

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.01.002

# 一种传感器结构对水中爆炸冲击波影响的数值模拟研究\*

严家佳 贾宪振 任松涛

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了了解一种流线型传感器结构对水中爆炸冲击波传播的影响规律,利用有限元方法对这种流线型传感器结构附近的水中爆炸冲击波传播过程进行数值模拟,研究分析了这种流线型传感器结构对水中爆炸冲击波传播的影响规律。研究表明,这种流线型传感器的前端锥体结构会使传感器结构表面冲击波增强,冲击波压力增大。传感器结构外径尺寸越大,对冲击波的增强作用越明显,前端锥体结构锥角高度不同的传感器结构对冲击波增强作用没有显著差异。

[关键词] 有限元法;数值模拟;水中爆炸;冲击波;传感器

[分类号] TJ011+.1;TD235.2+1

## 引言

冲击波峰值压力是评估炸药水中爆炸性能的一项重要特性参数,炸药水中爆炸参数测试主要采用电测法,利用传感器测量距炸药一定距离处冲击波压力随时间变化的历程,得到相应的压力-时间曲线,通过对曲线分析、计算,得到冲击波峰值压力等参数<sup>[1]</sup>。目前水中爆炸试验一般使用美国 PCB 公司生产的压电式水下激波压力传感器,利用该传感器能较好地测出炸药水中爆炸中、远场压力随时间变化的历程,测试技术比较成熟。但是利用该传感器进行炸药水中爆炸近场压力测试时,由于传感器离试样非常近,在测试过程中不仅承受的冲击波压力大,而且传感器在炸药水中爆炸最大气泡半径内,还会承受爆炸产物的冲击,因此极易损坏传感器。由于该进口传感器价格昂贵,且采购程序复杂,因此传感器成为了限制水中爆炸近场压力研究的重要因素。目前,拟设计一种笔式流线型传感器基座,搭载一种压力传感器进行水中爆炸近场压力的测量,以减少试验成本。

本文采用数值模拟的方法,对该传感器结构附近水中爆炸冲击波传播规律进行仿真计算,目的在于研究传感器结构对水中爆炸冲击波传播的影响特性,为该传感器设计及改进提供理论依据。

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

拟设计的笔式流线型传感器头部为圆锥体结

构,主体为圆柱体,圆柱体外壁铣出一平台用于安装传感器。所以冲击波首先到达传感器基座的头部锥体处,产生绕射现象,之后冲击波达到锥体与圆柱体的交界处,再一次发生绕射。对于冲击波在无限长锥体上的绕射问题,国内外学者已经做过不少研究<sup>[2]</sup>,通常不容易得到解析解。而对于本文中的问题来说,传感器头部锥体的长度是有限的,冲击波在有限锥体绕射之后,又在锥体与圆柱体交界处再次发生绕射现象,导致整个问题难以解析求解。同时,冲击波在水中传播时的衰减规律也得不到解析解,通常采用经验公式或数值模拟的方法进行计算。因此,本文拟采用数值模拟和试验相结合的方法进行研究。

在建立计算模型时,为了简化物理问题,忽略圆柱体结构侧壁的平台,将传感器结构视为前端为圆锥体、后端为圆柱体的旋转体结构,则模型中圆柱体的半径应视为传感器轴线到平台的距离。利用 LSDYNA12.0 软件建立二维计算模型,如图 1 所示。

为了提高计算效率,对计算模型进行了以下近似处理:

- 1) 将水中爆炸冲击波的传播问题近似看作球对称的;
- 2) 笔形传感器结构近似看作刚性结构,即在冲击载荷下不发生位移和变形;
- 3) 水介质初始状态的速度、加速度均为 0;
- 4) 不考虑重力影响。

\* 收稿日期:2015-06-14

作者简介:严家佳(1985~),男,硕士,主要从事爆炸性能评估技术方面的研究。E-mail:241049625@qq.com

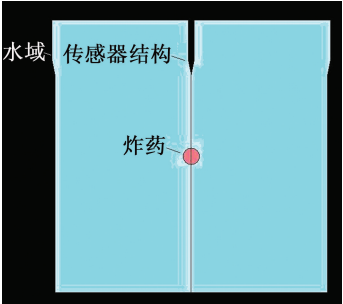


图 1 计算模型  
Fig. 1 Calculation model

如图 1 所示,计算模型是以  $Y$  轴为旋转轴的二维轴对称模型,坐标原点位置设置半径为 3 cm 的球形炸药,水域边界距炸药爆心 50 cm,在  $Y$  轴上与炸药爆心一定距离处设置传感器结构,传感器结构后端柱体长度为 15 cm,延伸至水域边界,则传感器锥体结构与柱体结构交界处距爆心 35 cm,可以通过改变前端锥体段尺寸,分别计算几种不同状态传感器结构对水中爆炸冲击波压力的影响特性,传感器结构尺寸设置见表 1。由于将传感器结构近似看作刚性体,本文中传感器结构与水域接触面的边界条件设置为全约束边界条件,传感器结构内部不设置材料。

表 1 计算模型中传感器结构尺寸  
Tab. 1 Structure size of the sensor in calculation model

序号	直径/ cm	锥体高度/ cm	锥体角度/ (°)	柱体长度/ cm
算例 1	2	5	22.6	15
算例 2	4	10	22.6	15
算例 3	2	3	36.8	15
算例 4	2	7	16.3	15

1.2 材料参数

炸药材料的参数设置为:密度 1 640 kg/m<sup>3</sup>,爆速 6 930 m/s, C-J 爆压 27 GPa,起爆点设置在坐标原点,即炸药中心位置。在数值计算过程中,爆轰产物的压力根据 JWL 状态方程<sup>[3]</sup>描述为:

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

式中:  $A$  为材料常数,  $3.712 \times 10^{11}$  Pa;  $B$  为材料常数,  $3.231 \times 10^9$  Pa;  $R_1$  为材料常数, 4.6;  $R_2$  为材料常数, 0.95;  $\omega = 0.37$ ;  $E$  为初始内能,  $9.5 \times 10^9$  Pa;  $V$  为初始相对体积,  $1.0^{[4]}$ 。

水用 Mie-Grunesen 状态方程<sup>[5]</sup>加以描述:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \tag{2}$$

式中:  $\rho_0$  为密度, 1 000 kg/m<sup>3</sup>;  $C$  为声速, 1 600 m/s;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $\gamma_0$ 、 $\alpha$  均为材料常数, 其中,  $S_1 = 1.979$ ,  $S_2 = 0$ ,  $S_3 = 0$ ,  $\gamma_0 = 0.11$ ,  $\alpha = 3.0$ ;  $\mu$  为压缩比  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ ;  $E$  为初始内能,  $3.072 \times 10^5$  Pa<sup>[6]</sup>。

1.3 算法简介

计算方法采用 Euler 算法<sup>[7]</sup>, 内部网格单元独立于物质实体而存在, 网格可以根据定义参数在求解过程中适当调整位置, 使得网格不致出现严重畸变。

2 计算结果及分析

2.1 传感器结构对冲击波传播的影响特性

通过算例 1 的计算结果, 观察传感器结构对水中爆炸冲击波传感器的影响特性。图 2 为试样起爆后不同时刻的冲击波压力云图。从图 2 可以看出, 当  $t = 135 \mu\text{s}$  时, 冲击波未到达传感器结构, 沿  $Y$  轴正、负方向与爆心相同距离处的冲击波压力没有明显差异, 说明冲击波到达传感器结构前基本以爆心对称; 当  $t = 170 \mu\text{s}$  时, 冲击波波头已经掠过传感器前端锥体结构, 此时冲击波压力分布出现了不对称性, 传感器结构锥体段表面的局部压力明显大于  $Y$  轴负方向相同距离位置处的压力; 当  $t = 189 \mu\text{s}$  时, 冲击波已经传播至传感器结构后端柱体段, 柱体段

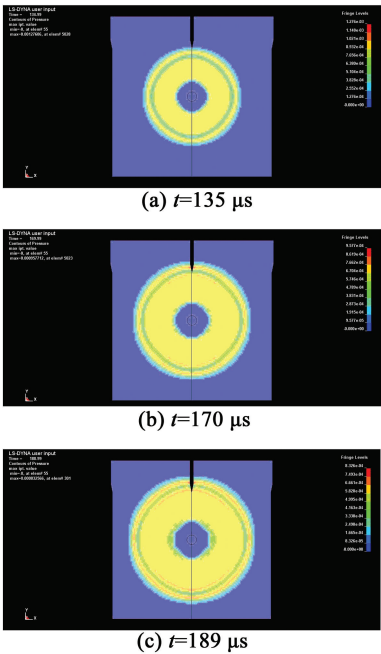


图 2 不同时刻冲击波压力云图

Fig. 2 Shock wave pressure nephogram in different times

表面的局部压力也明显大于  $Y$  轴负方向相同距离位置处的压力。

从图 2 所示不同时刻的压力云图中,可以初步推断冲击波经过传感器结构表面时受到刚性壁面的影响产生斜反射波,并叠加在入射波上,增大了锥体结构处的冲击波压力,并且随着冲击波传播至后端柱体段,增强的入射冲击波会持续影响传感器结构柱体段表面压力。

为验证上述从压力云图中得到的结论,利用后处理软件读取计算模型中  $Y$  轴正、负方向对称位置的压力-时间曲线。首先在  $Y$  轴上起爆点至传感器结构之间选取对称的两点,坐标分别为  $(0\text{ cm}, 27\text{ cm})$ 、 $(0\text{ cm}, -27\text{ cm})$ ,压力-时间曲线见图 3。从图 3 中可以看出,这两点的压力-时间波形基本吻合,压力峰值几乎相同,说明冲击波经过  $(0\text{ cm}, 27\text{ cm})$  这一点时基本不受传感器结构的影响,可以视为自由场压力。

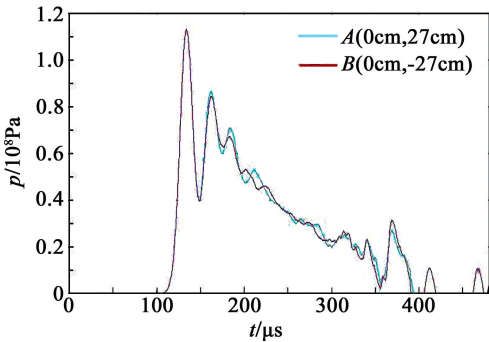


图 3  $(0\text{ cm}, 27\text{ cm})$ 和 $(0\text{ cm}, -27\text{ cm})$  两点处冲击波压力波形

Fig. 3 Shock wave shape at the points of  $(0\text{ cm}, 27\text{ cm})$  and  $(0\text{ cm}, -27\text{ cm})$

选取传感器结构尖端锥面处一点[坐标为  $(0\text{ cm}, 31\text{ cm})$ ]与沿  $Y$  轴负方向对称位置处一点[坐标为  $(0\text{ cm}, -31\text{ cm})$ ],得到其压力-时间曲线,见图 4。从图 4 中可以看出,传感器结构表面处的计算所得压力峰值比沿  $Y$  轴负方向对称位置计算所得压力峰值大,通过对传感器表面处与自由场相同距离处压力-时间波形对比分析,同样可以证明传感器结构对水中爆炸冲击波的传播过程产生了影响,使冲击波得到增强,冲击波压力增大。

选取传感器柱面处一点[坐标为  $(1\text{ cm}, 40\text{ cm})$ ]与沿  $Y$  轴负方向对称位置处一点[坐标为  $(1\text{ cm}, -40\text{ cm})$ ],得到压力-时间曲线,见图 5。从图 5 中可以看出,由于传感器的结构对水中爆炸冲击波的传播过程产生了影响,传感器柱体表面的压力峰值也明显大于自由场相同距离处冲击波的压力峰值。

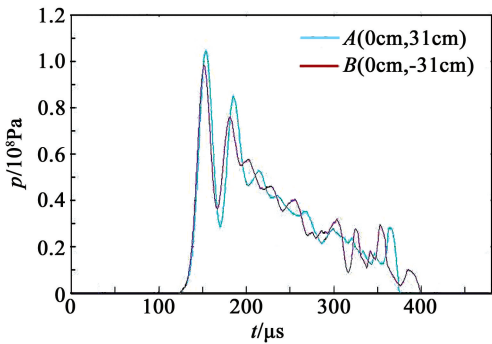


图 4  $(0\text{ cm}, 31\text{ cm})$ 和 $(0\text{ cm}, -31\text{ cm})$  两点处冲击波压力波形

Fig. 4 Shock wave shape at the points of  $(0\text{ cm}, 31\text{ cm})$  and  $(0\text{ cm}, -31\text{ cm})$

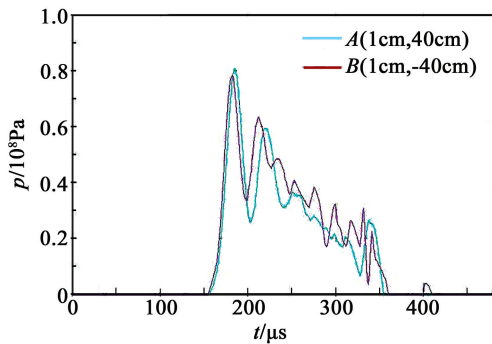


图 5  $(1\text{ cm}, 40\text{ cm})$ 和 $(1\text{ cm}, -40\text{ cm})$  两点处冲击波压力波形

Fig. 5 Shock wave shape at the points of  $(1\text{ cm}, 40\text{ cm})$  and  $(1\text{ cm}, -40\text{ cm})$

2.2 不同尺寸传感器结构对冲击波传播的影响规律

在算例 2 中,传感器结构前端锥角与算例 1 相同,约为  $22.6^\circ$ ,计算结果用于对比不同直径的传感器结构对水中爆炸冲击波传播规律的影响。在算例 1、算例 2 的计算结果中,选取  $Y$  轴方向与起爆点距离相同的传感器结构柱面处不同点压力峰值,与  $Y$  轴负方向对称位置压力峰值进行比较,结果见表 2 和表 3。

从表 2、表 3 中的计算结果中可以看出,在传感器结构前端锥角度数不变的情况下,当传感器结构

表 2 直径 2 cm 传感器结构水中爆炸数值模拟结果

Tab. 2 Numerical simulation results of underwater explosion for sensor with the diameter of 2 cm			
观察点坐标/cm	压力峰值/MPa	对称点坐标/cm	压力峰值/MPa
(1,36)	87.0	(1, -36)	83.7
(1,39)	80.1	(1, -39)	77.6
(1,42)	73.8	(1, -42)	69.5



表 3 直径 4 cm 传感器结构水中爆炸  
数值模拟结果

Tab.3 Numerical simulation results of underwater explosion for sensor with the diameter of 4 cm

观察点坐 标/cm	压力峰值/ MPa	对称点坐 标/cm	压力峰值/ MPa
(2,36)	89.9	(2,-36)	83.4
(2,39)	83.2	(2,-39)	77.2
(2,42)	75.3	(2,-42)	69.7

外径为 2 cm 时,传感器结构柱体表面压力峰值计算值比相同距离处自由场压力峰值计算值增大 4% 左右;在传感器结构尖端锥角度数不变的情况下,如果将传感器结构的外径设置为 4 cm,传感器结构柱体表面压力峰值计算值比相同距离处自由场压力峰值计算值增大 8% 左右。

在算例 3、算例 4 中,设传感器结构直径与算例 1 相同,为 2 cm,设前端锥体高度分别为 3、7 cm,对应传感器结构前端锥体角度分别为 36.8°和 16.3°,计算结果用于对比前端锥角度数不同的传感器结构对水中爆炸冲击波传播规律的影响。从算例 1、算例 3 和算例 4 的计算结果中,选取 Y 轴正方向与起爆点距离相同的传感器结构柱面处同一点压力峰值与 Y 轴负方向对称位置压力峰值进行比较,结果见表 4。

表 4 不同锥体高度传感器结构水中爆炸  
数值模拟结果

Tab.4 Numerical simulation results of underwater explosion for sensor with different cone heights

锥体高 度/cm	观察点坐 标/cm	压力峰值/ MPa	对称点坐 标/cm	压力峰值/ MPa
3	(1,36)	87.5	(1,-36)	83.7
5	(1,36)	87.1	(1,-36)	83.7
7	(1,36)	86.8	(1,-36)	83.7

从表 4 中可以看出,当传感器结构半径不变时,水中爆炸冲击波传播到不同锥角的传感器结构的后端柱体表面处,压力峰值的计算结果差异较小。

从数值模拟的计算结果可以分析得出,传感器结构的尺寸是一项影响水中爆炸压力准确测量的重要因素。传感器结构直径越大,对冲击波的增强作用越大;当传感器结构直径固定不变的情况下,前端锥体结构角度不同,冲击波受到的增强作用没有显著差异。因此,在进行该流线型传感器结构设计时,不可忽视结构本身对冲击波传播规律的影响,其外径尺寸越大,传感器结构本身对冲击的增强作用越

大,从而会导致测试结果偏离真值。

3 试验验证

为验证数值模拟的计算结果,设计加工了 3 种形状相似但尺寸不同的流线型传感器基座。为了方便安装传感器,在基座侧面铣出一平台,并安装 PVDF 压电薄膜进行水中爆炸近场压力的测量,传感器结构见图 6。传感器基座的直径和锥体高度决定了锥体的角度,安装 PVDF 压电薄膜的平台高度为冲击波压力观测点距轴线的距离,与数值模拟各算例中传感器基座结构直径等效。

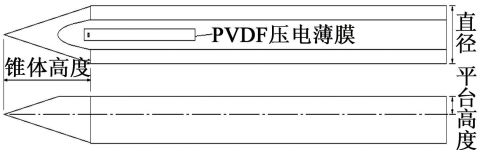


图 6 传感器结构

Fig.6 Structure of sensor

炸药试样选用 20 g 球形 Pentolite,利用支架将传感器和试样固定在水池中,传感器敏感面距试样中心 0.15 m。3 种工况各进行 6 次平行试验,取所测压力的平均值作为试验结果,见表 5。

表 5 不同传感器结构水中爆炸近场压力试验结果

Tab.5 Shock pressure in the near field test of underwater explosion by sensors with different structure

传感器	传感器 直径/cm	平台高 度/cm	锥体高 度/cm	压力峰 值/MPa
1 <sup>#</sup>	2.4	0.5	7	109
2 <sup>#</sup>	2.4	1.0	7	116
3 <sup>#</sup>	2.4	1.0	5	117

根据文献资料所给出的球形 Pentolite 水中爆炸压力峰值计算公式<sup>[8]</sup>,求得该试样水中爆炸 0.15 m 处冲击波峰值压力约为 106 MPa,表 5 中 1<sup>#</sup>传感器所测试验结果最为接近理论值,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>传感器所测结果偏大,且 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>传感器所测结果差异不显著。试验结果表明:传感器基座前端锥体结构会对水中爆炸冲击波的传播产生影响,锥体结构角度不变的情况下,平台高度越小,传感器对冲击波传播的影响越小,与数值模拟的结果相一致。

4 结论

1) 水中爆炸冲击波经过传感器前端锥体结构时,由于受到刚性壁面的影响,锥体结构表面的冲击波压力增大,随着冲击波传播至传感器结构后端柱体结构,增强的入射冲击波会持续影响传感器结构后端柱体结构表面压力,使之明显大于相同距离处的自由场压力。

2)传感器结构前端锥体角度不变的情况下,传感器结构直径对水中爆炸冲击波产生较大影响,其直径越大,水中爆炸冲击波受到的增强作用越大。

3)传感器结构直径固定不变的情况下,前端锥体结构锥角度数对水中爆炸冲击波也会产生影响,但差异不显著。

参 考 文 献

[1] 冯晓军. 炸药爆轰参数对水中爆炸能量输出结构的影响[D]. 西安:西安近代化学研究所, 2011.  
FENG X J. Configuration of underwater explosion energy output influenced by detonation parameter[D]. Xi'an: Xi'an Modern Chemistry Institute, 2011.

[2] 王继海. 二维非定常流和激波[M]. 北京:科学出版社,1994.  
WANG J H. Two dimensional unsteady flow and shock wave [M]. Beijing: Science Press,1994.

[3] 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.  
HUI J M, CHEN T Y. Explosion theory[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press,1995.

[4] 吴亚军,周鹏,雷晓莉. 水下爆炸对双壳体结构破坏的

数值研究[J]. 鱼雷技术,2008,16(4):10-14.  
WU Y J, ZHOU P, LEI X L. Numerical simulation of double-layer plate structure destroyed by underwater contact explosion[J]. Torpedo Technology,2008,16(4):10-14.

[5] LS-DYNA Version 960 Keyword User Manual[M]. Livermore Software Technology Corporation,2003.

[6] 方斌,朱锡,张振华,等. 水下爆炸冲击波数值模拟中的参数影响[J]. 哈尔滨工程大学学报,2005;26(4):419-424.  
FANG B, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Effect of parameters in numerical simulation of underwater shock wave[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005;26(4):419-424.

[7] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.  
ZHAO H O. LS-DYNA dynamic analysis[M]. Beijing: Ordnance Industry Press,1998.

[8] Cole R H. Underwater explosion[M]. Princeton, USA: Princeton University Press,1948.

Numerical Simulation of Underwater Explosion Shock Wave Influenced by the Structure of One Sensor

YAN Jiajia, JIA Xianzhen, REN Songtao  
Xi'an Modern Chemistry Institute(Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the influence of a kind of streamline sensor structure on underwater explosion shock wave, numerical simulation of underwater explosion shock wave transmitting around such sensor structure was performed by finite element method. The results show that the cone structure in front of the sensor can enhance the shock wave that transmits on the surface of sensor structure. Thereby the overpressure of shock wave becomes greater. The larger the outer diameter of the sensor structure, the more evident the effect that the sensor structure enhances the shock wave. Whereas under different cone angles in front of the sensor, the effect of the sensor structure on enhancing the shock wave is not evident.

[KEY WORDS] finite element method; numerical simulation; underwater explosion; shock wave; sensor

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