

# 含铝温压炸药及其爆炸效能研究

裴明敬, 胡华权, 张景森, 于 琴, 刘 瑜, 陈立强

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**[摘要]** 主要阐述含铝温压炸药配方的基本组成及在不同环境条件下的能量释放效率、爆炸火球及冲击波的形成过程等。通过测试含铝温压炸药在氧气、空气和氩气环境中的燃烧热值, 研究不同环境对其爆炸能量释放效率的影响及其使用范围; 通过测试爆炸火球和冲击波的成长过程、火球温度和高温火球持续的时间分析含铝温压炸药爆炸机理和破坏效能。结果表明, 以超细片状铝粉为主要原料的含铝温压炸药在有氧环境中爆炸的能量释放效率和能量释放速率均较高, 其有效破坏效能为较强的爆炸冲击波和持续的高温火球, 大大延展温压炸药的破坏效能。

**[关键词]** 含铝温压炸药; 爆炸效能; 冲击波; 爆炸火球

**[中图分类号]** TQ56 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)04-0067-09

## 1 前言

温压炸药因其比常规凝聚炸药大得多的综合破坏效应, 得到了广泛的应用, 也被称为第四代燃料空气炸药。因在抛撒后可以产生更强的爆炸冲击波和持续更长时间的高温火球, 而具有更特殊的用途; 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; 甚至在反恐战争中, 可以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, 不至因生化战剂泄漏造成更大的人为灾害<sup>[1]</sup>。

温压炸药的主要成分为高能炸药颗粒、液态敏化剂、高热值金属粉及含能聚合物材料等。其中高热值的金属粉末作为添加剂, 不仅能提供爆炸初始阶段的冲击波能, 同时可提高燃料爆炸后的热效应, 国内外已有许多学者从不同侧面研究了金属颗粒度和形态对固体炸药爆炸威力的影响<sup>[2-7]</sup>。因此, 寻求高热值的金属添加剂种类、提高其在燃料中的含量、改善燃烧性能、提高能量释放效率等成为增强温

压炸药总体破坏效应的有效方法。

通过多年的实验研究, 笔者研制了一种具有含能高、抗高过载能力强、能够适应高速武器平台需求的“三高”温压炸药配方, 该炸药配方以超细片状铝粉为主要原料, 同时添加了高能炸药颗粒、液态敏化剂及其他功能成分, 笔者以此为基础研究分析含铝温压炸药在爆炸抛散中能量的释放过程、爆炸前后铝粉的形态变化以及爆炸火球、爆炸冲击波的形成发展过程, 从而揭示温压炸药的爆炸及破坏机理。

## 2 含铝温压炸药配方及含能水平

### 2.1 含铝温压炸药配方简介

作为铝温压炸药的主要成分的高能添加剂铝粉, 是经过特殊加工的超细、片状粉, 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  $10 \mu\text{m}$ , 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, 并熔化及气化, 在与周围氧气接触时能够快速反应, 提高能量释放的速率和效率。从图 2 可以看出超细、片状铝粉与其他几种原料混合后的微观形态, 片状铝粉和炸药颗粒在液体敏化剂的粘结下, 形成

**[收稿日期]** 2008-11-18

**[作者简介]** 裴明敬(1967-), 男, 河南南召县人, 副研究员, 博士, 研究方向为新概念武器与弹药技术, 爆炸与冲击动力学相关理论及应用; E-mail: peimingjing@163.com

相互包覆的混合物,两种物质混和均匀。

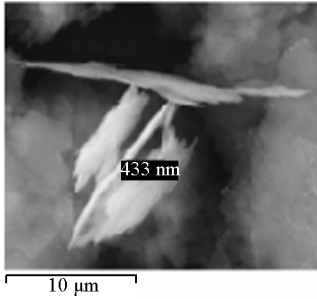


图1 铝粉微观形态的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photograph of aluminum flakes

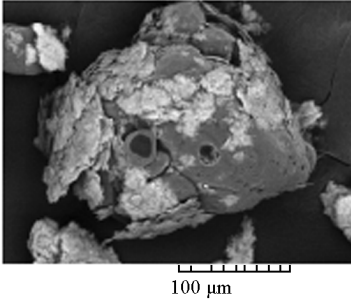


图2 混合燃料的微观形态

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,测试结果表明小于 $1\ \mu\text{m}$ 时超细铝粉约占体积的20%,小于 $5\ \mu\text{m}$ 约占体积的55%,小于 $17\ \mu\text{m}$ 时约占体积的90%,其余范围分布在 $17\sim 70\ \mu\text{m}$ 之间,比表面积为 $7.6\ \text{m}^2/\text{g}$ 。根据TEM(透射电镜)测试铝粉表面氧化层厚度约 $2\sim 5\ \text{nm}$ ,化学分析实测铝粉活性大于86%。

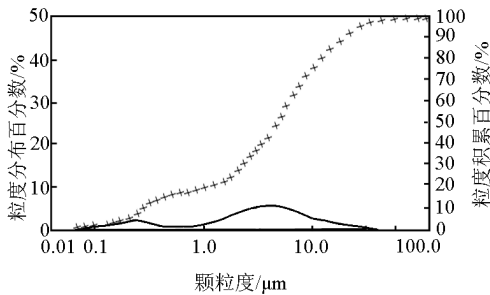


图3 铝粉的颗粒度分布曲线

Fig. 3 Distributing curve of the aluminum particle size

另外,含铝温压炸药配方中还含有液体敏化剂、助能剂、润滑剂和活性保护剂等。液体敏化剂的作用主要是为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,提高综合性能。助能剂主要作用是在分散过程中提高铝粉的初始反应温度和分散速度,使铝粉快速和空气中的氧结合,提

高能量释放率,并能提高爆炸冲击波能;润滑剂的主要作用是调节摩擦感度,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,主要在贮存过程中保护铝粉,避免氧化。

成品含铝温压炸药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。松散密度约 $0.77\ \text{g}/\text{cm}^3$ ,振动装填密度可达 $1.50\ \text{g}/\text{cm}^3$ ,在压装、捣装条件下最佳装填密度可达 $1.55\ \text{g}/\text{cm}^3$ ,如果压力太大将有液体渗出。

## 2.2 含铝温压炸药的理论含能及实验测定

根据配方中各组分的热值数据,按照盖斯定律计算得到含铝温压炸药试样的总焓值和理论燃烧热值如表1所示。

表2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巨大差别。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。

表1 炸药试样的理论总焓和理论燃烧热值

Table 1 Theoretical combustion heats and enthalpy of sample

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

$D$ —燃料密度; $\Delta H$ —理论总焓; $Q_1$ —理论燃烧热值; $Q_2$ —单位体积理论燃烧热值

表2 炸药试样在不同试验环境条件下测试的热值

Table 2 Experimental combustion heats in different conditions

试验条件	氧气	空气	氩气
	$/(0.5\ \text{MPa})$	$/(0.5\ \text{MPa})$	$/(1.0\ \text{MPa})$
释放热量 $/( \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1} )$	16.87	5.946	4.606

燃料燃烧后残渣的微观形态见图4。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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  壳层内部还有未氧化的铝存在。

从图 1 和图 4 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气化温度),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。

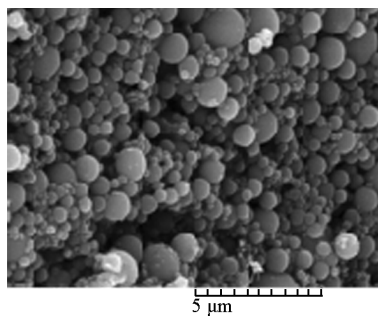


图 4 试样燃烧后残渣的微观形态

Fig. 4 SEM photograph of residue after thermobaric explosive fired

### 2.3 含铝温压炸药的爆炸威力

为了检验含铝温压炸药的爆炸威力,采用不同的装药质量进行试验,表 3 为实测的不同装药量时不同距离的爆炸冲击波数据。为检验测试系统的准确性,每次试验都采用柱状浇注 TNT 药柱进行系统标定,因此表中也统计了 5.9 kg TNT 爆炸的冲击波衰减数据。

表 3 含铝温压炸药试样爆炸冲击波压力测试数据(MPa)

Table 3 Data of the thermobaric explosive sample's shockwave pressure with distance

爆心距/m	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1.515 kg	0.479 5	-	0.124 5	-	0.056 1	-	0.033 7	-	-
2.35 kg	-	0.378	0.151 2	0.094 5	-	0.042 4	-	0.038	-
6.00 kg	-	-	0.335	0.195	0.138	-	0.065	-	0.035 4
5.95 kg TNT	-	-	0.254	0.150	0.105	-	0.056	-	0.035 0

图 5 为表 3 中相应的爆炸冲击波超压随爆心距变化的衰减曲线。图中 QLHX 为含铝温压炸药代号,可以直观地看出 6.0 kg 含铝温压燃料试样爆炸的冲击波压力明显比同样质量的 TNT 炸药爆炸在相同位置处的压力高,说明同质量的温压炸药比 TNT 的爆炸威力要高。

为了更加准确地体现温压炸药的爆炸性能,一般采用爆炸比当量值来量化表现温压炸药的爆炸威力,所谓比当量,就是在相同目标同样破坏程度下,1 kg 温压炸药相当于 TNT 的质量数。

爆炸比当量可以采用相同试验条件下测试 TNT 爆炸和温压炸药爆炸的冲击波衰减规律和对效应物的损伤效果来综合分析确定,也可以通过相同的经验公式进行计算。不过,对于采用的经验公式需要弄清其使用条件,保证两种爆炸方式的冲击波衰减规律相似,比如图 5 中的两种爆炸方式,在冲击波超

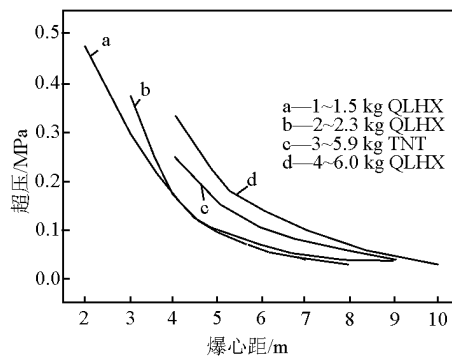


图 5 不同装药量爆炸的冲击波  $\Delta p - r^*$  曲线  
Fig. 5  $\Delta p - r$  curve of the different quantity charge

\* 起压—爆心距

压为 0.02 ~ 0.5 MPa 间,TNT 爆炸的  $\Delta p - r$  曲线与温压炸药爆炸的  $\Delta p - r$  曲线的变化趋势非常相似。由于试验条件和测试系统相同,采用的拟合公式一

致,换算的 TNT 当量具有较高的可靠性。

根据多年的实践经验及相关的测试标准要求<sup>[8-11]</sup>,通常采用式(1)的形式进行爆炸比当量的计算:

$$\Delta p_m = a_1 \frac{Q^{1/3}}{R} + a_2 \left[ \frac{Q^{1/3}}{R} \right]^2 + a_3 \left[ \frac{Q^{1/3}}{R} \right]^3 \quad (1)$$

式中, $a_1, a_2, a_3$  都为常数, $a_1 = 0.84, a_2 = 2.7, a_3 = 7.0$ ;  $\Delta p_m$  为冲击波峰值高峰,  $10^5$  Pa;  $Q$  为 TNT 当量, kg;  $R$  为冲击波到达距离, m。

根据实测的  $\Delta p_m$  和  $R$  值,可按照上式求得每个装药量条件下的  $Q$ ,再除以装置的实际装药量和修正系数,如式(2),即可获得试样的爆炸比当量  $Q_{TNT}$ 。

$$Q_{TNT} = Q / (k \cdot W) \quad (2)$$

式中,  $W$  为实际装药质量, kg;  $Q_{TNT}$  为爆炸比当量, 无量纲数;  $k$  为根据 TNT 标定实验数据确定的修正系数。

根据表 3 的数据按照公式(1), (2) 计算的平均当量、比当量、平均比当量及不确定度统计见表 4。

表 4 含铝温压炸药试样的爆炸比当量

Table 4 Ratio equivalence of the thermobaric explosive sample

装药量/kg	1.515	2.35	6.00	5.9 kg TNT
平均当量/kg	3.849 ± 0.50	7.492 ± 1.81	14.04 ± 2.8	10.38 ± 0.846
爆炸比当量	1.443 5 ± 0.33	1.811 ± 0.77	1.330 ± 0.47	1.76 ± 0.14
平均比当量	1.528 ± 0.205			

从计算的平均比当量来看,含铝温压炸药试样

的爆炸比当量为  $1.528 \pm 0.205$ ,也就是说,根据装药条件和实验环境不同,试样爆炸的威力大约为 1.323 ~ 1.733 倍的 TNT 装药量,最可几比当量为 1.528 倍 TNT 当量。

### 3 含铝温压炸药爆炸火球形成及扩展特性

#### 3.1 爆炸火球形成及扩展过程

为分析含铝温压炸药爆炸火球的特征参数和性能,采用数字高速摄影相机分别拍摄了 1.5 kg 级和 50 kg 级两种装药量的爆炸火球形成与扩展过程。

两种试验装置的装药结构均为柱形中心装药结构。1.5 kg 级装药的爆炸装置规格为  $\phi 92$  mm × 220 mm,实际装填量为 1 515 g,中心抛散药为 220 g 钝化黑索金(RDX),中心装药量相当于总装药量的 12.5%,装置的安装高度为 0.4 m,质心距地面 0.5 m。50 kg 级温压炸药的爆炸装置外型尺寸为  $\phi 266$  mm × 712 mm,实际装填量为 48 kg,中心抛散药为 4.8 kg 钝化 RDX,中心装药量相当于总装药量的 10%,试验装置的安装高度为 1.7 m,装置质心距地面高度为 2.05 m。图 6 为含铝温压炸药(1.5 kg)爆炸不同时刻摄影照片(部分),拍摄速度为 12 500(幅/s)。

两发 1.5 kg 温压炸药爆炸试验测试的  $r-t$  曲线如图 7 所示,其中左图为 0 ~ 60 ms 火球发展过程曲线,右图为 0 ~ 3.5 ms 内火球发展过程曲线,相当于左图的局部放大图,从中可以更清楚地看到爆炸初期火球快速发展的过程。

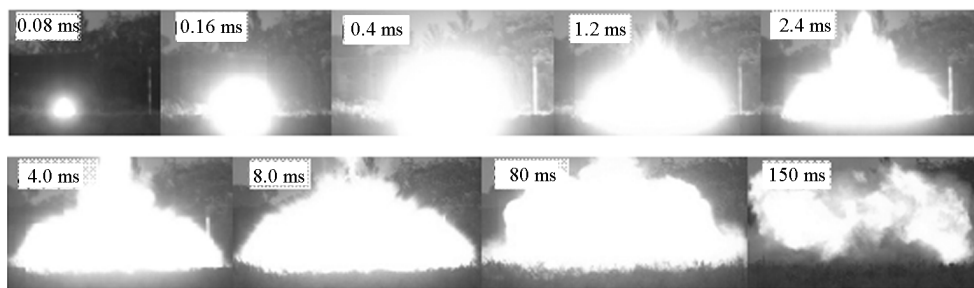


图 6 含铝温压炸药 ( $W = 1.5$  kg) 爆炸不同时刻火球形状(高速摄影截图)

Fig. 6 Fireball's shape of the thermobaric explosive sample ( $W = 1.5$  kg) within different explosion time (parts of the high speed photographic)

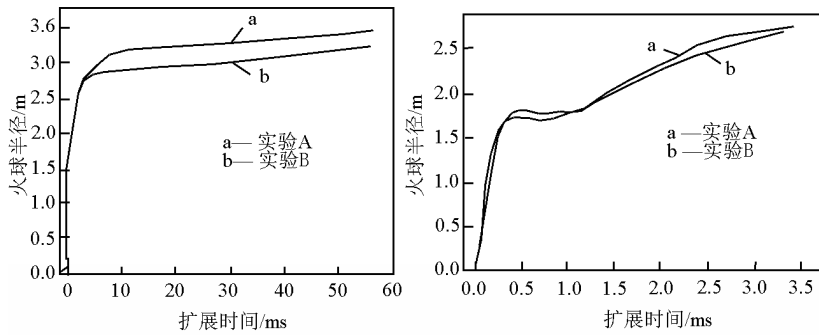


图7 含铝温压炸药爆炸高温火球发展的  $r-t$  曲线

Fig. 7  $r-t$  curve of fireball expanding within thermobaric explosion

从高速摄影拍摄不同装药量的爆炸连续火球图片和发展曲线,可以把火球的形成和扩展过程分为3个阶段:

第一阶段为高速飞散阶段。在中心抛散药的作用下,火球初始扩展速度达到  $1\ 500 \sim 2\ 300\ \text{m/s}$ ,火球在短时间内达到特征半径的  $70\% \sim 80\%$ 。此后,由于周围空气的强烈阻滞作用,使火球表面滞止不前,爆炸火球保持短暂的稳定。高速分散阶段的历程根据装药量和中心抛散药的不同而稍有差别,一般在几个毫秒内完成。

第二阶段为二次膨胀阶段。爆轰产物经过一个高速飞散、短暂的稳定过程之后,火球立即又进入一个相对快速的膨胀阶段,之后进入慢速膨胀(相对稳定)时期,火球的形状和体积在一个相对长的时间内变化不大。在此阶段的火球参数具有一定的规律性,具备特征参数的特点,因此常把此阶段的半径、体积、温度、持续时间作为评价火球效应的特征参数。相持、膨胀和稳定阶段持续时间约为几毫秒至几百毫秒,是造成目标综合毁伤效应的关键阶段。

第三阶段为自由扩散阶段: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,高温火球进入自由扩散阶段,直至形成最终烟雾,消散于空气中。该阶段持续时间较长,在综合破坏效应中主要消耗空气中的氧。

爆炸初期的火球扩展速度可以根据判读数据估算。撇开光晕的影响,在爆炸初期的  $0.72\ \text{ms}$  内,平均扩展速度为  $2\ 333\ \text{m/s}$ ;在  $0.8 \sim 1.2\ \text{ms}$  间火球有短暂的稳定,可能由于外围空气的阻滞作用,在火球表面产生了短暂的相持平衡;在  $1.2 \sim 3.5\ \text{ms}$  间,火球的扩展速度约为  $400 \sim 800\ \text{m/s}$ ;在  $3.5 \sim 5\ \text{ms}$  间,火球以约  $100\ \text{m/s}$  的速度扩展;在  $5 \sim 10\ \text{ms}$  内,火球以  $50\ \text{m/s}$  的速度扩展;在之后相当长时间内,火

球温度不断降低,火球外表面基本按照  $8 \sim 10\ \text{m/s}$  的速度在扩散。

### 3.2 爆炸火球体积

$1.5\ \text{kg}$  级的温压炸药在爆炸后  $5\ \text{ms}$  内基本上即可达到火球的特征半径。根据图7和测试数据,特征半径约为  $2.8 \sim 2.9\ \text{m}$ ,约为爆炸装药初始半径的60倍。此时,爆炸火球的形状像倒置的碗,火球的高度约  $2.56\ \text{m}$ ,可以近似按照球缺体积计算火球的特征体积,约为  $40\ \text{m}^3$ ,是初始装药体积的  $2.74 \times 10^4$  倍。

分析  $50\ \text{kg}$  级温压炸药爆炸的高速摄影图像,火球的最大半径出现在  $28\ \text{ms}$ ,此时最大半径达到  $8.6\ \text{m}$ ,是初始装置半径的66倍。此时火球高度约  $6.6\ \text{m}$ ,计算的火球体积约  $800 \sim 900\ \text{m}^3$ ,是初始装置体积的  $2.1 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^4$  倍。

从两种装药量的爆炸火球体积和半径测试结果分析,含铝温压炸药爆炸火球的最大半径约为初始装药半径的60倍左右。而最大火球体积约为初始装药体积的  $2.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4$  倍。

### 3.3 爆炸火球温度及持续时间

温压炸药爆炸的破坏效应包括冲击波和高温火球,描述火球的参数包括火球的特征体积及高温持续时间。为了直观描述火球温度,采用 OQ06/11C, OQ015/25/420 和 OQ015/25/7P1200 型3种瞬态红外高温传感器进行测量,传感器的标定响应时间为  $35\ \mu\text{s}$ , OQ06/11C 的温度测试范围为  $600 \sim 1\ 100\ ^\circ\text{C}$ , OQ015/25 型传感器的温度测试范围为  $1\ 500 \sim 2\ 500\ ^\circ\text{C}$ 。对于高温传感器信号,设置示波器的采样率为  $1\ \text{Ms/s}$ ,可以反映火球的高温上升时间和高温变化过程,而对于低温传感器的信号,示波器的采样率设置为  $500\ \text{ks/s}$ ,这样可以达到  $240\ \text{ms}$  的记录时间,以便观察火球的低温持续时间。

试验测试对象为  $1.515\ \text{kg}$  含铝温压炸药爆炸

表5 爆炸火球在不同温度持续时间

Table 5 Duration of the fireball in different high temperature regions

对应温度/℃	持续时间/ms
> 600	> 240.0
> 1 000	42.4
> 1 100	20.2
> 1 500	7.5
> 2 000	0.744
> 2 500	0.666

## 4 爆炸冲击波的形成

### 4.1 初始冲击波的形成

分析高速摄影图片可以发现,在火球发展的快速分散阶段,伴生了初始冲击波,伴生的冲击波在此前与火球基本同时发展,直到高温火球进入短时间的稳定阶段,一次冲击波与火球开始分离,并向周围空气传播。

试验中笔者经常比较容易测到的大部分为一次爆炸冲击波。爆炸冲击波的形成过程一方面可从高速摄影图片上直观看到,另一方面,也可从实测的冲击波波形图上得到反映。图10为1.5 kg含铝温压炸药爆炸火球高速摄影照片中的截图,经过增加对比度和放大处理后,可以清晰看到冲击波的产生、发展和传播过程。

如果把冲击波和爆炸火球的发展过程绘制在同一个 $r-t$ 坐标系内,可明显分辨爆炸火球和冲击波的形成关系和分离过程。图11中二组实验数据曲线,其规律性非常一致。需要说明的是图像判读数据与压电传感器的测试数据也非常一致。

以上事实说明,含铝温压炸药爆炸的初始冲击波一方面由炸药爆轰波传播入空气中产生,另一方面由爆轰产物的急剧扩散对周围空气压缩产生。在爆炸冲击波形成的初期,冲击波前沿一直与高速分散的火球一起传播,由于在火球前沿不断有氧气与炸药中的燃料反应释放大量能量,一方面通过热辐射的方式加热周围空气,另一方面通过接触传导方式直接对前沿冲击波的能量进行补充,提高冲击波压力,延缓冲击波在空气中的衰减损失。这就是含铝温压炸药爆炸比普通炸药冲击波作用范围提高的主要原因之一。

火球的温度,测试时传感器布置在距离目标大于20 m处,传感器反映的是测试方向上火球连续膨胀时表面的辐射温度,而火球内部的实际温度要比测试的表观温度高许多,但目前的技术手段也只能采用该方法测到相对准确的火球温度。

由于试验前对温度计进行了标定,每个输出电压对应的温度值是经过黑体辐射炉标定的值,数据可靠性较高,但根据辐射温度测试原理<sup>[12~17]</sup>,目标的测试温度与辐射体的辐射出射度和发射率相关,实际温度需要根据目标的发射率进行修正。由于爆炸火球的辐射出度和发射系数存在许多不确定因素,为保证测试数据的准确性,此处数据不做修订,为传感器的原始数据,但需要指出的是该数据比爆炸火球的真实温度低许多。图8为爆炸火球温度实测波形(电压信号),图9为换算后的温度衰减过程。

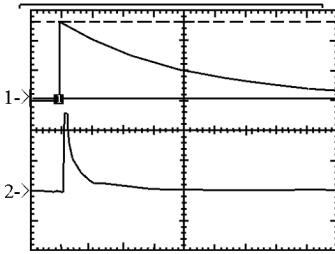


图8 爆炸火球温度测量波形

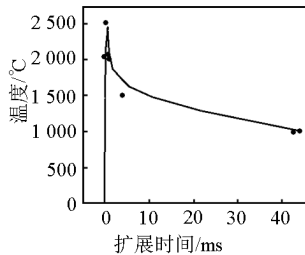
Fig. 8 Original curve of the fireball's temperature with time ( $v-t$  curve)

图9 爆炸火球温度随时间衰减曲线

Fig. 9 Curve of the fireball's temperature with time ( $T-t$  curve)

表5为从测试曲线上的对应点电压数据判读的实际温度值。结果表明:超过2 000℃的高温火球持续时间较短,不足1 ms;超过1 500℃的持续时间不大于10 ms,而超过1 000℃高温持续时间大于40 ms,高于600℃的火球持续时间大于240 ms。同时需要指出,由于600℃左右信号幅值较小,此温度持续时间只能和高速摄影图像结合进行估算,误差稍大。

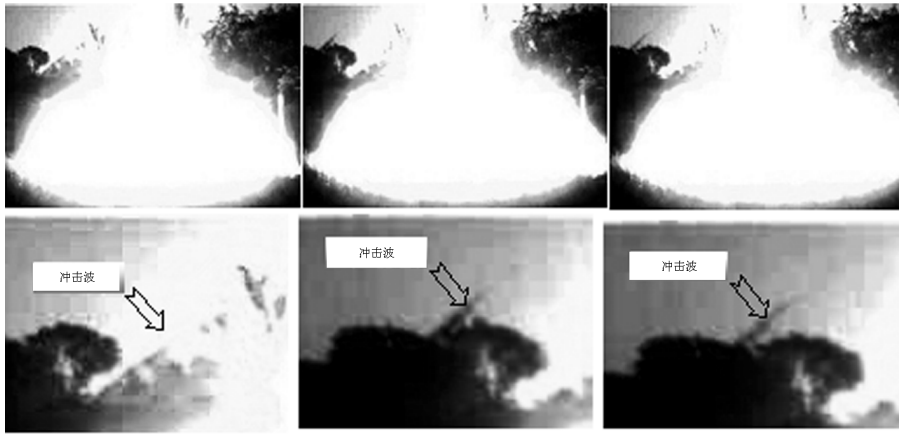


图 10 爆炸后的冲击波局部放大图片

Fig. 10 Megascopic photos of the shock wave formed and spread abroad process

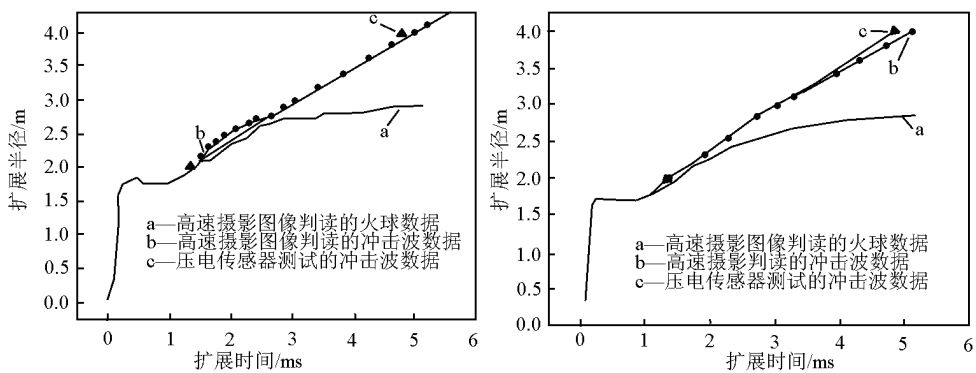


图 11 含铝温压炸药爆炸冲击波与火球扩展关系曲线

Fig. 11 Relationship of shockwave and fireball spread abroad in the thermobaric explosion

#### 4.2 二次冲击波的形成

在火球扩展的第二阶段,由于地面反射冲击波作用,使大量的空气有机会与爆轰产物充分混合,火球的压力也同时得到提高,促使初始爆炸过程中还未反应的铝粉和其他爆轰产物快速反应,进一步释放大量的热量,继续对火球加热,使火球产生爆燃或发生二次爆炸现象,使持续的高温火球得以继续膨胀,而快速膨胀的高温火球在空气中将形成一系列的压力波,根据击波传播理论,系列压力波的速度会不断地增长,有可能最终形成第二次、第三次冲击波,系列冲击波的形成将不断对前沿冲击波叠加,从而延缓了一次冲击波幅值的衰减,相应的增加了温压炸药在远区的破坏效能。

以上过程通过火球的扩展曲线分析得到,并常见于压力传感器测试的冲击波波形中。在装药量较小时,由于爆炸作用时间较短,爆炸火球的体积较小,可能造成二次压力波的幅值较小,在测试过程中

很难用压力传感器分辨出来,另外在时序上也很难与一次爆炸波分开。但在大当量爆炸时,则可以清晰分辨出来。

图 12 为小当量爆炸实验测得的未经滤波处理的原始冲击波压力波形,可以看出二次击波与一次击波叠加在一起,其后随着距离的增加,二次击波与一次击波的间距也在不断加大,波幅不断减小。有时其后产生新的压力波随着时间的增长,新的压力波又逐渐成长为新的冲击波,追逐在一次击波之后,或叠加在一次击波之上。

对大当量的爆炸,由于火球体积较大,火球膨胀时产生的压力波较为明显,在一般的压力传感器信号中都能够测到二次压力波信号。因压力传感器的布置范围较大,对于压力波的产生、发展和二次冲击波的形成过程可明显表现出来。

较大当量(30~50 kg)温压炸药爆炸不同距离上的冲击波压力波形变化情况(见图 13)。在爆炸

场的近区,由于一次冲击波的压力幅值较高,相对的压力波幅值被淹没在高压信号之内,随着距离的增加,二次压力波的信号与一次冲击波的幅值相比明显凸现,在某些距离上甚至演变为小的冲击波,但压力波的绝对值随着距离的增加则逐渐变小。在爆炸

场的远区,由于压力波的幅值甚至与一次冲击波的幅值处于同一数量级,对于一次冲击波的增强作用明显,相当于增加了初始爆炸威力,这也是温压炸药爆炸破坏效应比一般普通炸药增强的另一主要原因。

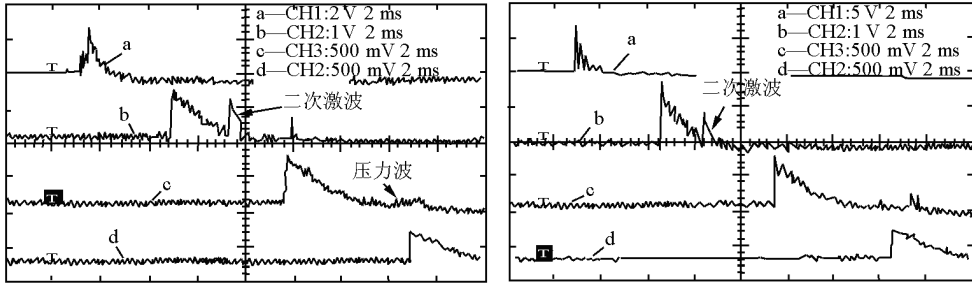


图 12 小当量爆炸实测初始冲击波和二次压力波形

Fig. 12 The original wave of the first shock and the second pressure wave in small scale test

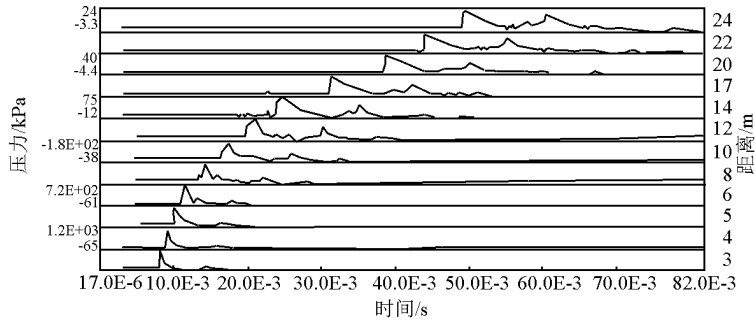


图 13 大药量温压炸药爆炸的一次冲击波和二次压力波形变化图<sup>[18]</sup>

Fig. 13 The first shock wave and the second pressure wave in large scale test

## 5 结语

1) 通过理论分析和大量试验研究,研制的以片状铝粉为主要原料的含铝温压炸药配方不仅具有一般固体炸药的爆轰性能,而且能够产生高温持续时间较长的爆炸火球,爆炸火球体积约为初始装药体积的  $2.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4$  倍,瞬时高温可达到  $2500^\circ\text{C}$  以上。装填密度达到  $1.5 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$ ,与固体炸药密度接近;无氧环境中爆炸能量约为  $4.95 \text{ MJ/kg}$ ,在空气和其他含氧空间中爆炸、燃烧释放的总能量为  $17.95 \text{ MJ/kg}$ ;在空气中爆炸产生的冲击波的等效威力约大于 1.5 倍的 TNT 当量。

2) 对含铝温压炸药爆炸冲击波和爆炸火球的形成和扩展规律研究表明,爆炸火球的扩展分为 3 个典型阶段:第一阶段为高速飞散阶段,火球初始扩展速度达到  $1500 \sim 2300 \text{ m/s}$ ,火球在短时间内(几

个毫秒)达到特征半径;第二阶段为火球界面二次膨胀阶段,此时不断有压力波产生,持续的压力波经过不断追赶可以形成二次冲击波,后者在传播过程中与前导冲击波的不断叠加,延缓了前沿冲击波的幅值衰减、增加了冲击波的正压作用时间,相应提高了温压炸药爆炸的冲击波破坏效应。第三阶段为自由扩散阶段,含能材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,高温火球进入自由扩散阶段,直至形成最终烟雾。

3) 根据温压炸药爆炸效能的固有特性,在空旷环境中爆炸时火球的持续时间较短,高温损伤效应不明显,冲击波成为主要的杀伤因素;在密闭、半密闭空间爆炸时,不仅其冲击波压力会大大提高,其能量释放效率也有很大提高,同时爆炸火球的高温持续时间也将大大增加。因此,在密闭空间内使用温压炸药,可大大提高其综合毁伤效应。



## 参考文献

- [1] Michael A L. 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: October 1961 to April 1982 [ R ]. LLNL, UCRL - 52821; 43 - 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
- [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
- [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
- [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
- [8] 罗艾民, 张奇, 白春华, 等. 燃料空气炸药冲击波超压反演研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 34 - 36
- [9] 熊祖钊, 白春华. 燃料空气炸药武器威力评价指标研究[J]. 火炸药学报, 2002, 2: 19 - 22
- [10] 惠君明, 刘荣海, 彭金华, 等. 燃料空气炸药威力评价方法[J]. 含能材料, 1996, 4(3): 124 - 128
- [11] 胡华权, 裴明敬, 许学忠, 等. 燃料空气炸药爆炸威力评价方法研究[A]. 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议文集[C], 2006. 10
- [12] 许学忠, 卫海鹰, 肖昌炎, 等. 一次起爆燃料云雾的热辐射[J]. 火工品, 1999: 14 - 17
- [13] 刘占增, 曾汉生, 丁翠娇. 红外辐射温度测量技术[J]. 武钢技术, 2006, 44(1): 21 - 23
- [14] 刘军, 刘梅冬, 曾亦可, 等. 非接触式红外测温的研究[J]. 压电与声光, 2001, 23(3): 202 - 205
- [15] 李晓英. 影响红外测温的主要因素及对策[J]. 山西机械, 2001, 2: 47 - 48
- [16] 田丰, 闫秀丽, 王蓬. 辐射温度计标定误差分析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1998, 15(1): 20 - 23
- [17] 郑中, 何腊梅. 红外测温技术及在钢铁生产中的应用[J]. 工业加热, 2005, 34(3): 25 - 29
- [18] 李秀丽, 惠君明, 王伯良. 云爆剂爆炸冲击波参数研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 410 - 414

# Study on efficiency of aluminized thermobaric explosive

Pei Mingjing, Hu Huaquan, Zhang Jingsen,  
Yu Qin, Liu Yu, Chen Liqiang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] This paper mainly expatiated the essential components of aluminized thermobaric explosive powder and its energy releasing efficiency in different environments, and dealt with the information of shock wave and fireballs spread abroad within explosion. Heats of the explosive samples were determined in oxygen, air and argon confined in stainless steel container. The effect of the circumstance to the energy releasing efficiency in confined condition was analyzed. Contemporary the energy releasing rates of the different metal additives were qualitatively analyzed. The temperature of the fire balls and the fireballs' durations were measured in the field test. The relationship of shock wave with fireball expanding was researched. The results indicated that the aluminized thermobaric explosive flake had a higher energy releasing efficiency and energy releasing rates in the oxygen environment. It could have produced a high temperature fireball and strong shock wave which brought an integrative damage.

[Key words] aluminized thermobaric explosive; detonation efficiency; shock wave; blast fireball