DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0230-06

# RDX 基铝纤维炸药空中爆炸性能*

林谋金[1,2],崔晓荣[1],马宏昊[2],郑炳旭[1],贾 虎[3]
(1.广东宏大爆破股份有限公司,广东 广州 510623;
2.中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027;
3.南阳师范学院土木建筑工程学院,河南 南阳 473061)

**摘要**:将铝纤维炸药与传统铝粉炸药和 RDX 炸药进行空中爆炸实验并得到压力时程曲线,经过分析计算得到 3 种炸药的压力峰值、二次击波、正相持续时间以及冲量。结果表明:铝纤维炸药的压力峰值相对于 RDX 没有明显提高,但其压力时程曲线衰减速度慢于 RDX 的,使铝纤维炸药的正相持续时间大于 RDX,铝纤维炸药的冲击波冲量相对于 RDX 的平均提高了 18%,与铝粉炸药的相当。铝纤维炸药的二次击波超压幅值与到达时间与铝粉炸药的接近,而铝纤维炸药的二次击波到达时间早于 RDX,说明二次击波的超压幅值与到达时间与炸药类型有关。

**关键词**:爆炸力学;压力峰值;空中爆炸;铝纤维炸药;二次击波;正相持续时间;冲击波冲量
**中图分类号**:O382.1 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

对空武器的装药选取需要考虑多方面因素,其中重要的性能指标有冲击波压力峰值和冲量。有学者对不同等效距离上的 TNT 压力峰值的实验和理论值进行了总结,得到不同的压力峰值经验计算公式。H. L. Brode 等[1]总结的压力峰值经验公式计算结果与实验验数据有较大的偏差,因此无法直接应用到战斗部威力评估中。於津等[2]提出的压力峰值经验公式虽然精度有所提高,但由于缺乏大量实验数据导致其经验公式的适用范围较小。张陶等[3]分别测试了油气炸弹(fuel air explosives,FAE)和 TNT 爆炸场压力峰值,结果表明 FAE 爆炸场压力分布规律与 TNT 有显著区别。牛余雷等[4]测量了 3 种双元炸药空中爆炸冲击波压力时程曲线,并与单一炸药进行比较,结果表明双元炸药的装药结构可使两部分装药之间产生能量耦合,从而提高装药的能量输出。仲倩等[5]对于不同装药量的 TNT 冲击波压力进行测定,提出了压力峰值与比例距离关系的改良经验公式,其与文献数据相对偏差的平均值为 5.61%。传统上,对于非 TNT 炸药,可通过实验得到其冲击波压力峰值,并与 TNT 炸药的压力峰值进行比较,从而求出该炸药的爆炸威力(TNT 当量比)[6],但这种方法仅对理想炸药适用。空中武器装填的炸药由于类型并不相同,不同类型的炸药在空中爆炸时爆轰特性以及冲击波衰减规律也不尽相同,按照冲击波压力峰值进行估算炸药威力往往会得出错误结论,因此需要对不同类型的炸药进行空中爆炸实验[7]。有学者对如何提高炸药爆炸后在介质中产生的压力以及冲击波冲量进行了深入研究,认为在炸药中加入金属粉末可以在爆炸中额外释放出能量,虽然这部分能量对爆速和爆压均无贡献,但可以增强炸药在周围介质中形成的冲击波压力和冲击波冲量[8]。本文中,将传统含铝炸药(RDX/Al)中的铝粉用铝纤维替代,得到新型铝纤维炸药[9],通过对铝纤维炸药与传统含铝炸药以及基体炸药 RDX 进行空中爆炸实验,分析三者空中爆炸性能的差异,以期为进一步提高含铝炸药的性能提供参考。

## 1 药柱制备与实验设备

制成长径比相近的 20 g 的圆柱形药柱(直径为 26 mm)。其中,基体炸药 RDX 中成分间的质量分数比为 $w$(黑索金):$w$(石蜡)=95:5,铝纤维炸药与铝粉炸药中成分间的质量分数比为 $w$(黑索金):

* **收稿日期**:2014-08-21;**修回日期**:2014-10-20
**基金项目**:国家自然科学基金项目(51174183,51374189,11202109)
**第一作者**:林谋金(1985— ),男,博士;**通讯作者**:马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

$w$(石蜡)∶$w$(铝纤维/铝粉)=76∶4∶20。铝纤维炸药密度为 1.69～1.71 g/cm$^3$，铝粉炸药密度为 1.68～1.70 g/cm$^3$，基体炸药 RDX 密度为 1.60～1.63 g/cm$^3$。铝纤维炸药中的铝纤维由压制法制成，压制的铝纤维厚度为 8～10 μm。

空中爆炸实验采用直径为 2.4 m、长为 4.5 m 的空中爆炸容器，测试装置包括压力传感器、恒流源和示波器。固定传感器时确保传感器水平，传感器的平面部分平行于铅垂面，传感器指向被测药柱，并与药柱处于同一水平面上，实验装置如图 1 所示。为了对比研究铝纤维炸药与铝粉炸药以及基体炸药 RDX 空中爆炸性能参数和衰减规律，在距离药柱 0.7 m 处安放传感器，并测得压力时程曲线。

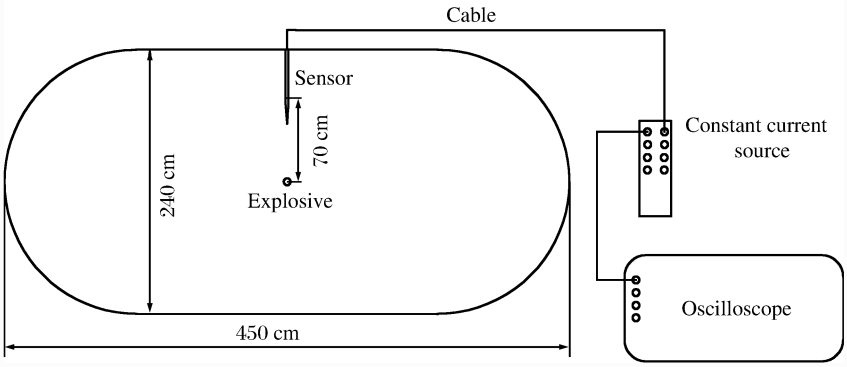


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

## 2 实验结果与分析

### 2.1 压力峰值与二次击波

通过对铝纤维炸药、传统含铝炸药及 RDX 进行空中爆炸实验，得到 3 种炸药的压力时程曲线如图 2 所示。在压力时程曲线中，可定义时间常数 $\theta$ 为冲击波压力从峰值 $p_m$ 衰减到$\frac{p_m}{e}$所需的时间[9]，因此由图 2 可以得出 3 种炸药的时间常数约为 125 μs。空中爆炸实验测试的准确度受到许多因素影响，容易产生不稳定的信号或者振荡信号，而具体的实验可能是代价较高的实验，因此必须经常从较差的记录中恢复数据。文献[10]推荐了一种方法，可以通过该方法对仪器尺寸和频率响应等因素产生的压力峰值误差进行修正，具体方法是将实验得到的压力时程曲线转换成对数压力时间关系曲线，可以用直线来精确地拟合对数压力时程曲线的初始部分，得到压力峰值和初始衰减率，铝纤维炸药的对数压力时间关系曲线如图 3 所示。

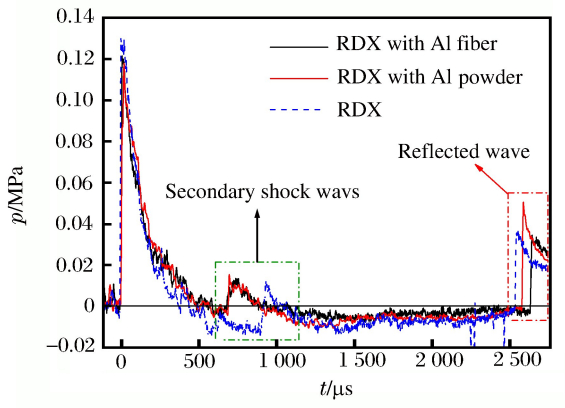


图 2 3 种炸药爆炸压力时程曲线对比

Fig. 2 Comparison of pressure histories between three kinds of explosives

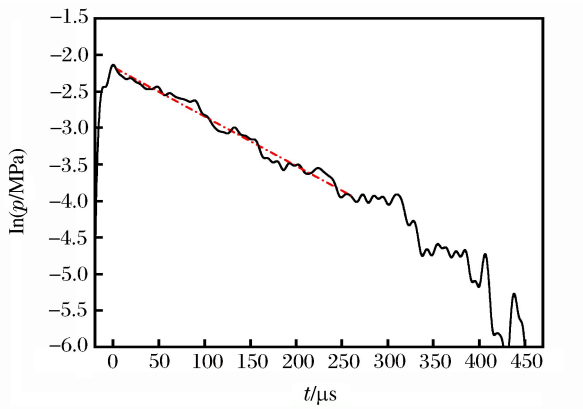


图 3 对数压力时间关系曲线

Fig. 3 Logarithmic pressure-time curve

不同研究者根据实验得到的或者理论上预测的不同位置上的压力峰值进行经验拟合，并得到相应的表达式，其中，文献[11]中压力峰值经验表达式为：

$$\begin{cases} p_{\mathrm{m}} = \dfrac{14.071\,7}{\bar{R}} + \dfrac{5.539\,7}{\bar{R}^2} - \dfrac{0.3572}{\bar{R}^3} + \dfrac{0.006\,25}{\bar{R}^4} & 0.05 < \bar{R} \leqslant 0.3 \\ p_{\mathrm{m}} = \dfrac{6.193\,8}{\bar{R}} - \dfrac{0.326\,2}{\bar{R}^2} + \dfrac{2.132\,4}{\bar{R}^3} & 0.3 < \bar{R} \leqslant 1.0 \\ p_{\mathrm{m}} = \dfrac{0.662}{\bar{R}} + \dfrac{4.05}{\bar{R}^2} + \dfrac{3.288}{\bar{R}^3} & 1 < \bar{R} \leqslant 10 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$p_{\mathrm{m}}$ 为压力峰值，$\mathrm{kg/cm^2}$；$\bar{R} = \dfrac{R}{\sqrt[3]{W}}$ 为等效距离，$\mathrm{m/kg^{1/3}}$；$W$ 为 TNT 当量。对于非 TNT 炸药，可通过爆热换算为 TNT 当量，再代入压力峰值经验公式进一步计算出压力峰值。通过对铝纤维炸药、传统含铝炸药以及 RDX 的压力时程曲线进行对数处理，得到 3 种炸药的压力峰值，并与文献[11]中采用式(1)的计算值进行比较，结果如表 1 所示。

**表 1 爆炸压力峰值实验值与参考文献[11]比较**

**Table 1 Comparison of peak pressures between test and reference [11]**

| $p_{\mathrm{m}}$(RDX)/MPa | | $p_{\mathrm{m}}$(RDX, Al fiber)/MPa | | $p_{\mathrm{m}}$(RDX, Al powder)/MPa | |
|---|---|---|---|---|---|
| 实验 | 文献[11] | 实验 | 文献[11] | 实验 | 文献[11] |
| 0.129 5 | 0.123 5 | 0.135 8 | 0.139 2 | 0.134 2 | 0.139 2 |
| 0.128 5 | — | 0.121 4 | — | 0.117 8 | — |
| 0.122 0 | — | 0.114 8 | — | 0.128 0 | — |
| 0.133 3 | — | 0.124 0 | — | 0.117 5 | — |

从表 1 中可以看出，实验数据的离散性较大，与空中爆炸实验为小药量实验以及空气可压缩性较大有关。铝纤维炸药和铝粉炸药的压力峰值相对于 RDX 没有得到明显提高，甚至低于 RDX，说明铝纤维炸药与铝粉炸药属于非理想炸药，金属铝参与反应所释放出的能量对实验中测试位置处的压力峰值贡献不大。

RDX 的压力峰值实验值与文献[11]中采用式(1)的计算得到的值相近，但总体趋势略高于计算值。由于含铝炸药中的部分爆热是由金属铝提供的，因此通过含铝炸药的爆热计算出的 TNT 当量偏大，使得通过式(1)计算得到的值高于压力峰值实验值，进一步说明式(1)对于理想炸药比较适用，而对非理想炸药的计算出的压力峰值偏高。

二次击波的产生是由于爆炸产物和空气之间的接触界面所发出朝向中心的稀疏波相继发生内爆而引起的，这种现象最初是用特征线方法对炸药爆炸过程进行计算时被观察到的[12]。由图 2 可以看出，实验得到的冲击波压力时程曲线在负相区域出现小振幅击波，与理想的冲击波压力时程曲线有所差异。由于实验是在空中爆炸罐中进行的，传感器与罐壁的距离约为 0.5 m，根据空气中冲击波的波速初步判断第 1 次出现的小振幅击波非反射波，而负相后面的峰值判定为反射波。文献[13]中压力时程曲线在正相后面也紧跟着小振幅击波，说明小振幅击波的出现与实验条件无关，因此综合判断负相区域出现小振幅击波为二次击波。铝纤维炸药的二次击波超压幅值和到达时间与传统含铝炸药相近，而铝纤维炸药的二次击波到达时间早于 RDX 的，说明二次击波的超压幅值与到达时间和炸药类型有关。

冲击波压力时程曲线在衰减阶段偶尔会出现许多反复的小击波，如果二次击波出现的位置恰好在压力衰减到达大气压之前，则正相持续时间能够显著地变化，但这些后期波除了对正相持续时间以外的任何正相特性的影响都比较小。二次以及反复出现的击波对负相影响较大，即可以使负相冲量和幅值大幅减少，或者使负相突然中止。由于实验得到二次击波处于负压区前端，对负压的持续时间影响较小，而对负压峰值与负压冲量影响较大。另外，铝纤维炸药与铝粉炸药的压力时程曲线衰减速度慢于 RDX 的，与铝纤维以及铝粉参与炸药爆炸产物的二次反应有关。

## 2.2 冲　量

由于正相冲击波冲量计算的精确性受限于正相持续时间的确定，而正相持续时间变动幅度较大，而且几乎不可避免，因此，在冲击波压力时程曲线处理中除了修正压力峰值以外，还需要尽可能准确地确定正相持续时间。为了确定正相持续时间，对铝纤维炸药的冲击波压力时程曲线的时间轴采用对数坐标，如图 4 所示，同时用直线进行拟合，最后通过拟合直线的斜率计算正相持续时间[10]。

通过对铝纤维炸药、传统含铝炸药以及 RDX 的压力时程曲线进行对数处理，得到 3 种炸药爆炸冲击波的正相持续时间，如表 2 所示。

由表 2 可以看出，不同炸药的正相持续时间的实验数据重复性较差，但总体趋势上含铝炸药略高于 RDX。由于铝纤维炸药与铝粉炸药属于非理想炸药，金属铝参与二次反应释放出的能量延缓了压力下降的速度，所以含铝炸药的正相持续时间应略大于 RDX 的正相持续时间。在空中爆炸实验中，正相冲击波冲量也是重要的冲击波参数，正相冲击波冲量的表达式为[11]：

$$I^+ = \int_0^{T^+} [p(t) - p_0]\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：$I^+$ 为正相冲击波冲量，Pa·s；$T^+$ 为正相持续时间，μs；$p_0$ 为环境压力，MPa，实验中得到的压力时程曲线是以大气压为基线，因此计算过程中需将 $p_0$ 值设置为零。通过对铝纤维炸药、传统含铝炸药以及 RDX 的压力时程曲线进行积分计算，得到 3 种炸药的冲击波正相冲量时程曲线，如图 5 所示。

**表 2　3 种炸药正相持续时间比较**

**Table 2　Comparison of positive phase duration of the shock wave between three kinds of explosives**

| Test | $T^+$/μs | | |
|---|---|---|---|
| | RDX | RDX with Al fiber | RDX with Al powder |
| 1 | 501.00 | 531.76 | 542.00 |
| 2 | 467.81 | 500.00 | 535.00 |
| 3 | 480.20 | 533.00 | 506.64 |
| 4 | 532.33 | 527.00 | 538.68 |

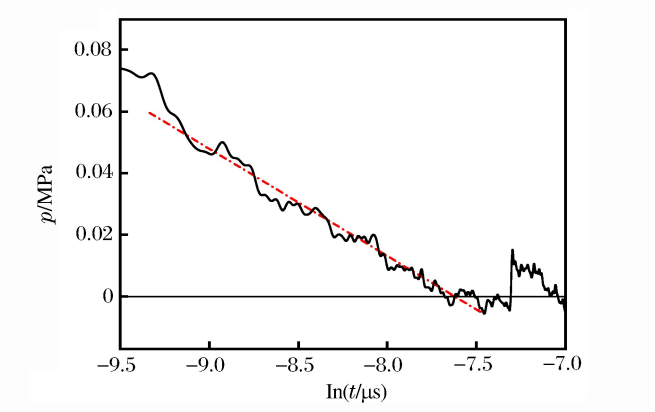


图 4　冲击波压力对数时间关系曲线

Fig. 4　Shock wave pressure-logarithmic time curve

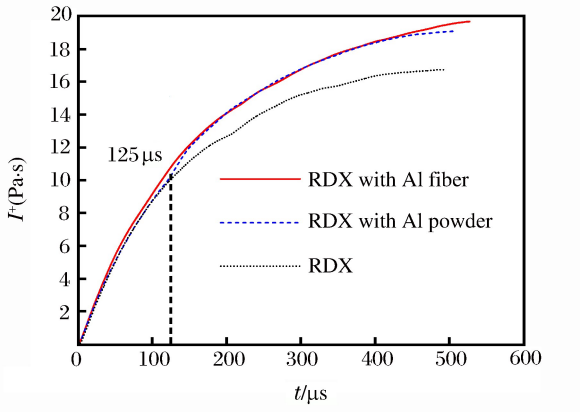


图 5　3 种炸药冲击波冲量时程曲线对比

Fig. 5　Comparison of impulse histories among three kinds of explosives

由图 5 可以看出，铝纤维炸药与铝粉炸药的冲击波冲量高于 RDX 的，其中铝纤维炸药的冲击波冲量相对于 RDX 的平均提高了 18%，与铝粉炸药相当。这说明在 RDX 中加入铝纤维能显著提高炸药空中爆炸时的冲击波冲量。铝纤维膜炸药与铝粉炸药的冲击波冲量约在 125 μs 后开始超过 RDX，说明铝纤维与铝粉参与二次反应所释放的能量在时间常数之后开始延缓基体炸药爆炸压力的下降速率，从而使含铝炸药的冲击波冲量得到提高。

### 2.3 压力时程曲线

为了描述空中爆炸的理想冲击波压力时程曲线的特性，需要将压力表述为时间的函数。目前主要是对时程曲线的正相部分进行拟合，不同研究者根据实验得到的或者理论上预测的压力时程曲线进行经验拟合，并得到相应的函数表达式，其中指数衰减形式的表达式为[14]：

$$p(t)=p_0+p_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{-ct} \tag{3}$$

修正的弗里德兰德方程表达式为[14]：

$$p(t)=p_0+p_{\mathrm{m}}(1-t/T^{+})\mathrm{e}^{-bt/T^{+}} \tag{4}$$

式中：$p_0$ 为环境压力，MPa，$b$、$c$ 为拟合参数。将实验得到的铝纤维炸药压力时程曲线的正相部分用式(3)～(4)分别进行拟合，拟合效果如图 6 所示。另外，实验得到的压力时程曲线是以大气压为基线，因此拟合过程中需将 $p_0$ 设置为零。

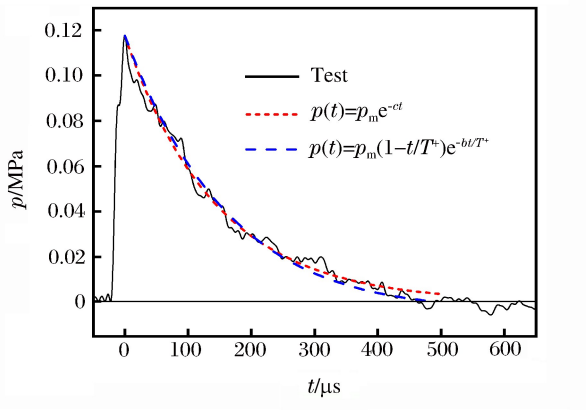


图 6 铝纤维炸药压力时程曲线与拟合曲线的对比

Fig. 6 Comparison between test pressure history and fitting curves for RDX based aluminum fiber explosive

由图 6 可以看出：指数衰减方程能较好地描述压力时程曲线的正相前段大部分，而修正的弗里德兰德方程能较好地拟合实验得到的压力时程曲线的正相部分，且表达式也相对简单，因此铝纤维炸药的压力时程曲线的正相部分可采用“修正的弗里德兰德”方程进行较好的描述，最终得到的表达式为：

$$p(t)=0.117\,76\left(1-\frac{t}{500}\right)\mathrm{e}^{\frac{-2.173\,1t}{500}} \tag{5}$$

## 3 结 论

本文中通过对铝纤维炸药、传统含铝炸药以及基体炸药 RDX 进行空中爆炸实验，得到结论如下：

(1)铝纤维炸药的压力峰值相对于 RDX 的没有得到明显提高，但铝纤维炸药的冲击波冲量相对于 RDX 的平均提高了 18%，与铝粉炸药相当，说明在 RDX 中加入铝纤维能使显著提高混合炸药在空中爆炸的冲击波冲量。

(2)铝纤维炸药的二次击波压力幅值和到达时间与铝粉炸药相近，而铝纤维炸药的二次击波到达时间早于 RDX 的，说明二次击波的压力幅值与到达时间与炸药类型有关。

(3)炸药空中爆炸的压力时程曲线的正相前段部分采用指数衰减方程进行拟合的较好，修正的弗里德兰德方程能够对压力时程曲线正相部分进行很好的描述。

## 参考文献：

[1] Brode H L. Blast wave from a spherical charge[J]. Physics of Fluids, 1959,2(2):217-229.

[2] 於津，彭金华，张陶，等. 基于 MATLAB 的 FAE 战斗部超压计算的公式拟合[J]. 弹箭与制导学报，2004(S4):306-308.
Yu Jin, Peng Jinhua, Zhang Tao, et al. Formula fitting to overpressure calculation of FAE warhead in MATLAB [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004(S4):306-308.

[3] 张陶，惠君明. FAE 爆炸场超压与威力的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2004,24(3):176-181.
Zhang Tao, Hui Junming. Experimental research on the overpressure and power in the FAE blast field[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,34(3):176-181.

[4] 牛余雷，王晓峰，冯晓军. 双元炸药装药空中爆炸的输出特性[J]. 火炸药学报，2009,32(4):45-49.
Niu Yulei, Wang Xiaofeng, Feng Xiaojun. Characteristics of air explosion output for dual explosive charge[J]. Chi-

nese Journal of Explosives & Propellants, 2009,32(4):45-49.
[5] 仲倩，王伯良，黄菊，等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报，2010,33(4):32-35.
Zhong Qian, Wang Boliang, Huang Ju, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010,33(4):32-35.
[6] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用：下册[M]. 北京：国防工业出版社，1979.
[7] 王建灵，郭炜，冯晓军. TNT、PBX 和 Hexel 空中爆炸冲击波参数的实验研究[J]. 火炸药学报，2008,31(6):42-44.
Wang Jianling, Guo Wei, Feng Xiaojun. Experimental research on the air explosion shock wave parameters of TNT, PBX, and Hexel[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008,31(6):42-44.
[8] 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.
[9] 林谋金，马宏昊，沈兆武，等. 铝纤维对黑索今水下爆炸性能的影响[J]. 爆炸与冲击，2014,34(3):379-384.
Lin Moujin, Ma Honghao, Shen Zhaowu, et al. The effect of aluminum fiber on underwater detonation performance of RDX[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(3):379-384.
[10] Ethridge N H. A procedure for reading and smoothing pressure-time data from HE and nuclear explosions[R]. Ballistic Research Laboratories, 1965.
[11] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国，译. 北京：科学出版社，1987:161-324.
[12] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011.
[13] 宋浦，肖川，梁安定，等. 炸药空中与水中爆炸冲击波超压的换算关系[J]. 火炸药学报，2008,31(4):10-13.
Song Pu, Xiao Chuan, Liang Anding, et al. Conversion relation of shock wave overpressure about underwater explosion and air blast[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008,31(4):10-13.
[14] 贝克 W E. 空中爆炸[M]. 江科，译. 北京：原子能出版社，1982.

# Air blast performance of RDX-based aluminum fiber explosive

Lin Moujin[1,2], Cui Xiaorong[1], Ma Honghao[2], Zheng Bingxu[1], Jia Hu[3]
(1. *Guangdong Hongda Blasting Co. Ltd*, *Guangzhou* 510623, *Guangdong*, *China*;
2. *Department of Modern Mechanics*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230027, *Anhui*, *China*;
3. *School of Civil Engineering and Architecture*, *Nanyang Normal University*, *Nanyang* 473061, *Henan*, *China*)

**Abstract**: The pressure history curves of aluminum fiber explosive and traditional aluminized explosives were measured by air blast experiments, and then the peak pressure, the secondary shock wave, the time of positive phase and the impulse were obtained by analyzing the curves. The result show that the peak pressure of the aluminum fiber explosive is not improved obviously with regard to the matrix explosives (RDX). The pressure decay rate of the aluminum fiber explosive is slower than that of RDX, resulting in that the time of the positive phase of the aluminum fiber explosive is longer than that of RDX. Compared with RDX, the impulse of the aluminum fiber explosive increases on the average by 18%, close to that of the traditional aluminized explosive. The amplitude and the occurrence of the secondary shock wave of the aluminum fiber explosive are the same as the traditional aluminized explosives and the secondary shock wave of aluminum fiber explosive occurs earlier than the matrix explosives (RDX), which shows that the amplitude and the occurrence time of the secondary shock wave are correlated with the types of explosive.

**Key words**: mechanics of explosion; peak pressure; air blast; aluminum fiber explosive; secondary shock wave; positive phase duration; shock wave impulse

(责任编辑　王易难)