

DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0513-07

# 铝氧比对含铝炸药性能影响的数值模拟\*

周正青, 聂建新, 覃剑锋, 裴红波, 郭学永

(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:** 为了研究铝氧比对含铝炸药在混凝土介质中爆炸性能的影响, 采用数值模拟与实验相结合的方法, 针对铝氧比分别为 0、0.257、0.632 的含铝炸药, 利用 AUTODYN 有限元程序建立计算模型, 计算了柱形装药在混凝土介质中的爆炸破坏过程, 并且得到了在比例距离为 2.5~10 的范围内, 3 种含铝炸药爆炸形成的冲击波压力时程曲线。计算结果表明: 冲击波峰值压力的衰减指数随炸药的铝氧比增大而减小, 衰减指数分别为 2.1、1.71、1.60; 另外, 当含铝炸药的铝氧比为 0.257 时比冲击波能最大。

**关键词:** 爆炸力学; 铝氧比; 衰减指数; 混凝土; 冲击波能

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

含铝炸药是一类高密度、高爆热的非理想炸药, 被广泛应用于各种武器战斗部。目前含铝炸药在水中和空中爆炸已得到广泛研究<sup>[1-4]</sup>, 但是在混凝土等密实介质中的爆炸作用过程公开报道较少。混凝土是民用和军用建设应用最为广泛的材料之一, 与空气、水相比, 混凝土的密度更大, 且具有一定强度, 对爆轰产物气体的约束作用更强, 更有利于维持铝粉反应所需要的高温、高压环境。研究含铝炸药对混凝土的爆炸作用具有非常重要的意义。Q. T. Wang 等<sup>[5]</sup>利用数值模拟方法研究了含铝炸药对混凝土的破坏效应; 李小雷等<sup>[6]</sup>利用理论计算和数值模拟相结合的方法, 研究了含铝炸药在混凝土的爆炸, 得到了铝含量与毁伤效应的关系, 但是没有对含铝炸药的爆炸冲击波进行研究。

冲击波是炸药对周围介质产生破坏效应的一个重要手段, 在混凝土介质中对冲击波进行研究将不仅有助于了解炸药性能, 而且可以为提高混凝土抗冲击防护性能提供理论指导。在冲击波测试方面, 王永刚等<sup>[7]</sup>、焦楚杰等<sup>[8]</sup>、Z. Rosenberg 等<sup>[9]</sup>利用锰铜传感器测量到了混凝土中的冲击波, 但是由于传感器的有效作用时间较短, 均没有记录完整的记录到冲击波时程曲线, 且测试得到信号干扰大, 严重影响了对混凝土介质中冲击波的分析。针对含铝炸药在混凝土中的爆炸作用这一复杂的问题, 采用数值模拟计算获取爆炸过程中冲击波传播及衰减规律, 是一种非常有效的手段。

本文中运用 AUTODYN 有限元程序对 3 种炸药在混凝土中的爆炸作用过程进行数值模拟研究; 与实验结果对照, 验证模型的可靠性; 计算 3 种不同铝氧比炸药在混凝土中爆炸毁伤的情况, 并且分析铝氧比对冲击波峰值压力和冲击波能的影响。

## 1 模型的建立

### 1.1 计算模型

以含铝炸药在混凝土中的爆炸实验为基本物理模型, 建立数值计算模型, 实验现场见图 1。混凝土靶板的尺寸是 1.2 m×1.2 m×0.8 m, 在靶板的中心处留有一个圆柱孔(直径 40 mm, 深 100 mm), 药柱尺寸为  $\varnothing 35$  mm×40 mm, 药量为 70 g, 起爆点为药柱上端面中心处。网格尺寸选为 0.4 cm, 利用欧拉法来描述炸药材料, 在炸药周围的空白区域填充空气, 在欧拉网格的边界定义流出边界。混凝土采用拉格朗日网格描述。为了计算方便, 简化成轴对称模型, 建立 1/2 模型。为了与实验工况保持一致, 在距

\* 收稿日期: 2014-01-02; 修回日期: 2014-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172042)

第一作者: 周正青(1987—), 男, 博士研究生, zhouzheng\_qing@163.com。

离炸药中心 5、10、15 和 20 cm 处设置观测点,计算该点冲击波压力。数值模型如图 2 所示。



图 1 实验现场

Fig. 1 Experimental site

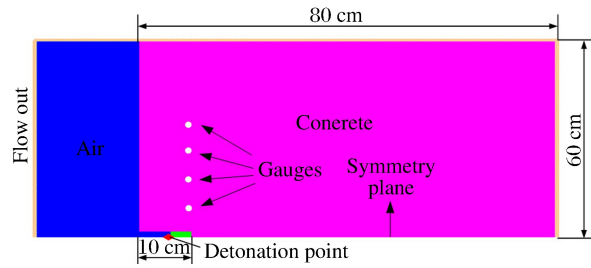


图 2 计算模型

Fig. 2 Simulation model

## 1.2 材料模型与状态方程

采用 JWL 状态方程<sup>[10]</sup>和 Miller 反应速率模型<sup>[11]</sup>来共同描述 RDX 基含铝炸药的二次反应能量释放过程:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{(-R_1 V)} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{(-R_2 V)} + \frac{\omega(E + \lambda Q)}{V} \quad (1)$$

式中:  $p$  为产物压力;  $V$  为产物相对比容;  $E$  为产物的内能;  $Q$  为非理想成分含有的热量;  $\lambda$  为非理想成分的反应度,  $0 \leq \lambda \leq 1$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为待定系数, 由圆筒实验得到。计算时炸药的性能及状态方程参数均由实验测得, 具体结果分别如表 1、表 2 所示, 其中:  $\omega$  为各成分的质量分数,  $\eta$  为铝氧物质的量比,  $\rho$  为密度,  $Q$  为爆热,  $D$  为爆速,  $p_d$  为爆压。

表 1 炸药性能<sup>[12]</sup>

Table 1 Characteristics of explosives<sup>[12]</sup>

炸药	$\omega/\%$			$\eta$	$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$Q/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$D/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$p_d/$ GPa
	RDX	Al	wax					
HL0	95	0	5	0	1.673	5.879	8325	29.39
HL15	80	15	5	0.257	1.763	6.736	8121	23.91
HL30	65	30	5	0.632	1.865	7.594	7879	22.21

表 2 炸药 JWL 状态方程参数<sup>[12]</sup>

Table 2 Parameters of JWL equations for explosives<sup>[12]</sup>

炸药	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
HL0	694.52	13.75	4.55	1.30	0.49
HL15	1897.54	24.77	5.83	1.72	0.35
HL30	2225.00	21.59	5.94	1.78	0.38

利用 Miller 反应速率方程定义非理想成分的反应速率:

$$\frac{d\lambda}{dt} = G(1 - \lambda)^a p^b \quad (2)$$

式中:  $G$ 、 $a$  和  $b$  是与反应速率相关的系数。根据文献[13], 含铝炸药反应速率指数取  $a=1/2$ ,  $b=1/6$ 。  $G$  的取值与炸药特性、铝粉的颗粒形状和尺寸有关。

混凝土内在的各向异性及多孔特性,使其有复杂的体积应变,内能受压力变化影响非常明显。考虑到这一因素,文中选取  $p$ - $a$  状态方程,既能够很有效描述混凝土在高压下的热力学行为,也能很好的描述在低压区时的压缩行为。混凝土本构方程选用侧重于描述混凝土的压缩损伤的 RHT 模型, RHT 模型中包含有失效面、弹性极限面、残余失效面、加载面和破裂面。实验中所用混凝土的抗压强度是 31.6 ~ 33.5 MPa, 密度为 2300 kg/m<sup>3</sup>。

## 2 模型验证

为了验证本文所选用的材料模型和状态方程,对实验的工况进行了数值模拟计算,表3是不同炸药作用下混凝土中毁伤效应的计算值与实测值的对比,其中: $m$ 为药量, $d$ 为炸药埋深, $R$ 为漏斗坑半径, $H$ 为漏斗坑深度,表3中实验值见参考文献[12]。数值模拟结果普遍高于实测值,偏差在15%以内,由于非均匀介质中的冲击波测试本身存在很大的离散性,这个偏差可以接受。图3是利用锰铜传感器实测的冲击波压力与计算压力时程曲线的对比,从图3可以看出计算得到的冲击波信号实验结果吻合较好,且模拟结果弥补了实验信号的不完整。由此说明文中所采用的材料模型、状态方程以及数值模拟方法可用于混凝土中含铝炸药爆炸的研究。

表3 数值模拟与实验结果的比较

Table 3 Comparison of experimental and simulated results

炸药	$m/g$	$d/cm$	$R/cm$		$H/cm$	
			实验	数值模拟	实验	数值模拟
HL0	70	10	27.2	24.8	14.1	13.0
HL15	70	10	28.6	26.9	14.5	14.2
HL30	70	10	25.7	23.3	13.6	11.9

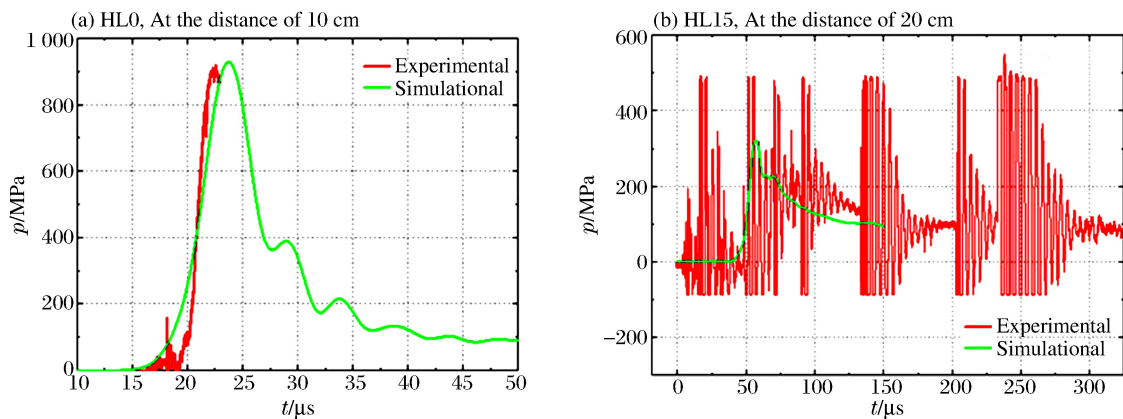


图3 冲击波时程曲线的数值计算与实验结果对比

Fig. 3 Numerical shock wave stress versus time compared with experimental results

## 3 计算结果与分析

### 3.1 毁伤过程分析

以损伤度  $f$  表示混凝土的破坏,图4给出了炸药爆炸后混凝土的破坏过程,3种炸药作用下混凝土破坏的发展趋势相同。炸药从零时刻开始起爆,20  $\mu s$  时混凝土在冲击波的压缩作用下粉碎破坏。随着冲击波的传播,破坏区域逐渐增大。冲击波在自由面反射后形成拉伸冲击波,由于混凝土的抗拉强度远小于抗压强度,在拉伸波的作用下混凝土更容易发生破坏。60  $\mu s$  时靠近自由面的区域出现了明显的破坏,这是压缩波和反射拉伸波共同作用的结果。药柱底端介质的破坏主要是由冲击波的压缩作用引起的,在拉伸波和压缩波的共同作用下,混凝土中出现了一个漏斗坑形状的破坏区域。

### 3.2 冲击波压力分析

3种炸药作用下的冲击波压力时程曲线如图5所示。HL15和HL30的冲击波峰值压力小于HL0,但是压力衰减明显慢与HL0,这主要是由于铝粉的二次反应,虽然二次反应放出的热量不能支持爆轰波阵面的传播,但它可以使爆轰产物的温度和压力维持较长的时间而不致过快的衰减。

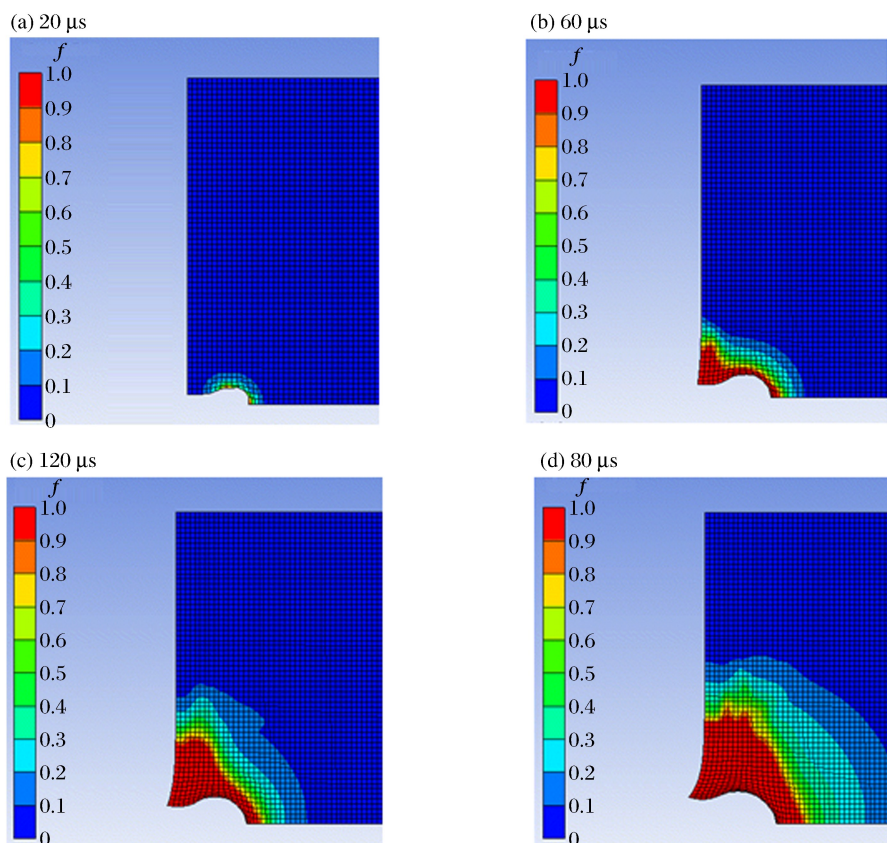


图 4 混凝土的损伤发展过程

Fig. 4 The damage development process of concrete

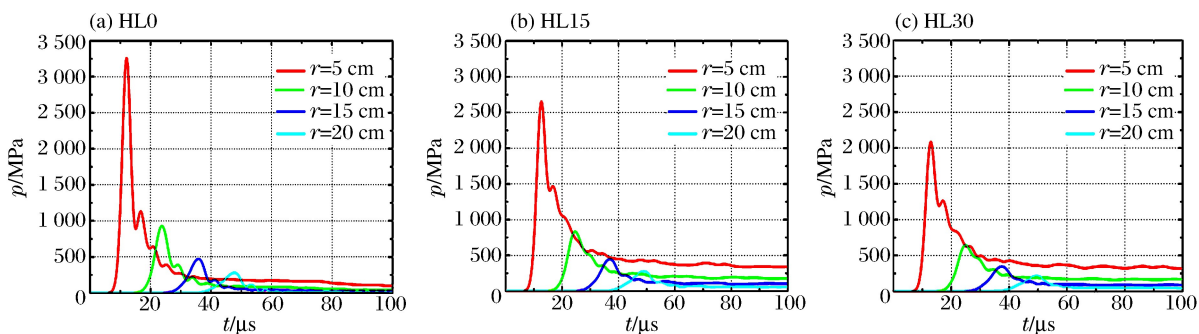


图 5 混凝土中的冲击波时程曲线

Fig. 5 Shock wave stress versus time in concrete

靶板中冲击波峰值压力与比例距离的关系一般可以用如下方程来描述：

$$p_r = D_1 \bar{r}^{-D_2} \tag{3}$$

式中： $p_r$  为混凝土介质中距爆心  $\bar{r}$  处的冲击波压力峰值(GPa)； $\bar{r}$  是比例距离， $\bar{r} = r/r_0$ ， $r_0$  为炮孔半径， $r$  为观测点与爆心之间的距离； $D_1$  为比例系数， $D_2$  为衰减指数， $D_1$  和  $D_2$  的值与炸药和混凝土介质的性质等相关。

利用模拟所得到数据进行拟合，得到冲击波压力峰值与比例距离之间的关系，如图 6 所示，其中图 6(b)为图 6(a)中虚线框内的放大图。2.5 ≤  $\bar{r}$  ≤ 10 时，不同炸药在 10 cm 炸深下压力峰值随比例距离的衰减规律为：

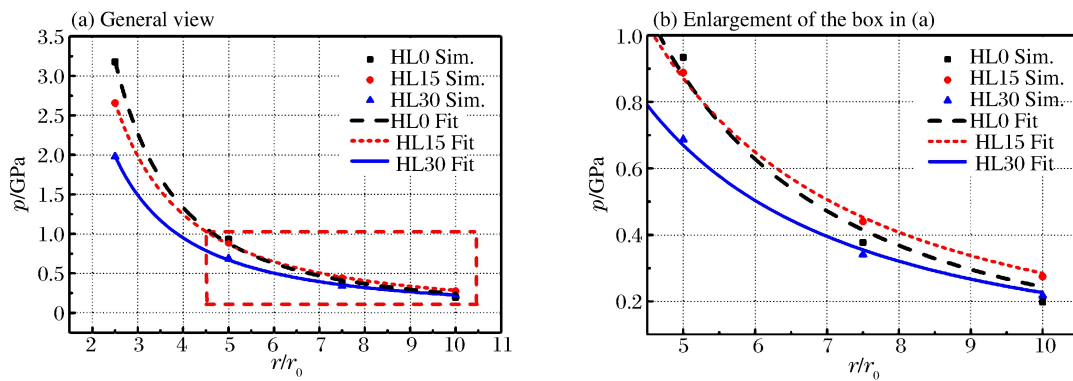


图 6 冲击波峰值压力与比例距离的关系

Fig. 6 Relationship between shock wave peak load and scaled distance

$$p_r = \begin{cases} 25.6\bar{r}^{-2.10} & \text{HL0} \\ 13.1\bar{r}^{-1.71} & \text{HL15} \\ 8.65\bar{r}^{-1.60} & \text{HL30} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中的比例距离  $\bar{r}$  是观测点的爆心距与炮孔半径的比值,是反映观测点与炸药中心距离的一个量纲一量。在比例距离  $2.5 \leq \bar{r} \leq 10$  范围内,压力峰值随传播距离呈指数衰减规律,随着铝氧比的增加,衰减指数减小。根据图 6(a)可知,在比例距离  $2.5 \leq \bar{r} \leq 5$  的范围内,在混凝土介质中炸药按冲击波压力峰值由大到小依次为:HL0,HL15,HL30;随着传播距离的增加,HL0 炸药作用下的压力峰值衰减最快,其次是 HL15,HL30 衰减最慢;根据图 6(b)可知,在比例距离  $5 \leq \bar{r} \leq 10$  范围内,炸药按压力峰值由大到小依次为:HL15,HL30,HL0。这主要是由于含铝炸药中铝粉反应放出的能量对爆轰产物的能量进行了补充,延缓了冲击波峰值压力的衰减。

### 3.3 冲击波能分析

本文选取的 4 个观测点离炸药的 中心距离较近,所以在炸药爆炸产生的高温高压环境下,爆炸近区的混凝土介质可以近似看作流体介质。因此在计算混凝土中的冲击波能量时可以参照在水中冲击波能<sup>[14]</sup>的公式进行推导,以爆炸点为坐标原点,设混凝土中任一点的 Euler 坐标为  $X$ ,比冲击波能  $E_{sw}$  为

$$E_{sw} = \frac{4\pi X^2}{\omega\rho_0 c_0} \int_{t_a}^{t_a+\tau} p^2(t) dt \quad (6)$$

式中: $X$  为测点到爆心的距离, $\omega$  为装药质量, $\rho_0$  为混凝土密度, $c_0$  为混凝土中波速, $t_a$  为冲击波到达时间, $p(t)$  为压力时程, $\tau$  为正压作用时间。

将模拟得到的冲击波时程结果带入式(6)进行计算,得到比冲击波能随距离的关系,如图 7 所示。

在以 RDX 为基的炸药中添加适量的铝粉可以提高比冲击波能,这主要是由于铝粉反应放出的能量转化为炸药的冲击波能,但是铝粉添加过多将导致冲击波峰值压力的降低,比冲击波能下降。由图 7 可知,当铝含量为 15%,铝氧比为 0.26 时,比冲击波能最大,在比例距离  $2.5 \leq \bar{r} \leq 10$  范围内,炸药按比冲击波能由大到小依次为:HL0,HL15,HL30。结合实验的毁伤结果可知,炸药的比冲击波能越高,其毁伤效果越好。在比例距离为 2.5 处,HL0、HL15、HL30 的比冲击波能分别为 2.12、2.87、1.38 MJ/kg。

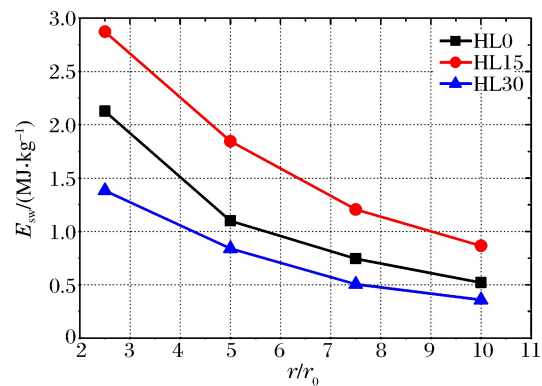


图 7 比冲击波能比较

Fig. 7 Comparison of shock wave energy

### 3 结 论

通过 AUTODYN 数值计算与实验相结合的方法,模拟了含铝炸药在混凝土中的爆炸作用过程,数值模拟结果与实验结果基本符合,说明材料的参数和选用的计算方法合理可行。根据计算的结果可知,在比例距离在 2.5 到 10 之间时,冲击波峰值压力呈指数衰减,衰减指数分别为 2.10、1.71、1.60,衰减指数随铝氧比的增大而减小。这主要是因为含铝炸药中铝粉的反应是在 C-J 面后进行的,虽然二次反应放出的热量不能支持爆轰波阵面的传播,但是它可以使爆轰产物的温度与压力维持较长时间而不过快的衰减。这使含铝炸药爆炸形成的冲击波压力-时间曲线不像非含铝炸药那样陡峭,铝氧比越高冲击波压力-时间曲线衰减越慢,同时冲击波峰值压力随距离的衰减也越缓慢。另外,以 RDX 为基的炸药中添加适量的铝粉可以提高比冲击波能,但是铝粉添加过多将导致冲击波峰值压力降低,进而导致比冲击波能下降,3 种炸药比冲击波能的大小顺序为:HL15,HL0,HL30。

### 参考文献:

- [1] Strømsøe E, Eriksen E W. Performance of high explosives in underwater applications. Part 2: Aluminized explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1990,15(2):52-53.
- [2] 黄菊,王伯良,仲倩,等.温压炸药能量输出结构的初步研究[J].*爆炸与冲击*,2012,32(2):164-168.  
Huang Ju, Wang Bo-liang, Zhong Qian, et al. A preliminary investigation on energy output structure of a thermo-baric explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012,32(2):164-168.
- [3] 周霖,杨启先.铝氧比对含铝炸药水中爆炸冲击波的影响[J].*兵工学报*,2008,29(8):916-919.  
Zhou Lin, Yang Qi-xian. The effect of Al/O ratio on underwater explosion shock wave of aluminium-containing explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2008,29(8):916-919.
- [4] 李金河,赵继波,谭多望,等.炸药水中爆炸的冲击波性能[J].*爆炸与冲击*,2009,29(2):172-176.  
Li Jin-he, Zhao Ji-bo, Tan Duo-wang, et al. Underwater shock wave performances of explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009,29(2):172-176.
- [5] Wang Q T, Ding J, Ying M K, et al. A study on damage properties of explosive internal-blast of concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2012,598:420-424.
- [6] 李小雷,聂建新,覃剑锋,等.含铝炸药在混凝土中爆炸效应的数值模拟研究[J].*爆破*,2012,29(3):109-114.  
Li Xiao-lei, Nie Jian-xin, Qin Jian-feng, et al. Numerical simulation of explosion effects in concrete by aluminized explosives[J]. *Blasting*, 2012,29(3):109-114.
- [7] 王永刚,王礼立.平板撞击下 C30 混凝土中冲击波的传播特性[J].*爆炸与冲击*,2010,30(2):119-124.  
Wang Yong-gang, Wang Li-li. Shock wave propagation characteristics in C30 concrete under plate impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010,30(2):119-124.
- [8] 焦楚杰,孙伟,高培正.碳纤维高强混凝土抗爆炸研究[J].*工程力学*,2008,25(3):158-166.  
Jiao Chu-jie, Sun Wei, Gao Pei-zheng. Study on steel fiber reinforced high strength concrete subject to blast loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2008,25(3):158-166.
- [9] Rosenberg Z, Yaziv D, Partom Y. Calibration of foil-like manganin gauges in planar shock wave experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980,51(7):3702-3705.
- [10] Kury J W. Metal acceleration by chemical explosives[C]//*Proceedings of the 4th International Symposium on Detonation*, Wahington DC, USA, 1965:3-13.
- [11] Miller P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion of non-ideal explosives[C]//*MRS Proceedings*. 1994,418:413-420.
- [12] 覃剑锋.含铝炸药在混凝土中的爆炸作用研究[D].北京:北京理工大学,2012:17-18.
- [13] 李澎.非理想炸药水下爆炸能量输出结构研究[D].北京:北京理工大学,2006:25-26.
- [14] Cole R H. *Underwater Explosion*[M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 1948:86-90.

## Numerical simulations on effects of Al/O ratio on performance of aluminized explosives

Zhou Zheng-qing, Nie Jian-xin, Qin Jian-feng, Pei Hong-bo, Guo Xue-yong  
(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aluminum to oxygen Al/O ratio is very important to the performance of aluminized explosives. In order to study the influence of the ratio on the performance of explosives in concrete, three kinds of aluminized explosives are taken into account, and their Al/O ratio are 0, 0.257 and 0.632, respectively. In this paper, the damaging process of concrete medium under explosion of cylindrical charge is numerically simulated using AUTODYN program. Meanwhile, within the range of relative distance from 2.5 to 10, shock wave pressure-time curve are obtained by means of numerical simulation and experiment. The numerical study shows that shock wave attenuation exponents are 2.10, 1.71 and 1.60, the exponents decrease with the increasing of Al/O ratio. In addition, shock wave energy is maximum when the Al/O ratio equals 0.257.

**Key words:** mechanics of explosion; Al/O ratio; attenuation exponent; concrete; shock wave energy  
(责任编辑 王小飞)

### 本刊关于稿件、版权等的声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中,作者需注意如下问题:

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果,无抄袭,无一稿多投,未在国内外公开发表过。
2. 稿件无政治错误,不涉及保密和拟申请专利的内容,已经过作者单位保密审查。
3. 作者署名和排序无异议,单位署名和排序无争议,且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中,如有作者或单位署名变更,需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。
4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时,编辑部将在4个月内反馈处理结果。若超过4个月未答复的,作者有权另行处理稿件,但需事先通知编辑部。
5. 对录用的稿件,在尊重稿件内容的基础上,编辑部有权作必要的修改和删减,按规定进行标准化和规范化。
6. 稿件录用后,稿件的所有出版版权归编辑部。
7. 稿件发表后,编辑部赠送样刊,并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2015年7月25日