

文章编号: 1006-9941(2007)05-0441-06

含铝温压燃料性能研究

裴明敬^{1,2}, 毛根旺¹, 胡华权², 陈立强²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 介绍了一种含超细片状铝粉的温压燃料配方试样及各项物化性能参数测试过程, 结合测试结果综合分析了该燃料的含能水平及铝粉在爆炸过程中的能量释放效率以及燃料爆炸火球发展规律和爆炸冲击波形成、扩展过程。结果表明: 燃料的能量密度为 $16.11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 理论爆炸威力大于 4.0 倍 TNT 当量, 在爆炸抛散过程中片状铝粉的能量释放速率和有效利用率较高, 对冲击波能量贡献较大; 另外, 燃料内相容性、贮存安定性和使用安全性良好, 经过冲击试验和火炮的发射安全性考核, 燃料抗过载能力大于 $1.7 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 满足高过载武器平台发射安全性要求。

关键词: 应用化学; 温压燃料; 爆炸; 铝粉

中图分类号: TJ55; O69

文献标识码: A

1 引言

温压燃料常被称为第四代燃料空气炸药, 抛撒后点火、爆炸可以产生更强的爆炸冲击波和持续时间更长的高温火球, 具有比常规凝聚炸药大得多的综合破坏效应: 利用爆炸产生的爆轰波和冲击波的破坏作用可以对常规目标进行硬杀伤; 利用持续的高温和窒息作用能高效杀伤隐藏在建筑物或山洞等密闭掩体内的有生力量; 在反恐战争中, 美国拟利用温压战斗部爆炸产生的持续高温来摧毁恐怖分子库存的化学和生物战剂^[1], 这样不会因生化战剂泄漏造成更大的灾害。

一般来说, 温压燃料主要成份为炸药颗粒、液态敏化剂、高热值金属粉以及含能聚合物材料等。其中高热值金属粉末不仅能提供爆炸初始阶段的冲击波能, 而且还能提高燃料爆炸后的热效应。因此, 探索新型高热值金属添加剂, 提高金属添加剂在燃料中的含量, 改善金属添加剂燃烧性能、提高能量释放效率, 从而增强温压战斗部总体破坏效应成为研究者关注的主要研究方向。

国内外已有许多学者从不同侧面研究了高性价比金属添加剂铝粉的颗粒度和形态对固体炸药爆炸威力的影响^[2-7]。本工作通过实验室和外场试验, 研究了含超细片状铝粉温压燃料的爆炸效能。

2 含铝温压燃料的成分及物化性能

2.1 金属添加剂的选择

含能温压燃料配方的主要成份包括高热值金属添加剂、液体敏化剂、润滑剂和活性保护剂等。其中, 几种常用的高热值金属添加剂性能参数^[8]见表 1。

从表 1 数据分析: 铍的质量热值和体积热值均较高, 应该是首选的高能添加剂, 但铍的燃烧产物毒性和粉尘危害太大, 应用困难。硼的质量热值和体积热值均比铝和镁的高, 熔点和沸点也较高, 点火温度在 $(1310 \pm 40) \text{ }^\circ\text{C}$ 以上^[9], 要想使其快速释放能量, 需要进行特殊工艺处理, 目前的处理技术还很难达到实际应用水平^[10], 超细硼粉的价格也很高。镁的密度和质量热值相对较低, 但熔点和沸点也较低, 燃烧或爆轰时, 在爆轰波阵面或火焰燃面很近的区域即开始点燃放热, 尽管反应放热值不高, 但反馈至爆轰波阵面或燃面的热量还比较大, 点火和爆炸性能很好, 目前已在部分 FAE 燃料中作为添加剂使用。铝的密度和质量热值处于中等水平, 单质熔点较低, 在火焰阵面或爆炸波阵面容易发生熔化, 另外 Al 和 Al_2O_3 的热膨胀系数比值大于 1, 加热时氧化物壳层应力增加, 容易使氧化壳层破裂, 增加透气性^[11], 有利于本体进一步氧化, 释放能量, 点火容易, 经过综合试验、分析, 本实验选择铝粉作为温压燃料的高能添加剂, 但铝的沸点较高, 需要采取措施提高其能量的释放速率。

收稿日期: 2006-10-16; 修回日期: 2007-03-26

基金项目: “十五”国防预研基金(4132604)

作者简介: 裴明敬(1967-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要从事爆炸技术、弹药工程研究。e-mail: peimingjing@163.com

表1 几种燃料添加剂的性能参数

Table 1 Parameters of the useful additive materials in the fuel

| additive materials | $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | $Q_1/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | $Q_2/\text{MJ} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $T_m/^\circ\text{C}$ | $T_b/^\circ\text{C}$ | $T_{\text{mo}}/^\circ\text{C}$ | $T_{\text{bo}}/^\circ\text{C}$ |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Be | 1840 | 66.5 | 122.5 | 1284 | 2484 - 2970 | 2557 | 3787 - 4260 |
| B | 2220 | 59.3 | 131.6 | 2130 | 3667 | 455 | 1860 - 2043 |
| Al | 2700 | 31.1 | 83.9 | 660 | 2477 | 2047 | 2980 |
| Mg | 1740 | 24.7 | 43.0 | 650 | 1112 | 2807 | 3260 - 3580 |

Note: T_m , melting point of the elements; T_b , boiling point of the elements; T_{mo} , melting point of the oxide; T_{bo} , boiling point of the oxide; Q_1 , theoretical combustion heats; Q_2 , theoretical combustion heats by unit volume.

2.2 燃料的基本成份

含铝温压燃料的主要成份为高能添加剂铝粉。燃料中铝粉是经过特殊加工的超细、片状铝粉,电镜下的微观形态如图1所示。从图1的结构图中可测得片状铝粉的厚度约为 $0.5 \mu\text{m}$,长度约为 $10 \mu\text{m}$ 左右,此结构扁平多刺,比表面积大,在抛散初期易于吸热达到瞬态高温,并熔化及汽化,在与周围氧气接触时能够快速反应,提高能量释放速率和能量释放效率。超细、片状铝粉与其它几种原料混合后的微观形态如图2所示。从中可以看出,片状铝粉和炸药颗粒在液体敏化剂的粘结下,形成相互包覆的混合体,两种物质混和均匀。

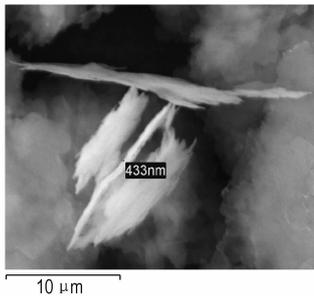


图1 铝粉微观形态的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photograph of aluminum flakes

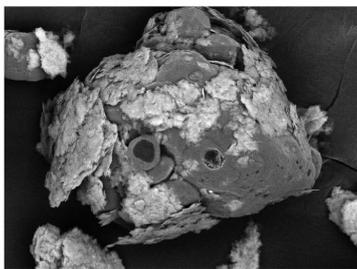


图2 混合燃料的微观形态

Fig. 2 Microstructure of fuel particle in mixture

按照设计要求加工的铝粉颗粒度分布如图3所示,图中左侧纵坐标轴为颗粒分布体积百分数,右侧纵坐标轴为颗粒累积百分数。测试结果表明 $1 \mu\text{m}$ 以下的超细铝粉约占20%体积, $5 \mu\text{m}$ 以下约占55%体积,

$17 \mu\text{m}$ 以下约占90%体积,其余分布在 $17 \sim 70 \mu\text{m}$ 之间,比表面积为 $7.6 \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。根据TEM测试的铝粉表面氧化层厚度约为 $2 \sim 5 \text{nm}$,化学分析实测铝粉活性大于86%。

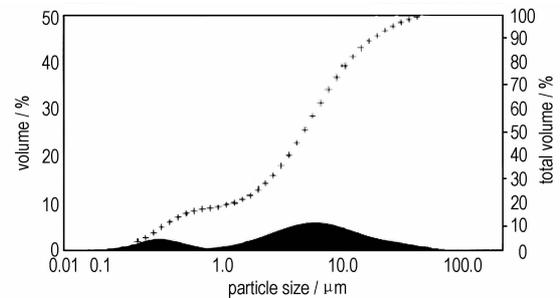


图3 铝粉的颗粒度分布曲线

Fig. 3 Distribution of the aluminum particle size

另外,含铝温压燃料中还含有液体敏化剂、助能剂、润滑剂和活性保护剂等。助能剂主要作用是在燃料分散过程中提高铝粉的初始反应温度和燃料分散速度,使铝粉快速和空气中的氧结合,提高能量释放率,并对爆炸冲击波能有贡献;润滑剂的主要作用是调节燃料的摩擦感度,使燃料适应高过载条件下的安全性要求;活性保护剂主要为直链烃,主要在燃料贮存过程中保护铝粉,避免氧化;液体敏化剂的作用主要是为燃料爆炸初期提高初始氧含量、改善铝粉的反应速率、调剂燃料的起爆感度,提高燃料综合性能。

2.3 燃料的物化性能

2.3.1 燃料物理性能

由于燃料中使用大量的铝粉,常态为蓬松状固体粉末,易在空气形成飞尘,不易沉降,所以在混制过程中添加少量油性直链烃,一方面对铝粉活性起到保护作用,另一方面保持燃料润湿,在铝粉颗粒和固态成份之间增加润滑性能。燃料混制工艺简单,把铝粉、活性保护剂、液态敏化剂和固态的增强剂同时加入密闭型搅拌装置直接混和即可。

成品燃料封装保存,在常压下为亚饱和态、银灰色

松散固态,在装填压力下则呈饱和态、胶泥状,流变性
好,易充满药室空间。燃料的松散密度约为
 $0.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,振动装填密度可达 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,在压
装、捣装条件下最佳装填密度可达 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,如
果压力太大,将有液体成份渗出。

2.3.2 燃料内相容性和外相容性

燃料组分的内相容性是指燃料组分之间的共存共
容性能,反映燃料各组分之间的化学反应能力和燃料
的长期存贮安定性能,燃料的外相容性是指燃料与弹
体材料、密封材料、包装材料间的化学反应性能。

燃料的内相容性按照 GJB737.6-94 标准,采用
CSC4400 型微热量热仪检测,测试曲线如图 4 所示,图
中曲线表示燃料各成份及混和燃料在 65 °C 条件下热
流值随时间变化曲线,由于燃料的实测热流值绝对值
较其理论热流值绝对值较小,表明燃料各组份间的内
相容性良好,在存贮期内燃料组份之间发生化学反
应的过程缓慢,不会影响使用性能。

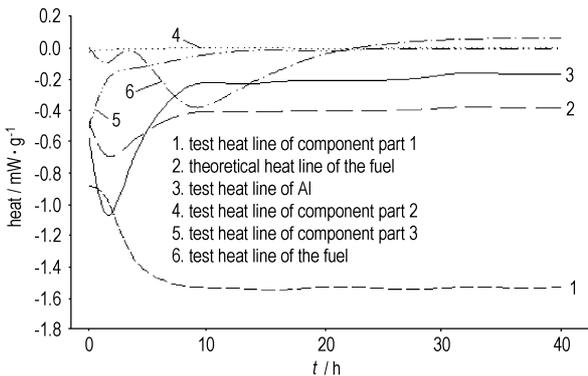


图 4 燃料内相容性微热量热法测试曲线
Fig. 4 Curves of the fuel's initial compatibility

燃料的外相容性按照 GJB772A504.1 测试了燃料
与钢壳体材料、铝壳体材料之间的腐蚀性,按照
GJB737.6-94 标准测试了燃料与石棉橡胶密封材
料之间的相容性,结果都表明燃料与包装材料、弹体材
料、密封材料间相容性很好。

2.3.3 燃料潜能及热值测定

根据表 1 中铝的热值数据,按照盖斯定律计算得到
含铝粉燃料试样的总焓值和理论燃烧热值(见表 2),其
中燃料中除铝粉外其它成份总的理论燃烧热值按照盖
斯定律计算为 $2.59 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。计算公式如下:

$$Q = \Delta H_p^{298.15} - \sum_{i=1}^L n_i M_i \Delta H_i^{298.15}$$

式中, $\Delta H_i^{298.15}$ 为完全燃烧产物 i 在 298.15 K 下的质量
生成焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; M_i 为第 i 种物质的摩尔质量,

$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; Q 为 1 kg 燃料的燃烧热值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; L
为完全燃烧产物数; n_i 为 1kg 燃料完全燃烧产物 i 的
物质的量,它要满足原子守恒方程。

表 2 燃料的理论总焓和理论燃烧热值

Table 2 Theoretical combustion heats and enthalpy of fuel

| $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | $\Delta H/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | $Q_1/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | $Q_2/\text{MJ} \cdot \text{dm}^{-3}$ |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1.55 | 14.82 | 16.11 | 24.4 |

Note: ΔH , theoretical enthalpy; Q_1 , theoretical combustion heats; Q_2 ,
theoretical combustion heats by unit volume.

表 3 燃料在不同试验环境条件下测试的热值

Table 3 Experimental combustion heats in different conditions

| experiment condition | oxygen (0.5 MPa) | air (0.5 MPa) | argon (1.0 MPa) |
|--|---------------------|------------------|--------------------|
| releasing heat/ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 16.87 | 5.946 | 4.606 |

表 3 为利用 GR-3500 型氧弹量热计按照
GJB770A-97-701.2 爆热和燃烧热方法测试的不同
环境中燃料的放热值,从中可以看到不同环境中燃料
的能量释放效率存在很大差别。在富氧环境中,燃料
试样的能量释放率($16.87 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)很高,接近燃料
的理论燃烧热值($16.11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);在有限空间内的
空气环境中,燃料的能量释放率约为理论燃烧热值的
35%;在无氧环境中燃料的能量释放效率约为理论燃
烧热值的 27%;另外与敏化剂和炸药粉单独引燃时能
量的计算值相比,在氩气环境中的燃料的放热值较高,
说明在无外界氧支持条件下有部分铝粉参与了中间反
应过程,与含铝炸药的爆炸反应特性相似。

图 5 是燃料燃烧后残渣的微观形态。由图 5 可以
清晰地看出残渣中大部分为球形团聚物颗粒,直径分
布在 $0.5 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 左右,电镜扫描分析,游离的 C 原
子很少,团聚物表面为 Al_2O_3 壳层,经过对残渣的化
学分析可知,残渣中仍有 19.9% 的活性 Al 存在,说明在
 Al_2O_3 壳层内部还有未氧化的铝存在。

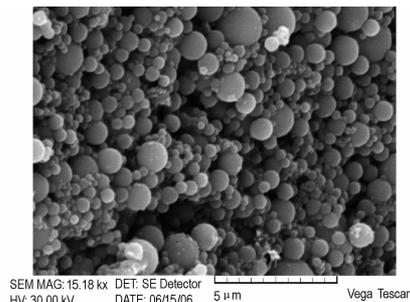


图 5 燃料燃烧后残渣的微观形态
Fig. 5 SEM photograph of residue after fuel fired

从图1和图5(图中有刻度标尺)的颗粒度分析,在铝粉参加燃烧反应前,片状铝粉的平均体积约为 $10\ \mu\text{m}^3$,而残渣中团聚的氧化铝颗粒的平均体积约为 $0.5\ \mu\text{m}^3$,说明片状铝粉在燃烧反应中发生了熔化和断裂过程。在燃料剧烈燃烧过程中,由于生成大量气体,在气体的动力学作用下使一个铝粉片熔化后分散、团聚成数十个铝液滴(此时环境温度并不足以达到铝粉的汽化温度),这个过程有利于铝粉进一步细化,增大比表面积,加速铝粉的能量释放效率和能量释放速率。小液滴表面与氧接触,反应后形成氧化铝壳层,氧化铝壳层对液滴具有保护作用,阻滞了氧气向液滴内部的扩散,使颗粒内部存在部分活性铝。该过程降低了铝粉的能量释放效率。因此在抛撒过程中需要采取提高初始温度、增大氧含量、减小颗粒度等措施调控爆炸过程,提高燃料的能量释放效率。

2.3.4 燃料的贮存安全性

按照 GJB736.8-90 试验标准,燃料在 $(71 \pm 1)\ ^\circ\text{C}$ 条件下经过 28 天和 39 天加速老化试验,试验过程中未发生安全问题,试验后外观无明显变化,试验前后同批试样感度无变化,起爆性能和爆炸威力无明显变化。根据可比性原则,燃料可以安全存贮 8~10 年。

按照 Q/AY251 高低温冲击试验方法,燃料在 $-40\sim+50\ ^\circ\text{C}$ 之间进行温度冲击试验,试验过程中未发生安全问题,试样外观未发现明显变化,试样在试验前后的冲击和摩擦感度均为 0%,未发生变化。

2.3.5 燃料使用安全性能

燃料的使用安全性和可靠性主要由冲击感度、摩擦感度、枪击感度和实际抗过载能力来评定。感度测试结果与常用炸药比较见表4,从表中数据可以看出含铝温压燃料试样的冲击和摩擦感度比钝化 RDX 和 TNT 炸药更低。

表4 燃料感度测试结果及与常用炸药比较

Table 4 Results of the fuel's sensitivity and comparison with TNT & RDX

| test item | thermobaric explosive | RDX ^[12] | TNT ^[13] |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| impact sensitivity | 0% (10 kg, 25 cm) | 32% (10 kg, 25 cm) | 8% (10 kg, 25 cm) |
| friction sensitivity | 0% | 8% - 16% | 4% - 6% |
| shooting sensitivity | NDD | NDD | / |
| spark sensitivity | 7 kV, 0.22 μF | / | / |

Note: NDD denotes neither deflagration nor detonation.

燃料的抗冲击过载能力首先在 $\Phi 57\ \text{mm}$ 轻气炮

上进行了逆弹道撞击实验,采用压电加速度计实测了燃料的实际过载,试验中装填燃料量 10 g,装药高度 60 mm,燃料在冲击加速度达到 $6.0 \times 10^5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上、脉冲宽度 50~500 μs 时是安全的。过载试验值如表5所示。

表5 燃料抗冲击试验测试结果

Fig.5 Results of anti-impact test of fuels

| impact velocity $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | shot materials | target materials | acceleration $/10^5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | result |
|--|----------------|------------------|---|--------|
| 245 | polythene | Q235 | 2.48 | safe |
| 287 | polythene | Q235 | 3.3 | safe |
| 281 | polythene | polythene | 4.7 | safe |
| 330 | polythene | polythene | > 6.0 | safe |
| 315 | Al | Q235 | > 6.0 | safe |

燃料的抗发射过载性能还采用目前所知的大口径炮弹发射平台中膛压最高的 130 mm 火炮^[14]进行试验,试验时燃料分别装填于模拟弹和实弹内,试验共发射模拟弹 15 发、实弹 18 发,各分三组,战斗部分别保持高温 $55\ ^\circ\text{C}$ 、低温 $-40\ ^\circ\text{C}$ 和常温 $15\ ^\circ\text{C}$,发射平均膛压达到 367 MPa,燃料承受的发射过载达到 $1.7 \times 10^5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,所有试验过程中均未出现发射异常和落地爆炸现象。

需要说明的是:燃料的抗过载性能是一个非常重要的技术指标,必须根据具体需求进行大量的全尺寸实验考核。

3 燃料爆炸性能和能量释放效率

3.1 实验条件

温压燃料的能量释放效率和高能添加剂的能量释放速率只能通过测量爆炸冲击波的能量、火球的发展过程、温度上升时间和爆炸火球高温维持时间定性说明。为了比较燃料中高能添加剂的能量释放速率,对燃料试样进行了外场爆炸抛散试验,装置采用如图6的同轴结构,中心抛散炸药量为 0.2 kg,装填燃料容积为 1.0 L,燃料试样装填量为 1.5 kg。试验在平坦场地进行,高速摄影相机布置在距爆心 20 m 处,压力传感器分别布置在距爆心 2 m、4 m、6 m、8 m 处,测试火球发展过程和冲击波衰减规律。

3.2 高温火球发展过程

为了更准确判读火球直径,在距爆炸装置中心 2 m 处设置红白相间的标志杆,红白标示间距 20 cm,从放大的图片中可以清晰分辨,图片判读精度为 0.5 mm,实际测量精度可达 15 mm。图7为燃料试样在爆炸后某时刻的火球照片。试验时高速摄影照片的

设置曝光时间为 $80 \mu\text{s}$, 从照片判读出的最终火球最大直径为 6.30 m , 高温持续时间 578 ms 。

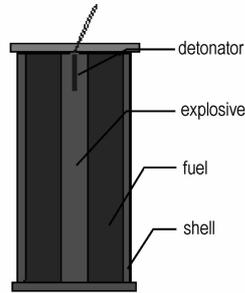


图 6 试验装置结构图

Fig. 6 Structure of the experimental set-up



图 7 爆炸火球发展的高速摄影照片

Fig. 7 High-speed photographs of the fireball

火球的扩展曲线如图 8 所示, 从中可以看出, 火球的扩展具有明显的特征, 首先经过一个快速扩展阶段, 短时间内火球半径达到特征半径的 $60\% \sim 70\%$, 在此时期, 伴生的爆炸冲击波与火球基本同时发展, 直到冲击波与火球分离, 高温火球进入稳定期: 此阶段大量的空气与燃料混合, 持续释放大量的能量, 以维持火球的高温环境, 此时火球的形状和体积在一个相对长的时间内保持不变, 表征火球的参数, 如: 体积、温度和高温持续时间等皆可称为爆炸特征参数, 可以用来评价温压炸药的综合爆炸效应。之后, 高温火球进入自由扩散阶段, 燃料燃烧释放的能量逐渐向周围扩散, 火球的温度渐渐降低, 火球亮度逐渐黯淡, 直至形成烟雾散去。

3.3 爆炸冲击波发展过程

从高速摄影图中还可以清晰地看到爆炸产生的空气冲击波与爆炸火球的分离过程, 当爆炸火球和冲击波一起扩展到某一特征半径后, 爆炸冲击波与火球界面分离, 冲击波以大于火球扩展速度的速度向外运动, 直至最后衰减为声速。为了更清晰表征冲击波的分离过程, 在图 9 中显示了经过局部放大处理的 3 张连续扩展的冲击波图片, 该图片进行了相应技术处理, 在图片的中央可以清晰看到冲击波的运行轨迹。为便于分析, 冲击波扩展曲线与火球扩展曲线共同绘制于图 8 中。

从图 8 的火球发展曲线和冲击波扩展曲线分析, 燃料试样在中心抛散药作用下, 产生的爆炸冲击波与火球界面分离位置大致在距爆心 2.0 m 处。爆炸冲击

波与爆炸火球分离位置不仅与中心装药量有关, 同时和燃料的成份、性能有密切关系, 爆炸火球的能量对前沿冲击波有贡献, 火球发展速度越快, 火球与冲击波共同运动的时间越长, 燃料持续的放能对前沿冲击波能量贡献越大, 冲击波压力越高, 破坏威力越强。

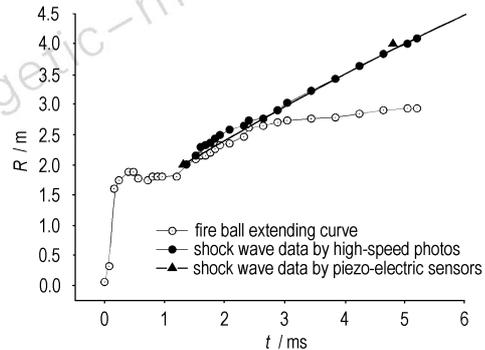


图 8 爆炸火球和冲击波迹线

Fig. 8 R-t curves of the fireball and shockwave

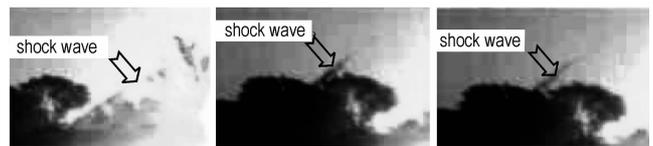


图 9 局部放大后的冲击波图片

Fig. 9 High-speed photographs of the shockwave enlarged locally

3.4 燃料在爆炸抛散过程中的能量释放效率

燃料在爆炸抛散过程中释放的能量包括冲击波能、爆炸火球的热能和光能、壳体碎片的动能等。由于火球能量很难确定, 所以燃料的能量释放效率很难定量描述。不过, 如果以爆炸冲击波效应作为破坏评判标准的话, 可以根据爆炸冲击波在空气中衰减的相似性规律换算出各燃料试样的爆炸当量^[15], 也就是说, 可以依据燃料释放能量对爆炸冲击波的贡献值作为评判燃料能量释放效率的标准。严格来讲, 这样计算燃料的爆炸效率并不恰当, 由于凝固相炸药爆炸与燃料空气炸药爆炸时的能量释放速率和与空气的能量耦合系数有较大差别。但如果以爆炸冲击波损伤效应作为评判燃料爆炸威力的标准时, 采用以上近似也是合理的。

试验测定了燃料试样在装药密度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时在 2.0 m 、 4.0 m 、 6.0 m 、 8.0 m 处的爆炸冲击波超压, 其峰值统计于表 6。按照冲击波衰减曲线计算的燃料的爆炸 TNT 比当量见表 7。表中的理论比当量值 q_t 按照燃料的燃烧热值计算, TNT 按照密度 $\rho = 1.598 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时爆热 $Q_i = 4.226 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16] 计算。燃料爆炸的实测 TNT 比当量 q_e 按照爆炸产生的冲击波超压值反演, 能量释放效率 E 按照实际 TNT 比

当量与理论 TNT 比当量的比值计算。

表 6 燃料试样爆炸冲击波压力测试数据

Table 6 Overpressure peak with distance in the test

| R/m | 2.0 | 4.0 | 6.0 | 8.0 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| $\Delta p/MPa$ | 0.4795 | 0.1245 | 0.0561 | 0.0337 |

表 7 燃料试样比当量和能量释放效率

Table 7 Ratio power and energy releasing efficiency of the fuel

| $\rho/kg \cdot m^{-3}$ | q_t | q_e | E |
|------------------------|-------|-------|-----|
| 1.50 | 4.00 | 1.556 | 39% |

4 结 论

(1) 本研究中设计的含铝温压燃料试样的装填密度可达 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上, 体积能量密度达到 $24.4 \text{ MJ} \cdot \text{dm}^{-3}$, 经过火炮发射考核, 燃料的抗过载能力大于 $1.7 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 能够满足大口径榴弹及其它发射平台高过载发射安全性要求; 燃料制造工艺简单, 使用安全性、存贮安定性良好, 可以满足工业化生产的安全性要求。

(2) 含铝温压燃料爆炸时的能量释放效率与使用环境的含氧量密切相关, 因此, 确定温压燃料配方时不仅要考虑燃料的含能水平, 还一定要考虑使用的环境条件。

(3) 铝粉的形状、颗粒度和氧化层厚度对能量释放速率有重大影响, 降低铝粉的颗粒度、提高比表面积、减小表面氧化层厚度、提高铝粉活性, 均可提高铝粉在爆炸过程中的能量释放效率和能量释放速率。

参考文献:

- [1] Michael A Levi. Effect of nuclear earth-penetrator and other weapons [R]. Washington D C: The National Academies Press, 2005.
- [2] Ornellas D L. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives [R]. October 1961 to April 1982. LLNL, UCRL-52821; P43, 49.
- [3] 殷海权, 潘清, 张建亮, 等. 铝粉对炸药性能的影响 [J]. 含能材料. 2004, 12(5): 318-320.
YIN Hai-quan, PAN Qing, ZHANG Jian-liang, et al. The influence of aluminum powder on explosive performance [J]. *Chinese Journal of Energetic materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(5): 318-320.
- [4] 于川, 李良忠, 黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 175-279.
- [5] 张炜, 曹泰岳, 王宁飞, 等. 铝粉颗粒燃烧产物的平均弥散度计算研究 [J]. 推进技术, 1997, 18(2): 103-106.
ZHANG Wei, CAO Tai-yue, WANG Ning-fei, et al. A study on aluminum oxide particle size calculation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(2): 103-106.
- [6] 陈朗, 冯长根, 赵玉华, 等. 含铝炸药爆轰数值模拟研究 [J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(4): 415-419.
CHEN Lang, FENG Chang-gen, ZHAO Yu-hua, et al. Numerical simulations of the detonation of aluminized explosives [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(4): 415-419.
- [7] 苗勤书, 徐更光, 王廷增. 铝粉粒度和形状对含铝炸药性能的影响 [J]. 火炸药学报, 2002, (2): 4-7.
MIAO Qin-shu, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng. Mechanism analysis of the influence of Al shape and size on the detonation properties of aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, (2): 4-7.
- [8] 张炜, 朱慧. 固体推进剂性能计算原理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996.
- [9] Kuo K K, Summerfield M. Fundamentals of solid-propellant combustion [R]. New York: AIAA, Inc., 1984.
- [10] 裴明敬, 毛根旺, 郑开伟, 等. 含硼温压燃料初步研究 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 1-5.
PEI Ming-jing, MAO Gen-wang, ZHENG Kai-wei, et al. Explosion performance of thermobaric fuel containing boron [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(4): 1-5.
- [11] 张炜, 朱慧. 固体推进剂性能计算原理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996.
- [12] 机械工业部第二零四研究所编. 火炸药手册·第一分册(增订本) [M]. 1981. 183.
- [13] 机械工业部第二零四研究所编. 火炸药手册·第一分册(增订本) [M]. 1981. 45.
- [14] 王连荣, 张佩勤. 火炮内弹道计算手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [15] 汪亮, 刘华强, 刘敏华. 包覆铝粉破裂燃烧的试验观察 [J]. 固体火箭技术, 1999, 22(2): 40-44.
WANG Liang, LIU Hua-qiang, LIU Min-hua. Experimental observations on disruptive burning of coated aluminum particles [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(2): 40-44.
- [16] 兵器工业部第二〇四所. 火炸药手册(增订本, 第四分册) [M]. 1987.

(下转 463 页)

Mechanical Behavior and Constitutive Model of Pressed Aluminized Explosive

CHEN Rong, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, WANG Rui-feng

(Department of Applied Physics, Institute of Science, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: Compressive behaviors of a pressed aluminized explosive with different densities ($1.5, 1.6, 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) were investigated experimentally by split Hopkinson pressure bars (SHPB) and hydraulic testing machine at different strain-rates (ranged from 0.008 s^{-1} to 800 s^{-1}) respectively. Nonlinear stress-strain curves at different strain rates were obtained. The results show that the mechanical behaviors of the aluminized explosive is obviously rate-dependent, and the corresponding failure stresses become higher if the original density or loading strain rates rise. A constitutive relation was established base on the experimental curves.

Key words: solid mechanics; aluminized explosive; constitutive model; strain rate effect

(上接 446 页)

Characteristic of the Thermobaric Explosive Contained Aluminum Powders

PEI Ming-jing^{1,2}, MAO Gen-wang¹, HU Hua-quan², CHEN Li-qiang²

(1. Northwest Polly University, Xi'an 710072, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A thermobaric explosive containing aluminum powder shaped flake and many physic-chemical parameters' testing courses of the fuel were mainly introduced. The energy contained in fuel was calculated, the energy releasing efficiency of fuel was tested in different environment, and the fireball's expanding characteristic and shockwave's removing process were studied. The results show that the fuel's energy density is $16.11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ theoretically, about 4 times of TNT-equivalency. The energy releasing rate of the aluminum flakes in the fuel is fast, and the released energy enhances the shockwave immediately when the shockwave is born and spreads. The fuel is safe in using and depositing. The capacity of the fuel's anti-loading is identified well after impact test and shooting test in large caliber fire-guns, and also show that the fuel is safe under the overload by $1.7 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. The fuel's stability is adopt to the large caliber fire-guns' shooting condition.

Key words: applied chemistry; thermobaric fuel; explosion; aluminum flake

(上接 454 页)

High-speed Liquid Jet Driven by Burned Gas of Gas Generating Compositions

ZHAO Lin-shuang, DU Zhi-ming

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new spray device is presented in the paper. Its power source is burned gas produced by combustion of gas generation compositions. High-speed photography was used in the experiments. Atomization processes of spiral jet spray nozzles is studied under five different charge quantities (30 g, 40 g, 50 g, 70 g, 90 g) of gas generator. Experimental results show, the atomizing effect of jet can be improved with increasing charge quantity of the main propellant grains. When charge quantity of gas generator is more than 50 g, the atomizing effect of jet is preferable.

Key words: fluid mechanics; gas generator; spiral jet spray nozzle; high-speed photography