文章编号：1000-5773(2013)04-0528-07

流-固界面冲击波入射压力的测试及数值模拟*

倪小军，马宏昊，沈兆武，蒋耀港，李 磊

（中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥 230027）

摘要：为得到炸药水中爆炸冲击波在中远场内流-固界面上的入射压力时程曲线，在双层壳体底部布置 2 个 PVDF 薄膜压电传感器，测量冲击波压力，并应用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA，对实验过程进行数值模拟。研究表明，实验结果与数值模拟结果符合较好；PVDF 薄膜压电传感器可用于流-固界面上水下爆炸冲击入射压力的测量；在中远场范围内，得到了流-固界面上冲击波的入射压力时程曲线，对评价舰船的抗爆性能具有重要意义。

关键词：双层壳体；数值模拟；水下爆炸；流-固界面；压力

中图分类号：O521.3；O383.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在水面舰船设计中，广泛采用双层壳体结构，因此其在水下爆炸作用下的动态响应问题也备受关注。Hu 等人[1]基于 Flügge 薄壳理论和反射尾流虚源法，研究了双层圆柱壳在水下爆炸冲击载荷作用下的动态响应特性；姚熊亮等人[2-3]通过数值模拟，研究了在冲击环境下不同壳体厚度对双层壳体结构动态响应的影响；李玉节等人[4]针对双层壳体结构中外壳对水下爆炸作用的影响问题，采用简单平面波理论，对外板的冲击波透射特性进行了分析。水面舰艇的双层壳体结构设计，必然会导致临空或临水板壳的存在。利用压力测试手段准确测量这些板壳表面处的水下爆炸冲击波入射压力，对于舰船安全防护设计具有重要的参考和应用价值。

为了研究水下爆炸冲击现象，准确测量爆炸压力是十分必要的。在水中爆炸压力测试中，PVDF 薄膜压电传感器被广泛使用，例如：Gustavson 等人[5]利用 PVDF 压电传感器，测量了水-PMMA 界面处的水下爆炸冲击波压力；池家春等人[6]利用 PVDF 压电传感器，测试了球形药包在 10 倍药包半径范围内的冲击波峰值压力分布情况；赵继波等人[7]利用 PVDF 传感器测量了柱形药包水中爆炸的近场冲击波压力，并指出在小于 4 GPa 的压力量程内，PVDF 压电传感器能得到较为准确的冲击波压力峰值。本研究利用 PVDF 压电传感器，测量在药柱爆炸中远场范围内流体与结构界面上的入射压力，并与经验公式计算结果和有限元(FEM)数值模拟结果进行比较。

2 实 验

2.1 实验原理

根据水中爆炸相似律，药柱的峰值压力可表示为[8]

* **收稿日期**：2011-11-07；**修回日期**：2011-12-27

基金项目：国家自然科学基金重点项目(51134012)；国家自然科学基金(51174183)；安徽省高等学校省级自然科学研究重大项目(KJ2010ZD003)

作者简介：倪小军(1982－)，男，博士研究生，主要从事爆炸力学与安全工程研究. E-mail：nixj@mail.ustc.edu.cn

$$p_{\mathrm{m}} = 52.4\left(\frac{w_{\mathrm{TNT}}^{1/3}}{R+0.5l}\right)^{1.13} \tag{1}$$

式中:p_{m} 为峰值压力(MPa);w_{TNT}为炸药水中爆炸的 TNT 当量(kg),R 为距药柱中心的距离(m),l 为药柱装药长度(m)。对于非 TNT 炸药,w_{TNT}的换算关系为[9]

$$w_{\mathrm{TNT}} = wE_{\theta}/E_{\theta,\mathrm{TNT}} \tag{2}$$

式中:w 为非 TNT 炸药水中爆炸的 TNT 当量(kg);E_{θ} 为非 TNT 炸药水中爆炸的冲击波能(MJ/kg);$E_{\theta,\mathrm{TNT}}$为 TNT 炸药水中爆炸的冲击波能(MJ/kg)。炸药冲击波能的理论计算公式为[10]

$$E_{\theta} = 1.04(w_{\mathrm{TNT}}^{1/3}/R)^{0.05} \tag{3}$$

通过(2)式、(3)式修正,可计算出非 TNT 炸药的水下爆炸 TNT 当量,最后由(1)式求得不同测点处药柱的爆炸冲击波峰值压力。

2.2　实验装置

实验在爆炸水桶中进行,爆炸水桶为圆形钢结构,壁厚 26 mm,高 2.5 m,直径 2 m,实验装置如图 1 所示。炸药为 PETN 炸药,装药方式为柱状装药,装药量为 0.5 g,装药直径为 0.7 cm,装药密度为 0.88 g/cm^3。将厚度为 3 mm 的钢板,制成内、外两个顶部开口的盒状壳体,内、外壳体尺寸分别为 400 mm×400 mm×400 mm 和 380 mm×380 mm×390 mm。内、外壳体之间放有垫片,分别置于内层壳体底部外表面的 4 个边角处,垫片材料为泡沫铝,尺寸均为 100 mm×100 mm×10 mm。由于 PVDF 具有优良的压电特性[6-7],因此本实验采用 PVDF 薄膜压电传感器直接测量水下爆炸冲击波压力。PVDF 所承受的瞬态压力 p 与电压信号 U 的关系为

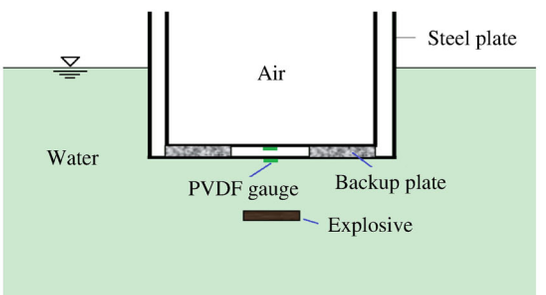


图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Scheme of experimental system

$$p = \frac{1}{kRs}\int U\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中:k 为 PVDF 的灵敏度系数,k=21 pC/N;R 为 PVDF 电阻(Ω);s 为 PVDF 的截面积,s=36 mm^2。

将 PVDF 薄膜压电传感器分别放置在内、外壳体底部外表面中心处,用以测量冲击波在各测点处的压力。实验分为 3 组进行:第 1 组中,药柱与箱体的最小间距(即爆距)为 30 cm;第 2 组中,最小间距为 25 cm;第 3 组中,最小间距为 15 cm。每组进行两次平行实验。

2.3　实验结果及分析

图 2 给出了爆距为 15 cm 条件下,位于内、外壳体底板外侧中心测点处的 PVDF 薄膜压电传感器获得的典型实测压力时程曲线,各次实验中实测的峰值压力结果见表 1。

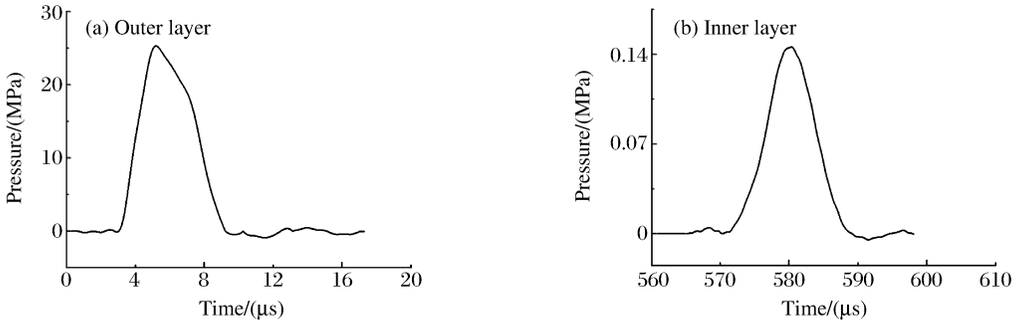


图 2　爆距为 15 cm 时内、外壳体的压力时程曲线

Fig. 2　Pressure-time curves of outer- and inner- shell at 15 cm away from the explosive

表 1 计算和实验结果

Table 1 Results of computation and experiment

No.	Distance/(m)	Outer-layer pressure/(MPa)			Inner-layer pressure/(MPa)		Time difference/(μs)	
		Eq. (1)	Exp.	FEM	Exp.	FEM	Exp.	FEM
1	0.30	11.29	11.63	12.02	0.049	0.043	506	393
2	0.30	11.29	11.58	12.02	0.042	0.043	483	393
3	0.25	13.79	14.11	13.62	0.073	0.064	587	452
4	0.25	13.79	14.10	13.62	0.070	0.064	593	452
5	0.15	23.90	25.31	24.92	0.145	0.100	575	430
6	0.15	23.90	25.38	24.92	0.136	0.100	526	430

实验中采用 PETN 药柱作为爆源，PETN 炸药空中爆炸的 TNT 当量系数为 1.29。联立(2)式和(3)式，可得 PETN 炸药水中爆炸 TNT 当量系数为 1.004 3。由(1)式可计算出外层壳体底部外表面中心处所承受的水下冲击波超压的理论计算值。从表 1 可以看出，各组平行实验中水-钢板和空气-钢板界面的入射冲击波压力实测值的偏差均较小，表明 PVDF 薄膜压电传感器的测量结果具有良好的可重复性。利用(1)式计算得到的水下冲击波超压计算值，与 PVDF 薄膜压电传感器实测值具有很好的一致性，表明 PVDF 薄膜压电传感器可以用于水-钢板界面水下爆炸冲击波入射压力的测量。

3 数值模拟

3.1 计算模型

采用 ALE 流固耦合(ALE-FSI)算法[11-12]，模拟双层壳体在水下爆炸加载下的动态响应。基于双层壳结构的对称性，对炸药、水、双层钢壳体、泡沫铝垫片和空气建立 1/4 三维计算模型，模型的 x、y 对称面采用对称约束，计算模型如图 3 所示。炸药、水和空气采用 Eulerian 算法，而双层壳体和垫片采用 Lagrangian 算法。为了减少计算量，降低计算时间成本，对位于水面以上的空气层采用标准大气压的压力边界条件等效表示。为防止计算过程中双层壳体和垫片材料的网格发生畸变，对其施加沙漏控制约束。

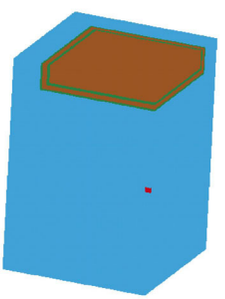


图 3 计算模型

Fig. 3 Model of numerical simulation

3.2 材料参数

炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能燃烧模型和 JWL 状态方程[12]，即

$$p = A\left(1-\frac{\omega\eta}{R_1}\right)\mathrm{e}^{-R_1/\eta}+B\left(1-\frac{\omega\eta}{R_2}\right)\mathrm{e}^{-R_2/\eta}+\omega\rho E \tag{5}$$

式中：p 为爆轰压力，E 为单位体积炸药的初始内能，ρ 为炸药密度，η 为爆炸气体与初始炸药的密度比，A、B、R_1、R_2、ω 为 JWL 状态方程参数。计算参数[13]如表 2 所示，其中 D 为爆速，p_{CJ} 为 CJ 爆轰压力。

表 2 炸药的高能燃烧模型及 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters of high-burn model and JWL equation of state

ρ/(g/cm^3)	D/(m/s)	p_{CJ}/(GPa)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	E/(kJ/cm^3)
0.88	5 170	6.5	348.62	11.29	7	2	0.24	5

钢板和泡沫铝均采用 * MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 材料模型，状态方程均采用 Mie-Grüneisen 方程，计算参数如表 3 所示，其中：c_0、S_1 为 Hugoniot 参数，γ 为 Grüneisen 系数，G 为剪切模量，Y 为屈服应力。

表 3　钢板与泡沫铝材料参数

Table 3　Material parameters of steel plate and aluminum foam

Material	Density/(g/cm^3)	c_0/(m/s)	S_1	γ	G/(GPa)	Y/(GPa)
Steel[14]	7.8	4 280	2.025	1.69	81.9	8.13
Aluminum foam	0.48	519	1.29	1.58	0.05	0.006 5

水和空气采用 MAT_NULL 材料模型,状态方程分别采用 Grüneisen 方程和线性多项式 LINEAR_POLYNOMIAL。水和空气的计算参数[13]分别列于表 4 和表 5,其中:S_1、S_2、S_3 为 Hugoniot 参数,v_0 为初始比容,C_0、C_1、C_4、C_5 为空气的状态方程参数。

表 4　水的状态方程参数

Table 4　Equation of state parameters of water

Density/(g/cm^3)	C	S_1	S_2	S_3	γ	v_0
1.00	0.164 7	2.56	−1.986	1.226 8	0.5	1

表 5　空气的状态方程参数

Table 5　Equation of state parameters of air

Density/(mg/cm^3)	C_0	C_1	C_4	C_5	E_0/(J/cm^3)	v_0
1.29	-1.0×10^{-6}	1.49	0.4	0.4	0.25	1

3.3　计算结果与分析

通过所建计算模型,可获得双层壳体在冲击波作用下的压力时程曲线,其中内、外壳体底板中心处单元的计算压力时程曲线如图 4 和图 5 所示。

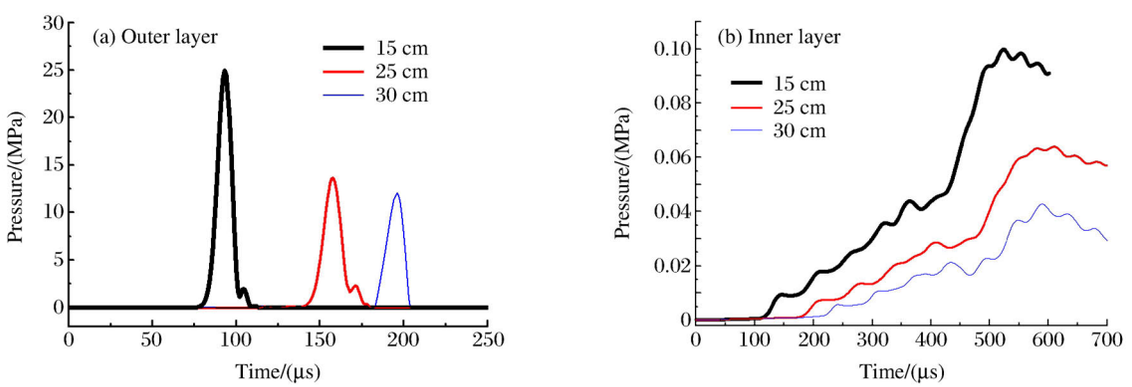


图 4　中心单元的入射压力曲线

Fig. 4　Pressure-time curves of the central element

图 4(a)给出了 0.5 g PETN 药柱水下爆炸时,距药柱 15、25、30 cm 处的水-钢板界面(即外层钢板底部)中心单元的冲击波入射压力时程曲线,其中各曲线的峰值压力列于表 1。由表 1 可以看出,数值模拟得到的压力峰值低于实验测量值。这是因为:网格密度对计算结果的影响显著,网格越密,压力峰值越大,当网格密度达到一定程度时,压力峰值不再明显提高[15];然而,网格变小时,会导致时间步长变小,进而使计算耗费增大。因此,在模拟水下爆炸时,网格密度的合理设置范围为炸药半径的 1/50～1/20[15]。在本计算模型中,总体尺寸是药柱径向尺寸的 100 多倍,并且模型为三维,若按文献[15]所建议的网格密度,则单元数将超过 10^9,计算时间成本很高。为了兼顾计算时间成本和计算精度,本研究设置的计算网格密度为药柱半径的 1/10～1/5,从而导致计算精度下降,计算结果偏低。但是,即使在网格密度较低的情况下,仍然可以看到本计算结果与实测结果在数量级上符合良好,变化趋势一致,表

明所建立的计算模型合理，也进一步验证了 PVDF 压电传感器用于测量水下爆炸非近场内水-钢板界面处水下冲击波压力的可行性。图 4(b)给出了冲击波经过 3 mm 厚钢板和 10 mm 厚空气层，到达空气-内层钢板界面(即内层钢板底部)中心处的冲击波入射压力时程曲线。对比图 4(a)和图 4(b)的峰值压力可以看出，空气层能有效地衰减冲击波压力。因为空气层和钢板的厚度与整体模型尺度相比非常小，考虑到计算稳定性和计算时间成本，钢板和空气层的网格采用低分辨率，从而导致冲击波在二者中传播过程的计算精确降低，色散性加强。由图 4(b)可以看出，计算结果表现出较大的扰动。通过对比表 1 中的压力峰值计算结果与实测结果，发现二者在数量级上符合良好，表明本研究选择的网格分辨率是合适的。

由表 1 可以看出，实验测得的和计算得到的两界面峰值压力所对应的平均时间差分别为 545 μs 和 425 μs，二者在数量级上符合较好，且变化趋势一致。若以钢板和空气的声速分别除以二者的厚度，可以估算出声波通过 3 mm 厚钢板和 10 mm 厚空气层的耗时约为 30 μs。空气-钢板界面处冲击波上升沿的初始时刻(见图 4(b))均在水-钢板界面处压力峰值对应时刻(见图 4(a))之后的 22～30 μs，并且由图 4(b)可知，空气-钢板界面处冲击波上升沿的平均时间约为 400 μs，说明冲击波到达空气-钢板界面处时，入射压力并非最大，而是经过数百微秒的上升过程后才达到最大。为分析其原因，数值模拟了距爆心 30 cm 时双层壳体的变形情况，如图 5 所示。可以看出：冲击波到达水-钢板界面(200 μs)后，双层壳体发生变形，空气层所占空间变小；冲击波过后，钢板在惯性作用下进一步变形，导致内、外层钢板之间的空气所占据的空间进一步减少，空气压力进一步上升；直到 589 μs 时，变形量达到最大，空气层的空间被压缩到最小，空气压力达到最大值；随后，空气层所占空间逐渐变大，空气压力逐渐变小。由此可以看出，在受限空间内，空间的压缩量对空气-结构界面压力的影响显著。

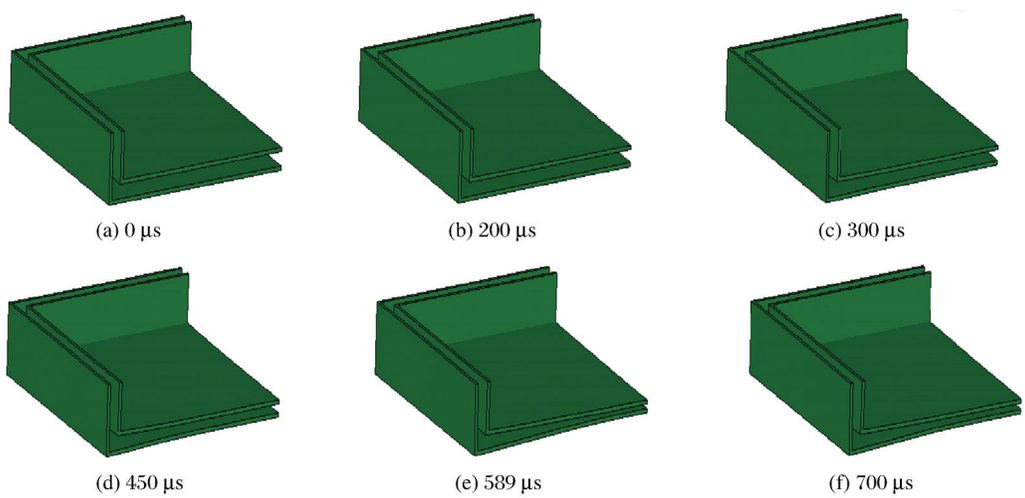


图 5 不同时刻双层板壳的变形情况

Fig. 5 Deformation of the double shell at different time

4 结 论

采用实验与数值模拟相结合的方法，研究了 0.5 g 柱状 PETN 炸药水中爆炸冲击波在水-双层壳体结构的入射压力。对比冲击波压力峰值和内、外层壳体峰值压力时间间隔的计算结果与实验结果，发现二者符合良好。基于实验和数值模拟，得出以下结论：(1) PVDF 薄膜压电传感器可用于测量流-固界面处的水下爆炸冲击压力，重复性和测量精度良好；(2) 在水下爆炸载荷下，若双层壳体之间的空隙介质为空气，则空气层的空间压缩过程持续时间较长，对空气-结构界面压力的影响显著；(3) 空气层能有效地衰减爆炸冲击波的峰值压力，延长冲击波峰值压力的上升沿时间。

References:

[1] Hu G Y, Xia F, Li J. The transient responses of two-layered cylindrical shells attacked by underwater explosive shock waves [J]. Compos Struct, 2010, 92(7): 1551-1560.

[2] Yao X L, Guo J, Feng L H, et al. Comparability research on impulsive response of double stiffened cylindrical shells subjected to underwater explosion [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(5): 754-762.

[3] Yao X L, Liang D L, Xu W J. The effect of changing structure parameter on impulse response of double cylinder shell structure [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(4): 477-483. (in Chinese)
姚熊亮,梁德利,许维军. 结构参数变化对双层圆柱壳冲击响应的影响 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(4): 477-483.

[4] Li Y J, Li G H, Zhao B L, et al. Influence of double hull structure on the effects of underwater explosion [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(5): 127-134. (in Chinese)
李玉节,李国华,赵本立,等. 双层壳体对水下爆炸作用的影响研究 [J]. 船舶力学, 2006, 10(5): 127-134.

[5] Gustavson P K, Tasker D G, Forbes J W. Underwater shock wave measurements using PVDF transducers [C]// Schmidt S C, Dick R D, Forbes J W, et al. Shock Compression of Condensed Matter: Proceedings of the American Physical Society Topical Conference. Amsterdam: Elsevier, 1992: 905-908.

[6] Chi J C, Ma B. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B-3 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(3): 199-204. (in Chinese)
池家春,马　冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(3): 199-204.

[7] Zhao J B, Tan D W, Zhang Y P, et al. Application of PVDF sensor in underwater explosive shock wave measurement at near-field [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(3): 1-4. (in Chinese)
赵继波,谭多望,张远平,等. PVDF 计在水中爆炸近场压力测试中的应用 [J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 1-4.

[8] Zhao J B, Tan D W, Li J L, et al. Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater-explosion field [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 539-543. (in Chinese)
赵继波,谭多望,李金河,等. TNT 药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 539-543.

[9] Song P, Xiao C, Liang A D, et al. Conversion relation of shock wave overpressure about underwater explosion and air blast [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(4): 10-13. (in Chinese)
宋　浦,肖　川,梁安定,等. 炸药空中与水中爆炸冲击波超压的换算关系 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(4): 10-13.

[10] Lu F Y, Li X Y, Lin Y L. The Structure and Principle of Warhead [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
卢芳云,李翔宇,林玉亮. 战斗部结构与原理 [M]. 北京:科学出版社, 2009.

[11] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. Livermore, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[12] Li Y C, Shi D Y, Zhao Y. Basic Theory and Engineering Practice of ANSYS10. 0/LS-DYNA [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese)
李裕春,时党勇,赵　远. ANSYS10. 0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.

[13] Century Dynamics Inc. AUTODYN User Manual [M]. USA: Century Dynamics Inc, 2001.

[14] Dong Y B, Su L X, Chen D N, et al. Numerical simulation on the spallation of a steel cylindrical shell imploded under slipping detonation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1989, 3(1): 1-10. (in Chinese)
董玉斌,苏林祥,陈大年,等. 滑移爆轰作用下内爆柱形钢壳层裂的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 1989, 3(1): 1-10.

[15] Xiao Q P, Chen W H, Jia X Z, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave based on AUTODYN [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 38-43. (in Chinese)
肖秋平,陈网桦,贾宪振,等. 基于 AUTODYN 的水下爆炸冲击波模拟研究 [J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 38-43.

Experimental Measurement and Numerical Simulation of Incident Shock Wave Pressure on the Fluid-Solid Interface

NI Xiao-Jun, MA Hong-Hao, SHEN Zhao-Wu, JIANG Yao-Gang, LI Lei

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: In order to research the mid-far field pressures of the incident shock wave on the fluid-solid interface, an experiment was designed to measure the shock wave pressure, by means of two PVDF piezoelectric film sensors laid on the bottom of double shell. The experimental process was simulated by the finite element method software ANSYS/LS-DYNA. The simulation results are in good agreement with the experimental data. PVDF sensor can be used to measure the incident shock wave pressure on the fluid-solid interface. The mid-far field pressures of the incident shock wave on the fluid-solid interface can be gained, which is important to evaluate the antiknock performance of ships.

Key words: double shell; numerical simulation; underwater explosion; fluid-solid interface; pressure