

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.001

# 含铝炸药爆炸作用下的水中圆柱壳 动态响应数值研究\*

夏博文 魏亚杰 饶国宁 彭金华

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了研究圆柱壳在含铝炸药水下爆炸载荷作用下的响应规律,利用非线性动力学软件 AUTODYN 计算了 3 种不同配方含铝炸药的远场冲击波特特性,并将计算值与文献实验值进行对比,计算误差能够稳定在 5% 以内,之后结合 ABAQUS 程序模拟了含铝炸药冲击载荷作用下水中圆柱壳的动态响应。在 30 kg 药量下分析对比了圆柱壳体加速度、速度及有效塑性应变的变化规律,随后确定了各炸药致使圆柱壳结构失稳的临界药量,并以 PBXW-115 为例研究了临界药量作用下的圆柱壳破坏模式。结果表明,AUTODYN 与 ABAQUS 程序的联用,能够有效地模拟圆柱壳在含铝炸药远场冲击波作用下的动态响应;含铝炸药致使圆柱壳单元达到屈服失效所需药量普遍低于理想炸药 RDX。

[关键词] 含铝炸药;数值模拟;水下爆炸;圆柱壳;动态响应

[分类号] O383.3

## 引言

含铝炸药作为典型的非理想炸药,其非理想组分能够在理想成分爆轰之后释放大量的能量。释放的能量可以使爆轰产物的温度和压力维持较长的时间而不致于过快地衰减,从而有效地改善了炸药的性能,这使得含铝炸药能够广泛应用于水下兵器的战斗部中。

圆柱壳结构作为水下结构物的重要组成部分,广泛应用于船舶与海洋工程等领域。圆柱壳抗冲击性设计以及屈曲特性研究一直以来都是较为热门的课题。Fox<sup>[1]</sup>通过实验并结合 LS-DYNA 及 USA 程序,研究了水下爆炸冲击波载荷作用下圆柱壳的毁伤效应,实验结果与计算结果吻合较好。贾宪振<sup>[2]</sup>运用数值软件分析了冲击载荷作用下的深水圆柱壳响应的影响因素,并研究了圆柱壳随深度变化的破坏规律。Hung<sup>[3]</sup>通过数值软件研究了小药量载荷作用下圆柱壳的线性与非线性的响应规律,并结合实验对结果进行验证。但研究含铝炸药作用下的结构的动力学响应却不多见。研究圆柱壳在特定冲击载荷作用下的动态响应特性也能够一定程度上反映出炸药的實際做功能力和能量输出结构,对于水中兵器装药的配方设计及性能研究具有重要的意义。

本文通过动力学软件 AUTODYN 计算并验证了数种含铝炸药远场冲击波特特性,然后将冲击载荷的表征参数导入到结构分析软件 ABAQUS 中,以此研究含铝炸药冲击载荷作用下的水下圆柱壳动态响应规律。

## 1 模型的选取和验证

参考文献[1]中所选取的圆柱壳模型,该模型被用于评估水中冲击波作用下的结构响应特性,具有较好的适用性和再现性。

### 1.1 材料模型

圆柱壳模型全长 1.067 m,外径 0.305 m,主体壁厚 6.35 mm,两段封头壁厚 24.50 mm,水平置于开放性水域中。爆距 7.62 m,爆深 3.66 m。圆柱壳体材料为 T6062-T6 铝合金,材料性质如表 1 所示。

外部水域半径定为 0.915 m,圆柱壳位于外部

表 1 圆柱壳体材料性质

Tab. 1 Material properties of cylindrical shell

材料	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性 模量/ GPa	泊松 比	屈服 应力/ GPa	失效 应变
T6062-T6	2.784	7.56	0.33	0.3	0.12

\* 收稿日期:2014-05-21

基金项目:青年科学基金项目(11102091);博士点基金(博导类)(20113219110010)

作者简介:夏博文(1990~),男,硕士,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:summerxbw@sina.com

通信作者:饶国宁(1978~),男,博士,讲师,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:njraoguoning@163.com

流体的中心。水域网格采用非等分的形式进行划分,外部边界设为无反射边界条件。

## 1.2 含铝炸药冲击波载荷

ABAQUS 中,通过定义静态点处的压力时程曲线、爆心位置及冲击波传播的流体性质,即可完成在流/固网格界面处入射波载荷的定义。静态点位于结构体上最接近爆心的位置,施加在该点处的压力时程曲线直接影响数值模拟的精度。定义冲击波载荷的最佳方案是导入水下爆炸实验实测的压力时程曲线,而当缺乏系统的实验数据时,则一般利用实验拟合的水下爆炸相似率公式进行计算。

就理想炸药而言,爆炸产生的能量能够瞬间释放。而对于非理想炸药,炸药爆轰的滞缓效应较为明显,反应速率作为影响水下爆炸基本参数的因素,化学反应速度与冲击波波头推进速度并不按照同一比例变化,则初始冲击波性质发生变化,相似律就无法满足。

AUTODYN 程序中 JWL-Miller 状态方程能够较好地描述非理想炸药二次能量释放的过程。本文利用该状态方程对含铝炸药的爆轰过程进行了数值研究。

### 1.2.1 爆轰产物的状态方程

含铝炸药爆轰产物的状态方程可采用 JWL-Miller 状态方程进行描述:

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

式中: $p$  为爆轰产物的压力; $V$  为比容; $E$  为 CJ 面前释放的比内能; $Q$  为 CJ 面后额外释放的比内能; $A$ 、 $B$  为材料参数; $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  是常数; $\lambda$  为非理想成分的燃烧分数,当  $\lambda = 1$  时,即为理想炸药的 JWL 方程。非理想组分的反应速率可以用下式表示:

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

式中: $a$  为能量释放常数; $m$  为能量释放指数; $n$  为压力指数。一般取  $m = 1/2$ ,  $n = 1/6$ ,  $a$  的取值与炸药特性和非理想成分颗粒形状、粒度有关<sup>[4]</sup>,当  $a$  取值在 0.025 ~ 1.000 范围内,能够对应非理想成分粒度 200 ~ 50  $\mu\text{m}$  的情况<sup>[5]</sup>。

### 1.2.2 含铝炸药载荷的验证

为了体现含铝炸药的特性,同时能够对含铝炸药进行定量的分析和对比,本文选取了国内外数种不同配方的 RDX 基含铝炸药进行研究。结合文献[6-7]中含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程的参数,

并引入 Miller 能量释放模型进行计算。几种炸药的组分及相关信息见表 2。

表 2 炸药组分及相关信息

Tab. 2 Explosive components and information

炸药名称	装药密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	组分质量比	实验数据来源
HBX-1	1.69	RDX/TNT/ Al/黏结剂: 40/38/17/5	文献[1]
PW20	1.70	RDX/Al/ 黏结剂: 75/20/5	文献[5]
PBXW-115	1.79	RDX/AP/ Al/黏结剂: 20/43/25/12	文献[7]

利用 AUTODYN 程序,在二维条件下模拟文献中实验工况。忽略不同实验条件下水的热传导、黏滞性及浅水中静水压力对结果的影响,水介质采用 Shock 状态方程<sup>[8]</sup>。模拟实验工况得出的 3 种炸药计算值与实验值对比结果分别见表 3 和图 1。HBX-1 为 27.0 kg 药量,7.62 m 爆距;PW20 为 0.5 kg 药量,0.98 m 爆距;表 3 中,  $p_m$  为压力峰值,  $\theta$  为衰减常数。

表 3 各工况下冲击波参数的计算值与实验值

Tab. 3 Calculated and experimental values of shock wave parameters under different conditions

类别	实验值		模拟值	
	$p_m/\text{MPa}$	$\theta/\text{ms}$	$p_m/\text{MPa}$	$\theta/\text{ms}$
HBX-1	15.7	0.400 0	15.9	0.380 0
PW20	44.9	0.069 6	42.6	0.070 2

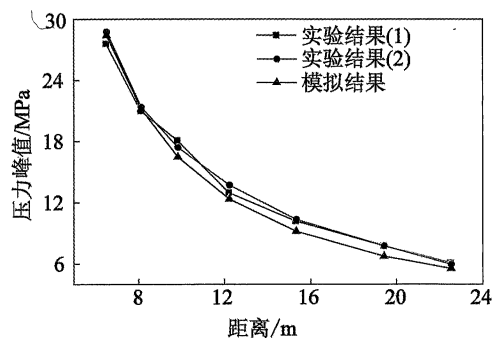


图 1 25 kg PBXW-115 各爆距处压力峰值计算值和实验值对比

Fig. 1 Comparison of calculated and experimental values of peak overpressure for 25kg PBXW-115 at different explosive distances

表 3 为 HBX-1 及 PW20 相应工况下压力峰值  $p_m$  和衰减常数  $\theta$  的计算值与实验值的对比。文献

测得的 HBX-1 压力峰值为 15.7 MPa, 本文计算得到的峰值为 15.9 MPa, 误差在 1.3% 左右, 衰减常数的实验值和计算值分别为 0.400 0 ms 和 0.380 0 ms, 误差为 5%, 两者的压力峰值及衰减曲线吻合较好。对于 PW20, 相同工况下实验值和计算值的压力峰值误差大约为 5%, 计算得出的衰减常数  $\theta$  较实验值高出 0.8%, 模拟结果较为理想。

图 1 为 25 kg PBXW-115 各爆距处压力峰值计算值和实验值对比图。从图中可以看出, 当爆距在 6~8 m 范围内时, 计算值与实验值吻合较好, 误差能够保持在 3% 以内; 当爆距大于 8 m 时, 随着爆距的增加, 冲击波衰减较实验值略快, 误差最大可达到 10%。而在爆距小于 8 m 时, 模拟的精度是满足要求的。

总体来说, 模拟 HBX-1、PW20 以及 PBXW-115 相应实验工况所得到的冲击波表征参数的计算值与实验值吻合较好, 误差能够稳定在 5% 以内, 精度满足模拟的要求。

## 2 圆柱壳动态响应的研究

在验证了含铝炸药载荷的精确度之后, 本节将以此为基础, 计算 30 kg 含铝炸药作用下水中圆柱壳的动态响应。图 2 为 30 kg 药量在 7.62 m 爆距处的冲击波压力时程曲线, 作为比较, 也计算了理想炸药 RDX 相应的特征参数, 图中各曲线依次错开 0.5 ms。

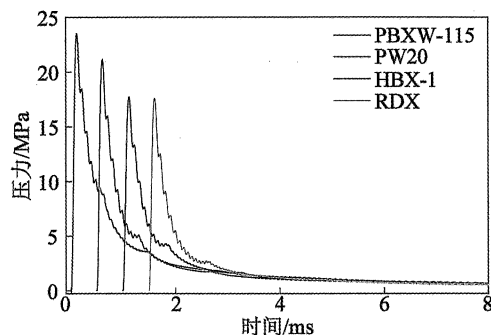


图 2 30 kg 药量冲击波压力时程曲线

Fig. 2 Overpressure history curves of shock waves in 30 kg charge mass

Miller 能量释放模型在传统 JWL 方程的基础上, 引入了后期能量释放项  $\lambda Q$ , 并结合原方程低压项以  $\omega(\frac{E + \lambda Q}{V})$  的形式给出。含铝炸药中, Al 的二次反应放热对 CJ 面后额外释放的比内能  $Q$  具有较大贡献, 反映在压力时程曲线上则表现为曲线后期衰减较为缓慢。如图 2 所示, 3 种含铝炸药的压力峰值及衰减趋势均优于理想炸药。引入 Miller 能量释放模型后, 曲线能够较好地描述含铝炸药是做功

特性。

### 2.1 加速度响应分析

图 3 为 30 kg 药量作用下, 圆柱壳迎爆面中心处的横向加速度响应对比图。图中各曲线依次错开 0.2 ms。从图中可以看出, PBXW-115 作用下的壳体加速度峰值最大, 即  $3.7 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ; 以 RDX 为主体的炸药加速度峰值则相对略低。

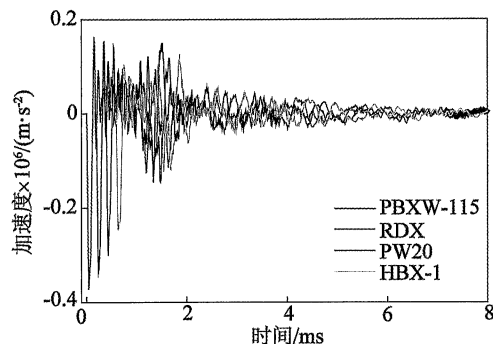


图 3 30 kg 药量下迎爆面中心处横向加速度响应对比图

Fig. 3 Lateral acceleration comparison on center of the positive side in 30 kg charge mass

### 2.2 速度响应分析

图 4 为 30 kg 药量作用下, 圆柱壳迎爆面中心处的横向速度响应对比图, 图中的各曲线依次错开 0.2 ms。

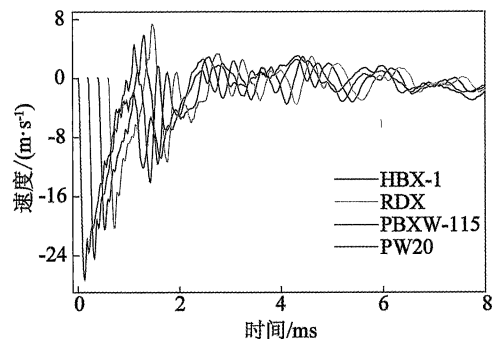


图 4 30 kg 药量下迎爆面中心处横向速度响应对比图

Fig. 4 Lateral velocity comparison on center of the positive side in 30 kg charge mass

从图 4 可以看出, PBXW-115 作用下的壳体速度响应峰值最大, 即 27.2 m/s, 由于 Miller 能量释放项的加入, 曲线脉宽也明显高于理想炸药 RDX。受水下爆炸载荷的作用, 在 2 ms 以后圆柱壳体均出现了不同程度的鞭状运动。其中 HBX-1 和 PW20 以理想炸药为主体, 壳体运动规律与 RDX 较为相似, 以 AP 为主的 PBXW-115 后燃效应更为显著, CJ 面后大量的能量释放造成了产物压力曲线后期衰减的非理想性, 这是导致曲线“不规则性”的主要原因。

### 2.3 等效塑性应变分析

图 5 为最大应变处的等效塑性应变对比图。在

30 kg 药量下,各圆柱壳依次在 0.44、0.34、0.29 及 0.27 ms 内达到了等效塑性应变的最大值。结合图 2 可知,HBX-1 和 RDX 超压峰值相差无几,受能量释放项  $\lambda Q$  影响,HBX-1 的等效应变最大值较 RDX 高出 15.7%,同时也可以看出 Al 的二次燃烧放热能够延长载荷对圆柱壳体的有效作用时间。而后燃效应更为显著的 PBXW-115 的远场冲击波能够对圆柱壳造成更大的毁伤效应。

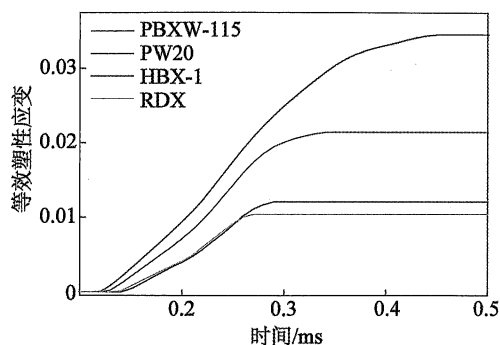


图 5 30 kg 药量下最大应变处等效塑性应变对比图

Fig. 5 Comparison of equivalent plastic strain peaks at the maximum strain in 30 kg charge mass

结合上述分析可以看出, AUTODYN 与 ABAQUS 程序联合计算得出的圆柱壳加速度响应、速度响应及等效塑性应变结果均能够较为真实地反映出圆柱壳的响应规律。

而针对工程中较为关注的圆柱壳破坏行为和破坏模式,对不同药量作用下的圆柱壳动态响应进行数值研究。

## 2.4 临界药量的计算

失效应变可用于描述冲击作用所导致的圆柱壳的破坏行为。不同药量作用下的圆柱壳最大等效塑性应变曲线如图 6 所示。

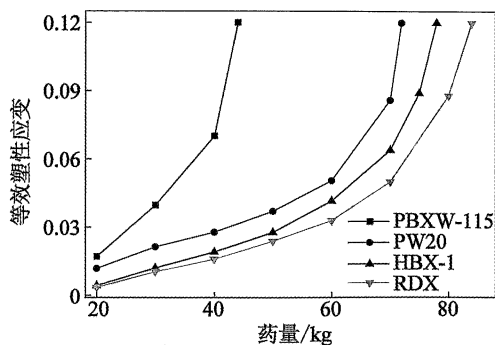


图 6 不同药量作用下的圆柱壳最大等效塑性应变图

Fig. 6 The maximum equivalent plastic strain of cylindrical shell in different mass

从图 6 可以看出,在相同工况下圆柱壳开始出现屈曲失效的临界药量分别为 44、72、78 和 84 kg。含铝炸药致使圆柱壳单元达到屈曲失效所需药量普

遍低于理想炸药 RDX。作为典型的 RDX/Al/AP 3 体系能量系统的炸药, PBXW-115 中 AP 的分解反应及 Al 的缓慢燃烧放热表征在 Miller 模型中,表现为 CJ 面后额外释放的比内能  $Q$  值较高,从而使得 Miller 模型对其远场冲击波具有更大的支持作用, PBXW-115 的临界药量远低于其他炸药。

从图 6 中可以看出,当载荷药量较低时,圆柱壳体的等效塑性应变随药量的变化大致呈线性增长,随着药量的增加,等效塑性应变的增长速率明显加快,并相继达到失效应变。对比 HBX-1 和 RDX 可以发现,药量较低时两种炸药作用下的圆柱壳等效应变差别较小;而随着药量的增加,等效应变的差值逐渐增加。这是由于随着壳体损伤程度加深,致使圆柱壳的承载能力降低,铝的二次燃烧放热对伤后结构体造成了更大的毁伤效应。

## 2.5 临界药量作用下的结构破坏模式

以 PBXW-115 为例,进一步研究临界药量下的圆柱壳的破坏模式。图 7 和图 8 分别为 44 kg PBXW-115 作用下圆柱壳迎爆面等效应力和等效塑性应变分布图。

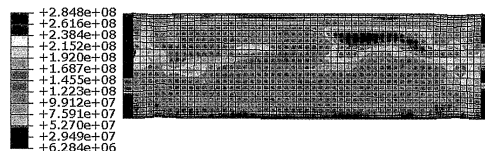


图 7 圆柱壳等效应力分布图

Fig. 7 Equivalent stress distribution of cylindrical shell

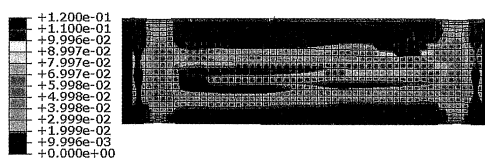


图 8 圆柱壳等效塑性应变分布图

Fig. 8 Equivalent plastic strain distribution of cylindrical shell

从图 7、图 8 可以看出,圆柱壳体单元的失效主要是局部的应力集中导致的,应力集中区域的非对称性是壳体网格分布的差异造成的,但总体来说,该工况下的圆柱壳体并未出现整体的材料屈服或较大的变形。

## 3 结论

1) AUTODYN 与 ABAQUS 程序的联用,能够有效地模拟圆柱壳在含铝炸药远场冲击波作用下的动态响应,模拟结果能够较为真实地反映出圆柱壳的响应规律。

2) 圆柱壳单元在远场冲击波作用下的失效主要是由于局部的应力集中引起的;含铝炸药致使圆

柱壳单元达到屈曲失效所需药量普遍低于理想炸药 RDX。

### 参 考 文 献

- [1] Fox P K. Nonlinear dynamic response of cylindrical shells subjected to underwater side-on explosions [R]. ADA252856, 1992.
- [2] 贾宪振,胡毅亭,董明荣,等. 深水环境中水下爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 160-164.  
Jia Xianzhen, Hu Yiting, Dong Mingrong, et al. Dynamic response of cylindrical shell subjected to underwater explosion shock waves in deepwater[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5): 160-164.
- [3] Hung C F, Lin B J, Hwang-Fuu J J, et al. Dynamic response of cylindrical shell structures subjected to under-water explosion [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(8): 564-577.
- [4] Miller P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion of non-ideal explosives [C]// MRS Symposium Proceedings. Pittsburgh, U. S. A, 1996:413-420.
- [5] 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.  
Li Peng. Energy output structure of non-ideal explosive underwater explosion [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.
- [6] Lu J P, Kennedy D L. Modelling of PBX-115 using kinetic CHEETAH and the DYNA codes [R]. ADA421656, 2003.
- [7] Bocksteiner G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115 (AUST) [R]. ADA315885, 1996.
- [8] 李晓杰,张程娇,王晓红,等. 水的状态方程对水下爆炸影响的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 46-51.  
Li Xiaojie, Zhang Chengjiao, Wang Xiaohong, et al. Numerical study on the effect of equations of state of water on underwater explosions [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 46-51.

## Dynamic Response of Underwater Cylindrical Shells Subjected to Blast Loads of Aluminized Explosives

XIA Bowen, WEI Yajie, RAO Guoning, PENG Jinhua

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To study the response of cylindrical shell subjected to underwater blast waves of aluminized explosives, the far-field shock wave characteristics of three different formulations aluminized explosive were calculated with nonlinear dynamics software AUTODYN. The calculated values are compared with the experimental values, and the calculation error can be stable within 5%. Combined with the finite element software ABAQUS, the dynamic response of cylindrical shell subjected to blast waves of aluminized explosives was discussed. With 30kg charge mass, the comparison and analysis were carried out with regard to the variation of cylindrical shell acceleration, velocity and equivalent plastic strain. Subsequently the critical buckling load of several explosives was identified. With PBXW-115 as an example to contrast the ideal explosives RDX, the failure modes of cylindrical shells subjected to the critical loads were researched. The results show that, the combination of AUTODYN program and ABAQUS can simulate the dynamic response of cylindrical shells subjected to blast waves of aluminized explosives effectively; and the desired dose for Aluminized explosives causing cylindrical shell unit to failure strain is generally lower than the ideal explosive RDX.

[KEY WORDS] aluminized explosives; numerical simulation; underwater explosions; cylindrical shell; dynamic response

## 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部