of relative explosive energy—underwater explosion test [S]. The military standard of the People's Republic of China, 2012.
- [31] Selezenev A A, Kreknin D A, Lashkov V N, et al. Comparative analysis of the effects of aluminum and aluminum hydride on the detonation parameters and performance of mixed explosives [C]//Eleventh Symposium (International) on Detonation, Colorado, Office of Naval Research, 1998: 231-236.
- [32] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药与理想炸药能量输出结构的数值模拟 [J]. *火炸药学报*, 2007, 30(4): 6-8.  
XIN Chun-liang, XU Geng-guang, LIU Ke-zhong, et al. Numerical simulation of energy output structure for aluminized explosive and idealized explosive in under explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(4): 6-8.
- [33] 于川, 刘文翰, 李良忠, 等. 钝感炸药圆筒试验与爆轰产物JWL状态方程研究 [J]. *高压物理学报*, 1997, 11(3): 227-233.  
YU Chuan, LIU Wen-han, LI Liang-zhong, et al. Studies on cylinder test and JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1997, 11(3): 227-233.
- [34] Thomas Keicher, Andreas Happ, Alois Kretschmer. Influence of aluminium /ammonium perchlorate on the performance of underwater explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1999, 24(3): 140-143.
- [35] 裴明敬, 毛根旺, 吴婉娥, 等. 含铝温压燃料爆炸抛撒过程中能量释放效率研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(3): 276-283.  
PEI Ming-jing, MAO Gen-wang, WU Wan-e, et al. On energy releasing efficiency of thermobaric fuel containing aluminum in dispersing with explosion [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(3): 276-283.
- [36] 黄亚峰. 混合金属化炸药的释能机理研究 [D]. 北京: 中国兵器科学研究院, 2003.  
HUANG Ya-feng. Study on the energy release mechanism of mixed metallized explosive [D]. Beijing: Chinese Academy of Weapons Science, 2003.



## Energy Output Characteristics and Power Ability of HMX-based Explosives Containing B/Al

LI Xing-long<sup>1,2</sup>, WANG De-hai<sup>1</sup>, LIU Qing-jie<sup>1,2</sup>, HUA Cheng<sup>1,2</sup>, CAO Wei<sup>1,2</sup>, SONG Qing-guan<sup>1,2</sup>, WANG Xiang<sup>1,2</sup>, GAO Da-yuan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Robust Munitions Center, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** How to improve the explosion energy and power ability of explosive by applying reactive metal particles effectively is the key problem for the design of metalized explosive. To explore the application of the micro-B/Al composite powder in enhance blast explosive (EBX) and thermobaric explosive (TBX), three HMX-based explosives containing B/Al particles were designed and prepared. The energy output characteristics of the samples with a dimension  $\Phi 100$  mm $\times$ 105 mm was studied by air blast and underwater explosion tests, meanwhile the power abilities were evaluated by a  $\Phi 50$  mm cylinder test. The effect of the content of micro-metal on energy output process and power ability of metalized explosives was discussed. Results show that in the air blast and underwater explosion tests, initiated by the detonation of HMX, the combustion of micro-Al can promote the afterburning effect of micro-Boron resulting in releasing a great amount of combustion heat to generate expansible products with high temperature and high pressure, finally increase the sustained duration of fireball and total energy in underwater explosion. In the cylinder test, there was not enough oxygen to react with micro-B before the cooper cylinder burst, accordingly the advantage of combustion energy of micro-boron in explosives containing B/Al could not present. However, after the cooper cylinder burst, the oxygen in the air can oxide B/Al composite powder to release a large amount of combustion heat, which can enhance the power ability of aftereffect.

**Key words:** HMX-based explosives containing B/Al; air blast test; underwater explosion test; cylinder test; overpressure of shock wave; bubble energy; Gurney energy

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021165

(责编: 王艳秀)