

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.004

# JH-14 装药水中爆炸特征研究\*

周明 赵云涛 李万全 郝文博 韩魏勤  
西安物华巨能爆破器材有限责任公司(陕西西安,710061)

[摘要] 采用爆炸相似理论计算了 JH-14 装药水下爆炸冲击波的  $k$  值和峰值压力,根据计算结果设计了试验方案。测试了 JH-14 炸药在不同水深及作用距离处的冲击波峰值压力,用最小二乘法对测试结果进行线性回归,拟合出 JH-14 炸药爆炸冲击波超压系数  $k$  为 57.01、 $\alpha$  为 1.131,该值可作为产品设计的依据。

[关键词] JH-14 装药;冲击波;峰值压力;超压系数;作用距离

[分类号] TD235.2<sup>+</sup>1;TQ564

## Research on Underwater Explosion Characteristics of JH-14 Charge

ZHOU Ming, ZHAO Yuntao, LI Wanquan, XI Wenbo, HAN Weimeng  
Xi'an Wuhua Juneng Blasting Equipment Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] In this paper,  $k$ -value and peak pressure of underwater explosion shock wave of JH-14 charge was calculated according to the theory of explosion similarity. Test scheme was developed according to the calculation. Peak pressure of JH-14 charge at different depths and distances of action were tested, and least square method was used in linear regression of test result. By the proposed calculation of JH-14 charge, shock wave overpressure coefficient  $k$  is 57.01 and  $\alpha$  is 1.131, which could be used as the basis for production design.

[KEYWORDS] JH-14 charge; shock wave; peak pressure; overpressure coefficient; operating distance

## 引言

装药在水中爆炸时,通常产生冲击波、气泡和后续压力波,三者都能使目标受到一定程度的破坏<sup>[1]</sup>。水中冲击波爆炸峰值压力是衡量水中兵器威力大小的重要指标,通常由试验确定超压系数后,再采用经验公式计算。水中兵器(鱼雷、水雷、深水炸弹等)的爆炸威力与炸药的性能、工艺以及作用方式等息息相关,梯黑铝炸药及其他典型炸药在水下兵器中得到了广泛的应用和研究,有经验公式和数值可供参考<sup>[2-3]</sup>;而 JH-14 装药作为主装药,在水下爆炸冲击波性能尚不明确。

本文中,从评估 JH-14 装药在水中的爆炸威力出发,测试了不同水深和作用距离处的冲击波峰值压力,拟合出水下爆炸冲击波超压系数  $k$  和  $\alpha$  的值,并分析了 JH-14 装药在水下爆炸时峰值压力与作用距离和水深的变化规律。

## 1 理论计算

### 1.1 峰值压力系数 $k$ 和 $\alpha$ 的理论值

$k$  和  $\alpha$  是炸药在水中爆炸冲击波的峰值压力系数(也叫超压系数),与炸药物理化学性质有关,其大小由试验确定。常采用公式近似计算出  $k$  值和  $\alpha$  值,再估算水中兵器爆炸时的峰值压力、比冲量及能量密度等,然后根据试验进行精准测定,确定出水下兵器的威力。由爆炸相似原理进行换算,可以得出本试验中所用的 JH-14 装药水中冲击波超压系数  $k$ 。其计算公式如式(1)所示<sup>[4]</sup>。

$$k_i = k_T \left( \frac{Q_{vi}}{Q_{vT}} \right)^{\frac{\alpha}{N+1}} \quad (1)$$

式中: $k_i$  为某炸药的  $k$ ;  $k_T$  为 TNT 炸药的  $k$ ;  $Q_{vT}$  为 TNT 爆热, kJ/kg, 按  $\rho_0 > 1.52 \text{ g/cm}^3$  的状态值<sup>[5]</sup>, 取 4 226 kJ/kg;  $Q_{vi}$  为某炸药爆热, kJ/kg;  $N$  为爆轰波的形状参数,球形波时为 1,柱面波时为 2;  $\alpha$  为 TNT 炸

\* 收稿日期:2018-12-14

第一作者:周明(1978-),女,工程师,主要从事特种爆破技术研究。E-mail:zmcpu@163.com

药的  $\alpha$  值。

$k_T$  是 TNT 炸药的经验值,行业内计算 TNT 炸药水中爆炸自由场冲击波的峰值压力时,选取的  $k$  为 52.2,  $\alpha$  为 1.13 (此时压力单位为 MPa)<sup>[6-8]</sup>。

试验中的主装药为 JH-14,其组分为 96.5% (质量分数) 的黑索今和 3.5% (质量分数) 的添加剂<sup>[9]</sup>。按混合炸药爆热的经验公式计算其爆热,如式(2)所示<sup>[5]</sup>。

$$Q_v = \sum m_i Q_{oi} - \sum m_i B_i (\rho_T - \rho) \quad (2)$$

式中: $m_i$  为混合炸药各组分的质量分数; $Q_{oi}$  为各组分特征热值, kJ/kg;  $B_i$  为各组分密度修正系数;  $\rho_T$  为混合炸药的理论密度, g/cm<sup>3</sup>, JH-14 的理论密度为 1.82 g/cm<sup>3</sup>;  $\rho$  为混合炸药的装药密度, g/cm<sup>3</sup>, JH-14 装药的密度取 1.70 g/cm<sup>3</sup>。

由式(2)计算可得, JH-14 装药的爆热为 5 795 kJ/kg。将计算出的 JH-14 装药的爆热代入式(1)中,可得出  $k$  为 58.78。

$\alpha$  与炸药爆轰波的波形参数、爆热和爆轰压力有关,需要进行大量测试得到。根据前人的试验结果,  $\alpha$  的数值波动不大,在计算峰值压力的理论值时,借用 TNT 的经验值 1.13 作为 JH-14 装药峰值压力系数  $\alpha$  的估算值。

## 1.2 冲击波峰值压力计算

爆炸冲击波在传播过程中,其压力峰值随传播距离的增加而迅速衰减,根据爆炸相似率,其压力峰值与距离及药量的经验计算式如式(3)所示。

$$p_m = k \left( \frac{\omega^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中: $R$  为炸药距爆心距离, m;  $\omega$  为 TNT 药量, kg;  $p_m$  为冲击波峰值压力, MPa;  $k$  为超压系数,用式(1)计算出的理论值为 58.78;  $\alpha$  为超压系数,取 TNT 炸药的经验值 1.13。

试验中的 JH-14 装药以黑索今为主体,药量 200 g,约为 1.2 倍的 TNT 当量<sup>[10]</sup>,按爆炸相似率,将式(1)计算出的  $k$  值和 TNT 的  $\alpha$  值代入经验公式(3),可计算不同作用距离处冲击波峰值压力  $p_m$ ,理论值如表 1 所示。

表 1 冲击波峰值压力理论值

Tab. 1 Theoretical value of shock wave pressure

| 距爆心的<br>作用距离/m  | 10    | 15    | 20    | 25    | 50    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 冲击波<br>峰值压力/MPa | 2.546 | 1.160 | 1.163 | 0.904 | 0.413 |

按照王中黔<sup>[11]</sup>的分析,  $\Delta p \leq 0.3 \text{ kg/cm}^2$  (换算

为 0.03 MPa),可作为水下爆炸冲击波作用于人体而不至于受伤的安全标准。

## 2 试验

测试 JH-14 装药在水下的冲击波压力分布,测试系统主要由 JH-14 装药、冲击波压力传感器、传输电缆、数据采集系统组成。

### 2.1 试验方案

由表 1 可知,不计水深影响,在距爆心 50 m 的作用距离处, JH-14 装药水中爆炸后的冲击波压力为 0.413 MPa,与安全距离处的压力值 0.030 MPa 相比,有很大的裕量;据此确定最大测试半径为 50 m,最大水深 15 m。制定的设计测试方案见表 2。

表 2 试验布置

Tab. 2 Test layout

| 水深/<br>m | 传感器数量 |      |      |               |               | 试验<br>发数 |
|----------|-------|------|------|---------------|---------------|----------|
|          | 10 m  | 15 m | 20 m | 25 m          | 50 m          |          |
| 5        |       | 1    | 1    | 正交方位<br>各 1 支 | 正交方位<br>各 1 支 | 1        |
| 10       | 1     | 1    | 1    | 1             | 正交方位<br>各 1 支 | 2        |
| 15       |       | 1    | 1    | 正交方位<br>各 1 支 | 正交方位<br>各 1 支 | 1        |

### 2.2 试验条件

试验水池为椭圆形,长轴约 130 m,短轴约 80 m,最深处直径约为 60 m,水深  $h$  为 25 m。装药半径  $r_0$  为 30 mm,装药沉深  $H$  最小为 5 m。研究表明,当在水深  $h$  与装药半径  $r_0$  之比大于 10~20、装药沉深  $H$  与装药半径  $r_0$  之比大于 5~10 的深水中爆炸时,水中冲击波峰值压力基本不受自由水面和水底反射的影响,装药与无限水介质中爆炸时相同或相近,可视为装药在无限水介质中爆炸<sup>[12]</sup>。

测压传感器采用 32 通道瞬态信号记录仪,每通道采样率 1M/s,精度  $\pm 0.05\%$ ,通过计算机软件监测压力传感器采集数据。

试验样弹为圆柱形,壳体尺寸为  $\varnothing 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,壳体厚度 1.5 mm。装填炸药为 JH-14,药量 200 g,装药密度为 1.70 g/cm<sup>3</sup>,采用引信中心起爆形式。测试样弹放在水下 5 m 及以下位置处,满足冲击波能和气泡能对于水域几何尺寸的最小限度和压力传感器位置的测试要求<sup>[13-14]</sup>。样弹参数如表 3 所示。

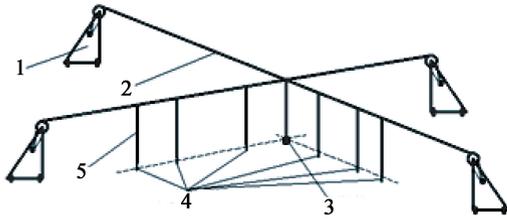
试验设施主要包括支架与绞盘、钢索、绳索。试验样弹(JH-14 装药)用吊放设施投放。试验样弹位

表 3 样弹参数表

Tab. 3 Parameters of the sample

| 材料名称     | 质量/<br>g | 密度/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 尺寸/<br>mm × mm |
|----------|----------|------------------------------|----------------|
| 壳体       | 72       | 2.70                         | ∅60 × 60       |
| JH-14 炸药 | 200      | 1.70                         | ∅56 × 50       |

于水池的中心位置。试验样弹与压力传感器均位于水下同一深度处。示意图见图 1。



1-支架与绞盘;2-钢索;3-试验样弹;  
4-压力传感器;5-绳索。

图 1 试验设施布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of the test facility

### 2.3 试验测试

试验样弹与冲击波压力测点之间距离分别为 10、15、20、25、50 m,通过在试验水池池面钢索上的悬挂位置来确定。水深分别为 5、10、15 m,由试验样弹与传感器悬吊绳带上的标记来确定。按图 1 布

置试验样弹和压力传感器。为了减少介质对测试的影响,每一次爆炸试验前,均对水下部分进行水密处理。

4 次爆炸测试过程中,传感器都采集到了压力曲线,如图 2 所示。因 4 次爆炸的压力曲线图类似,故以第 1 发爆炸压力曲线为例进行分析。

图 2 中第 1 次峰值为冲击波峰值压力,后续的峰值为气泡脉动压力峰值。可以看出,随着测试距离增大,爆炸冲击波峰值压力呈下降趋势,但是下降幅度逐渐减少。

通过整理 4 次试验测试得到的压力-时间曲线,可得到距爆心不同作用距离处爆炸冲击波的峰值压力数据。其中,第 1 发、第 3 发、第 4 发在距爆心 10 m 的作用距离处,未设置测量点;第 2 发在距爆心 25 m 的作用距离处,只测得一个数据。数据见表 4 所示。

### 3 试验结果分析

从表 4 的试验数据上可以看出,小药量 JH-14 装药在水中不同作用距离(距爆心的距离)处爆炸时,冲击波峰值压力随着作用距离的增大而减少,数据分析见图 3。小药量 JH-14 装药在不同水深处爆炸时,同一作用距离处测试的冲击波峰值压力变化

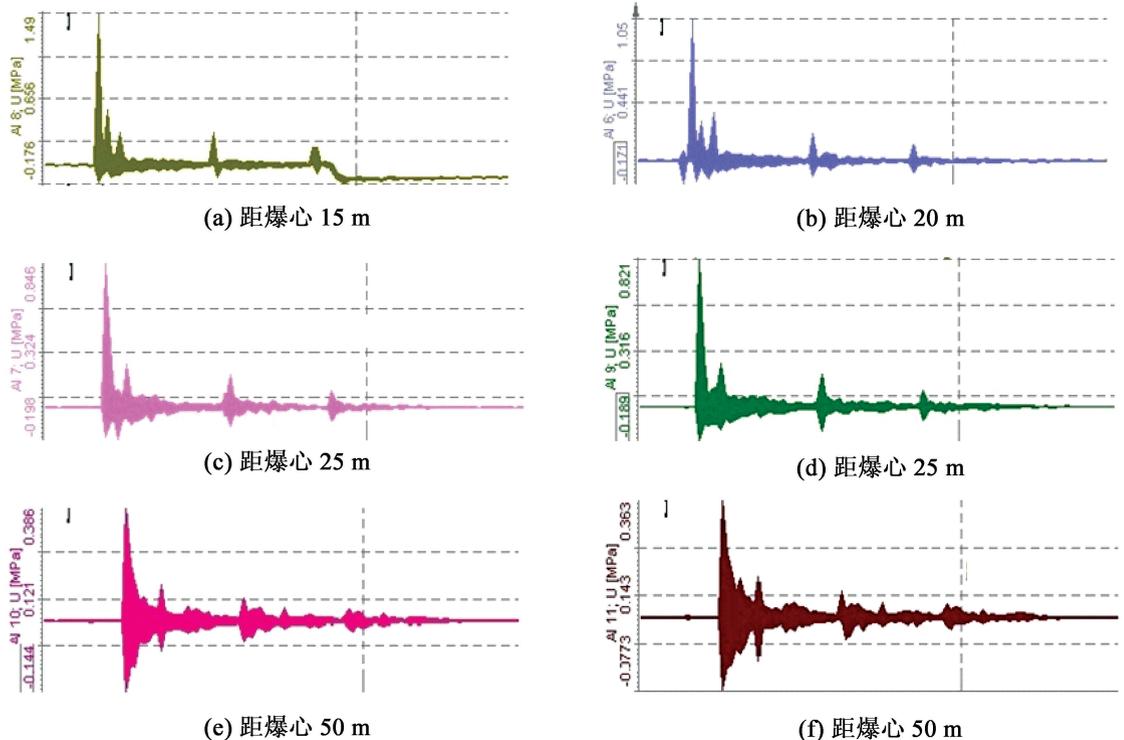


图 2 第 1 发样弹爆炸压力曲线

Fig. 2 Explosive pressure curve of the first sample

表4 冲击波峰值压力测试结果统计

Tab.4 Statistics on peak pressure test results of shock waves

MPa

| 发次  | 作用距离/m |      |      |             |             | 水深/m |
|-----|--------|------|------|-------------|-------------|------|
|     | 10     | 15   | 20   | 25          | 50          |      |
| 1#  |        | 1.49 | 1.05 | 0.846;0.821 | 0.386;0.363 | 5    |
| 2#  | 2.23   | 1.43 | 1.05 | 0.888       | 0.361;0.323 | 10   |
| 3#  |        | 1.50 | 1.06 | 0.879;0.914 | 0.369;0.353 | 15   |
| 4#  |        | 1.43 | 1.01 | 0.888;0.902 | 0.358;0.354 | 15   |
| 平均值 |        | 1.46 | 1.04 | 0.878       | 0.358       |      |

不大,即水深对冲击波峰值压力的影响较小。数据分析见图4。这与鲁忠宝的仿真计算结果一致<sup>[15]</sup>。

为自变量,以  $\ln p_m$  为因变量的线性函数。其变量关系可以用一元线性回归模型进行分析。根据表4的数据,做出的一元线性回归趋势线如图5所示。

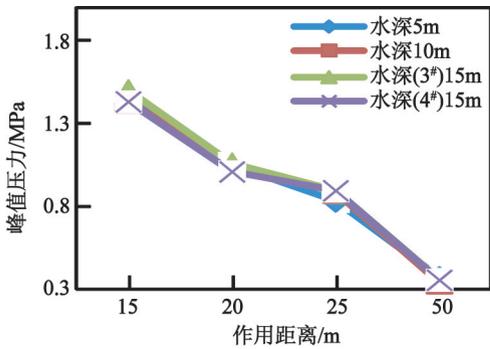


图3 不同水深处的峰值压力

Fig.3 Peak pressure at the different depth

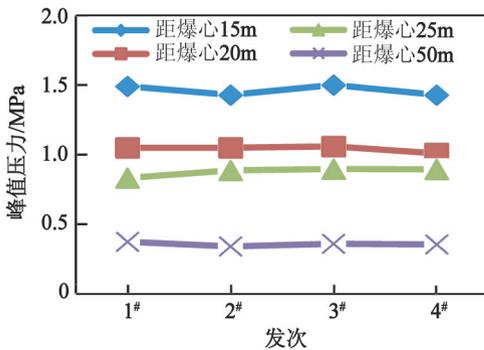


图4 不同作用距离处的峰值压力

Fig.4 Peak pressure at the same operating distance

实际上,水下爆炸冲击波峰值压力受很多因素的影响,使用经验公式计算出的  $k$  和  $\alpha$  只能提供参考范围。炸药特性不同,相应的系数  $k$  和  $\alpha$  不同,  $k$  的大小影响炸药冲击波的幅度,  $k$  越大,幅度越高。  $\alpha$  则反映了冲击波在传播过程中变化的快慢程度,  $\alpha$  越大,说明冲击波衰减越快<sup>[16]</sup>。

对式(3)两边取对数,整理后的计算式如式(4)所示。

$$\ln p_m = \alpha \ln \frac{\omega^{1/3}}{R} + \ln k = \alpha \left( \frac{1}{3} \ln \omega - \ln R \right) + \ln k. \quad (4)$$

从式(4)可以看出,该公式就是以  $\ln(\omega^{1/3}/R)$

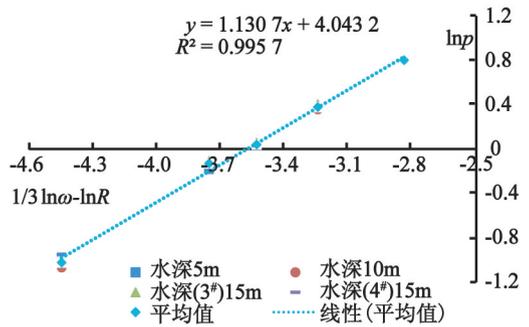


图5 线性回归模型拟合图

Fig.5 Fitting graph of linear regression model

拟合出的公式为  $y = 1.1307x + 4.0432$ , 线性拟合程度  $R^2 = 0.9957$ , 截距 4.0432 就是  $\ln k$  的值,经计算,  $k$  为 57.01, 斜率  $\alpha$  为 1.131。由试验计算出的  $k$  和  $\alpha$  与理论值存在一定的偏差,这是因为爆炸相似理论对水中冲击波压力峰值的计算公式进行了简化。实际上,装药在水下爆破产生的冲击波受到诸如壳体材料及厚度<sup>[17]</sup>、爆炸深度<sup>[18]</sup>、爆炸角度<sup>[19]</sup>、装药密度等诸多因素的影响。

由试验确定出的超压系数  $k$  为 57.01,  $\alpha$  为 1.131,可作为 JH-14 类装药产品设计在水中爆炸压力计算的依据。

## 4 结论

经验公式(3)忽略了壳体材料及厚度、爆炸深度、爆炸角度、装药密度等对峰值压力的影响,仅能作为产品设计时的初步参考,测算不同种类的炸药在水中的爆炸威力时,仍需由试验来确定超压系数  $k$  与  $\alpha$ 。对于本次试验可以得出如下结论:

1)同一作用距离处,小药量 JH-14 装药在水深 5 ~ 15 m 的范围内爆炸时,水深对峰值压力的影响

很小,可以忽略。

2)对于小药量 JH-14 装药而言,用水下爆炸冲击波峰值压力公式计算时,可取  $k$  为 57.01,  $\alpha$  为 1.131。

### 参 考 文 献

- [1] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用:下[M]. 北京:国防工业出版社,1979:319-320.
- [2] 俞统昌,王晓峰,王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能[J]. 含能材料,2003,11(4):182-186.  
YU T C, WANG X F, WANG J L. Underwater shock-wave performance of explosives[J]. Energetic Materials, 2003, 11(4):182-186.
- [3] 周霖,徐少辉,徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究[J]. 兵工学报,2006,27(2):235-238.  
ZHOU L, XU S H, XU G G. Research on energy output characteristics for underwater explosion of explosives[J]. Acta Armamentarii, 2006,27(2):235-238.
- [4] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000:321.
- [5] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995:22.
- [6] 孙承纬,卫玉章,周之奎,等. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000:652.
- [7] Л. П. 奥尔连科(Л. П. ОРЛЕНКО). 爆炸物理学[M]. 孙承纬,译. 北京:科学出版社,2011:610.
- [8] 孙业斌. 爆炸作用与装药设计[M]. 北京:国防工业出版社,1987:339.
- [9] 中国兵器工业集团公司. 聚黑-14 传爆药规范:GJB 6237—2008[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,2008.
- [10] 民用爆破器材工程建设设计安全规范:GB 50089—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007.  
Safety code for design of engineering of civil explosives materials: GB 50089—2007[S]. Beijing: China Planning Press,2007.
- [11] 王中黔. 关于水下爆破人身安全距离的探讨[J]. 爆炸与冲击,1982(1):109-116.  
WANG Z Q. On the safety distance for the protection of the human body during the operation of underwater blast[J]. Explosion and Shock Waves, 1982(1):109-116.
- [12] 周方毅,陈晓强,张可玉,等. 无限水介质中爆炸冲击波压力计算公式辨析[J]. 爆破,2003,20(1):7-8,11.  
ZHOU F Y, CHEN X Q, ZHANG K Y, et al. Analyses on formulae of pressure caused by explosive shock wave in indefinite water media[J]. Blasting, 2003,20(1):7-8,11.
- [13] BOEKSTEINER G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115:ADA 315885[R]. 1996.
- [14] 张立,汪大立. 水下爆炸炸药能测量消除边界效应的研究[J]. 爆破器材,1995,24(2):1-6.  
ZHANG L, WANG D L. A study on elimination of the boundary effect in underwater explosion testing of explosive[J]. Explosive Materials, 1995,24(2):1-6.
- [15] 鲁忠宝. 典型装药水中爆炸参数与水深关系的仿真研究[J]. 鱼雷技术,2007,15(1):45-47.  
LU Z B. Simulation research on relation between underwater explosive parameters and water pressure under a typical charge[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(1):45-47.
- [16] 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 J H, ZHAO J B, TAN D W, et al. Underwater shock wave performances of explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2):172-176.
- [17] 陈勇,陈刚. 壳体材料及厚度对装药水下爆炸冲击波特性的影响数值研究[J]. 水雷战与舰艇防护,2016,24(1):72-77.  
CHEN Y, CHEN G. Numerical investigation on influence of material type and thickness of shell on shock wave properties of underwater explosion with shell[J]. Mine Warfare & Ship Self-defense, 2016, 24(1):72-77.
- [18] 盛振新,刘荣忠,郭锐. 壳体厚度和爆炸深度对水下爆炸冲击波的影响[J]. 火炸药学报,2011,34(3):45-47,64.  
SHENG Z X, LIU R Z, GUO R. Effect of shell thickness and explosion depth on underwater explosive shock wave[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011,34(3):45-47,64.
- [19] 李健,荣吉利. 水下爆炸圆柱壳塑性动态响应实验及数值计算[J]. 北京理工大学学报,2008,28(8):659-662.  
LI J, RONG J L. Experimental and numerical investigations of dynamic response for cylindrical shell subjected to underwater explosion[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(8):659-662.