

文章编号: 1001-1455(2005)04-0309-04

含铝炸药能量释放的简化模型*

周俊祥, 徐更光, 王廷增

(北京理工大学机械电子工程系, 北京 100081)

摘要: 为了在水下爆炸效应中反映出非理想爆轰特性的影响, 建立了含铝炸药非理想爆轰能量释放的简化模型。该模型以 CJ 爆轰理论和二次反应理论为基础, 把含铝炸药化学反应划分为快速反应和慢速反应, 以释放的化学能和慢反应速率常数作为非理想特征参数, 并应用于一维数值模拟。计算结果与基本实验结果一致, 冲击波峰值的计算误差不大于 10%, 衰减时间常数的误差小于 5%, 冲击波能与实验值也具有良好的一致性。简化模型合理地描述了含铝炸药非理想爆轰的主要过程及非理想特性, 可应用于含铝炸药的设计和爆炸效应的分析。

关键词: 爆炸力学; 简化模型; 二次反应理论; 含铝炸药; 数值分析; 爆轰

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引言

含铝炸药是典型的非理想炸药, 其各组分的化学能释放速率存在显著差异, 尤其是缓慢的反应过程显著低于流体动力学特征时间。因此, 以经典热力学为基础的 CJ 爆轰理论不能描述含铝炸药的爆轰过程, 化学反应动力学行为已成为影响含铝炸药爆轰性能的重要因素。但由于炸药在高温、高压下反应过程的复杂性, 目前对反应机理以及反应速率函数关系的认识还是唯象的和经验的。在应用化学反应流体动力学所作的理论分析中, 对氧化剂的分解和铝粒子的氧化等主要的化学和物理过程必须做出适当的假设^[1]。在以 WK 爆轰理论为基础的动力学模型中, 化学能的释放分为快、慢两个反应过程, 并采用形式相同的反应速率函数^[2]。这些处理方法在分析爆轰波与化学反应间的相互作用方面是非常有效的, 而且爆轰性能的计算结果与实验值具有良好的一致性。然而在含铝炸药爆炸效应的数值分析中, 常常沿用点火-燃烧-快反应三项式反应速率函数描述能量释放过程, 显然难以描述非理想爆轰特征。本文中以 CJ 爆轰理论和含铝炸药二次反应理论为基础, 建立一种能描述非理想爆轰并适用于爆炸效应计算的简化模型。

2 非理想爆轰的简化模型

炸药冲击起爆以及爆轰建立过程的化学动力学分析模型一般包含未反应炸药的状态方程、爆轰产物状态方程、混合物规则和反应速率方程。设未反应炸药比内能为 e_χ , 爆轰产物比内能为 e_p , 反应度(已反应炸药的质量分数)为 λ , 则混合物的比内能

$$e = (1 - \lambda)e_\chi + \lambda e_p \quad (1)$$

式中: $e_p = e(p, v) - q_p$, $e(p, v)$ 为某种形式的爆轰产物状态方程, p 为压力, v 为比容, q_p 为单位质量炸药释放的化学能。

含铝炸药的组成通常可分为快速反应的理想组分(如高能炸药 RDX、HMX)和缓慢反应的非理想组分(如 AP、Al、粘结剂等)。AP 的分解以及 Al 的氧化速率通常比 RDX 的分解速率低二个数量级, 但能量水平较高。因此, 可以认为含铝炸药的化学变化过程主要由非理想组分的慢反应所控制, 即相当数量的化学能是在 CJ 面之后持续释放的, 从而构成非理想特性。根据含铝炸药二次反应的特点, 通常假设

* 收稿日期: 2004-08-31; 修回日期: 2004-10-12

作者简介: 周俊祥(1962—), 男, 博士研究生, 工程师。

理想组分的反应进行得很快,并在 CJ 面全部反应完毕,因而 CJ 面后主要是非理想组分的缓慢反应。一般认为理想组分的分解是次要的能量释放过程,可进一步假设其反应速率为无穷大,即可以不再考虑炸药的冲击起爆和稳态反应区内的变化过程。设理想组分的初始质量分数为 λ_1^0 ,在 t 时刻非理想组分反应的质量分数为 λ_{NI} ,则有

$$\lambda = \lambda_1^0 + \lambda_{NI} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$e = (1 - \lambda)e_x + \lambda e(p, v) - (\lambda_1^0 q_1 + \lambda_{NI} q_{NI}) \quad (3)$$

式中: q_1 、 q_{NI} 分别为理想组分和非理想组分的反应热,并有化学能释放为

$$q_p = \lambda_1^0 q_1 + \lambda_{NI} q_{NI} \quad (4)$$

式(2)、式(4)明确地反映了含铝炸药非理想爆轰的进程及能量释放过程。根据上述假设,可进一步令

$$e(p, v, \lambda) = (1 - \lambda)e_x + \lambda e(p, v) \quad (5)$$

即可采用一个与 λ 相关的状态方程描述爆轰产物从 CJ 点开始的非等熵膨胀。由式(1)表示的爆轰产物比内能改写为

$$e = e(p, v, \lambda) - q_p(\lambda) \quad (6)$$

由式(2)可知,非理想组分的反应速率即为含铝炸药的反应速率。含铝炸药具有普适性的方程是与压力相关的反应速率方程^[3],即

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1 - \lambda)^{1/2} p^{1/6} \quad (7)$$

式中: a 为反应速率常数,等于单位压力下的初始反应速率。若取压力单位为 MPa,时间单位为 μs ,则 a 的单位为 $\text{MPa}^{-1/6} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

按上述方法,含铝炸药非理想爆轰的动力学分析主要包括与 λ 相关的爆轰产物状态方程和非理想组分的反应速率方程,具体关系式为式(2)、(4)、(6)、(7)。简化分析模型是针对含铝炸药的非理想爆轰建立的,并包含着可评价含铝炸药非理想程度的特征参数:理想组分和非理想组分的化学能以及非理想组分的反应速率常数,因而具有明确的物理意义。两类化学能都可由热力学计算得出,反应速率方程中的各项参数则可根据相应的水下爆炸实验数据分析得到^[4]。可以看出,若式(7)中的速率常数 $a \rightarrow \infty$,则该简化能量释放模型与 CJ 爆轰模型一致。

3 一维数值分析中的应用

含铝炸药在无限水域中的爆炸效应可以采用方便、快捷的一维非定常数值分析。以一维球对称拉格朗日型流体动力学方程为基础,将简化的非理想爆轰模型纳入其中,则可以明确地分析各种非理想因素对水下爆炸能量特性的影响。

建立与反应度 λ 相关的爆轰产物状态方程的有效方法是将状态方程中的各项参数视为 λ 的线性函数。采用 JWL 状态方程

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \rho_0 v} \right) e^{-R_1 \rho_0 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \rho_0 v} \right) e^{-R_2 \rho_0 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (8)$$

并分别确定对应于 $\lambda=0$ 和 $\lambda=1$ 时的两条等熵线,则反应过程任一中间状态的参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为两条等熵线间的线性差值^[5]。以 PBX 型含铝炸药 RDX/AP/Al/HTPB 为计算实例,密度为 1.79 g/cm^3 。JWL 爆轰产物状态方程的各项参数见表 1,理想组分和非理想组分的化学释能分别为 $q_1 = 3.015 \text{ kJ/g}$, $q_{NI} = 8.19 \text{ kJ/g}$,这些数据来源于文献^[5]。计算中通过调整反应速率常数改变能量释放速率的大小。

图 1 为装药质量 m 为 0.5 kg 的 PBX 含铝炸药与等能量的 RDX 距装药中心 0.5 m 处的水中冲击波计算结果。可以看出,在爆炸总能量相同的情况下,由于含铝炸

表 1 JWL 状态方程参数

Table 1 Parameters for JWL EOS

| λ | A/GPa | B/GPa | R_1 | R_2 | ω |
|-----------|----------------|----------------|---------|---------|----------|
| 0 | 778.3 | 7.071 | 4.485 0 | 1.068 0 | 0.300 0 |
| 1 | 652.7 | 10.640 | 5.152 3 | 1.030 5 | 0.155 1 |

药按简化模型改变了爆炸能量的释放过程,从而降低了压力波的峰值压力 p_{max} ,增大了衰减时间常数 θ ,这与公认的试验结果一致。爆炸冲击波的超压取决于炸药的爆速和爆压,即能量的动态释放特性,而与含铝炸药对应的这部分能量是理想组分释放的化学能。与 RDX 相比,含铝炸药降低了这部分能量,故导致冲击波峰值压力下降。此外,非理想组分的放热反应是在流体膨胀过程中进行的,因而导致了压力衰减速率变慢,这有助于增大冲击波能量。通过改变装药质量和距装药中心的距离 r 可得到冲击波峰值压力、衰减时间常数随对比距离的变化,计算结果与实验值^[6]的比较如图 2、图 3 所示。在图中对比距离范围内,冲击波峰值的计算误差不大于 10%,衰减时间常数的误差小于 5%。而且,两者的变化趋势与实验值具有良好的一致性。这表明简化模型合理地反映了含铝炸药的能量释放过程,能量释放特征参数与冲击波特性的联系基本正确。

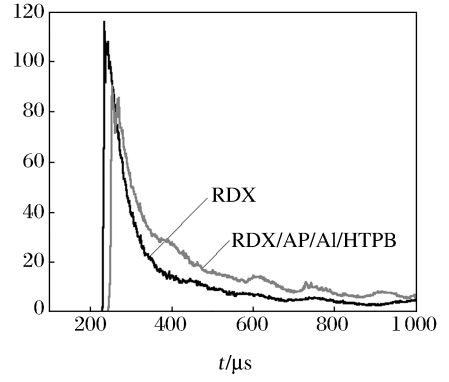


图 1 水中 0.5 m 处的冲击波历史
Fig. 1 History of the underwater shock wave at the depth of 0.5 m

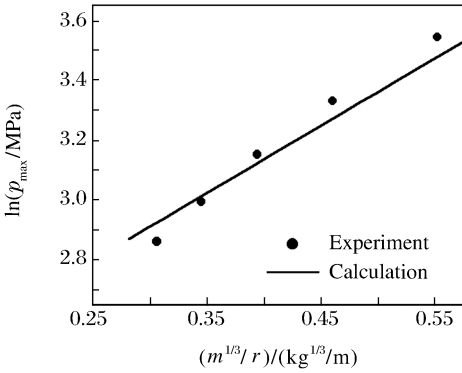


图 2 冲击波峰值压力随对比距离的变化

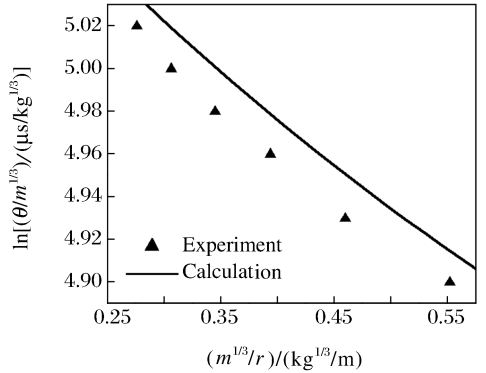


图 3 衰减时间常数随对比距离的变化

Fig. 2 Peak pressure of shock wave versus scaled distance

Fig. 3 Decay time constant versus scaled distance

在不同反应速率下,计算得到的 0.5 m 处爆炸冲击波特征参数如表 2 所示,其中 E_{sw} 为相对于炸药 PENTOLITEDE 的冲击波能。可以看出,慢反应速率的大小对冲击波峰值压力和衰减时间常数都有不同程度的影响。当反应速率常数由 $0.025 (10 \text{ MPa})^{-1/6} / \mu\text{s}$ 减少到 $0.001 (10 \text{ MPa})^{-1/6} / \mu\text{s}$,峰值压力没有明显变化,但压力衰减速率却有大幅度的增加。当反应速率常数大于 $0.025 (10 \text{ MPa})^{-1/6} / \mu\text{s}$ 时,峰值压力和压力衰减速率都增加了相同的幅度。这一结果表明,对于存在能量慢速释放过程的含铝炸药,当慢速反应速率过低时,将减少爆炸作用的有效能量,而当慢速反应速率过高时,则会更多地表现出理想爆轰的特征。此外,在随慢反应速率常数的变化中,压力衰减时间常数和冲击波能都存在最大值。冲击波能在慢反应速率常数较小时上升迅速,达到最大值后则下降缓慢。若取 90% 的最大冲击波能对应的慢反应速率常数为阈值,则本算例的速率常数阈值为 $0.025 (10 \text{ MPa})^{-1/6} / \mu\text{s}$,该值与最大衰减时间常数对应的慢反应速率常数相同,也反映出能量释放速率与冲击波特性间的本质联系。与此相对应的相对冲击波能计算值为 1.80,实验值^[6]为 1.85,两者吻合较好。因此,爆轰产物与水介质的动力学耦合要求慢速反应速率应控制在一定的范围内,才能满足最大冲击波能的设计要求。当反应速率常数偏离某个阈值时,慢速释放的能量不能最大限度地转换为爆炸冲击波的能量。

表 2 水下冲击波特征参数

Table 2 Characteristic parameters of underwater shock wave

| $\alpha / [(10 \text{ MPa})^{-1/6} / \mu\text{s}]$ | $\theta / \mu\text{s}^{-1}$ | p_{max} / MPa | E_{sw} |
|--|-----------------------------|------------------------|----------|
| 0.001 | 47.2 | 85.0 | 0.92 |
| 0.005 | 74.0 | 85.2 | 1.23 |
| 0.025 | 98.6 | 85.0 | 2.80 |
| 0.500 | 74.6 | 207.0 | 2.05 |
| 1.000 | 75.0 | 105.0 | 2.00 |

4 结 论

简化模型由 CJ 模型和含铝炸药二次反应理论相结合而得到,该模型以 CJ 面为界,把含铝炸药的能量释放过程分为理想组分的快速释放和非理想组分的慢速释放两个过程,并以两步反应释放的化学能和慢反应速率作为评价含铝炸药非理想特性的参数。将简化模型应用于一维数值分析中,与理想炸药相比,含铝炸药水下爆炸冲击波的时间衰减常数较大,冲击波的能量耗散较小,可以获得更多的冲击波能量。此外,含铝炸药化学能向冲击波能的转换程度受慢速反应速率的制约,且速率常数存在阈值。这些计算结果与基本试验事实和理论分析相一致,且简化模型中的非理想特征参数能体现不同非理想程度下的水下爆炸效应。因此,简化模型合理地描述了含铝炸药非理想爆轰的主要过程,快速和慢速释放的化学能以及慢反应速率常数能够有效地体现含铝炸药的非理想程度。该模型可用于水下爆炸效应的计算分析,对含铝炸药设计有指导意义。

参考文献:

- [1] Pastine D J, Cowperthwaite M, Solomon J M, et al. A model of nonideal detonation in aluminized explosives[A]. 11th International Symposium on Detonation[C]. Colorado: AFRL, 1998:204—213.
- [2] Howard W M, Fried L E, Souers P C. Kinetic modeling of nonideal explosives with CHEETAH[A]. 11th International Symposium on Detonation[C]. Colorado: AFRL, 1998:998—1006.
- [3] Pastine D J. Energetics of late chemical reactions in nonideal underwater detonations[R]. ADA309088, 1995.
- [4] Guirguis R, McKeown R. A closed water-filled cylinder to characterize nonideal explosives[A]. 12th International Symposium on Detonation[C]. California: NSWC, 2002:344—352
- [5] Guirguis R H, Miller P J. Time-dependent equations of state for aluminized underwater explosives[A]. 10th International Symposium on Detonation[C]. Massachusetts: NSWC, 1993:675—682
- [6] Bocksteiner G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-15[R]. ADA315885, 1996.

A simplified model of energy release for aluminized explosives

ZHOU Jun-xiang^{*}, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng

(*Department of Electrochemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: A simplified model of nonideal detonation energy release is proposed to account for the effect of nonideal detonation on underwater explosion. Based on the CJ detonation theory and the later reaction theory, the model divides chemical reactions in aluminized explosives into fast and slow reactions, and takes the released chemical energy and the slow reaction rate as the nonideal characteristic parameters. One-dimensional calculations using this model are in good agreement with the experiments, with the error in peak pressure of shock wave and the error in decay time constant less than 10% and 5%, respectively. The shock wave energies are also in agreement with the experimental results. This indicates that this simplified model has correctly described the major processes and characteristics of the nonideal detonation, and can be used in explosive design and explosion effect analysis.

Key words: mechanics of explosion; simplified model; later reaction theory; aluminized explosive; numerical simulation

* Corresponding author: ZHOU Jun-xiang
E-mail address: zhouyi90@163.com
Telephone: 010-69771368-3154