文章编号：1000-5773(2012)05-0523-08

射流冲击模型在水下爆炸实验中的应用研究*

崔　杰[1]，李世铭[1]，黄　超[2]，姚熊亮[1]，张阿漫[1]

(1.哈尔滨工程大学船舶工程学院，黑龙江哈尔滨　150001；
2.中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳　621900)

摘要：为研究射流冲击载荷对结构的作用效果，从理论和数值角度研究了射流的载荷特性，以舱段模型实验为研究对象，建立了射流计算模型，结合实验数据，对射流冲击问题进行了分析。结果表明，射流冲击能够造成结构强烈的局部响应，某些情况下，射流冲击载荷引起的结构响应甚至比冲击波载荷引起的响应更大。因此，中近场水下爆炸实验需要考虑射流的影响。建立的射流模型能够较好地反映射流冲击的载荷特性，为水下爆炸实验分析提供了一种新的手段。

关键词：射流；气泡；水下爆炸；载荷特性；舰船结构
中图分类号：O358　　**文献标识码**：A

1　引　言

水下爆炸载荷成分复杂，舰船结构在受到水下武器攻击时，由于作用载荷成分的不同而呈现出不同的动态响应以及毁伤模式。有关冲击波载荷的特性，以及结构对冲击波的动态响应研究开展较早，已进行了大量的深入研究，成果丰富。而关于气泡载荷的研究则开展得相对较晚，目前主要集中在气泡的动态特性，以及在气泡脉动载荷作用下结构的动态响应方面[1-2]。在气泡坍塌所产生的射流载荷方面，已有学者对水下爆炸气泡射流现象进行了一些实验和数值研究，侧重于气泡坍塌产生射流的动力学特性[3-4]和一些简单结构模型的响应特性[5-6]，但是并未揭示射流冲击载荷与结构响应之间的紧密联系，对射流载荷特性的关注较少。反映出当考虑结构受射流冲击载荷作用问题时，实验研究和数值模拟分析都存在较大难度。本研究从理论和数值角度分析射流的载荷特性，以舱段模型实验为研究对象，建立射流计算模型，讨论射流冲击模型在水下爆炸实验中的应用问题，为水下爆炸实验研究提供参考。

2　射流的载荷特性

射流是一团高速运动的流体，当其运动受到固壁阻碍时，强烈的冲击使射流头部产生很高的压力，从而对材料造成损伤。Barber 等人[7]采用液-固冲击模型，描述了射流冲击固体的全过程，图 1 为液-固冲击模型示意图[7]。当流体与固体表面接触时，接触面上的流体质点因运动受到阻碍而几乎在瞬间静止，从而产生很高的密度和压力，形成一个向射流上游传播的冲击波。当冲击波远离后，液体边缘的流体质点向侧面运动，形成向射流内部传播的稀疏波，使冲击波后的压力迅速减小。由于稀疏波的传播比

* **收稿日期**：2011-07-11；**修回日期**：2011-10-09
基金项目：国家自然科学基金重点项目(50939002)；国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(10976008)；国家自然科学基金(50809018，50779007)；中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCFZ1001)；第十二届霍英东教育基金(121073)
作者简介：崔　杰(1984—)，男，博士研究生，主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail：cuijie2006@gmail.com
通讯作者：黄　超(1984—)，男，博士，助理研究员，主要从事气泡动力学和冲击动力学研究.
E-mail：huangchao21cn@126.com

冲击波快，因此稀疏波将追赶上冲击波，直到完全消除冲击波的作用，此时在射流内部形成稳态流。图 2 给出了射流冲击固体时的理想压力曲线[7]。图 2 中：*OA* 段反映了在碰撞接触面附近密度不断增加，导致压力变大并形成冲击波，所产生的峰值压力称为 Hugoniot 压力；*AB* 段压力的下降是由于稀疏波的形成与传播造成的；*BC* 段则表示由稳态流现象形成了滞流点。

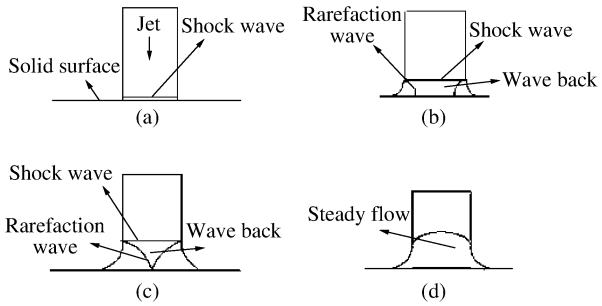


图 1 射流冲击固体表面情况[7]

Fig. 1 Jet impact on the surface of a solid[7]

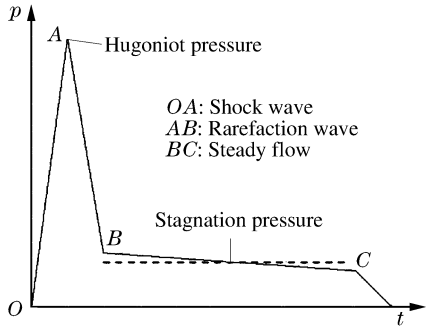


图 2 射流冲击固体的理想压力曲线[7]

Fig. 2 Idealized pressure curve of jet impact[7]

考察射流一维运动情形下的载荷特性。如图 3 所示，一束射流以速度 u_0 向固壁运动，发生撞击后在射流中产生一个以速度 w 向左运动的冲击波。此时射流上游区域的流体尚未受到射流头部反射冲击波扰动的影响，根据非定常流体力学理论，可以得到冲击波后流场中的压力表达式[8]

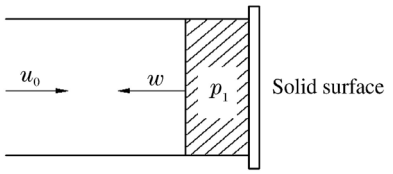


图 3 射流冲击形成的冲击波

Fig. 3 Shock wave generated by jet impact

$$p_1 - p_0 = \rho_0 u_0 (w + u_0) \tag{1}$$

式中：p_0 为波前压力，p_1 表示波后压力，ρ_0 表示波前水的密度。当射流速度较低时，可用流场中未受扰动区域流体中的声速 c_0 代替(1)式中的波前速度项 $w+u_0$，从而得到

$$p_1 - p_0 = \rho_0 c_0 u_0 \tag{2}$$

(2)式即为“水锤”压力计算公式。随着冲击波的传播，射流与固体表面发生碰撞后将向侧面运动，在射流中产生边侧稀疏，稀疏波将追赶上冲击波并产生持续作用，当冲击波逐渐减弱直到消除时，即形成了稳态流。沿流线的运动方程为[9]

$$\int \frac{\mathrm{d}p}{\rho} + \int u \mathrm{d}u = C_1 \tag{3}$$

式中：p 为流体中的压力；ρ 为流体密度；u 为流体质点的速度；对于不同的流线，C_1 取不同的常数。在一维情况下，射流中各处的流动性质相同，$C_1=0$，因此(3)式可变换为

$$\int_{p_0}^{p} \frac{\mathrm{d}p}{\rho} + \int_{u_0}^{u} u \mathrm{d}u = 0 \tag{4}$$

对于射流冲击形成的稳态流动，在固体表面形成速度为零的滞流点(如图 1 所示)，滞流点的压力即为固体表面上承受的驻点压力 p_s，由(4)式可得

$$p_s = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \tag{5}$$

采用数值模型方法计算射流的载荷特性，以圆柱形射流冲击一块四周刚固的钢板为例。射流半径为 0.25 m，长为 0.5 m，冲击速度为 200 m/s，钢板尺寸为 4 m×4 m×0.01 m；结构建模采用 Belytschko-Tsay 壳单元模型，单元尺寸为 25 mm；根据 Cowper-Symonds 模型考虑应变率效应；射流中水的压缩性质采用 Grüneisen 状态方程描述[10]。图 4 给出了射流顶端的压力曲线，压力波形与图 1 基本相似，峰值压力约为 301 MPa，与采用(2)式计算得到的峰值压力(300 MPa)几乎相等，由此可见数值模型能够准

确地反映射流的载荷特性。由于结构的弹性性质,在压力峰值处出现了轻微振荡,而在峰值过后,由于边侧稀疏波的作用,压力迅速减小到驻点压力附近,随后由于空化的产生,压力降至零。

与冲击波对结构的作用相似,射流冲击具有高强度、瞬时的特性。但冲击波的大部分能量由冲击波携带,并向四周传播,在传播过程中很快耗散。而射流的能量大部分集中在高速运动的水流中,具有方向性,因此能够对结构产生高强度的集中作用,并可能造成结构更加剧烈的动态响应。

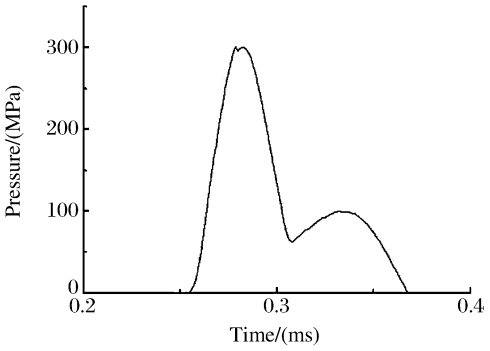


图 4 射流冲击平板的压力

Fig. 4 Jet impact pressure on plate

3 实验工况与结果分析

3.1 实验工况

水下爆炸载荷特性十分复杂,在实验中,冲击波载荷和射流冲击载荷在引起局部结构响应的各因素中往往占主导地位。对于远场爆炸,冲击波引起的结构响应比较明显;而对于中近场爆炸,冲击波和射流共同的毁伤效应则更加显著。由于中近场爆炸实验中无法将冲击波和射流载荷剥离开来,因而为数据分析带来了很大的难度,本研究建立的射流计算模型为解决这一问题提供了思路。为分析冲击波和射流对结构产生的不同毁伤效果,以某船体舱段为研究对象,将实验结果和计算数据进行对比分析。

实验模型为一舱段沿中纵剖面截取的 1/2 结构,长为 l,宽为 b,高为 h,斜置静浮于水面,药包均布在舱段模型中间实肋板的正下方,双层底从龙骨到舭部依次分为 a、b、c、d 沿船长方向的 4 个纵向区域。中近场实验工况及测点布置如图 5 所示,工况 1 和工况 2 位于舱段正下方较深处,而工况 3 和工况 4 位于龙骨下方水深较浅处,爆距与气泡半径比 γ 逐渐减小;测点 M 位于b 区板格中间,测点 N 位于 a 区板格角落。另设置一标定工况,药量为 6 kg,爆距为 10 m,用于传感器的标定和检测。表 1 给出各实验工况下的参数,其中:m_{TNT} 为炸药的 TNT 当量,s 为炸药距自由面的距离,d 为爆距,γ 为爆距与气泡半径的比值,β 为冲击因子。

表 1 各实验工况参数

Table 1 Parameters of experimental conditions

Case	m_{TNT} /(kg)	s /(m)	d /(m)	γ	β
1	8	7.0	5.9	2.3	0.48
2	8	5.4	4.4	1.7	0.64
3	8	3.6	3.2	1.2	0.88
4	6	2.2	1.8	0.7	1.35

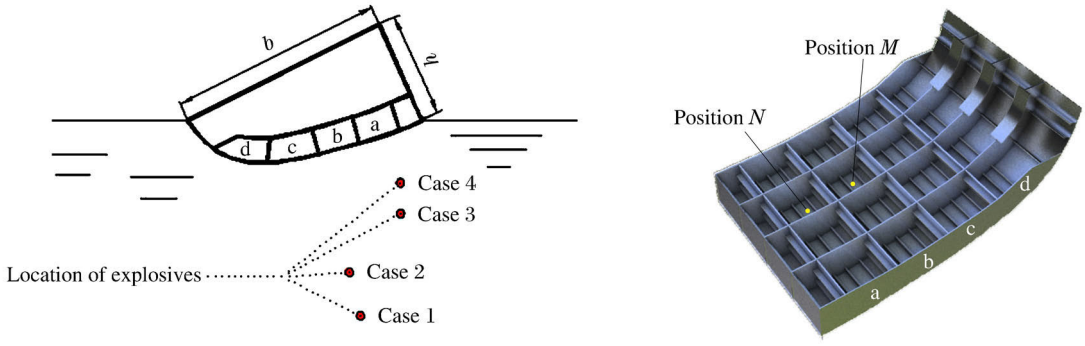
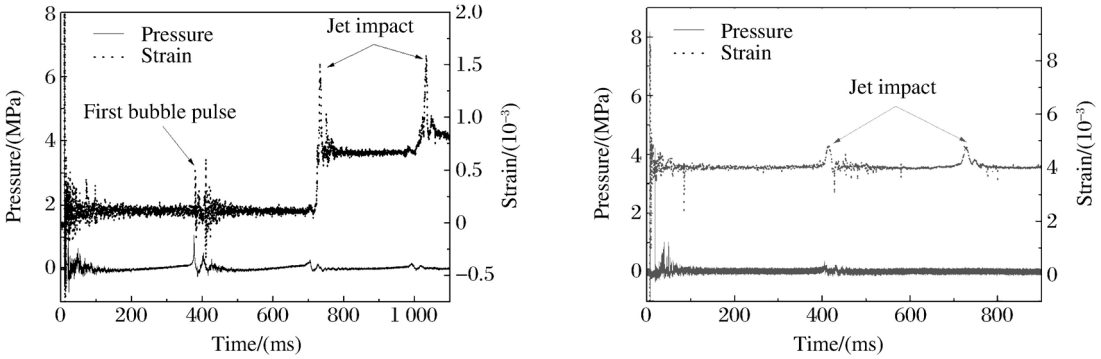


图 5 实验工况及舱内测点布置

Fig. 5 Experimental conditions and strain gaging position

3.2 实验结果分析

图 6 给出了工况 1 和工况 3 实验测得的水中压力和气泡上方测点处的应变曲线。从压力时程曲线的对比可以看到，在冲击波之后，工况 1 中气泡表现为连续的周期性运动，而工况 3 中，气泡的脉动仅持续一个周期便消失，且脉冲压力的幅值较工况 1的小得多，这是因为工况 3 的药包所处深度较浅，气泡运动大约一个周期就上浮至水面，大部分气泡将脱离水体。另外，对比两个工况的应变曲线发现，工况 1 中由于爆距相对较远，由冲击波载荷引起的塑性应变较工况 3 的小得多，而在气泡脉动载荷作用下，结构主要表现为弹性振动，没有发生塑性形变，这可由气泡第一次脉动时结构的应变响应得到。



(a) Position M in Case 1　　(b) Position N in Case 3

图 6 实验测得的水中压力及应变时程曲线

Fig. 6 Pressure curve in the water and strain curve on the strcture

图 6 显示，工况 1 中在气泡脉动第 2 和第 3 个周期结束时，结构均出现了较大的塑性应变，且塑性应变的幅值明显比冲击波作用的结果大。然而压力曲线则显示，工况 1 在气泡脉动第 2 和第 3 个周期结束时的压力和冲量都远小于第一次气泡脉动，由此可知，结构的塑性变形不是由气泡脉动载荷产生的。根据 Geers-Hunter 模型[11]，在自由场情况下，工况 1 第 2 个气泡脉动周期结束时，气泡上升的距离为 3.7 m，这时气泡距舱段底部的距离小于 2.2 m，即 $\gamma<0.9$，如果考虑边界效应，气泡的坍塌将产生指向舱底的射流，由此可以推断，气泡引起的结构塑性变形是由射流冲击载荷所产生的，而气泡第 3 个周期结束时的塑性应变小于第 2 个周期结束时的塑性应变，说明射流的能量为结构所吸收，呈逐次减小的趋势。另外，工况 3 的射流冲击只引起结构的弹性振动，是由于在气泡上浮至水面、大部分气体脱离水体的过程中，结构的阻挡使得少量气体滞留在模型底部水中，尽管也能形成射流，但能量却小得多，因此，没有造成结构的塑性变形。

图 7 为 4 个工况结束后，双层底外板的变形照片。从直观上看，外板在冲击波载荷作用下产生了较为明显的塑性变形，外板向内凹陷，且板格边缘出现方形的塑性铰线。测量得到 a 区中部两个板格的最大凹陷位于 A_1 点和 A_2 点处，均在板格的中心，凹陷位移均为 3.8 cm，b 区中部两个板格的最大凹陷位于 B_1 点和 B_2 点处，均在靠近肋板处的纵骨上，B_1 点的位移为 9.6 cm，B_2 点的位移为 8.7 cm。b 区的变形比 a 区的大，与实验工况布置的预期结果不一致。根据图 4 中的实验布置，工况 1 和工况 2 的直达波首先到达 b 区，而工况 3 和工况 4 的直达波首先到达a 区，根据表 1 中冲击因子 β 值推断，a 区变形应比 b 区变形大。实验结果与预期结

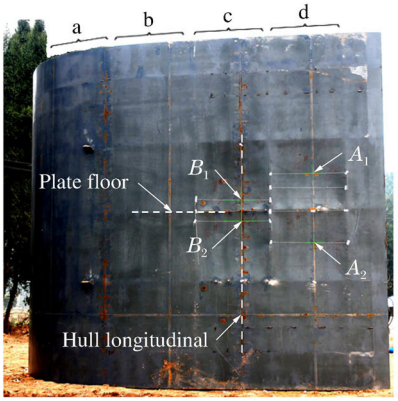


图 7 舱段底部外板变形

Fig. 7 Deformation of the cabin bottom

果不一致说明存在除冲击波之外的载荷作用于结构,使b区的变形加强,根据上文的分析,该载荷就是射流冲击载荷。由工况布置可知,工况 1 和工况 2 由于药包较深,气泡能够在水中运动多个周期,容易出现射流冲击现象;而工况 3 和工况 4 由于药包较浅,气泡很快窜出水面,不太容易出现强烈的射流冲击现象。因此,在整个舱段模型实验中,在工况 1 和工况 2 情况下需要考虑射流冲击载荷对结构响应造成的影响。

4　射流冲击模型及计算结果

以工况 2 为例,采用第 2 节中建立的射流模型计算结构的响应。模拟过程中主要考虑第一次射流所产生的效应。射流模型参数有:射流的形状、尺寸、速度和周期,这些参数可以通过非球形水下爆炸气泡数值模型计算获得。非球形水下爆炸气泡采用多物质任意拉格朗日-欧拉耦合(Arbitrary Lagrangian-Eulerian,ALE)算法与边界积分法相结合的联合数值模型进行模拟,即首先采用 LS-DYNA 程序计算得到水下爆炸生成的初始气泡,然后提取初始气泡的形状、速度和压力,建立气泡模型并输入开发的边界元程序,计算气泡的运动过程[12-13]。图 8 为工况 2 中气泡在舱段双层底下方坍塌形成的射流。从图 8 可以看出,由于气泡的迁移,气泡与舱段之间的距离拉近,射流完全形成时距外板已经较近,能够冲击到舱段的双层底。计算得到的射流形状近似于正圆台状,如图 9 所示。射流顶端半径为 0.3 m,约为气泡最大半径的 1/10,与文献[14-15]的结果一致,射流底部半径为 0.6 m。由非球形水下爆炸气泡动力学模型计算得到的射流速度为 55 m/s,符合浅水爆炸的射流特征,射流的周期(作用时间)为 25.5 ms。由射流的周期和速度计算出射流的长度为 1.4 m。依据射流的形状、尺寸、速度和周期等参数,通过LS-DYNA程序建立射流冲击模型。结构建模采用板和梁单元模型,共划分 18 834 个壳单元和 2 465 个梁单元,在冲击区域保持射流的单元密度与接触的壳单元密度一致,采用 ALE 算法和流固耦合算法计算整个冲击过程。

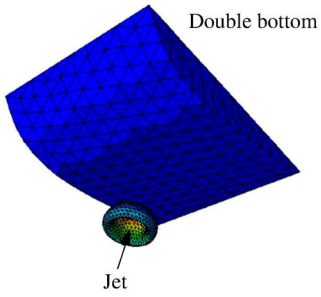


图 8　气泡在双层底附近形成的射流

Fig. 8　Jet formed under double bottom

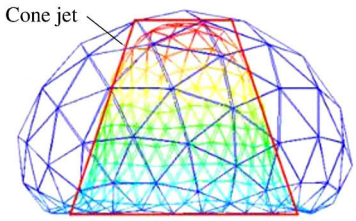


图 9　射流的形状

Fig. 9　The shape of jet

图 10 给出了在射流冲击舱段的过程中双层底的等效塑性应变结果。从图 10 可以看出:$t=0.1$ ms 时,射流头部以一定角度与肋板和旁底桁交界处的外板发生接触,外板上首先产生塑性变形;$t=3.0$ ms 时,塑性变形区域在外板、肋板和旁底桁上扩展;$t=10.0$ ms 时,已经有一半射流撞击到双层底上,塑性变形的区域进一步扩大,但仍处于 4 个板格之内;$t=20.0$ ms 时,射流已经完全撞击到结构上,肋板和纵骨均产生了较大的塑性变形。

图 11 给出了采用射流冲击模型计算得到的舱底受射流冲击的外板变形结果。从图 11 可以看出,射流冲击会造成局部影响,外板的凹陷主要集中在 a 区和 b 区中部的 4 个板格上,其中以 b 区中部 2 个板格的凹陷程度最大。

图 12 给出了标定工况下测点 N 的应变的实验与仿真结果对比。实验和数值仿真的采样频率均为 2×10^4 s^{-1}。由于标定工况中药包距结构较远($\gamma=4.7$),气泡载荷对于舱段的影响较小,因此该工况下

舱段结构的响应主要受到冲击波的作用。从图 12 可以看出，结构在初始冲击波作用下产生较高的应变脉冲之后，一直处于弹性范围内的振动状态。无论是应变脉冲值还是其随后的结构响应，计算结果与实验结果都基本相符，说明对舱段在冲击波载荷作用下响应的计算是较为准确的。

采用重启动分析计算了 4 个工况的冲击波载荷和工况 1、工况 2 的射流冲击载荷作用下，舱段底部的累计凹陷变形，并与实验结果进行对比，结果见表 2。从表 2 可以看出：如果不考虑射流冲击载荷，仅用冲击波载荷计算预估的结构响应比实验结果小得多，且结构变形的规律也不一致；而将冲击波载荷与射流冲击载荷引起的结构响应进行叠加得到的结果，则与实验结果的规律一致，误差在 10%左右。

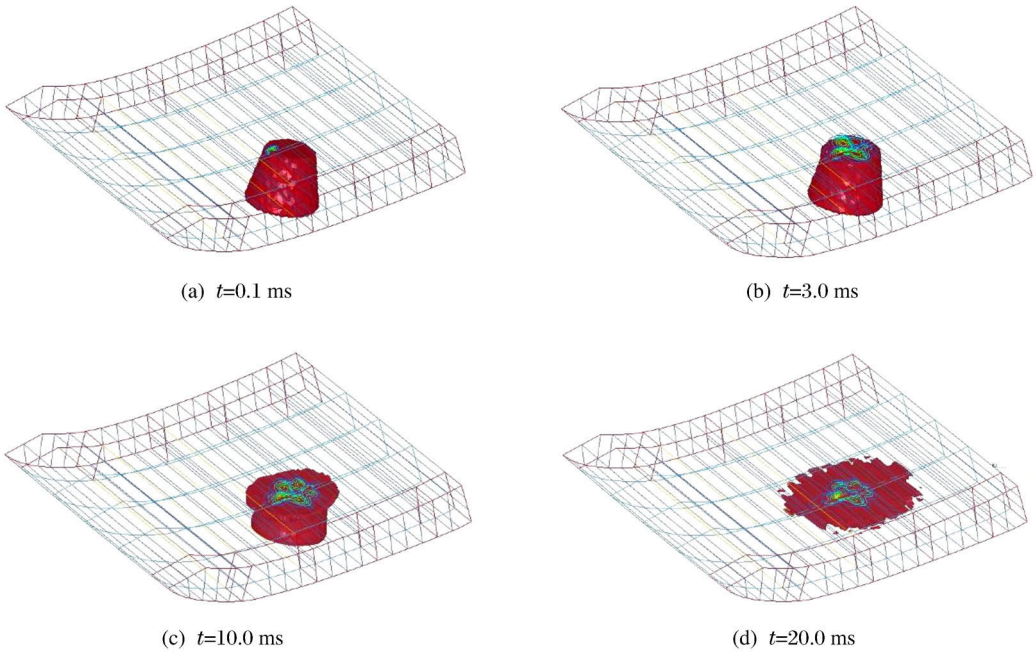


图 10 射流冲击双层底的过程

Fig. 10 Impact process between jet and double bottom

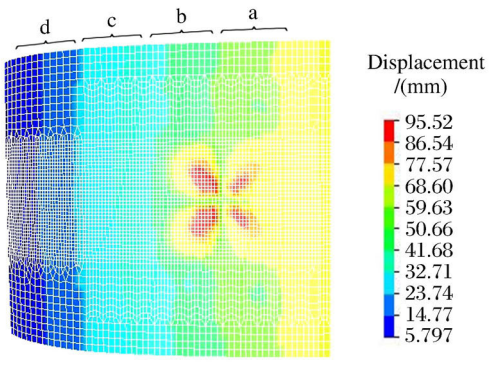


图 11 射流冲击舱段底部的位移分布

Fig. 11 Displacement of the bottom induced by jet impact

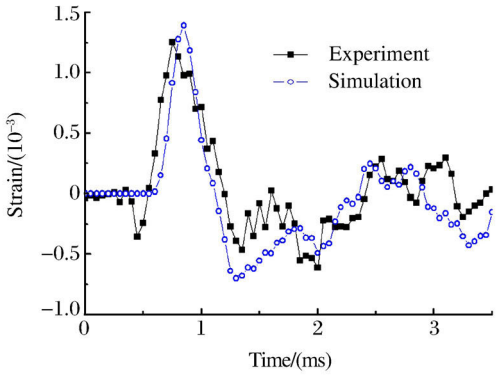


图 12 测点 N 真实应变对比

Fig. 12 Comparison of real strain at position N

表 2　各测点凹陷变形的计算结果与实验结果对比

Table 2　Comparison of depression results between caculation and experiment

Position	Deformation (cal.)/(cm)			Deformation (exp.) /(cm)	Error /(%)
	Shock wave	Jet	Shock wave & jet		
A_1	2.9	1.3	4.2	3.8	10.5
A_2	2.5	1.4	3.9	3.8	2.6
B_1	1.2	6.8	8.0	8.7	8.0
B_2	1.5	7.0	8.5	9.6	11.4

5　结　论

(1) 射流冲击载荷与冲击波载荷的不同之处在于,冲击波的能量大部分由冲击波携带,并向四周传播;而射流的能量大部分集中在高速运动的水流中,具有方向性,能够对结构产生高强度的集中作用。

(2) 射流冲击载荷主要对结构造成局部变形和破坏,在某些情况下,射流冲击载荷引起的结构响应远大于冲击波载荷引起的响应。

(3) 气泡不仅在结构附近形成时可对结构发起射流冲击,当气泡在结构下方较远的位置形成时,在浮力作用下气泡上浮到结构附近后,仍然能够形成射流,造成结构强烈的局部响应,这时如果不考虑射流造成的影响,则可能导致实验结果与预期结果产生较大差异,甚至出现完全相反的规律。

(4) 射流冲击模型反映了射流的载荷特性,能够计算由射流冲击造成的结构响应,丰富了水下爆炸实验分析的手段。

References:

[1] Chahine G L, Kalunuch K M, Hsiao C T. Simulation of surface piercing body coupled response to underwater bubble dynamics utilizing 3DYNAFS, a three-dimensional BEM code [J]. Comput Mech, 2003, 32(4-6): 319-326.

[2] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure [J]. J Fluid Mech, 2005, 537: 387-413.

[3] Zong Z, He L, Sun L Q. Numerical study of loading on the surface ship near an underwater explosion bubble [J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(5): 733-739. (in Chinese)
宗　智,何　亮,孙龙泉. 水下爆炸气泡对水面舰船载荷的数值研究 [J]. 船舶力学, 2008, 12(5): 733-739.

[4] Zhang A M, Yao X L. Review on the bubble dynamics based on boundary integral method [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(5): 561-570. (in Chinese)
张阿漫,姚熊亮. 基于边界积分法的气泡动态特性综述 [J]. 力学进展, 2008, 38(5): 561-570.

[5] Mu J L, Zhu X, Huang X M, et al. Experimental study of jets formed by bubbles from underwater explosions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(2): 154-158. (in Chinese)
牟金磊,朱　锡,黄晓明,等. 水下爆炸气泡射流现象的试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(2): 154-158.

[6] 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): 165-169. (in Chinese)
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): 165-169.

[7] Barber J P, Taylor H R, Wilbeck J S. Bird impact forces and pressures on rigid and compliant targets [R]. Ohio: Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1978.

[8] Huang Y C, Hammitt F G, Mitchell T M. Note on shock-wave velocity in high-speed liquid-solid impact [J]. J Appl Phys, 1973, 44(4): 1868-1869.

[9] Lin J Z, Ruan X D, Chen B G, et al. Fluid Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

[10] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual [Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 1999.

[11] Geers T L, Hunter K S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble [J]. J Acoust Soc Am, 2002, 111(4): 1584-1601.

[12] Huang C, Zhu F, Wang B, et al. Numerical simulation for dynamic behavior of non-spherical underwater explosion bubble [A]//10th National Conference on Shock & Impact Dynamics [C]. Taiyuan, 2011. (in Chinese)
黄 超, 朱 枫, 汪 斌, 等. 非球形水下爆炸气泡动态特性的数值模拟 [A]//第十届全国冲击动力学学术会议论文集 [C]. 太原, 2011.

[13] Huang C, Wang B, Liu C L, et al. On the mechanism of non-spherical underwater explosion bubble collapse [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(5): 501-507. (in Chinese)
黄 超, 汪 斌, 刘仓理, 等. 非球形水下爆炸气泡坍塌机制 [J]. 高压物理学报, 2012, 26(5): 501-507.

[14] Plesset M S, Chapman R B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary [J]. J Fluid Mech, 1971, 47: 283-290.

[15] Zhang A M, Wang S P, Bai Z H, et al. Experimental study on bubble pulse features under different circumstances [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(1): 71-83. (in Chinese)
张阿漫, 王诗平, 白兆宏, 等. 不同环境下气泡脉动特性实验研究 [J]. 力学学报, 2011, 43(1): 71-83.

Application Research of Jet Impact-Model in an Underwater Explosion Experiment

CUI-Jie[1], LI Shi-Ming[1], HUANG Chao[2], YAO Xiong-Liang[1], ZHANG A-Man[1]

(1. *College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*;
2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: In order to study the damage effect of ship structure subjected to jet impacting, characteristic of jet loading was investigated theoretically and numerically. A jet impact-model was verified based on a ship cabin model underwater explosion test. An analysis was made by combining the calculation results and test data. Results show that the jet impact can induce a strong local response on the structure. Under certain circumstance, jet impacting response is more severe than that caused by shock wave even when bubble incepts at a relatively far position. Therefore, jet impact problem cannot be considered only in proximal underwater explosion test. The jet impact-model developed in this work could reflect the loading feature accurately, and would provide reference to underwater explosion experimental analysis.

Key words: jet; bubble; underwater explosion; load characteristic; ship structure