

引用格式: 姚熊亮, 刘文韬, 张阿漫, 等. 水下爆炸气泡及其对结构毁伤研究综述[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 36-45.
YAO Xiongliang, LIU Wentao, ZHANG Aman, et al. Review of the research on underwater explosion bubbles and the corresponding structural damage[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 36-45.

水下爆炸气泡及其对结构毁伤研究综述

姚熊亮, 刘文韬, 张阿漫, 刘云龙

哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 水下爆炸, 特别是近场水下爆炸, 会对舰船结构造成严重的毁伤, 研究表明, 水下爆炸气泡将与含初始毁伤的结构产生强烈的耦合效应, 造成二次毁伤。水下爆炸气泡与自由面、壁面、弹性结构等不同边界的相互作用是流体力学和流固耦合领域的研究热点, 有很多机理性问题亟待解决。围绕水下爆炸气泡对结构的毁伤, 从实验研究、理论研究、数值研究等方面阐述该领域国内外的研究现状。在现有的研究动态中, 仍存在着不足, 一些问题仍需深入研究, 例如, 要研究水下爆炸冲击波对水中结构造成破口后, 气泡与具有初始破口的不完整边界的耦合动力学特性, 并计入结构的弹塑性、自由液面效应、气泡周围流场的可压缩性、气泡的初始形状以及气泡内部的温度变化, 探索气泡的“腔吸现象”、射流特性及其载荷规律。

关键词: 水下爆炸; 气泡; 结构毁伤; 综述

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.01.006

Review of the research on underwater explosion bubbles and the corresponding structural damage

YAO Xiongliang, LIU Wentao, ZHANG Aman, LIU Yunlong

School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: The near-field underwater explosion can cause severe damage to warships. Specifically, studies reveal strong coupling interaction between underwater explosion bubbles and the structure that are initially damaged, which could generate further damage to the structure. The interaction between underwater explosion bubbles and different boundaries, including the free surface, the seabed, and the elastic structure, is the research focus in the field of fluid mechanics and fluid-structure interaction. However, urgent problems remain unsolved. This study pays much attention to the structure damage caused by underwater explosion bubbles, namely the research status of this field, including experimental, theoretical, and numerical aspects. Particularly, the dynamic characteristics of the coupling of bubbles are studied by considering the structure elasticity, free surface effect, the compressibility of the flow field around the bubble, assuming that the underwater explosion shock wave results in structural break. Furthermore, the initial shape of the bubble and the temperature variation inside the bubble are investigated, exploring the phenomenon of "cavity suction" as well as the characteristics of the jet and the load law of the bubble.

Key words: underwater explosion; bubble; structure damage; overview

收稿日期: 2015-07-09

网络出版时间: 2016-1-19 14:55

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1430236, 51479041, 51279038)

作者简介: 姚熊亮(通信作者), 男, 1963年生, 博士, 教授。研究方向: 舰船结构动力学, 水下爆炸, 气泡动力学。

E-mail: xiongliangyao@hrbeu.edu.cn

刘文韬, 男, 1991年生, 硕士生。研究方向: 水下爆炸。E-mail: liuwentao0@hotmail.com

0 引言

作为一个基础性的研究课题,水中气泡动力学特性研究在船舶与海洋工程中占有很重要的地位,其应用范围涵盖水下爆炸气泡^[1]、螺旋桨空泡^[2-3]、可燃冰开采过程中形成的上浮气泡^[4-5]、由海底资源勘探气枪形成的高压气泡^[6]等。本文将主要针对水下爆炸过程中产生的大尺度气泡对已受到冲击波破坏的舰船结构进一步严重毁伤的相关研究进行综述。该问题是近年来研究的热点与难点,其背后的机理均为气泡与不同特性边界耦合的动态特性。随着精确制导武器的快速发展,鱼雷、水雷等武器可贴近水面舰船、潜艇等表面发生近场爆炸,爆炸产生冲击波之后紧接着会形成高温高压的气泡,气泡在收缩膨胀过程中会形成脉动压力,在气泡收缩阶段,又会坍塌产生射流。近场水下爆炸冲击波首先使得船体结构产生局部凹陷甚至是破口,随后,水下爆炸气泡在具有初始变形(破口)的船体结构附近运动,对船体结构造成二次毁伤,最终导致船体结构丧失总纵强度或者局部强度,从而使舰船丧失生命力。

目前,水下爆炸气泡与自由面、结构壁面等不同边界相互作用耦合已成为国内外业界内的研究热点,如中国船舶科学研究中心和美国的Chahine研究团队等均在研究水下爆炸气泡的动态特性。经过实验研究和数值研究,科研人员发现,气泡和自由液面、刚性壁面等不同边界的耦合依然有很多本质性的问题未被解决。这些问题的本质为气泡与复杂边界的相互作用,以及气泡在不完整边界、自由液面及反射冲击波的作用下将产生的“腔吸现象”、反射流、对射流等强非线性力学特征。虽然各国学者对水下爆炸气泡及其载荷特性进行了大量研究,但迄今为止,关于气泡与具有初始破口的船体结构相互作用的文献仍然十分少见。

水下爆炸气泡运动过程复杂,存在超近边界、不连续、大变形等诸多强非线性问题,在求解此类问题时,传统单一的有限元和边界元等方法均存在巨大的挑战。为此,本文将从实验分析、理论研究和数值研究这3个方面综述国内外关于气泡动力学的特性,以及气泡与不同边界耦合作用的研究进展与现状,旨在为水下爆炸气泡对舰船结构毁伤的相关研究提供基础性的技术支撑和参考。

1 现状分析

水下爆炸是水面舰船和潜艇生命力的主要威胁之一,不仅前期的冲击波会对结构造成毁伤,而

且后期的气泡载荷也会对结构造成更为严重的破坏。在水下爆炸中,气泡对结构的毁伤不是孤立的,其与冲击波密不可分,两者在时间上一前一后联合作用,对舰船结构造成严重毁伤。水面舰船在近场水下爆炸冲击波的作用下会产生破口,形成不完整边界,而紧随其后的水下爆炸气泡又处于复杂的流场环境中,此时,既存在有初始破口的船体结构,还存在着自由液面,而且气泡还受反射冲击波的作用。上述问题的本质为气泡与复杂边界的相互作用,气泡在不完整边界、自由液面以及反射冲击波的作用下将产生“腔吸现象”、反射流及对射流等强非线性力学特征。虽然各国学者对水下爆炸气泡及其载荷特性进行了大量研究,但迄今为止,关于气泡与具有初始破口的船体结构相互作用的文献仍然十分少见。基于舰船近场水下爆炸的复杂性,目前,国内外的研究均主要集中在近场水下爆炸作用下简单规则结构破坏形式的分析(Ramajeyathilagam等^[7], Rajendran等^[8], 张馨等^[9], 陈亮等^[10])上,而关于近场水下爆炸载荷及其对舰船结构的毁伤研究较少,关于近场爆炸形成的气泡与冲击波造成初始破口的不完整边界相互作用方面的公开文献资料更是十分罕见。

研究近场水下爆炸对舰船结构破坏毁伤的主要途径有3种:实验研究、理论研究和数值研究。近场水下爆炸实验研究具有破坏性,尤其是实船实验,代价十分昂贵,而且还要承担很大的风险。理论分析则主要局限于近场水下爆炸作用下简单规则结构的响应与破坏研究,如Wierzbicki等^[11]和Rajendran等^[12]基于能量原理对矩形方板及圆形板的分析研究。近年来,随着计算机运算能力的飞速发展和提高,数值研究已逐渐成为研究舰船近场水下爆炸的主要手段之一^[13],但现阶段的数值研究主要是利用集成封装的商业软件,如AUTODYN, LS-DYNA, MSC/DYTRAN及ABAQUS等各类有限元软件,这些商业软件的灵活性低,且无法完全弄清其内部具体的计算细节,计算精度很难保证,在解决近场水下爆炸问题时,仍会面临很大的困难与挑战。数值研究方法虽然可以解决近场水下爆炸问题,但仍需予以进一步的探索与探讨。下面,将分别从实验、理论以及数值研究方面阐述国内外在相关问题方面的研究现状,并提出需进一步研究的工作。

1.1 实验研究

实船水下爆炸实验具有严重的破坏性和不确定性,其可重复性差,过程复杂,难以开展。国外

曾多次开展过近场水下爆炸实船实验。自二战以来,以美国为代表的各海军强国进行了系列的舰船水下爆炸研究,其中,就包括近场接触爆炸实验。例如,吉田隆等^[14]针对日本在二战中受损的战舰,采用数据统计方法,对舰船的破口情况进行了数据采集,通过对数据的分析研究,总结出了舰船在近场水下爆炸时破口大小的估算公式;2005年,美国采用鱼雷等武器对一艘退役的航空母舰进行实弹攻击,得到了珍贵的实验数据;2008年,美国和澳大利亚海军通过鱼雷实弹实验,证明当在龙骨下方发生近场接触爆炸时,考虑舰船的总纵强度,舰船会产生总体结构毁伤,在一些极端情况下,舰船中部还会产生断裂。但由于舰船接触爆炸实验研究多数涉及军事秘密,公开发表的文献很少,因此无法了解具体的研究内容与成果。近年来,国内在此方面也取得了一些研究进展,如陈辉等^[15]进行了较多的舰船模型及实船爆炸实验,取得了一批珍贵的实验数据,但这些都是远场爆炸实验,气泡射流载荷未对舰船结构造成毁伤,所以有关舰船近场接触水下爆炸方面的实验研究还是比较少。

基于水下爆炸实验的成本和安全性,研究者开始寻找其他方法以产生类似的气泡。近年来,随着光测技术和电子科技的迅速发展,新材料和新工艺如雨后春笋般出现,使得水下爆炸实验测试水平得到了极大的提升,在实验中拍摄、记录气泡动力学行为变得现实可行,因而针对水下爆炸气泡的实验研究也得到了良好的开展。实验研究发现,激光气泡和电火花气泡可以被用来代替水下爆炸产生的真实气泡,由于这2种气泡的动力学行为极其相似,故在实验研究中经常被采用。Klaseboer等^[16]通过在水池中进行水下爆炸实验,拍摄记录下了气泡在自由场和靠近刚性壁面的动力学行为,完整地拍摄到了气泡坍塌产生射流的过程,为研究水下爆炸气泡提供了极有价值的影像资料。朱锡等^[17]和汪斌等^[18]利用水下高速摄影技术,研究了自由场及结构附近水下爆炸气泡的动态特性,取得了与前人一致的结论。Dadvand等^[19]和张阿漫等^[20]采用电火花气泡代替真实的炸药生成的气泡,形成了机理性的实验方法用来研究气泡的运动及其载荷特性。但常压下的电火花气泡和激光气泡的尺度远小于真实的水下爆炸气泡,与真实的水下爆炸气泡存在着较大差异。为此,Zhang等^[21]在减压罐中进行了电火花气泡实验,以使实验中的气泡尺寸增加,更重要的是,其可以与真实水下爆炸气泡实现浮力相似,即

气泡的射流和迁移规律基本一致。

国外学者针对简单的规则结构进行了许多有关水下爆炸的基础性实验研究。Brett等^[22]最早采用小当量的水下爆炸实验,研究了其对水中圆柱壳的动态响应,发现在近场爆炸过程中,气泡作用下结构的响应比冲击波阶段的大。Klaseboer等^[16]在Brett等^[22]的基础之上,以气泡运动和载荷特性为研究重点,采用实验和数值的方法研究了水下爆炸气泡与水中钢板的相互作用机理。Brett等^[23]采用类似的实验方法,研究了水下爆炸对水中圆柱壳结构的损伤特性,并分析了在此过程中,气泡与圆柱壳的相互作用及气泡载荷对冲击损伤的影响。

有关近场水下爆炸及其对舰船结构毁伤破坏规律的实验研究,国内的相关文献资料也较少。陈继康等^[24]开展了舰船接触爆炸冲击环境研究,得出舰船最弱的部位是焊缝及其焊接残余应力区。朱锡等^[25]针对带有加强筋的矩形船体板架的近场水下爆炸开展了实验,总结并修正了带加强筋板的破口长度估算公式。朱锡等^[26]对舰船舷侧防雷舱结构模型进行了水下爆炸实验,结果表明,舰船结构对近场水下爆炸的防护能力可以通过设计水下防雷舱来予以大幅提高。施兴华等^[27]开展了在近场水下爆炸作用下多层板壳防护结构的动态响应研究,得到了各层板的破坏形式并分析了其毁伤原因。汪斌等^[28]考虑了边界效应和非球状初始条件,针对近场水下爆炸气泡脉动、射流载荷开展了实验研究。此外,李海涛和朱锡等^[29-31]、黄超和汪斌等^[32-33]及王树山等^[34]也对水下爆炸气泡及其对结构的毁伤进行了深入的实验研究。以上研究多偏重于工程应用研究,而有关近场接触爆炸载荷特征方面的研究则较少,在水下爆炸过程中,产生的冲击波和气泡会相互作用、相互影响,所以冲击波使结构出现破口之后的气泡脉动、射流等载荷特性需要进行更深入的研究,关于近场水下爆炸气泡的动力学特性及其对结构的毁伤规律也需要进行更深入的探讨。

1.2 理论研究

水下爆炸气泡理论研究主要是以简单的模型作为研究对象。在初期的研究工作中,主要采用理论与实验研究相结合的方法,这样有助于对简单模型研究的开展,揭示内在的机理和规律。

针对水下爆炸气泡动力学理论的分析研究在很久之前就已经存在了。早在1859年,Besant^[35]就尝试通过源和汇来描述气泡球形脉动过程中的

流场特性。在此基础上,Rayleigh^[36]结合气泡内部气体的状态方程,得到了球形气泡脉动的解析解,即经典的Rayleigh方程。在推导这一理论的过程中,引入了一些合理的假设。首先,认为气泡周围是不可压缩的理想流体,采用势流理论来描述流场的运动过程。对于水下爆炸气泡,通常尺度较大,结合其运动速度,可以认为属于高雷诺数问题,因此,在其运动过程中粘性力相对于惯性力是小量,可以忽略;其次,在除去气泡接近最小体积的极短时间内,气泡壁的速度远小于水中的声速,所以在气泡第1个周期内将流体看作不可压缩流体也是合理的。因此,尽管当时针对的研究背景主要为空化气泡,但这些假设对于水下爆炸气泡也是适用的,并且奠定了后续采用边界元方法求解气泡动力学问题的理论基础。随后,研究者分别考虑表面张力、粘性、弱可压缩性^[37-39]以及热传导和质量耗散^[40-41]的影响,得到改进的Rayleigh模型,通过对比,表明这些因素均对气泡脉动第1个周期的运动影响不大。随着研究的深入,研究者发现,对于水下爆炸这种大尺度气泡,浮力的作用十分明显,其会使气泡在脉动过程中产生十分明显的上浮运动,因此在深度较小时,这种上浮会显著改变气泡周围的流体静压力,从而间接影响气泡的脉动过程。为此,研究者在球形假设下,考虑了由浮力引起的气泡上浮的影响。其中,比较典型的是Wilkerson^[42]提出的气泡动力学模型。Klaseboer和Khoo^[43]在Rayleigh方程的基础上,引入了等效气泡半径和等效气泡壁速度,将其扩展到了壁面、自由面附近以及重力场中等非球形气泡运动的情形中,并从气泡壁速度的角度出发,解释了边界对气泡脉动周期的影响规律。对于水下爆炸气泡膨胀与收缩阶段的压力载荷,Geers和Hunter^[44]给出了比较精确的估算公式。Liu等^[45]通过势流理论推导了考虑气泡变形和迁移特性的奇点等效方法,并给出了修正的气泡脉动载荷计算方法。

以上气泡动力学模型均在不可压缩势流的假设下成立,然而实验表明,当考虑气泡多次脉动运动特性时,周围流体的这种弱可压缩性是不可忽略的。可压缩性的存在会使气泡在最小体积附近向外辐射波能,从而造成系统的能量损耗,使气泡脉动的最大半径和脉动压力峰值逐次减小,尤其是对强度参数较大的水下爆炸气泡,这种衰减更为明显,甚至有研究者通过高速摄影装置还捕捉到了气泡坍塌至最小体积附近时向外辐射的冲击波。对此,研究者们尝试通过不同的方法考虑气

泡周围流场可压缩性的影响^[37-38,46-49]。早期的Keller-Herring模型是将气泡周围流体假设为声学介质,并采用线性化的波动方程代替拉普拉斯方程来求解气泡的运动^[48]。Geers等^[44]同样基于声学假设,在球坐标系下推导了考虑内部气体可波动特性和气泡在浮力作用下迁移特性的一维双渐近法,并采用水下爆炸气泡的大量实验数据对其进行了修正,该方法在水下爆炸气泡脉动压力载荷的工程计算中被广泛使用。在此基础上,Zhang等^[50]从三维波动方程出发,在时域角度将双渐近法推广到了非球状气泡动力学边界元方法中,得到的结果与理论模型吻合良好。Prosperetti和Lezzi^[37-38]则通过在流体的状态方程中引入“焓”,并结合摄动理论分别得到了考虑可压缩性的一阶理论和二阶理论,在二阶理论的基础上,Wang等^[51-53]建立了可压缩流体中非球形气泡运动边界元数值模型理论。

经过不断的努力和改进,在理论研究方面,气泡动力学有了长足的进步。尽管仍有着明显的局限性,例如,无法考虑气泡与复杂边界的耦合特性,仅能考虑球形或偏离球形不大的非球状运动等,但对于气泡动力学实验和数值研究的发展及气泡运动机理的揭示有着重要的推动作用。

1.3 数值研究

近场水下爆炸过程由于涉及几何大变形、边界、材料等强非线性现象,对于稍微复杂的边界来说,即使经过多次简化,理论分析的难度也很大,数值模拟同样面临着极大的困难。所以,现阶段大多数的研究都是采用数值模拟与理论分析相结合的方法,在理论分析的基础上建立相应的数值模型。

1.3.1 气泡动力学模型

在基于势流理论的边界元气泡动力学数值模型中,假设气泡周围的流体为理想不可压缩。将拉格朗日方程的时间积分与边界积分方程的空间积分结合起来形成的混合欧拉-拉格朗日(MEL)方法是气泡动力学研究中最成功的一种方法,在水下爆炸这类由边界大变形引起的强非线性问题中,表现出了较高的精度和稳定性。后续的气泡动力学数值研究大多是在此基础上,采用各种新的数值和理论方法对MEL方法进行改进。Lenoir^[54]尝试采用这一技术计算了靠近自由面和刚性壁面的非球形气泡的动态特性。Blake和Gibson^[55]进行了若干改进,并计算了自由面附近气泡的动态特性,其结果与实验结果吻合良好,表

明MEL方法可以用来模拟强非线性的气泡运动问题。Blake和Gibson^[56]还在计算刚性壁面附近的气泡运动时,引入了通过限制每个时间增量步上气泡表面最大速度势增量的方式,用以控制时间步长,其在保证数值稳定性的前提下极大地提高了MEL方法在气泡动力学中的计算效率。Harris^[57]在其基础上,采用线性四节点单元建立了三维气泡动力学模型,计算了固定的球和圆柱附近气泡被射流穿透前的动态特性。但在三维气泡模拟中,网格的优化不再像轴对称或是二维模型一样方便,常出现网格过度畸变的问题从而使计算终止。对此,Zhang等^[58]提出了自适应网格优化技术,即在网格过于集中的位置对单元进行合并,而在网格稀疏的位置则对单元进行拆分以保证网格质量,效果较好,但由于其在网格优化过程中不断改变了节点数,致使编程极其复杂。Wang等^[59]则针对这一问题引入了弹性网格技术(Elastic mesh technique),即将节点之间的连接看作弹性的“杆”,通过弹性连接的作用,使整个网格内部的弹性势能最小以得到优化的网格。这一技术由于其简便性和较好的效果而被广泛应用于后续的气泡动力学研究中^[16,58-65],极大地提高了气泡动力学模型的数值稳定性。

一般来说,气泡诱导的最大压力发生在气泡射流之后(气泡最小体积附近),然而,在气泡射流发生以后,气泡从单连通域转化为双连通域,形成了一个环状气泡,给边界元模拟带来了很大的困难。为此,Best^[66]提出了“涡面模型”,Wang等^[67]提出了“涡环模型”,这两者均可以处理流场势函数多值的问题,但前者较难处理三维问题,而后者则具有更强的适应性^[68]。Li等^[69]基于“涡环模型”,采用辅助函数法计算了气泡射流在结构表面引起的载荷,发现在射流压力时历曲线上可能会出现多个峰值,其中第1个峰值是由气泡射流造成,其后的峰值与气泡坍塌、气泡迁移以及飞溅现象有关。另外,Zhang等^[70]提出了“多涡环模型”,对环状气泡的撕裂现象进行了相关研究,发现环状气泡撕裂时也会在流场中产生局部高压区。

除此之外,边界元方法还可以与其他数值方法结合,以求解更为复杂的气泡动力学问题。例如: Tan等^[71]结合Level-set技术和边界元方法来计算气泡动力学,用以改善边界更新问题; Zhang等^[72]和张奇等^[73]分别采用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)和任意拉格朗日—欧拉(Arbitrary Lagrange—Euler, ALE)方法计算了炸药初始爆轰阶段,并用边界元方法

(Boundary Element Method, BEM)计算了后续的气泡运动过程,得到的结果与实验结果吻合良好; Klaseboer等^[16]和Zhang等^[74]通过将BEM与非线性有限元程序耦合,计算了水下爆炸气泡与弹塑性结构的相互作用。以上应用表明,边界元方法具有较高的扩展性,能方便地与其他方法结合来求解复杂的问题。

除边界元方法外,苏怡然等^[75]采用N-S方程的有限差分格式,并结合MAC法^[76]对水下爆炸的气泡脉动过程进行了数值仿真研究,精确处理了复杂的自由面边界。Popinet等^[77]采用有限体积法(FVM)求解不可压的N-S方程,采用MAC法捕捉气泡界面,数值研究了粘性对水下爆炸气泡在近壁面处收缩产生射流的影响。Terashima等^[78]采用显性的界面追踪法(Explicit front-tracking method)捕捉流体界面,并基于虚拟流法(Ghost-fluid method)定义界面条件,模拟了可压缩流体中冲击波和气泡运动的耦合关系。Han等^[79]采用基于FVM和流体体积函数(VOF)的开源代码,数值研究了2个激光气泡的相互作用。

1.3.2 气泡与结构耦合动力学模型

水下爆炸气泡及其对结构毁伤的问题是气泡动力学中一个重要的研究方向,即流固耦合问题,该问题的本质就是流体载荷与结构响应之间的相互作用关系。由于两者之间的耦合关系,使得该问题变得非常困难、复杂。在采用基于势流理论与结构的流固耦合方面,有2个难点,分别是流固交界面的处理和结构上流体载荷的计算。对于流固交界面的处理,涉及交界处满足2个流体力学边界条件的过约束问题,Wang^[80]提出了一种结合节点拆分方法和集中奇点的边界元方法的解决途径;对于流体载荷计算,由于载荷的大小与结构响应之间存在双向的耦合效应,因此与传统的刚性固定结构表面载荷的求解有所区别。然而,针对气泡动力学本身,这类研究多直接采用球形气泡动力学模型,而忽略了结构的存在对气泡运动的影响。比较典型的研究方法是结合球形气泡模型和Morrison方法,计算舰船及潜艇等细长体的剖面受力问题,不过,在这方面的进展主要是更为科学的球形气泡动力学模型的提出。例如,早期的工作均是在不可压缩假设下,且忽略了自由面效应的影响。Wilkerson^[81]和Stettler^[82]采用考虑自由面效应的气泡动力学模型,计算了水面舰船和潜艇结构的鞭状运动特性,但这些研究均是在结构的线弹性假设下进行的。这一套流固耦合方法对后续的研究具有很大的指导意义,例如,李

玉节等^[83]、Zhang和Zong^[84]采用相似的方法研究了舰船产生的鞭状运动中的刚体运动成分。Zong等^[85-87]结合以上方法和船体梁刚塑性模型,分析了舰船在水下爆炸气泡载荷下的总体损伤特性。董海等^[88]采用二阶双渐近方法(DAA2)代替Morrison模型,计算了结构湿表面的流体载荷,得到了可考虑实际潜艇界面形状的鞭状运动分析方法,较之前的研究有明显的进步。李健等^[89]研究了在水下柱形装药冲击载荷作用下,圆柱壳结构的动力响应过程,其中采用流固耦合方法处理了流场边界,通过对比,发现其计算结果与实验结果吻合良好。汪浩等^[90]计算研究了近场非接触水下爆炸中,内加筋圆柱壳结构在气泡脉动压力载荷和气泡射流冲击载荷作用下的毁伤特性,并分析了结构尺寸、爆距和装药方位等变量因素对结构破坏特性等规律的影响。刘云龙^[91]以实际尺寸舰船模型研究了其与水下爆炸气泡的耦合作用,分析了舰船处于静水、波峰和波谷3种工况下舰船的总纵强度问题。

以上研究均是在结构的运动对流场的扰动较小的假设下进行的,因而可以忽略边界效应对气泡运动的影响,而完全考虑流固耦合的气泡动力学的研究则较少,多是以波浪对浮体的作用为研究背景的理论 and 数值研究。

2 结 论

目前,随着水中兵器的发展,舰船遭遇近场水下爆炸的概率在逐渐增大,各军事强国越来越多地开始关注近场水下爆炸对舰船结构的毁伤特性。但由于舰船近场水下爆炸的复杂性,故较少采用实验研究的方法,特别是在采用实船实验方面,更是凤毛麟角。在理论和数值研究方面,主要的研究还局限于相对简单的模型,数值方法也主要依赖于封装的进口通用有限元软件,求解精度很难保证。总之,虽然国内外许多研究学者均针对近场水下爆炸开展了大量研究,但还是存在着一些不足之处:

1) 在研究近场爆炸对结构的破坏时,目前更多的是关注冲击波对结构的毁伤特性,而有关气泡脉动压力载荷和射流冲击载荷对舰船破坏规律的研究则甚少。

2) 在研究近场水下爆炸气泡时,需要考虑计入反射冲击波的作用、气泡的初始形状影响、气泡内部温度变化影响,以及周围流场可压缩性的影响,以对气泡动力学行为开展进一步的探索。

3) 在近场水下爆炸气泡研究中,要考虑冲击

波的影响。冲击波对结构会造成初始破口,形成不完整边界,气泡在不完整边界附近会形成“腔吸现象”,而有关这方面的研究,公开发表的文献十分少见。

4) 现阶段在解决与分析近场水下爆炸问题时,多数文献并未考虑自由液面、水底和弹塑性结构的边界效应。

5) 在研究近场水下爆炸气泡对结构的毁伤时,需计入结构的弹塑性,建立气泡与不完整边界的耦合效应,探索气泡的反射流载荷和对射流载荷特性,以及其对结构的毁伤规律。

6) 有关近场水下爆炸载荷的实验研究,特别是冲击波过后的气泡动力学特性及其载荷特性方面的基础性实验研究,尚需加强。

针对以上存在的问题和不足,以后的研究可针对近场水下爆炸,在计入气泡的初始条件、流场的可压缩性、结构的弹塑性以及冲击波作用下的初始损伤的情况下,建立更加完善的水下爆炸气泡与结构的耦合动力学模型,为近场水下爆炸的相关研究提供理论参考与基础性的技术支撑。

参考文献:

- [1] 崔杰. 近场水下爆炸气泡载荷及对结构毁伤试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [2] HSIAO C T, CHAHINE G L. Effect of a propeller and gas diffusion on bubble nuclei distribution in a liquid[J]. *Journal of Hydrodynamics(Ser. B)*, 2012, 24(6): 809-822.
- [3] JI B, LUO X W, WU Y L, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 51: 33-43.
- [4] 李帅,孙龙泉,张阿漫. 水中上浮气泡动态特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 287-299.
LI Shuai, SUN Longquan, ZHANG Aman. Dynamic behavior of rising bubble[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 287-299.
- [5] 李帅,张阿漫. 上浮气泡在壁面处的弹跳特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 256-262.
LI Shuai, ZHANG Aman. Study on a rising bubble bouncing near a rigid boundary[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5): 256-262.
- [6] 叶亚龙,李艳青,张阿漫. 基于势流理论的气枪气泡远场压力子波特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 263-272.
YE Yalong, LI Yanqing, ZHANG Aman. Study of far-field pressure wavelet of air-gun bubble based on

- potential flow theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5): 263–272.
- [7] RAMAJEYATHILAGAM K, VENDHAN C P. Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(6): 699–719.
- [8] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion—a review [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 1945–1963.
- [9] 张馨, 王善, 陈振勇, 等. 水下接触爆炸作用下加筋板的动态响应分析[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(2): 257–260.
ZHANG Xin, WANG Shan, CHEN Zhenyong, et al. Research on dynamic responses of stiffened-plate under underwater oscillatory explosion [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(2): 257–260.
- [10] 陈亮, 舒雄, 朱锡, 等. 冲击波和气泡载荷联合作用下加筋板塑性变形[J]. *海军工程大学学报*, 2011, 23(6): 8–13.
CHEN Liang, SHU Xiong, ZHU Xi, et al. Plastic deformation of stiffened plate subjected to loading of shock wave and bubble [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2011, 23(6): 8–13.
- [11] WIERZBICKI T, FATT M S H. Deformation and perforation of a circular membrane due to rigid projectile impact [M]. *Dynamic Response of Structures to High Energy Excitation*, 1991, 225: 73–83.
- [12] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(4): 373–386.
- [13] 湛勇, 汪玉, 沈荣瀛, 等. 舰船水下爆炸数值计算方法综述[J]. *船舶工程*, 2007, 29(4): 48–52.
CHEN Yong, WANG Yu, SHEN Rongying, et al. Overview on the numerical implementation of the underwater explosion of ships [J]. *Ship Engineering*, 2007, 29(4): 48–52.
- [14] 吉田隆, 黄骏德. 二次世界大战初期日本海军舰船在炸弹攻击下的损伤实例分析[J]. *舰船科学*, 1990, 43(5): 70.
- [15] 陈辉, 李玉节, 潘建强, 等. 水下爆炸条件下不同装药对水面舰船冲击环境的影响试验研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 16–20.
CHEN Hui, LI Yujie, PAN Jianqiang, et al. Tests for influence of different charges in UNDEX on shock environment of surface warships [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 16–20.
- [16] 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]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 537: 387–413.
- [17] 朱锡, 牟金磊, 洪江波, 等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(4): 365–368.
ZHU Xi, MU Jinlei, HONG Jiangbo, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(4): 365–368.
- [18] 汪斌, 张远平, 王彦平. 水中爆炸气泡脉动现象的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(6): 572–576.
WANG Bin, ZHANG Yuanping, WANG Yanping. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(6): 572–576.
- [19] DADVAND A, DAWOODIAN M, KHOO B C, et al. Spark-generated bubble collapse near or inside a circular aperture and the ensuing vortex ring and droplet formation [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(5): 657–666.
- [20] 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.
ZHANG Aman, WANG Shiping, BAI Zhaohong, et al. Experimental study on bubble pulse features under different circumstances [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1): 71–83.
- [21] ZHANG A M, CUI P, CUI J, et al. Experimental study on bubble dynamics subject to buoyancy [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 776: 137–160.
- [22] BRETT J M, YIANNAKOPOULOS G, VAN DER SCHAAP P J. Time-resolved measurement of the deformation of submerged cylinders subjected to loading from a nearby explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(9): 875–890.
- [23] BRETT J M, YIANNAKOPOULOS G. A study of explosive effects in close proximity to a submerged cylinder [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(4): 206–225.
- [24] 陈继康, 岳茂裕. 舰艇接触爆炸冲击环境和近舰水下爆炸破口模型试验[J]. *舰船论证参考*, 1993(2): 1–8.
- [25] 朱锡, 白雪飞, 黄若波, 等. 船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验[J]. *中国造船*, 2003, 44(1): 46–52.
ZHU Xi, BAI Xuefei, HUANG Ruobo, et al. Crevasse experiment research of plate membrane in vessels subjected to underwater contact explosion [J]. *Shipbuilding of China*, 2003, 44(1): 46–52.
- [26] 朱锡, 张振华, 刘润泉, 等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(2): 133–139.

- ZHU Xi, ZHANG Zhenhua, LIU Runquan, et al. Experimental study on the explosion resistance of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(2): 133-139.
- [27] 施兴华, 张婧, 王善. 水下接触爆炸载荷作用下多层板壳破坏概率分析[J]. *弹道学报*, 2009, 21(1): 1-4, 18.
- SHI Xinghua, ZHANG Jing, WANG Shan. Destroy probability of multilayer plate-shell structure subjected to underwater contact explosions [J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 1-4, 18.
- [28] 汪斌, 张远平, 王彦平. 水中爆炸气泡与水底边界相互作用的水射流现象[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(3): 250-255.
- WANG Bin, ZHANG Yuanping, WANG Yanping. Water jet phenomena induced by the interaction between underwater explosion bubbles and water bottom boundaries [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(3): 250-255.
- [29] 李海涛, 张永坤, 张振海. 近场水下爆炸作用下箱形梁整体损伤特性研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(5): 611-616.
- LI Haitao, ZHANG Yongkun, ZHANG Zhenhai. Damage characteristics of box-like beam as a bulk subjected to underwater explosion in near-field [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(5): 611-616.
- [30] 黄晓明, 朱锡, 牟金磊, 等. 圆柱壳在水下爆炸作用下鞭状响应试验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31(10): 1278-1285.
- HUANG Xiaoming, ZHU Xi, MU Jinlei, et al. Study on the whipping response of a stiffened cylindrical shell in an underwater explosion [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, 31(10): 1278-1285.
- [31] 朱锡, 李海涛, 牟金磊, 等. 水下近距爆炸作用下船体梁的动态响应特性[J]. *高压物理学报*, 2010, 24(5): 343-350.
- ZHU Xi, LI Haitao, MU Jinlei, et al. Dynamic response characteristics of ship-like beam subjected to underwater explosion in near field [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(5): 343-350.
- [32] 黄超, 汪斌, 刘仓理, 等. 柱形装药水中爆炸气泡的形态演变[J]. *高压物理学报*, 2011, 25(3): 235-241.
- HUANG Chao, WANG Bin, LIU Cangli, et al. On the shape evolution of underwater explosion bubbles by cylindrical charges [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(3): 235-241.
- [33] 汪斌, 王彦平, 张远平. 有限水域气泡脉动实验方法研究[J]. *火炸药学报*, 2008, 31(3): 32-35.
- WANG Bin, WANG Yanping, ZHANG Yuanping. A method of studying bubble pulses in a confined water area [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(3): 32-35.
- [34] 王树山, 李梅, 马峰. 爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 231-240.
- WANG Shushan, LI Mei, MA Feng. Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(19): 231-240.
- [35] BESANT W H. *Hydrostatics and hydrodynamics* [M]. London: Cambridge University Press, 1859.
- [36] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. *Philosophical Magazine*, 1917, 34: 94-98.
- [37] PROSPERETTI A, LEZZI A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 1: first-order theory [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 168: 457-478.
- [38] LEZZI A, PROSPERETTI A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 2: second-order theory [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 185: 289-321.
- [39] GILMORE F R. *The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid* [M]. Pasadena, CA: California Institute of Technology, 1952.
- [40] STOREY B D, SZERI A J. A reduced model of cavitation physics for use in sonochemistry [J]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 457(2011): 1685-1700.
- [41] STOREY B D, SZERI A J. Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry [J]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 456(1999): 1685-1709.
- [42] WILKERSON S. A boundary integral approach for three-dimensional underwater explosion bubble dynamics [R]. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, 1992.
- [43] KLASEBOER E, KHOO B C. A modified Rayleigh-Plesset model for a non-spherically symmetric oscillating bubble with applications to boundary integral methods [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2006, 30(1): 59-71.
- [44] GEERST L, HUNTER K S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111(4): 1584-1601.
- [45] LIU Y L, ZHANG A M, TIAN Z L. Approximation of underwater explosion bubble by singularities based on BEM [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 75(1): 46-52.
- [46] COLE R H. *Underwater explosions* [M]. Princeton,

- NJ, USA: Princeton University Press, 1948.
- [47] HERRING C. Theory of the pulsations of the gas bubble produced by an underwater explosion[M]. Columbia: Columbia University, Division of National Defense Research, 1941.
- [48] KELLER J B, KOLODNER I I. Damping of underwater explosion bubble oscillations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(10): 1152–1161.
- [49] GEERS T L, PARK C K. Optimization of the G&H bubble model[J]. *Shock and Vibration*, 2005, 12(1): 3–8.
- [50] ZHANG A M, WANG S P, WU G X. Simulation of bubble motion in a compressible liquid based on the three dimensional wave equation [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2013, 37(9): 1179–1188.
- [51] WANG Q X, BLAKE J R. Non-spherical bubble dynamics in a compressible liquid. Part 1: travelling acoustic wave[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 659: 191–224.
- [52] WANG Q X, BLAKE J R. Non-spherical bubble dynamics in a compressible liquid. Part 2: acoustic standing wave[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 679: 559–581.
- [53] WANG Q X. Non-spherical bubble dynamics of underwater explosions in a compressible fluid[J]. *Physics of Fluids (1994–present)*, 2013, 25(7): 072104.
- [54] LENOIR M. Calculnumérique de l'implosion d'une bulle de cavitation au voisinage d'une paroi ou d'une surface libre [J]. *Journal de Mécanique*, 1976(5): 725–751.
- [55] BLAKE J R, GIBSON D C. Growth and collapse of a vapour cavity near a free surface[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 111: 123–140.
- [56] BLAKE J R, GIBSON D C. Cavitation bubbles near boundaries [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1987, 19(1): 99–123.
- [57] HARRIS P J. A numerical model for determining the motion of a bubble close to a fixed rigid structure in a fluid[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1992, 33(9): 1813–1822.
- [58] ZHANG Y L, YEO K S, KHOO B C, et al. 3D jet impact and toroidal bubbles[J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 166(2): 336–360.
- [59] WANG C, KHOO B C, YEO K S. Elastic mesh technique for 3D BIM simulation with an application to underwater explosion bubble dynamics [J]. *Computers & Fluids*, 2003, 32(9): 1195–1212.
- [60] KLASEBOER E, KHOO B C, HUNG K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(4): 395–412.
- [61] ZHANG A M, WANG S P, HUANG C, et al. Influences of initial and boundary conditions on underwater explosion bubble dynamics [J]. *European Journal of Mechanics–B/Fluids*, 2013, 42: 69–91.
- [62] HAN R, ZHANG A M, LI S. Three-dimensional numerical simulation of crown spike due to coupling effect between bubbles and free surface [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(3): 369–381.
- [63] NI B Y, ZHANG A M, WANG Q X, et al. Experimental and numerical study on the growth and collapse of a bubble in a narrow tube [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(5): 1248–1260.
- [64] 刘云龙, 张阿漫, 王诗平, 等. 基于边界元法的气泡同波浪相互作用研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(22): 263–270.
- LIU Yunlong, ZHANG Aman, WANG Shiping, et al. Research on interaction between bubble and surface waves based on BEM [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 263–270.
- [65] WANG C, KHOO B C. An indirect boundary element method for three-dimensional explosion bubbles [J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, 194(2): 451–480.
- [66] BEST J P. The formation of toroidal bubbles upon the collapse of transient cavities [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 251: 79–107.
- [67] WANG Q X, YEO K S, KHOO B C, et al. Nonlinear interaction between gas bubble and free surface [J]. *Computers & Fluids*, 1996, 25(7): 607–628.
- [68] ZHANG A M, LIU Y L. Improved three-dimensional bubble dynamics model based on boundary element method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2015, 294: 208–223.
- [69] LI S, LI Y B, ZHANG A M. Numerical analysis of the bubble jet impact on a rigid wall [J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 50: 227–236.
- [70] ZHANG A M, LI S, CUI J. Study on splitting of a toroidal bubble near a rigid boundary [J]. *Physics of Fluids (1994–present)*, 2015, 27(6): 062102.
- [71] TAN K L, KHOO B C, WHITE J K. A level set-boundary element method for the simulation of underwater bubble dynamics [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2008, 30(2): 549–571.
- [72] ZHANG A M, YANG W S, HUANG C, et al. Numerical simulation of column charge underwater explosion based on SPH and BEM combination [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 71: 169–178.
- [73] 张奇, 张若京. ALE方法在爆炸数值模拟中的应用 [J]. *力学季刊*, 2006, 26(4): 639–642.
- ZHANG Qi, ZHANG Ruoqing. Numerical simulation

- of explosion using ALE method[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2006, 26(4): 639-642.
- [74] ZHANG A M, ZENG L Y, CHENG X D, et al. The evaluation method of total damage to ship in underwater explosion[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(4): 240-251.
- [75] 苏怡然, 唐文勇, 郑绍文, 等. 基于欧拉单元的水下气泡高效数值仿真算法研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(23): 32-37.
- SU Yiran, TANG Wenyong, ZHENG Shaowen, et al. A high efficiency Eulerian numerical method for the simulation of underwater bubbles[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(23): 32-37.
- [76] HAWKER N A, VENTIKOS Y. Interaction of a strong shockwave with a gas bubble in a liquid medium: a numerical study[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 701: 59-97.
- [77] POPINET S, ZALESKI S. Bubble collapse near a solid boundary: a numerical study of the influence of viscosity[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 464: 137-163.
- [78] TERASHIMA H, TRYGGVASON G. A front-tracking/ghost-fluid method for fluid interfaces in compressible flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(11): 4012-4037.
- [79] HAN B, KÖHLER K, JUNGNICHEL K, et al. Dynamics of laser-induced bubble pairs[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 771: 706-742.
- [80] WANG Q X. Unstructured MEL modelling of nonlinear unsteady ship waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 2005, 210(1): 368-385.
- [81] WILKERSON S A. Elastic whipping response of ships to an underwater explosion loading[D]. Washington, DC: George Washington University, 1985.
- [82] STETTLER J W. Damping mechanisms and their effects on the whipping response of a submerged submarine subjected to an underwater explosion[R]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 1995.
- [83] 李玉节, 张效慈, 吴有生, 等. 水下爆炸气泡激起的船体鞭状运动[J]. *中国造船*, 2001, 42(3): 1-7.
- LI Yujie, ZHANG Xiaoci, WU Yousheng, et al. Whipping response of ship hull induced by underwater explosion bubble[J]. *Shipbuilding of China*, 2001, 42(3): 1-7.
- [84] ZHANG N, ZONG Z. The effect of rigid-body motions on the whipping response of a ship hull subjected to an underwater bubble[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(8): 1326-1336.
- [85] ZONG Z. Dynamic plastic response of a submerged free-free beam to an underwater gas bubble[J]. *Acta-Mechanica*, 2003, 161(3/4): 179-194.
- [86] ZONG Z. A hydroplastic analysis of a free - free beam floating on water subjected to an underwater bubble[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20(3): 359-372.
- [87] 张弩, 宗智. 水下爆炸气泡载荷对舰船的总毁伤研究[J]. *中国造船*, 2012, 53(3): 28-39.
- ZHANG Nu, ZONG Zhi. Global damage of ship hull subjected to underwater explosion bubble loading[J]. *Shipbuilding of China*, 2012, 53(3): 28-39.
- [88] 董海, 刘建湖, 吴有生. 水下爆炸气泡脉动作用下细长加筋圆柱壳的鞭状响应分析[J]. *船舶力学*, 2007, 11(2): 250-258.
- DONG Hai, LIU Jianhu, WU Yousheng. Whipping response analysis of slender stiffened cylindrical shell subjected to underwater explosion with bubble pulse[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 11(2): 250-258.
- [89] 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 Jian, RONG Jili. 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.
- [90] 汪浩, 王先洲, 刘均, 等. 水下爆炸气泡对内加筋圆柱壳结构毁伤机理分析[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 32(6): 111-115.
- WANG Hao, WANG Xianzhou, LIU Jun, et al. Damage mechanism analysis of inner-stiffened cylindrical shell subjected to underwater explosion bubble[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 32(6): 111-115.
- [91] 刘云龙. 水下爆炸气泡与复杂边界耦合特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.