

文章编号: 1006-9941(2017)06-0472-07

铝粉粒度和铝氧比对含铝炸药在密闭空间内爆炸特性的影响

段晓瑜, 郭学永, 焦清介, 赵倩, 张静元, 张庆明

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为研究铝粉粒度和铝氧比对含铝炸药在密闭空间内爆炸能量输出的影响, 对铝氧比为 0.45 和 0.99, 铝粉粒度分别为 50 nm、5 μm 和 50 μm 的 RDX 基含铝炸药进行了内爆炸实验。采用多点平均降噪法对压力曲线进行降噪处理获得准静态压力, 指数衰减近似法获得压力衰减系数的实验数据处理方法, 提出用准静态压力(p_{QS})、压力上升时间(t_{QS})和压力衰减系数(ω)三个特征量来表征含铝炸药在密闭空间内爆炸的能量输出特性。实验研究表明: 铝氧比为 0.45, 含 50 μm 铝粉的 p_{QS} 比含 5 μm 和含 50 nm 的分别高 0.3% 和 0.7%; 相应的 t_{QS} 分别延长 8.6 ms 和 10.0 ms。铝氧比为 0.99, 含 50 μm 铝粉的 p_{QS} 比含 5 μm 和含 50 nm 铝粉的分别高 31.2% 和 31.9%, 相应的 t_{QS} 分别延长 9.3 ms 和 9.4 ms。铝粉粒度相同时, 铝氧比为 0.99 的 p_{QS} 大于铝氧比 0.45 的 p_{QS} , t_{QS} 亦是如此。对于任一铝氧比炸药, ω 随铝粉粒度的增加而减少, 对于同一铝粉粒度, ω 随铝氧比增加而减少。

关键词: 含铝炸药; 粒度; 铝氧比; 密闭空间; 爆炸特性

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.005

1 引言

炸药在约束空间内爆炸的作用规律与在开放空间有着明显不同, 壁面的约束导致了冲击波的反射并增加炸药的后燃效应。瑞典 Weibull R W^[1] 1968 年首次对 TNT 在半密闭爆炸罐内的压力特性进行的研究, 他指出初始反射冲击波持续时间很短, 对厚实墙面的结构效用效果可以忽略^[2], 而之后的压力波的持续时间相比壁面的特征周期持续时间很长, 可以被当做是实际作用在墙面的载荷。Swisdak M M^[3] 指出炸药在密闭空间内爆炸时形成一个静态的压力波, 其衰减与爆炸容器的热传导有关。Kingery C N^[4] 研究了结构内爆炸的压力特征。Anderson C E^[5] 分析了大量在密闭和半密闭空间内爆炸的实验数据, 并结合数值模拟研究了结构中的准静态压力、持续时间和冲量。Kuhl A L^[6] 通过数值模拟比较了 TNT 在密闭空间内的燃烧热与爆热。Trzcinski W A^[7] 对压力曲线进行平均后, 拟合了平均压力并得到的指数衰减的指前因子作为准

静态压力。Lee K B^[8] 把紧随初始冲击波之后的压力当做准静态压力。Ames R G^[9] 通过求取一段时间内的压力平均值来求得准静压。金朋刚^[10] 将炸药在密闭空间内爆炸后的 10 ~ 20 ms 内的压力平均值作为准静态压力。王等旺^[11] 测试了自制试验装置中的准静态压力, 认为准静压是一定时间后达到的稳定的准静态压力值。Trzcinski W A^[12] 测试了含 30% 5 μm 或 90 μm 铝粉的含铝炸药的准静态压力, 结果显示含 5 μm 铝粉炸药的准静压比含 90 μm 的略高; 金朋刚^[13] 等测试含有两种粒度铝粉的奥克托今/Al/端羟基聚丁二烯 53/35/12 炸药的准静态压力, 结果显示含 13 μm 铝粉的炸药比含 130 μm 的释放更多的能量提高了密闭空间内爆炸的准静态压力。美国海军水面武器中心在比较密闭空间中炸药威力时采用准静态压力作为唯一的威力评估参数^[14], 但如何确定爆炸罐内的载荷表征方法仍然是要努力的方向, 特别是前一阶段反射冲击波时间的确定^[15]。

鉴于目前国内外尚无统一的准静态压力的读取方法, 且铝粉粒度和含量对含铝炸药内爆炸特性的影响的研究不够充分, 因此, 本研究通过对含铝炸药内爆炸实验, 获得较为客观的准静态压力的读数方法, 测试了含不同粒径, 不同含量铝粉的 RDX 基含铝炸药的内爆炸特性, 研究铝粉粒度和铝氧比对含铝炸药在内爆炸中的能量释放特性的影响。

收稿日期: 2016-09-28; 修回日期: 2017-01-20

基金项目: 国家国防科技工业局预先研究项目(00402010301)

作者简介: 段晓瑜(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事含铝炸药爆炸特性研究。e-mail: dxy900401@163.com

通信联系人: 郭学永(1975-), 男, 讲师, 主要从事火工品、含能材料、新能源研究。e-mail: nust@bit.edu.cn

2 实验设计

实验样品由黑索今(RDX)、铝粉和少量蜡组成,药量为 100 g,压制成长径为 1:1 的圆柱形药柱,压药相对密度保持在 95% 以上,起爆药柱采用 JH14,质量为 20 g。由于单质铝的化学当量比为 0.67,因此,本研究选择铝氧比(Al/O)分别为 0.45 和 0.99 的两种含铝炸药配方,HL-01 和 HL-02,具体配方见表 1。同时经课题组已有实验验证^[16],试样直径均大于其临界直径且均可爆炸完全。

表 1 实验用含铝炸药配方

Table 1 The compositions of tested aluminized explosives

sample	content/%			
	RDX	Al	wax	Al/O
HL-01	70	25	5	0.45
HL-02	55	40	5	0.99

2.1 铝粉特性

实验采用的铝粉有三种,为了便于区分,将铝粉的名称定为与中位径相近的整数。50 nm 铝粉,由于颗粒较小,团聚较严重,使用激光粒度仪分析其样品的粒

度分布时有较大偏差,因此其粒度是根据扫描电镜的照片估算而确定的,5 μm 和 50 μm 铝粉的粒度根据粒度分析仪确定。为了观察铝粉的球形度以及整体粒径分布,使用 Hitachi S4700 对三种铝粉样品进行了扫描电镜分析(SEM),结果如图 1。5 μm 和 50 μm 铝粉的粒径分布如图 2 所示。

图 1 表明,50 nm 铝粉样品颗粒饱满,球形度好,但分布不太均匀,有一定团聚现象,而 5 μm 和 50 μm 铝粉无明显团聚现象。该团聚主要是由于颗粒间范德华力和库仑力所致的软团聚^[17],很难避免,在使用前对铝粉进行超声分散,有助于减轻这一现象。

2.2 爆炸容器及测试仪器

关于炸药在约束空间内爆炸的试验方法目前国内尚无相关标准,实验通常采用特制的钢体,本实验采用西安近代化学研究所 500L 爆炸罐,顶部为球冠,四周及底部为平板钢焊接而成的圆柱体,在圆柱体右侧距圆柱底端 400 mm 外焊接传压管并安放传感器,药柱用雷管线悬挂于容器中央,爆心距离罐底 400 mm,爆炸罐示意图如图 3。

实验时爆炸罐内充满 0.1 MPa 的空气,测试室温为 15 °C。实验采用 Kistler 603 BQ-01 型壁面压力传

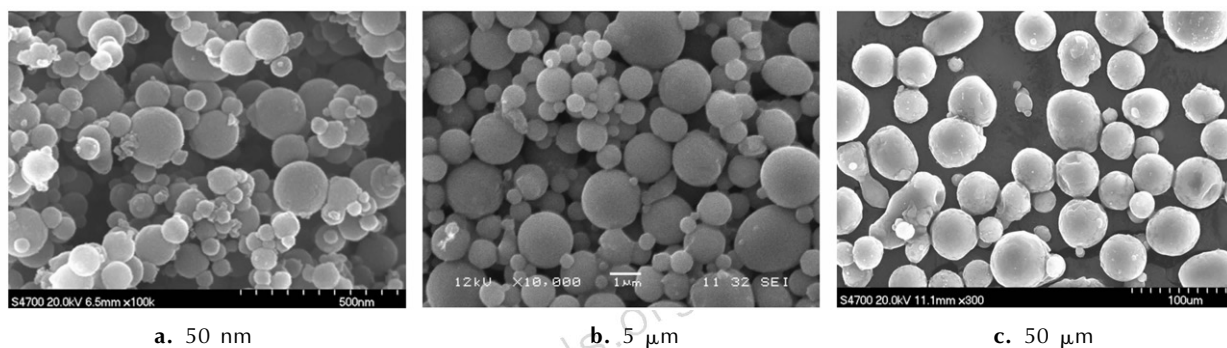


图 1 铝粉 SEM 照片

Fig. 1 The SEM images of Al particles

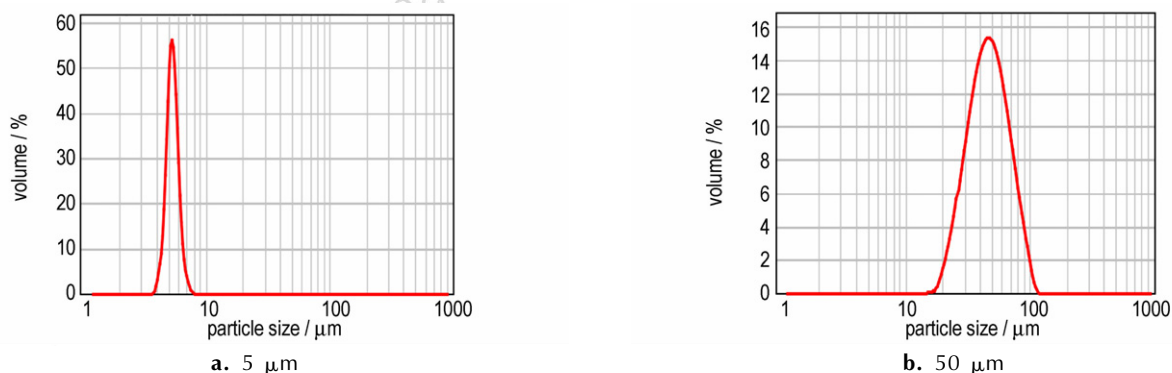


图 2 5 μm 和 50 μm 铝粉粒径分布

Fig. 2 The particle size distributions of 5 μm and 50 μm aluminum

感器, 传感器谐振频率为 300 kHz, 灵敏度为 0.5 ~ 0.75 V/MPa, 记录仪为 VXI 高速数据采集仪。采样频率为 200 kHz; 记录时间为 2.5 s。

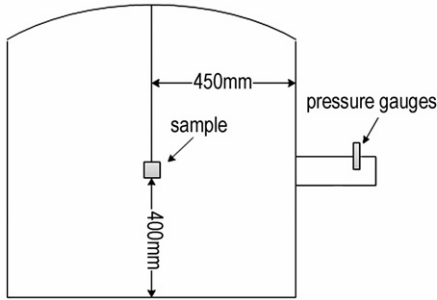


图 3 500 L 爆炸容器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 500 L explosion chamber

3 测试结果及数据处理

3.1 压力曲线测试结果 (以含 5 μm 铝粉的 HL-02 样品为例)

图 4 为含 5 μm 铝粉的 HL-02 电压波形图。图 5 为相应的压力时间曲线, 以及在 80 ms 内采集的压力曲线。

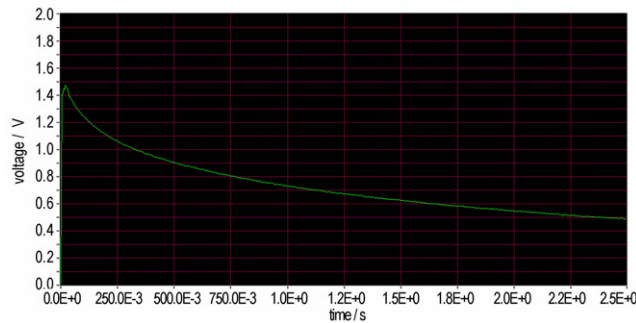


图 4 实测 HL-02 的电压曲线

Fig. 4 The voltage history of HL-02

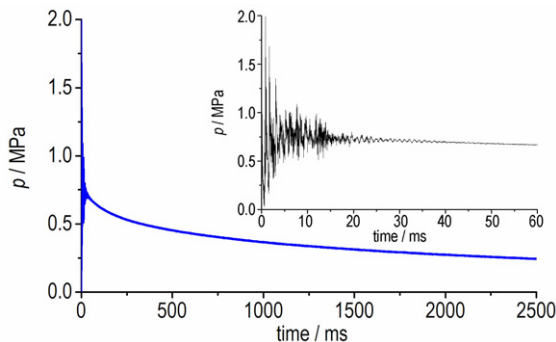


图 5 实测 HL-02 压力曲线

Fig. 5 The pressure history of HL-02

由图 4 和图 5 可见, 测试的压力曲线在记录时间 (2.5 s) 内可大致分为三个阶段, 第一阶段表现为压力曲线的大幅震荡, 大致到 20 ms 左右, 该阶段为初始冲击波

的反射过程, 这个过程已有部分铝粉发生了反应^[18], 但这些反射波的持续时间很短, 并不是对墙板造成毁伤的主要来源^[7,19]; 第二阶段表现为压力的非线性下降, 到 200 ~ 300 ms, Trzcin'ski W A^[7] 用指数衰减公式近似描述了该段的压力曲线, 该阶段为持续时间很长的准静态压力波, 可以当做是实际作用在墙面的载荷, 结合含铝炸药的二次反应机理^[20] 以及文献中对含铝炸药内爆炸过程的区分^[21], 可知该段主要是炸药爆轰产物的后燃过程, 主要是铝粉的反应过程包括其与爆轰产物及周围空气中的氧的反应; 第三阶段表现为压力近似线性的缓慢下降, 从第二阶段结束开始到记录终止, 该阶段为密闭体系降温导致的压力的缓慢下降过程^[9]。

3.2 数据处理

应用多点平均降噪法对采集的数据进行滤波。该方法的原理是对指定点数 n 的相邻数据求平均, 第 i 点压力的计算方法如式(1):

$$p'_i = \left(\sum_{j=i-(n-1)/2}^{i+(n-1)/2} p_j \right) / n, \quad 0 < i < 5 \times 10^5 \quad (1)$$

式中, p'_i 为处理后第 i 点的压力值, MPa, p_i 为原始记录的第 i 点的压力值, MPa, 由于本实验的记录时间为 2.5 s, 采用频率为 200 kHz, 记录总点数为 5×10^5 点, i 的取值最大为 5×10^5 。 n 的取值决定了滤波处理后的曲线的光滑程度。

利用 Origin8 平滑模块中的相邻平均法对压力曲线进行滤波处理, 其中的窗口数据点数即为式(1)的 n , 并以 HL-02 含有 5 μm 铝粉的数据处理方法为例介绍该处理方法。图 6 为经过降噪处理后的 HL-02 含 5 μm 铝粉的压力曲线, 由图 6 可知, 经相邻平均法降噪处理后的曲线仍能体现炸药在密闭空间内爆炸压力曲线的特征, 且能判别出明显的峰值。

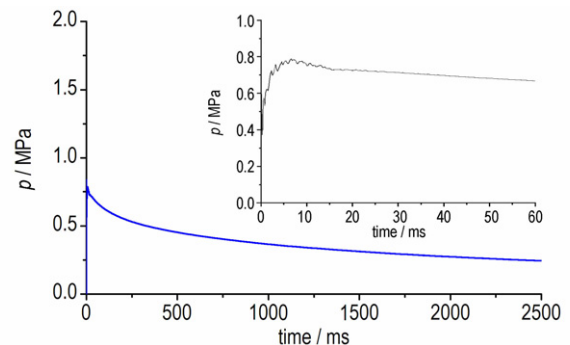


图 6 降噪后的 HL-02 压力曲线

Fig. 6 The smoothing pressure curve of HL-02

表 2 为不同窗口数据点光滑处理后所读的峰值超压的压力值, 窗口数据点数的选取对峰值的影响很明

显,随着窗口数据点数的增加,曲线的峰值逐渐减小,同时在 600 ms 后的峰值变化很小。

表 2 不同窗口数据点滤波后的峰值压力

Table 2 The overpressures after smoothing using different numbers of the window

n	200	400	600	800	1000
p_M/MPa	0.807	0.792	0.788	0.782	0.781

根据文献[14]对准静态压力的定义可知,达到准静态压力之后无明显的冲击波反射作用,因此光滑取点数应该以达到准静态压力之后无明显击波反射为依据,即准静态压力之后无反射带来的跳动,表现为噪声少。图7窗口数据点为200、400和600点光滑后的

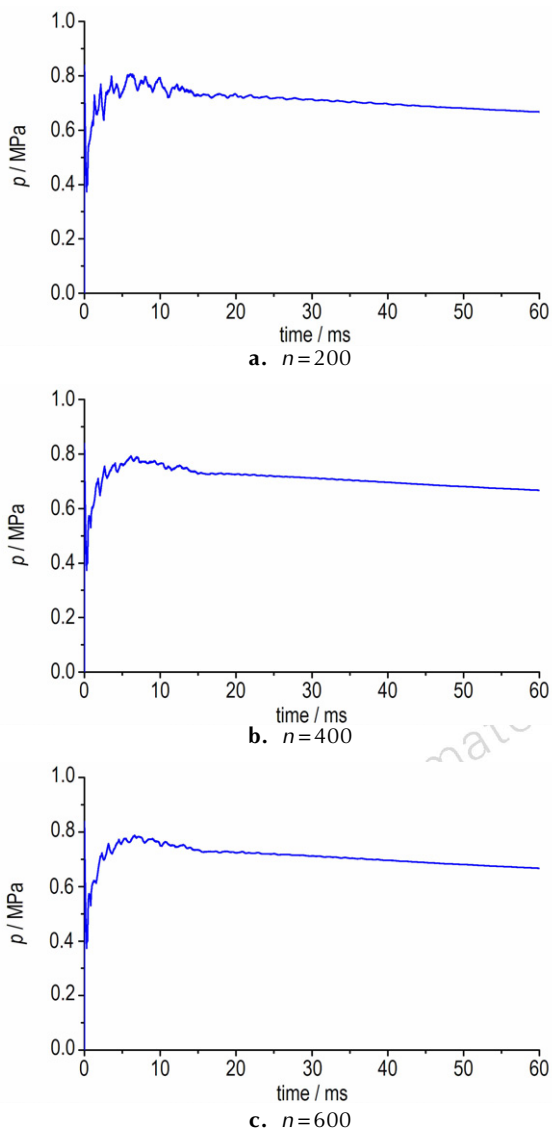


图 7 不同窗口数据点数降噪后的曲线

Fig.7 The smoothing curves with different numbers of window

曲线,其中,窗口数据点为 200 点时,峰值后波形抖动较大,400 点时有所好转,但仍有一些震荡,600 点处理后的曲线在峰值后几乎没有大幅震荡,可见 400 ~ 600 点的窗口数据点比较合适,其中由于 400 点和 600 点处理后的峰值差别很小,而且在 600 点后变化更为微小(如表 2),因此选择的光滑数据点数为 600。

由于经处理后的压力曲线在达到峰值后无明显噪声,满足准静态的定义,因此定义降噪处理后的峰值为准静态压力, p_{QS} ; 对应的时间定义为压力上升时间, t_{QS} ,反映了达到 p_{QS} 所需时间。由于曲线中第三阶段主要与体系的热传导有关,因此主要研究第二阶段,即在达到准静态时间后第一段下降较快的阶段,如文献[6],采用指数衰减近似如式(2)表征这个阶段,并以这个阶段的衰减系数 ω 作为特征量来表征爆炸罐内的载荷,定义为压力衰减系数。

$$p_2(t) = (p_{QS} - p_x) \exp(-\omega(t - t_{QS})) + p_x, \quad t_{QS} \leq t < t_x \quad (2)$$

式中, $p_2(t)$ 为第二阶段的压力值, MPa, p_x 为第三阶段的初始压力值, MPa, t_x 为第三阶段的初始时间, ms。

为确定 t_x 的值,分别选取准静态压力后的 150 ~ 400 ms 内的压力值以式(2)进行拟合,表 3 为拟合得到的衰减系数及其相关系数。

表 3 HL-02 不同时间内的指数衰减速率

Table 3 The attenuation rate of different time for HL-02

time interval after p_{QS} / ms	150	200	250	300	350	400
ω	0.0144	0.0119	0.0094	0.0089	0.0080	0.0074
R^2	0.995	0.994	0.996	0.994	0.994	0.994

Note: ω is attenuation factor of pressure.

由表 3 可见,运用式(2)的指数衰减公式拟合的相关系数均为 0.994 以上,说明该公式较为适用,同时衰减系数 ω 随着峰值后时间的增加而减少。图 8 为压力衰减系数与达到准静态压力后时间段之间的关系。

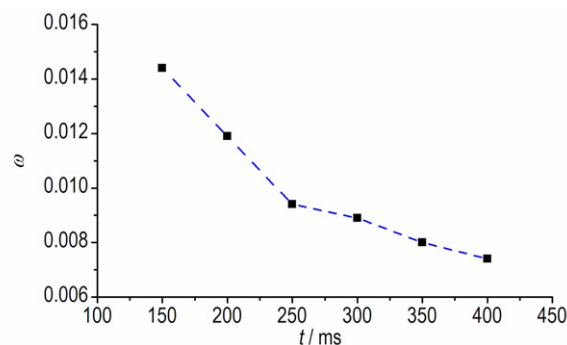


图 8 ω 与达到准静态压力之后时间段的关系

Fig.8 The relationship of ω vs times after p_{QS}

由图 8 可见, ω 在准静态压力后 250 ms 内变化较为剧烈, 在 250 ms 之后变化较小, 因此取达到准静态峰值压力后 250 ms 来拟合 ω 。

4 实验结果分析

依据上节所述数据处理方法对几个样品的压力曲线进行处理后得到的特征值如表 4。图 9 为两类配方的 p_{QS} 、 t_{QS} 和 ω 随铝粉粒度变化的关系。

4.1 准静态压力 p_{QS}

根据表 4 可知, 对于 HL-01, 含 5 μm 铝粉的 p_{QS}

比含有 50 nm 铝粉的高 0.3%, 可见对于低铝氧比配方 HL-01, 相比 5 μm 的铝粉, 纳米铝粉的使用不会对 p_{QS} 有太大的影响; 而含 50 μm 铝粉的 p_{QS} 比含有 50 nm 铝粉的高 0.7%。对于 HL-02, 含 50 nm 铝粉的 p_{QS} 只比含有 5 μm 铝粉的低 0.5%, 对于高铝氧比炸药, 铝粉粒径为 50 nm 或 5 μm 也不会影响准静态峰值压力的大小; 而含 50 μm 铝粉的准静态压力比含有 50 nm 铝粉高 31.9%, 说明对 HL-02 铝粉粒径越大, p_{QS} 越大。由图 9a 可知, 任一粒度下, HL-02 的 p_{QS} 均比 HL-01 的高。

表 4 不同配方的特征值

Table 4 The eigenvalue of samples

size of aluminum	p_{QS}/MPa		t_{QS}/ms		ω	
	HL-01	HL-02	HL-01	HL-02	HL-01	HL-02
50 nm	0.724	0.784	3.220	6.505	0.0170	0.0097
5 μm	0.727	0.788	4.550	6.605	0.0154	0.0094
50 μm	0.729	1.034	13.19	15.89	0.0104	0.0073

Note: p_{QS} is quasic-static pressure, t_{QS} is rising time of pressure, ω is attenuation factor of pressure.

4.2 压力上升时间 t_{QS}

由表 4 可知, 对于 HL-01, 含 50 μm 铝粉的 t_{QS} 比含有 5 μm 铝粉的 t_{QS} 高 8.6 ms, 比含有 50 nm 铝粉的 t_{QS} 高 10.0 ms。对于 HL-02, 含 50 μm 铝粉的 t_{QS} 比含有 5 μm 铝粉的高 9.3 ms, 比含有 50 nm 铝粉的高 9.4 ms。由图 9b 可知, 铝粉粒度对两种炸药 t_{QS} 的影响保持相同的趋势, 均随着铝粉粒度的增加而增加。

4.3 压力衰减系数 ω

由图 9c 可知, 对于任一铝氧比配方, 压力衰减速率 ω 均随着铝粉粒度的增加而减少, 且同一粒度下 HL-02 的 ω 比 HL-01 的小。

4.4 反应机理分析

由以上分析可知, 铝粉的粒度和含量影响着含铝炸药在密闭空间内爆炸前两个阶段的能量释放。在第一阶段的初始冲击波反射过程中, 主要包含了铝粉和高能炸药 (RDX) 的爆轰产物发生的氧化还原反应, 即无氧燃烧过程, 以及部分铝粉与周围空气中氧的反应, 主要影响 p_{QS} 和 t_{QS} 两个特征量。对于 p_{QS} , 含有 50 μm 铝粉的样品的值大于含有 50 nm 和 5 μm 铝粉的样品的值, 这可能是由于纳米铝粉和小尺寸微米铝粉的活性铝含量少所导致^[22], 另一方面可能是铝粉尺寸的减小导致反应过程提前, 准静态压力反应的是长时间量级变量^[23], 过早的反应不会增加 p_{QS} ; HL-01 中大多

数铝粉与爆轰产物反应, 而 HL-02 中由于铝较多, 铝粉与环境中的氧气进一步反应, 后燃时间更长, 可持续增加准静压, 故每个粒度下 HL-02 配方的 p_{QS} 均比 HL-01 高。对准静压的增加不明显; 对于 t_{QS} , 一方面, 粒度越小的铝粉越容易与炸药爆轰产物发生反应, 体现在压力上升时间 t_{QS} 的减小; 另一方面, 铝粉含量越多其与爆轰产物的反应时间越长, 增加了 t_{QS} , t_{QS} 随铝粉粒度的降低程度随 Al/O 的不同而不同。低 Al/O 的混合物 HL-01, 纳米铝粉可以减少准静态压力形成的时间更明显, 这主要是由于 HL-01 里的主体炸药足够多, 相比 HL-02 更高的爆速和爆压导致炸药爆轰后的高温高压环境更易于铝粉的燃烧, 这时小尺寸的铝粉更快地反应。

第二阶段的铝粉的后燃烧过程中, 粒度对 HL-01 的 ω 影响更为剧烈, 这主要是由于一方面 HL-01 里的主体炸药足够多, 相比 HL-02 更高的爆速和爆压导致炸药爆轰后的高温高压环境更易于铝粉的燃烧, 这时小尺寸的铝粉更快地反应, 对压力的支持作用也更容易衰退, 而大粒径的铝粉由于其反应速率慢, 对压力的支持作用持续时间更长; 另一方面, 由于 HL-02 中的铝粉对爆速和爆压的稀释作用更强, 铝粉不仅要和爆轰产物反应, 更需要分散到空间内与爆炸罐内的空气反应, 这就使得铝粉粒径对 HL-02 的准静态压力的衰减不如 HL-01 明显。同一配方下, 粒径越小, 铝粉所

需的反应时间越短,短时间内准静压提升较快,同时压力衰减也更快。

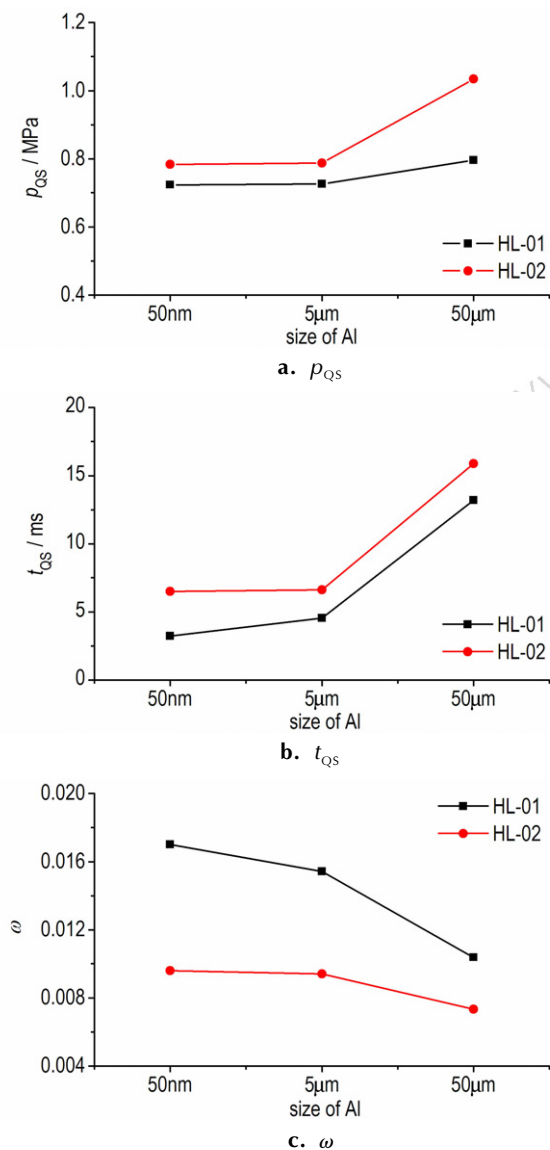


图9 含不同粒度铝粉的两炸药的特征值

Fig. 9 The eigenvalues for HL-01 and HL-02 containing different sizes of Al

5 结论

(1) 采用多点平均降噪法获得准静态压力和指数衰减近似法获得压力衰减系数的实验数据处理方法,并提出了由准静态压力 p_{QS} 、压力上升时间 t_{QS} 和压力衰减系数 ω 三个特征量表征含铝炸药在密闭空间内爆炸的能量输出特性。

(2) 对于含有 50 nm、5 μ m、50 μ m 铝粉的样品,铝氧比为 0.99 的 p_{QS} 和 t_{QS} 均高于铝氧比为 0.45 的,

ω 则相反;对于任一铝氧比的配方, p_{QS} 均随铝粉粒度的增加而增加, ω 均随铝粉粒度的增加而减小。

参考文献:

- [1] Weibull H R. Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges[J]. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1968, 152(1): 357-361.
- [2] Trott B D, Backofen J, Joseph E, et al. Design of explosion blast containment vessels for explosive ordnance disposal unit[R]. AD016707.
- [3] Swisdak M M. Explosion effects and properties: part I-explosion effects in air[R]. AD018544, 1978.
- [4] Kingery C N, Schumacher R N, Ewing W O, Internal pressures from explosions in suppressive structures[R]. BRL Memorandum Rep. ARBRL-MR-02848, USA Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1978.
- [5] Anderson C E, Baker W E. Quasi-static pressure, duration and impulse for explosions (e. g. HE) in structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1983, 25(6): 455-464.
- [6] Kuhl A L, Oppenheim A K, Ferguso R E, et al. Effects of confinement on combustion of TNT explosion products in air[C]// 28th International Symposium on Combustion, Edinburgh, Scotland. 2000.
- [7] Tzcin'ski W A, Paszila J. Confined explosions of high explosives [J]. *Journal of Technical Physics*, 2000 (4): 453-470.
- [8] Lee K B, Lee K D, Kim J K, et al. Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives[C]// 36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar. Karlsruhe, 2005.
- [9] Ames R G, Drotar J T, Silber J, et al. Quantitative distinction between detonation and after burn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions[C]// 13th International Detonation Symposium. Norfolk Virginia. 2006.
- [10] 金朋刚, 郭炜, 任松涛, 等. TNT 密闭环境中能量释放特性研究 [J]. *爆破器材*, 2014, 43(2): 10-14.
JIN Peng-gang, GUO Wei, REN Song-tao, et al. Research on TNT energy release characteristics in enclosed condition[J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(2): 10-14.
- [11] 王等旺, 张德志, 李焰, 等. 爆炸容器内准静态气压实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(12): 1493-1497.
WANG Deng-wang, ZHANG De-zhi, LI Yan, et al. Experiment Investigation on quasi static pressure in explosion containment vessels[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(12): 1493-1497.
- [12] Tzcin'ski W A, Stanisław C, Jozef P. Studies of the effect of particles size on non-ideal explosives performance[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(3): 227-235.
- [13] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 不同粒度铝粉在 HMX 基炸药中的能量释放特性[J]. *含能材料*, 2015, 23(10): 989-993.
JIN Peng-gang, GUO Wei, WANG Jian-ling, et al. Energy releasing characteristics of aluminum powder in HMX-based explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(10): 989-993.
- [14] David T P E. Internal blast test to support the tomahawkand APET programs "Munitions Survivability in Unified Operations" [C]// Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. San Diego, NDIA, 1996.
- [15] Wu C Q, Fattori G, Whittaker A, et al. Investigation of air-blast effects from spherical- and cylindrical-shaped charges[J]. *Inter-*

- national Journal of Protective Structures*, 2010, 1(3): 345–362.
- [16] 周正青. 基于铝粉燃烧理论的含铝炸药爆炸性能及能量释放研究[D]. 北京: 北京理工大学. 2016.
ZHOU Zheng-qing. Research of Explosion Properties and Energy Release of Aluminized Explosives based on the Aluminum Combustion Theory [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [17] Rai A, Park K, Zhou L, et al. Understanding the mechanism of aluminum nanoparticle oxidation [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2006, 10(5): 843–859.
- [18] ZHOU Zheng-qing, NIE Jian-xin, OU Zhuo-cheng, et al. Effects of the aluminum content on the shock wave pressure and the acceleration ability of RDX-based aluminized explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 144906-01–144906-08.
- [19] Trott B D, Backofen J, Joseph E, et al. Design of explosion blast containment vessels for explosive ordnance disposal unit [R]. ADB 016707, 1975.
- [20] 薛再清. 含铝炸药的爆轰特性[C]//中国兵工学会火炸药专业委员会第四届第二次学术年会火炸药论文集, 1997: 296–300.
XUE Zai-qing. The properties of detonation of aluminized explosives [C]//Chinese explosive ordnance society specialized committee in the fourth session of the second symposium on explosives, 1997: 296–300.
- [21] Peuker J M, Krier H, Glumac N. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement in aluminized explosives [J]. *Proceedings of Combustion Institute*, 2013, 34: 2205–2212.
- [22] 曾亮, 焦清介, 任慧, 等. 纳米铝粉粒径对活性量及氧化层厚度的影响[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(4): 26–29.
ZENG Liang, JIAO Qing-jie, REN Hui, et al. Effect of particle size of nano-aluminum powder on oxide film thickness and active aluminum content [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(4): 26–29.

Effect of Aluminum Size and Content on Explosion Performance of Aluminized Explosives in Confined Space

DUAN Xiao-yu, GUO Xue-yong, JIAO Qing-jie, ZHAO Qian, ZHANG Jing-yuan, ZHANG Qing-ming

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

Abstract: To investigate the influences of aluminum size and content on the performance of aluminized explosives in confined space, experiments were conducted in a fully confined chamber. Two kinds of RDX based explosives with different aluminum oxygen ratio (0.45 and 0.99) containing aluminum of 50 nm, 5 μm and 50 μm respectively were used. The data processing method of multipoints averaging for gaining quasic-static pressure and exponential decay similar for gaining the attenuation factor of pressure were proposed. Three characteristic quantities, quasic-static pressure (p_{QS}), rising time of pressure (t_{QS}) and attenuation factor of pressure (ω), were used to characterize the energy release from aluminized explosives in chamber. Results show that for the formulation with aluminum oxygen ratio of 0.45, the p_{QS} of sample with 50 μm aluminum powder is 0.3% and 0.7% higher than those with 5 μm and 50 nm aluminum, respectively. For the formulation with aluminum oxygen ratio of 0.99, the p_{QS} of sample containing 50 μm aluminum powder was 31.2% and 31.9% higher than those containing 5 μm and 50 nm aluminum powder, respectively, and the p_{QS} of two samples with aluminum oxygen ratio of 0.45 containing the same particle size aluminum powder are larger than the sample with aluminum oxygen ratio of 0.45. With respect to either samples containing the same size of aluminum, with the increase of aluminum oxygen ratio, p_{QS} increased, t_{QS} and ω decreased.

Key words: aluminized explosives; aluminum size; aluminum oxygen ratio; confined space; explosion performance

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.005