文章编号:1000-5773(2008)02-0181-06

水下爆炸冲击波作用下空化区域形成的特性研究*

李海涛,朱 锡,黄晓明,牟金磊

(海军工程大学船舶与动力学院,湖北武汉 430033)

摘要:对水下爆炸冲击波作用下的局部空化和区域空化形成特性进行了理论和实验研究。引入平面冲击波假设,理论分析了结构几何尺度及冲击波参数的变化对空化区域形成的影响,并在直径 5 m 的圆柱形水箱中,对边长 1 m、厚度 2 mm 的方形钢板在 50 g TNT 炸药、1 m 爆距条件下进行了水下爆炸冲击实验,以验证局部空化理论。研究结果表明:在相同的冲击条件下,结构尺度的变化对局部空化的形成具有较大影响;炸药质量及爆深的变化会改变区域空化的形状及范围;实验结果与局部空化理论计算结果基本一致。

关键词:空化;水下爆炸;冲击波;数值计算;实验研究

中图分类号:O383.1 **文献标识码**:A

1 引 言

在水下爆炸冲击波作用下,舰艇等水面结构的附近水域会出现空化效应,具体分为流固耦合面处的局部空化(Local Cavitation),以及附近水域的区域空化(Bulk Cavitation)。空化效应形成于冲击波作用初期,主要原因是初始冲击波遇到结构边界或自由边界后发生反射,反射波与入射波叠加后形成负压区,当负压力达到水的空化压力时,就会出现空化现象。

研究局部空化,首先需要考虑结构边界在水下冲击波作用下的早期响应问题。而该问题包含复杂的流固耦合过程,进行精确的理论求解显得困难。鉴于此,人们一直致力于通过近似的方法来简化求解。Mindlin、Bleich 最先用平面波近似法(PWA)研究结构在冲击波作用初期的响应问题[1];Geers 进一步将该方法应用于舰船和潜艇在爆炸冲击作用下的早期响应研究[2]。Makinen 在平面波近似法的基础上,分析了 4 种不同空化模型的适用范围,并对简单模型利用近似方法和经典理论分别求解,比较计算结果后发现,两者具有较好的一致性[3]。随着计算机技术的发展,人们开始利用有限元仿真方法研究水下爆炸引起的空化效应。Leonard、Stevent 在平面波近似理论的基础上,利用有限元仿真方法分析了水下爆炸引起的空化效应对船体箱形梁结构响应的影响,发现空化效应的存在会增大结构整体的速度响应[4-5];国内顾文彬等人也采用平面波假设,利用数值方法研究了自由水面在冲击波作用下的空化区域形成特性[6]。

理论上说,水下爆炸源发出的冲击波为球面波,将其简化为平面波处理,可行性及结果误差是需要研究的问题。文献[7]指出,当爆距趋于无穷时,球面波可按平面波处理,但该结论的实际意义不大。文献[8]对球面波作平面波处理的误差进行了分析研究,发现当爆距与炸药半径之比超过 50 以后,球面波即可按平面波处理,误差不超过 5%;当比值小于此范围时,误差较大。结合文献[8]的结论及已有研究成果可知,平面波近似理论对于解决冲击波作用下的流体空化问题具有一定的合理性。但已有的工作

* **收稿日期**:2007-06-22;**修回日期**:2007-12-27

基金项目:国家安全重大基础研究项目(51335020101)

作者简介:李海涛(1979—),男,博士研究生,主要从事水中结构抗冲击理论及实验技术研究. E-mail:navy_lht@163.com

多集中于理论分析,实验研究开展较少。本工作利用平面波理论对水下爆炸冲击波作用下局部空化和区域空化的形成特性进行了研究,并通过具体实验对局部空化理论进行了验证,为进一步开展水面结构在空化区域中的结构响应研究打下基础。

2 局部空化

2.1 局部空化的形成

水下爆炸冲击波接触结构物表面后发生反射,入射波和反射波叠加会在结构的流固耦合面形成负压区。当负压力达到水的空化压力时,就会在该区域出现空化现象,称为局部空化。对于理想水介质,其空化压力可以达到−4.25 MPa,但对于一般水介质而言,其中含有的杂质等因素会提高水的空化压力,Cole 通过平面空化试验得出水的空化压力上限为−0.5 MPa 左右。文献[3-5]在分析过程中,取水的空化压力为零,即认为流体达到负压时,空化便开始形成。

考虑到水下爆炸冲击波的高频特性,当冲击波作用到舰艇结构后,主要发生波的反射、透射,衍射现象不明显。本研究忽略高频冲击波衍射的影响,将舰艇结构在冲击波作用下的早期响应过程简化为一无限平板在平面波作用下的响应过程,平板两侧分别为水和空气介质,整个简化物理模型如图 1 所示。

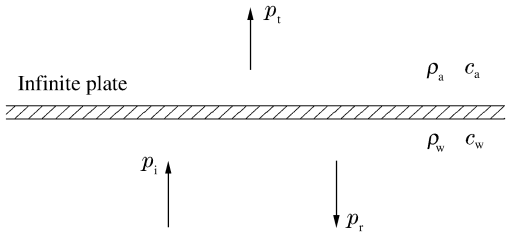


图 1 平面波作用下的无限平板

Fig. 1 Infinite plate subjected to a plane wave

冲击波以入射压力 p_i 作用到平板上,形成反射波 p_r 和透射波 p_t,图中 ρ_a、ρ_w 和 c_a、c_w 为空气、水的密度和声速。根据爆炸冲击波理论[9],入射压力 $p_i=p_{max}e^{-t/\theta}$,随时间按指数函数衰减,其中

$$\begin{aligned} p_{max} &= K_1 \cdot (W^{1/3}/R)^{A_1} \\ \theta &= K_2 W^{1/3} \cdot (W^{1/3}/R)^{A_2} \end{aligned} \tag{1}$$

式中:p_{max}为测点处的峰值压力,单位 MPa;W 为炸药当量,单位 kg;R 为测点与装药间的距离,单位 m;K_1、K_2、A_1、A_2 为冲击波常数,与所使用的炸药相关;θ 为冲击波衰减常数。炸药类型及爆距确定后,即可确定入射压力。

根据连续性边界条件,平板两边的质点速度必须相等。入射面一侧质点速度为$(p_i-p_r)/\rho_w c_w$,透射面一侧质点速度为 $p_t/\rho_a c_a$,因此

$$v_p=(p_i-p_r)/(\rho_w c_w)=p_t/(\rho_a c_a) \tag{2}$$

式中:v_p 为平板的运动速度。根据牛顿第二运动定律,平板两侧的压力差提供平板单位面积质量 m 运动的惯性力 $m\,\mathrm{d}v_p/\mathrm{d}t$,列出动力平衡方程式有

$$p_i+p_r-p_t=m\frac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

方程(2)、方程(3)中,只有 p_r 和 p_t 为未知量,其它均为已知量,联立求解得平板入射面总压力 p_i+p_r 为

$$p_i+p_r=2p_{max}\left[e^{-t/\theta}-\frac{\theta\rho_w c_w}{m(A\theta-1)}\left(e^{-t/\theta}-e^{-At}\right)\right] \tag{4}$$

为简化方程(4)的形式,引入参数 $A=(\rho_a c_a+\rho_w c_w)/m$,为已知量。当总压力 p_i+p_r 为负值并达到水的空化压力时,在平板的入射面会出现空化现象。本研究参考文献[3-5],假设总压力为负值时,流固耦合面处即发生空化现象。

2.2 数值计算及试验比较

图 2 为改变无限平板单位面积质量 m 时,入射面总压力 $p=p_i+p_r$ 的时间历程曲线,其中给定入射压力峰值 $p_{max}=1.63$ MPa,$\theta=0.107$ ms。从图中可以看出,冲击波压力入射到无限平板后的初期,就在很短的时间内衰减为负压,且其持续时间短,处于毫秒量级,这些特性也是与冲击波快速衰减特性相关的。随着 m 值的增大,总压力 p 的衰减速度降低,负压峰值增大,说明对于同种材料的板,其厚度

越大,流固耦合面处的负压峰值越大,形成空化的能力越强;厚度越小,形成负压区的速度越快,空化速度也越快。

为了研究平板在爆炸冲击波作用下的局部空化特性,我们进行了试验研究。整个试验在直径为 5 m的圆柱形水池中进行,水深 2 m。选取边长 1 m、厚度 2 mm 的方形钢板作试验用板,将其焊接于强力钢质托架上,并用钢绳将整个托架水平悬挂于水面上。壁压传感器型号为 WM109c11,灵敏度为10.24 mv/MPa,安装于平板中央。将 50 g TNT 炸药置于钢板正中央下方 1 m 处爆炸,以模拟入射冲击波压力。整个试验装置及压力传感器布置如图 3、图 4 所示。本次爆炸冲击试验中,爆距与炸药半径之比约为 52,满足文献[8]提到的平面波假设条件。考虑到冲击波的高频特性,可忽略其衍射效应,同时,当弹性板中央受到初始冲击波作用时,绕射波的作用还没有开始,从而可将壁压传感器处的弹性板早期响应近似为无限板的情况处理。

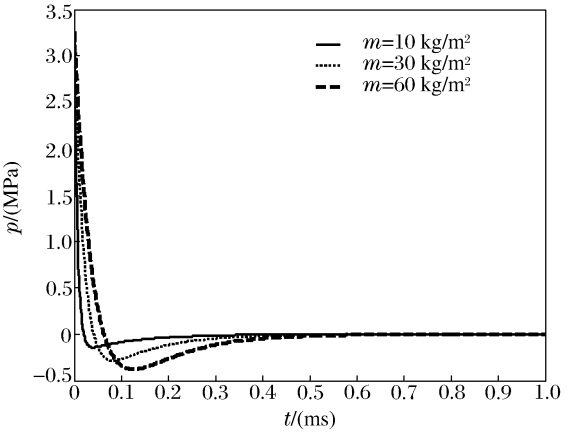


图 2　不同单位面积质量下的冲击波总压力时程曲线

Fig. 2　History of total pressure for different unit area mass of plate

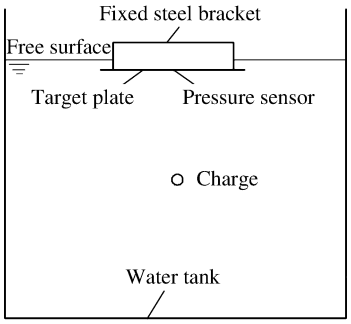


图 3　水下爆炸试验示意图

Fig. 3　A view of UNDEX experimental set-up

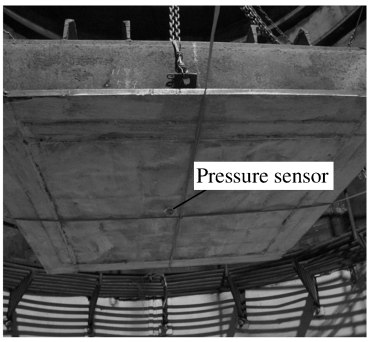


图 4　压力传感器布置图

Fig. 4　Arrangement of pressure sensor on the target plate

图 5 为钢板入射面总压力的理论值和试验值比较曲线,从中可以看出,两条压力曲线均很快进入负压区,且试验压力曲线在负压区持续时间长,这主要是因为平板流固耦合处发生空化后,空化气泡维持了低压的存在,而理论计算没有考虑空化气泡对压力的影响。具体的压力曲线参数见表 1,可以看出,试验和理论的最低负压值及其发生时刻均比较一致,而初始峰压值相差较大,主要原因是冲击波压力衰减快,例如图 5 中的理论压力曲线,$t=0$ 时压力值为 33.82 MPa,$t=3$ μs 时就衰减到 23.69 MPa,考虑到壁压传感器捕捉速度,试验压力峰值与理论峰值存在较大差别是合理的。通过比较试验结果和理论计算结果可以发现,平面波近似方法及局部空化理论在一定条件下是合理的。

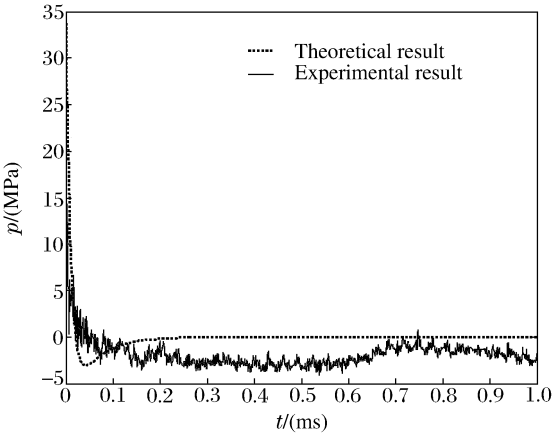


图 5　冲击波总压力的理论值和试验值

Fig. 5　Comparison of total pressure between theoretical and experimental results

表 1 冲击波参数的理论值和试验值

Table 1 Theoretical and experimental results of parameters of total pressure

Method	Peak pressure/(MPa)	Bottom pressure/(MPa)	Time point/(μs)
Experiment	22.56	−3.12	162
Theory	33.82	−3.03	43

3 区域空化

3.1 区域空化的形成

水下爆炸冲击波到达水面后，产生反射稀疏波，稀疏波与入射波叠加后形成负压区，当负压值超过水的抗拉力上限时，即会在水域形成空化现象，称为区域空化。图 6 为区域空化示意图，整个区域由上下边界构成[10]。图 7 为自由水面下，爆炸区域周围流体所受压力示意图，其中将自由水面的影响看作另外存在一个镜像爆源，稀疏波压力由镜像爆源产生，对入射波产生削弱作用。

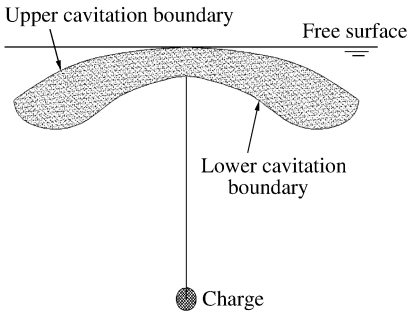


图 6 区域空化

Fig. 6 Schematic view of bulk cavitation zone

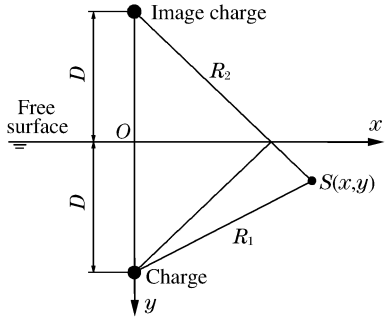


图 7 考虑自由水面影响的冲击波传播

Fig. 7 Shock wave under free surface

冲击波压力随时间变化时按指数关系衰减，有

$$p = p_{\max}\exp\left(-\frac{t-t_0}{\theta}\right) \tag{5}$$

式中：t_0 为冲击波到达测点处的初始时刻；t 为冲击波达到测点之后经历时间，$t \geqslant t_0$，在弱冲击波环境下，认为冲击波按声速传播，有 $t_0 = R/c$，c 为流体声速；$p_{\max}$、θ 的含义参见方程(1)。

对于图 7 中的测点 $S(x,y)$，根据以上冲击波理论，同时考虑静水压力 p_h 和大气压 p_a，可得到测点总压力 $\varphi(x,y,t)$ 为

$$\varphi(x,y,t) = K_1\left(\frac{W^{1/3}}{R_1}\right)^{A_1}\exp\left(-\frac{t-R_1/c}{\theta_1}\right) + p_a + p_h - K_1\left(\frac{W^{1/3}}{R_2}\right)^{A_1}\exp\left(-\frac{t-R_2/c}{\theta_2}\right) \tag{6}$$

式中：θ_1、θ_2 分别为入射波和稀疏波的衰减常数。取 $t = R_2/c$，由 $\varphi(x,y,t) = 0$ 即可确定空化区域上边界。对于空化区域下边界，取测点总正压力(考虑静水压力和大气压力)的衰减速度等于稀疏波的衰减速度，经过公式推导后，由函数 $\psi(x,y) = 0$ 确定[10]，其中

$$\psi(x,y) = -\frac{p_i}{c\theta_1}\left\{1 + \left[\frac{R_2^2 - 2D(D+y)}{R_1R_2}\right]\left(\frac{A_2R_2}{R_1} - A_2 - 1\right)\right\} + \rho_w g\left(\frac{D+y}{R_2}\right) - \frac{A_1p_i}{R_1^2}\left[R_2 - 2D\left(\frac{D+y}{R_2}\right)\right] + \frac{A_1}{R_2}(p_i + p_a + p_h) \tag{7}$$

式中：$p_i = K_1(W^{1/3}/R_1)^{A_1}\exp[-(R_2-R_1)/c\theta_1]$，$\theta_1 = K_2W^{1/3}(W^{1/3}/R_1)^{A_2}$。

3.2 数值计算及分析

根据区域空化的上下边界公式编程计算，本文分析了 TNT 炸药深度及药量的变化对空化区域的影响。

图 8 为保持爆深 $D=100$ m 不变,改变炸药质量,获得的区域空化范围的半剖面图。从中可以看出,随着炸药质量的增加,空化区域范围增大,其深度和广度均增加,且广度的增加尺度大于深度的增加尺度。

图 9 为保持炸药质量 $W=100$ kg 不变,改变炸药深度,获得的区域空化范围的半剖面图。可以看出,随着炸药深度的增加,空化区域在深度方向上尺寸减小,在广度方向上尺度增加,整个空化区域变得更加扁长。

比较以上不同情况下的空化区域,可以看出,水下爆炸冲击波形成的区域空化范围较大,形似一个悬浮于水面下一定深度的盖子,其深度方向的尺寸小于广度方向的尺寸,形成一片扁长的负压空间。

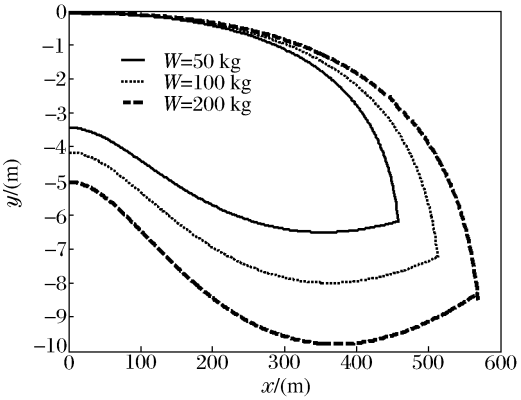


图 8　不同药量下的区域空化范围

Fig. 8　Bulk cavitation zones for different TNT charges

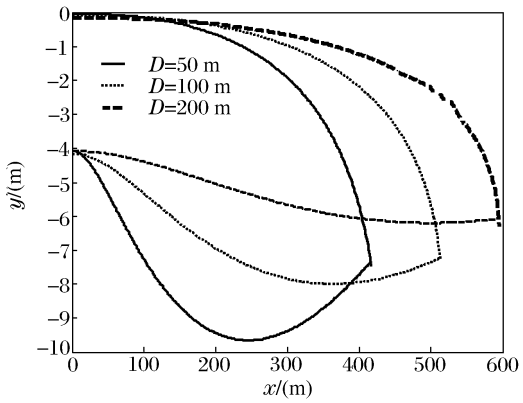


图 9　不同深度下的区域空化范围

Fig. 9　Bulk cavitation zones for TNT charges at different depths

4　结　论

(1) 冲击波压力入射到无限平板的初期,会在流固耦面处形成负压,出现局部空化。随着平板单位面积质量 m 值的增大,总压力 p 的衰减速度降低,负压峰值增大;对于同种材料的板,其厚度越大,流固耦合面处的负压峰值越大,形成空化的能力越强;厚度越小,形成负压区的速度越快,空化速度也越快。通过比较爆炸冲击试验结果与理论计算结果后发现,两者具有较好的一致性,证明了平面波近似方法及局部空化理论的合理性。

(2) 自由水面下爆炸产生的冲击波会因为反射稀疏波的作用,在水面下形成较大范围的负压区域,出现区域空化,其存在于水面下一定深度的扁长空间。保持爆深不变,随着药量的增大,空化区域的深度和广度范围均增大;保持药量不变,随着爆深的增加,空化区域在深度方向尺度减小,在广度方向尺度增大。

References:

[1] Bleich H H, Sandler I S. Interaction between Structures and Bilinear Fluids [J]. Int J Solids Struct, 1970, 6: 617-639.

[2] Geers T L. Shock Response Analysis of Submerged Structures [J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1974, 44: 17-32.

[3] Makinen K. Cavitation Models for Structures Excited by a Plane Shock Wave [J]. J Fluid Struct, 1998, 12: 85-101.

[4] Leonard D S. Fluid-Interaction and Cavitation Effects on a Surface Ship Model due to an Underwater Explosion [R]. California: Naval Postgraduate School, 1997.

[5] Stevent L W. Cavitation Effects on a Ship-Like Box Structure Subjected to an Underwater Explosion [R]. California: Naval Postgraduate School, 1998.

[6] Gu W B, Su Q L, Liu J Q, et al. Formation Process of Cavitation Region Affected by Underwater Plane Blast Shock Wave and Its Characteristics [J]. Blasting, 2004, 21(4): 8-11. (in Chinese)
顾文彬,苏青笠,刘建青,等. 水下平面爆炸冲击波作用下空化区域形成及其特征 [J]. 爆破, 2004, 21(4): 8-11.

[7] Wang L L. Stress Wave [M]. Beijing: National Defence Industry of Press, 1985: 196-201. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 196-201.

[8] Zhu C Y, Xu G S. Analysis and Study on Dealing with Blasting Wave as Planar-Wave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 455-458. (in Chinese)
朱传云,许桂生. 爆炸应力波近似处理的分析与研究 [J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 455-458.

[9] Cole R H. Underwater Explosion [M]. New Jersey: LISA, Princeton University Press, 1948.

[10] Costanzo F A, Gordon J D. An Analysis of Bulk Cavitation in Deep Water [R]. DTNSRDC, UERD Report, 1980.

On the Characteristics of Cavitation Formation Subjected to Underwater Blast Shock Wave

LI Hai-Tao, ZHU Xi, HUANG Xiao-Ming, MU Jin-Lei

(*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: On the basis of plane shock wave hypothesis, the characteristics of local cavitation and bulk cavitation formation subjected to underwater explosion were theoretically and experimentally studied. The effects of structure dimensions and shock wave parameters on the cavitation formation were analyzed theoretically. Aiming at validating the local cavitation theory, an underwater explosion experiment in a 5-m diameter columned water tank was carried out. The explosion layout was as follows: 50-g TNT charge was placed at a 1-m stand-off away from a 1-m square and 2-mm thick steel plate. Results show that different structure dimensions can affect significantly the formation of local cavitation under the same shock wave parameters, and the quantity and depth of charges play an important role in the bulk cavitation formation. The experimental results basically agree with those of theoretical analysis.

Key words: cavitation; underwater explosion; shock wave; computation; experimental study