

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.021

水下爆炸气泡动态特性的研究进展*

段超伟, 宋 浦, 胡宏伟, 杨 青, 冯海云
(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘 要: 水下爆炸气泡载荷是造成舰船结构整体损伤的主要原因, 研究水下爆炸气泡动态特性对水中兵器研发和舰船防护等方面至关重要。从水下爆炸气泡脉动的载荷特性出发, 综述了气泡动力学理论、实验和数值模拟三方面的研究进展, 总结气泡非球状坍塌运动过程、气泡与不同结构表面耦合作用以及自由场中多气泡耦合作用等问题的典型研究成果。在现有研究成果的基础上, 提出应建立综合考虑气泡内部因素和水中不同环境因素的气泡运动力学模型; 针对非理想炸药水中爆炸气泡运动特性规律开展更系统的实验研究; 进一步加强近边界条件下多气泡耦合过程的研究工作等建议。

关键词: 爆炸力学; 水下爆炸; 气泡; 脉动; 动态特性

中图分类号: O383⁺.1; TJ610.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0140-12

Research Progress on Dynamic Characteristics of Underwater Explosion Bubbles

DUAN Chao-wei, SONG Pu, HU Hong-wei, YANG Qing, FENG Hai-yun
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The bubble load caused by underwater explosion is the main reason for the overall damage of ship structure. Studying the dynamic characteristics of underwater explosion bubbles is crucial to the research of underwater weapon development and ship protection. Starting from the loading characteristics bubble pulsation in underwater explosion, the research progress of bubble dynamics theory, experiment and numerical simulation is reviewed. Meanwhile, the typical research results of the bubble non-spherical collapse process, bubble coupling with different structural surfaces and multi-bubble coupling in free field and the fragmentation of multiple bubbles in water after interaction are summarized. On the basis of the existing research results, it is suggested that the bubble motion mechanics model should be established considering the factors inside the bubble and different environmental factors in water, a more systematic experimental study should be carried out on the movement characteristics of bubbles in non-ideal explosive water, the research of multi-bubble coupling process under near-boundary conditions should be further strengthened.

Key words: explosive mechanics; underwater explosion; bubbles; pulsation; dynamic characteristics

1 概述

水下爆炸会对舰船等水中结构造成强烈毁伤, 严重危及舰船的生命力和作战能力, 因此水下爆炸对舰船结构的毁伤特性研究始终是国内外水中兵器装备领域的重要研究课题^[1-8]。水下爆炸载荷包括冲击波和气泡, 两者对水中结构造成不同模式的毁

收稿日期: 2021-07-02

作者简介: 段超伟(1996-), 男, 西安近代化学研究所, 硕士, 从事水下爆炸动力学研究, (E-mail) 1085692807@qq.com。

通讯作者: 宋 浦(1973-), 男, 西安近代化学研究所, 研究员, 主要从事爆炸力学、新型毁伤技术研究, (E-mail) songpu73@163.com。

基金项目: 国家专项资助(涉密)

伤。水中爆炸冲击波作用时间短,主要使目标结构产生变形、破孔等局部损伤。而气泡脉动持续时间长,若气泡脉动频率与舰船固有频率或安装部件频率接近时,会引起船体结构强烈的“鞭状抖动”,危及舰船的总纵强度^[9,10];同时气泡脉动能够驱使周围大面积流体运动,低频的滞后流和脉动压力会对结构造成总体破坏,加剧对舰船的整体破坏作用^[11]。因此,研究水下爆炸气泡动态特性规律对水中兵器研发和舰船防护等方面有着重要的指导意义。

气泡脉动及其载荷特性均呈现强烈的非线性特征^[12],包括射流冲击引起的气泡大变形、气泡与水下结构的流固耦合和多气泡耦合作用等。气泡在水下结构附近脉动时,在坍塌阶段会产生射流,气泡从单连通形式转化为双连通形式,射流冲击到结构表面对舰船结构造成严重的局部毁伤^[13],射流冲击后产生环状气泡的非球形态给气泡的理论研究造成了很大困难;同时气泡与不同边界条件的耦合作用也极为复杂,无论是在自由场中,还是近边界条件下,气泡运动都不是孤立的,气泡载荷对船体结构的毁伤与船体固有特性、海底边界条件、自由液面等环境参数密切相关^[14],这给气泡运动特性的相关研究带来了极大的挑战,迄今为止,气泡与自由面、水中结构等相互作用的许多现象和本质仍未被揭示;多气泡耦合作用比单气泡动力学更为复杂,以两气泡为例,自由场中两气泡相互作用过程中可能会出现融合、蘑菇状气泡、对射流、射流方向逆转、反向射流等现象^[15],其背后蕴涵着力学机理还未被完全揭示,相关研究成果较为匮乏。

由于水下气泡运动的强非线性和水中环境的复杂性,水下爆炸气泡动态特性研究仍有很多问题亟待解决。本文对水下爆炸气泡动态特性的理论、实验、数值模拟三方面研究进行综述,总结了气泡非球状坍塌运动过程、气泡与不同结构表面耦合作用以及水中多气泡相互作用等问题的典型研究成果,并在现有研究的基础上,对未来水下爆炸气泡动态特性研究发展进行展望。

2 水下爆炸气泡动态特性研究进展

水下爆炸气泡的动力学行为包括脉动、射流、迁移等^[16]。气泡脉动是水下爆炸所特有的现象,气泡脉动诱发的滞后流、气泡坍塌产生的脉动压力波及高速射流对水下舰船造成严重的破坏性。国内外许多研究机构在气泡动态特性方面开展了长期、大量的研究工作,下面分别从理论、实验以及数值模拟研

究三方面阐述气泡动力学相关研究进展。

2.1 理论研究

水下爆炸气泡动力学理论研究主要是以简单的模型作为研究对象,并采取理论与实验研究相结合的方法,揭示内在的机理和规律。由于现实工况的复杂性,气泡动力学理论模型多为经过条件假设简化后建立的,并且考虑部分现实因素的影响,不断对其进行改进,以提高理论模型在工程应用中的准确性。

2.1.1 气泡球状运动理论模型

针对水下爆炸气泡动力学的理论分析研究最早开始于19世纪中期,Besant在1859年就尝试运用数学模型描述气泡球形脉动过程的运动特性^[17],推导出了球状气泡膨胀和收缩的运动方程。Rayleigh在此基础上^[18],引入合理假设,对连续方程进行积分得到径向速度场,建立了水下爆炸球形气泡的运动方程(Rayleigh-Plesset方程,简称RP方程)

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = (P_R - P_0)/\rho_0 \quad (1)$$

式中: R 是气泡半径; \dot{R} 是关于时间的函数; P_0 为无穷远处流场的压力; P_R 为气泡的表面压力。

RP方程可以基本描述气泡做球状脉动时的运动特性,后续研究者采用此方程对气泡动力学特性做了大量的研究工作^[19-21]。Hicks和Vernon基于RP方程推导出了关于流场中气泡脉动压力的估算模型^[22,23]。Geers和Hunter通过类似的方法建立了可以计算水下爆炸后冲击波阶段和气泡脉动阶段流场中任意一点流场参数的气泡动力学理论模型^[19],提供了一种气泡脉动压力的工程计算方法。王振宇等在气泡运动方程的基础上^[24],考虑了能量的消耗,加入虚拟力模拟气泡能对整个气泡脉动特征的影响,改进了计算气泡脉动规律和水中压力分布规律的基本方程,其结果更为接近气泡的真实脉动过程。以上模型考虑的均为球形气泡,或是偏离球形运动不是很大的情况,无法对气泡的非球状运动给出准确的描述。

2.1.2 气泡非球状运动理论模型

真实水下爆炸气泡的运动形态并不总是球状结构,气泡在水中受浮力和流体压缩性等影响,会产生向上的迁移和非球状变形。

考虑水中浮力作用对气泡运动的影响,Klaseboer和Khoo在R-P方程的基础上,引入等效气泡半径和等效气泡壁速度等参量^[25],将Rayleigh方程推广到了自由重力场、自由面附近以及结构表面等气泡非球形运动的工况下,从气泡壁径向速度的角度

出发,探讨了浮力参数对气泡脉动周期的影响规律。Liu 等基于势流理论^[26],应用浮力作用下气泡运动变形和向上迁移特性的奇点等效方法,给出了修正后的气泡脉动载荷计算方法,提高了计算准确性。Harkin 等同样基于势流理论^[27],在计算流场速度势时考虑速度势的前四阶项,得到了气泡在声场中脉动和平移的理论模型,在保证准确性的同时,简化了计算过程。这些模型都可以在一定范围内很好地描述爆炸气泡在浮力作用下向上迁移的运动特性。

针对流体可压缩性对气泡运动的影响,Keller 将气泡周围的流体假设为声学介质^[28],并利用线性化的波动方程代替拉普拉斯方程,建立了 Keller-Herring 模型,为研究可压缩性流体中的气泡运动特性奠定了良好的基础。Prosperetti 和 Lezzi 在流体的状态方程中引入“焓”这一参量^[29,30],结合摄动理论得到了可压缩性流体的一阶理论和二阶理论,Wang 等在其二阶理论的基础上^[31-33],将可压缩流体理论与边界元数值理论相结合,建立了可压缩流体中非球状气泡运动边界元数值理论模型,其计算结果可以更加准确地描述真实水下爆炸气泡的非球状运动特性。

当气泡在水中结构附近脉动时,坍塌阶段会形成高速射流,高速射流穿过气泡使流场由单连通域变为多连通域,从而形成环状气泡,这一现象在水下爆炸气泡中极为普遍。张阿漫等将射流形成的原因总结为三种^[11]:边界的 Bjerknes 效应、重力与浮力的作用以及爆炸冲击波的作用。余俊等基于多相可压缩流体的 five-equation 计算模型^[34],引入界面函数和界面密度压缩技术,采用 5 阶 WENO 重构与 HLLC 近似 Riemann 求解器进行空间离散,时间离散采用 3 阶 TVD Runge-Kutta 法来提高水下爆炸气泡溃灭过程中气-液界面的计算精度,建立的模型可以基本描述射流的产生、发展以及水锤冲击等典型演化过程,但其适用范围较小。由于存在强冲击、多相界面复杂运动等强非线性效应,目前气泡运动的计算方法还无法完全描述整个高速射流的运动特征。

综上,基于球形气泡模型的水中爆炸气泡动力学理论较为成熟,能够考虑各种环境因素的影响,使得计算结果更加接近真实水下爆炸气泡的运动参数。但现有的气泡理论模型大多只是针对单一因素对气泡运动特性的影响,尚无法准确描述气泡的非球状坍塌运动过程及其引起的射流冲击现象,并且缺乏综合考虑气泡内部因素和不规则边界条件对气泡运动影响的理论模型。

2.2 实验研究

水下爆炸实验是研究爆炸气泡运动最直接的研究手段,通过实验获得水下爆炸气泡脉动过程的直观图像也是开展气泡动力学相关研究的重要途径。美国人 Cole 在二战后进行了大量的水下实船爆炸实验^[2],对水下爆炸的现象、物理化学变化、水下爆炸气泡载荷的分布和传播特点进行了详尽的阐述。但水下爆炸实验过程复杂,费用昂贵,还存在爆炸强冲击波对高速相机等设备产生强烈破坏作用等问题^[35]。目前关于气泡动态特性研究的实验方法主要有小当量炸药水下爆炸实验和光-电法生成气泡实验两种。

2.2.1 小当量炸药水下爆炸实验

研究人员通常选择在浅水域或者爆炸水箱中进行小当量装药水下爆炸实验来获得冲击波压力、气泡脉动压力等数据,并利用高速摄影设备记录气泡脉动过程。

Bret 等最早在浅水域进行小当量的水下爆炸实验^[36],实验分别测量了圆柱壳在冲击波载荷和气泡脉动载荷作用下的结构响应,研究了爆炸气泡在圆柱壳附近的运动特性及其对结构的毁伤作用,并发现在近场水下爆炸过程中,气泡脉动载荷作用下的结构响应比冲击波作用阶段更大。张姝红等采用水中爆炸压力测量系统对不同工况下的水下爆炸压力进行了测量^[37],得到了装药在近水底、自由场和近水面爆炸条件下气泡脉动特性的宝贵试验数据。Daniel 等采用类似实验方法研究爆炸气泡产生的射流对结构的毁伤作用^[38],并依据实验数据给出了气泡与水下结构耦合作用产生的射流速度计算方法,可以对射流速度进行初步预估。Zhang 等统计了大量实验数据的相关结果^[39],将气泡在刚性壁面上方以及自由液面下方运动时产生的射流方向绘于同一张图中,如图 1 所示。该图汇总了多年来各国学者在气泡近边界运动特性的研究成果,较为系统地描述了气泡在刚性壁面上方和自由液面下方运动时,射流产生方向与气泡强度与流体浮力参数等无量纲参数的关系,对后续不同边界条件下的气泡近壁面运动特性的研究工作具有重要的指导意义和参考价值。

Klaseboe 等则选择在水池中进行水下爆炸实验^[40],分别研究了气泡在自由场、靠近刚性壁面和弹性壁面的动力学行为,观察到了气泡射流、气泡向结构发生迁移等现象,完整地记录了气泡坍塌的过程。汪斌等在考虑了边界效应和非球状初始条件的情况下^[41,42],开展了针对近场水下爆炸气泡脉动、射流载荷的实验研究,并在水箱壁上贴低声阻抗材

料,利用弹性波从声阻抗高的物质传入声阻抗低的物质时的“减震缓冲”原理,有效降低了水箱壁反射冲击波对气泡脉动过程的影响,获得了更加准确地气泡脉动过程图像、气泡水射流形成过程图像和气泡脉动压力曲线,规避了水箱实验中边界效应的影响,研究了自由场及结构附近水下爆炸气泡的动态

特性。崔雄伟等基于腔内爆炸提出了一种新的高速水射流实验方法^[43],实验装置图如图 2 所示,开展了不同工况下高速水射流的实验研究,使用压电型壁压传感器测量水射流冲击壁压,给出了水射流冲击壁压的载荷特性,为水射流的研究工作提供了一种具有较高可行性的实验研究方法。

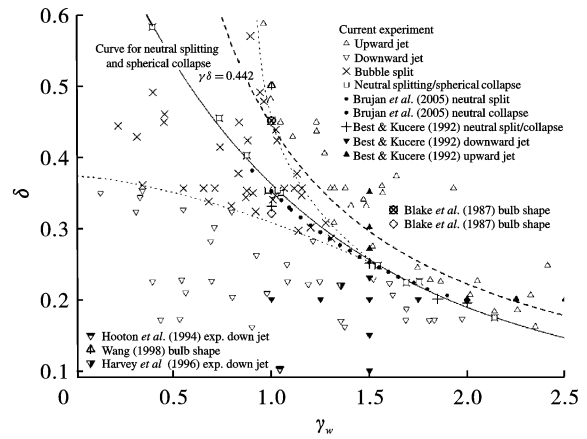
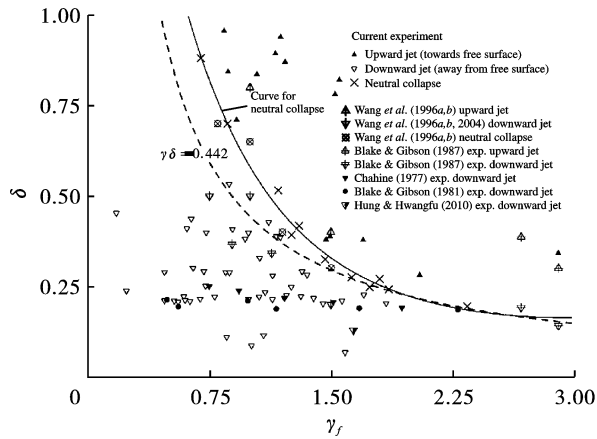
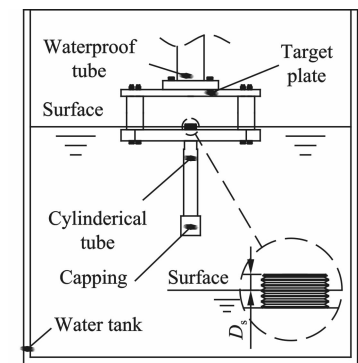
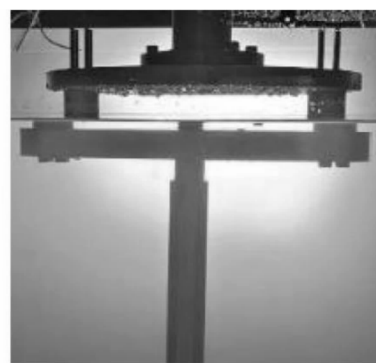


图 1 气泡在刚性壁面与自由液面附近射流方向与无量纲参数之间的关系图
Fig. 1 The relationship between the direction of bubble jet and the dimensionless parameters near the rigid wall surface and the free surface



(a) 高速水射流实验装置示意图
(a) Diagrammatic sketch of high-speed water jet experimental setup



(b) 空气-水交界面的折射图
(b) Refraction through air-water interface

图 2 高速水射流实验装置

Fig. 2 High speed water jet experimental equipment

2.2.2 光-电法生成气泡实验

近年来,随着科学技术的高速发展,为实验技术带来了前所未有的改变。考虑到水下爆炸实验的成本和安全性,研究人员利用激光气泡和电火花气泡来代替水下爆炸产生的真实气泡,其产生气泡的动力学行为与水下爆炸气泡极为相似,并且可以较为准确地控制气泡的生成位置和尺寸,有利于系统的研究不同边界条件下气泡的动力学特性。

激光聚焦气泡主要是通过透镜装置将能量聚焦到流场内的一点,使水在高能量短脉冲的作用下发

生光学击穿,生成脉动气泡,如图 3 所示。激光气泡内部气体透明,能够清晰地观察到气泡形态及其内部产生的射流。

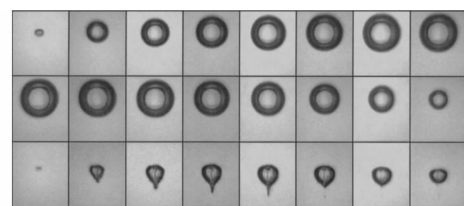


图 3 激光气泡脉动过程图像
Fig. 3 Laser bubble pulsation process

最早进行激光气泡实验的是 Lauterborn 和 Bolle^[44],他们研究了激光生成气泡在刚性边界附近的运动,观察到了气泡射流的形成。Gibson^[45]、Mitchell 等也利用激光泡做了大量空泡溃灭的实验^[46],得到了空泡溃灭产生射流的速度,结果与数值解相吻合。Philipp 和 Lauterborn 通过激光气泡实验发现环状气泡的剧烈坍塌会向外释放冲击波^[47],并在壁面上观察到了破口或环形毁伤。Li 等人利用激光气泡实验对自由场中两个气泡的相互作用进行了实验研究^[48],通过调节气泡间距和气泡生成时间能够控制气泡射流的强度和方向,实验结果表明两个异相气泡之间出现先吸引后排斥的现象。激光生成气泡实验中的气泡尺寸一般都很小,可以清晰地观察到气泡形态的变化,却很难对气泡及流场中的参数变化进行测量。

电火花气泡的原理是通过高压放电将电极之间的水击穿产生电弧,短时间内将水电离或气化,从而形成高压气泡。Tipton 等用电火花气泡实验方法和数值方法相结合研究了近刚壁面的微小气泡(几毫米)的膨胀和坍塌^[49]。Chahine 等通过高压电火花打火生成气泡来研究固定和移动式刚性边界附近气泡的膨胀和坍塌^[50],实验发现可移动边界与固定边界都会使气泡周期变短。Dadvand 等同样采用了电

火花气泡代替真实的水下爆炸气泡^[51],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。郑监等利用高速摄影系统对电火花引起的气泡脉动和水射流现象进行了实验研究^[52],通过改变气泡初始深度,得到了不同无量纲距离条件下气泡与自由面相互作用形成水射流和气泡脉动的动态过程的图像。

为了更加接近真实水下爆炸气泡的运动环境,Chahine 设计了自由面附近气泡射流实验^[50],实验在减压水箱内进行,环境压力可降低到 6 kPa,气泡运动过程被减慢了 5 倍,配合每秒 2 万帧的摄影技术即可获得十分清晰的气泡形态和射流图形,实验表明与壁面附近不同,自由面附近的气泡在坍塌时将形成背离自由面的射流。张阿漫等利用电容在相对较低的电压下放电打火产生的电火花气泡来模拟水下爆炸气泡^[53],设计多组实验工况来模拟气泡在不同环境下的运动特性,研究气泡在不同环境下的脉动特性、射流特性,总结了不同环境因素对气泡运动的影响规律,具体的实验装置图如图 4 所示。为了得到尺寸更大,浮力效应更明显的气泡,张阿漫、崔杰等人在电火花气泡实验基础上^[54,55],对密闭实验罐中的空气进行抽气减压处理,实验得到的气泡半径可达 5 cm 以上,明显增大了气泡的浮力效应,实现了与真实水下爆炸气泡相当的浮力作用。

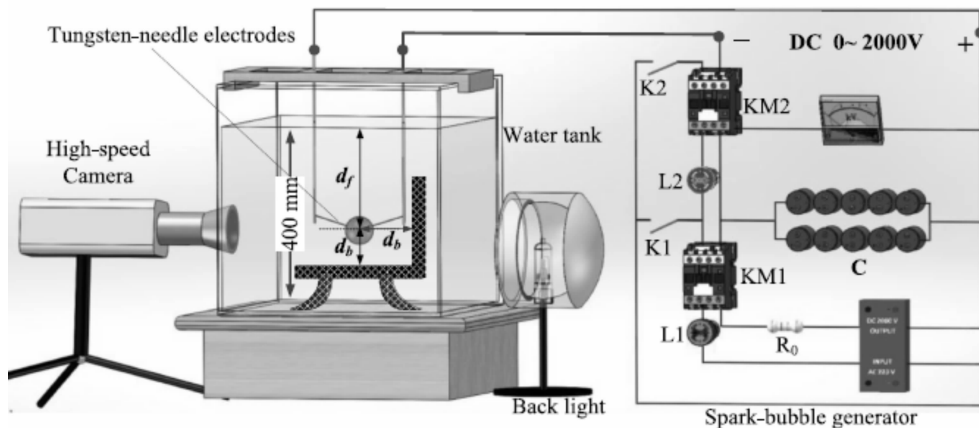


图 4 电火花气泡实验装置图

Fig. 4 Experimental apparatus for electric spark bubble

目前水箱内爆炸实验装药均采用理想炸药,压力传感器多是用来测量装药附近流场压力的变化,不能准确测得气泡内的压力变化;无论是激光生成气泡还是电火花生成气泡,其原理都是利用能量在水中的瞬间释放使液态水气化形成高压气泡,尺寸极小,仅能观察到气泡的运动形态的变化,未考虑炸药水下爆炸中能量释放以及冲击波传播的影响。非理想炸药是未来混合炸药发展的重大新方向之一,

因此加强非理想炸药水下爆炸气泡运动特性研究十分必要。非理想炸药分子间反应相对较慢,早期爆轰反应不完全,可能通过后续爆燃反应释放能量,对目标的毁伤作用也更加依赖环境因素,考虑到非理想炸药能量释放速率、装药尺寸效应等特性的影响,以上两种实验方法都不适用于非理想炸药水下爆炸的实验研究。建立完善的实船实弹水下爆炸实验方案是研究非理想炸药水下爆炸气泡运动特性及其对

目标毁伤效应的关键。

2.3 数值模拟研究

随着计算机技术的发展,研究者们开始采用数值模拟方法对气泡动力学问题进行研究,通过建立气泡运动模型模拟气泡运动过程、计算流场载荷信息来分析气泡运动现象背后的力学机理。

2.3.1 单气泡数值模拟研究

研究气泡动力学常见的数值方法有结合界面捕捉法的离散域方法和基于势流理论的边界积分法,前者计算量大,难以处理复杂边界条件,后者计算效率更高,被广泛应用于气泡动力学的数值研究。边界积分法在数值模拟过程中只需在边界上划分网格,其基本思路如下:设置气泡表面的速度势和节点坐标,结合初始条件和边界条件求解边界积分方程,以此获得气泡表面节点的法向速度,根据速度势差分求得气泡表面节点的切向速度,联立获得节点合速度 $\nabla\phi$,在时域计算中,根据合速度更新气泡边界位置,同时利用非定常 Bernoulli 方程更新气泡表面速度势,以此获得下一时刻气泡的位置形态及其表面速度势,经过显式迭代计算,即可得到整个时域内每一时刻气泡的运动形态和速度。边界积分法经过多年的发展,可以快速周期的模拟单个气泡在不同边界条件下的运动特性^[56-65]。

Blake 等人最早采用轴对称边界积分方法^[57],先后模拟了自由面附近和位于刚性壁面上方的气泡的运动,研究发现在不考虑浮力作用时,气泡会产生朝向自由面或壁面的射流,当浮力参数增加到较大值时,气泡产生向上的射流。Klaseboer 等和 Zhang 等通过将边界积分法与非线性有限元程序耦合^[25,58],计算了水下爆炸气泡与弹塑性结构的相互作用。Akihiro Yasuda 针对气泡的热传导效应采用边界积分法计算气泡的膨胀和压缩过程^[59],在气泡内部采用非结构网格的有限元方法求解气泡内、外的热传导过程。Liu 等采用边界积分方法研究了气泡射流的特性^[60]。气泡射流冲击对面时,其形状被简化为圆柱形,因此气泡射流的特性由圆柱形直径、圆柱形高度和射流速度三个参数来表征。基于最小二乘法,得到了气泡射流宽度、高度和速度的三个估计公式。牟金磊等对深水自由场、近自由液面、近刚性壁和弹性边界等不同边界条件下水下爆炸气泡的动态特性进行了仿真计算^[61],系统地分析了不同边界条件对水下爆炸气泡的影响规律。

Harris 在边界积分法的基础上^[62],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,但其三维

模型网格会出现畸变问题。Wang 等针对这一问题引入了弹性网格技术(Elastic mesh technique)^[63],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,因其取得了很好的效果而被广泛应用于气泡动力学研究中。张阿漫等利用此弹性网格技术^[64,65],基于势流假设开发了三维气泡数值模型程序仿真,并运用边界积分法建立了气泡与壁面耦合数值模型,得到的计算值与实验值吻合良好。

除了常用的边界积分法之外,很多研究者选择其他数值计算方法模拟气泡的动态特性,同样取得了很好的效果。

Yu 等利用 ABAQUS 软件模拟水下气泡爆炸、脉动和坍塌的过程^[66],应用欧拉方法简化了边界条件,但该方法在气泡在水中的迁移、压力脉冲、水射流的形成和气泡周围的流场速度等方面提供了较为准确的结果。Tian 等采用欧拉有限元法模拟水平固壁附近激波和非球形气泡的演化过程^[67]。在柱坐标系下建立了数值模型,利用电火花气泡实验结果验证了数值模型的正确性。利用该模型研究了水下爆炸冲击载荷的特性,结果表明脉动压力峰值、冲击范围和持续时间非线性地依赖于壳体参数的组合,在适当的参数组合范围内,射流冲击载荷可以达到最大,并具有比冲击波更大的破坏性。Liu 等利用流体体积法(VOF)捕捉多相界面^[68],采用欧拉有限元法(EFEM)建立了水下爆炸模型,但其改进了轴对称模型中引入元素中心变量的 MUSCL 算法以保持其稳定性,并采用二阶时间逼近法(ETA2)处理计算域的非反射边界条件,通过实验验证了数值模型在冲击波和气泡振荡模拟中的有效性,并利用该模型模拟了两种不同初始深度的水下爆炸情况,分析了近场气泡载荷压力特性。苏怡然等基于 N-S 方程的有限差分格式^[69],对水下气泡脉动过程进行数值模拟,实现了一种能够精确处理复杂形状自由液面边界的数值算法。模拟结果与实验结果对比如图 5 所示。通过近场边界压力合理性的判别机制,有效抑制了边界压力失真现象与数值震荡现象,该方法可用于水下爆炸气泡脉动、螺旋桨空泡溃灭等过程的数值模拟和相应射流冲击载荷的预报。

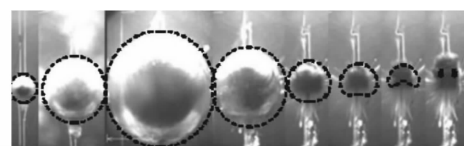


图5 数值模拟结果与实验结果对比
Fig. 5 The numerical simulation results are compared with the experimental results

高速射流后的环状气泡的流场速度势可能是多值函数,传统的边界积分法就不再适用了。Best 提出向流场中引入一个切割面来连接射流碰撞的气泡节点^[70],使流场仍保持为单连通域,进而可以模拟环状气泡的运动,并提出了“涡面模型”。Wang 等人采用一种切割技术^[71],将气泡从单连通域变为双连通域,并在气泡内部布置涡环来模拟气泡的环状阶段,这种方法可以推广到三维气泡的环状气泡模型。Li 等基于“涡环模型”^[72],采用辅助函数法计算了气泡射流在结构表面引起的载荷,模拟气泡的射流过程如图 6 所示,发现在射流压力时历曲线上可能会出现多个峰值现象,计算结果与实验结果较为符合。

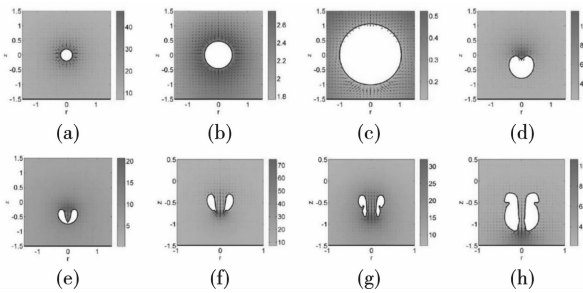


图 6 气泡射流过程的模拟图像

Fig. 6 Simulation image of bubble jet process

2.3.2 多气泡数值模拟研究

随着研究的深入,很多学者针对多气泡的耦合作用也进行了大量的数值研究工作,最简单的多气泡工况时自由场中两个同尺寸同相气泡的相互作用,不计浮力作用,每个气泡的动力学行为与刚性壁面附近的单气泡运动等效。李章锐等采用边界积分方法模拟三维水下气泡的动力特性^[73],探究了三种不同浮力参数情况下气泡的演变情况,计算了两气泡在不同距离和不同强度参数下的相互作用的特点,其中无浮力状态下两气泡的演化过程如图 7 所示。

张淑君等则是采用 VOF 中的界面捕捉方法^[74],结合考虑了表面张力的运动方程,对重力场中单个气泡和气泡群的上升及变形运动进行了三维数值模拟研究,深入研究了曝气池中气泡在运动过程中的动力学特性。Thanh-Hoang 等采用轴对称可压缩三相均质数值模型^[75],分别研究了一个和两个水下爆炸气泡在自由表面上的强非线性相互作用。观察到了射流冲击、环形气泡、一次和二次水冢等现象,得到了气泡相互作用过程中压力和速度等历时曲线。不仅如此,其还研究了气泡和自由表面在不同无量纲参数下的运动特性,模拟两个气泡和自由表面之间的耦合作用过程,包括环状气泡和对射流等物理现象,揭示了中心水柱和气泡与自由面相互

作用的关系。

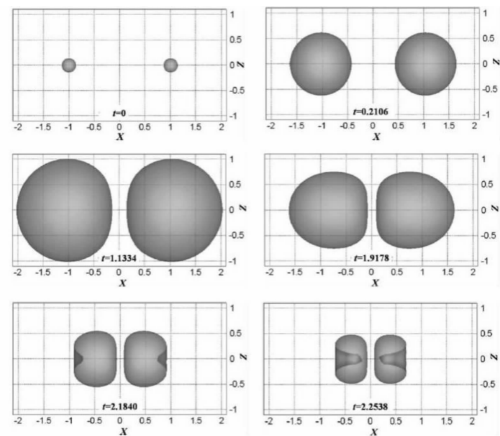


图 7 无浮力状态下两气泡的演化过程

Fig. 7 Evolution of two bubbles without buoyancy

当两个气泡在水下的初生距离较近时,气泡会发生融合现象。Rungsiyaphornrat 等最早采用边界积分法轴对称模型对自由场中两个同相或异相气泡的融合问题进行研究^[76],提出了数值计算中的融合准则,模拟了同相和异相气泡融合过程,如图 8、9 所示。张阿漫等采用边界积分法建立了气泡融合三维数值模型^[77],分析了气泡间距、水深等特征参数对气泡融合动态特性的影响,并发现了两个气泡的相互作用具有聚集能效。Li 等同样利用三维气泡数值模型研究了两同相气泡的融合特性^[48],考虑不同浮力作用下,分别研究了两气泡水平排列、竖直排列和倾斜 45° 角排列时气泡融合形成射流方向和大小的变化,得到了浮力对气泡融合后射流变化的影响规律。

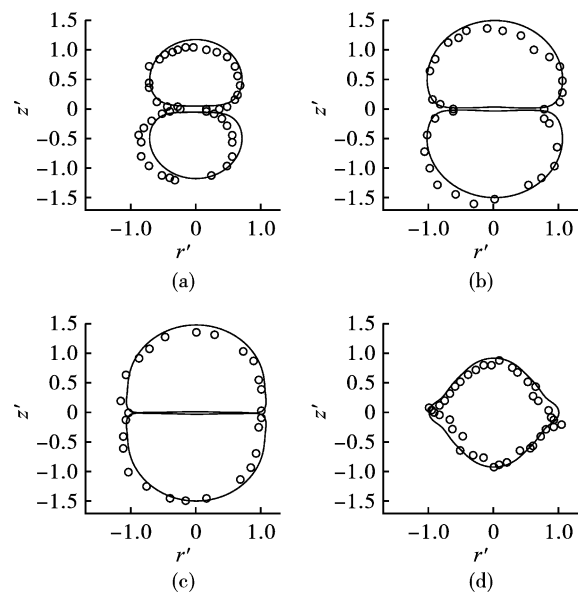


图 8 同相气泡的融合过程

Fig. 8 Fusion process of in-phase bubbles

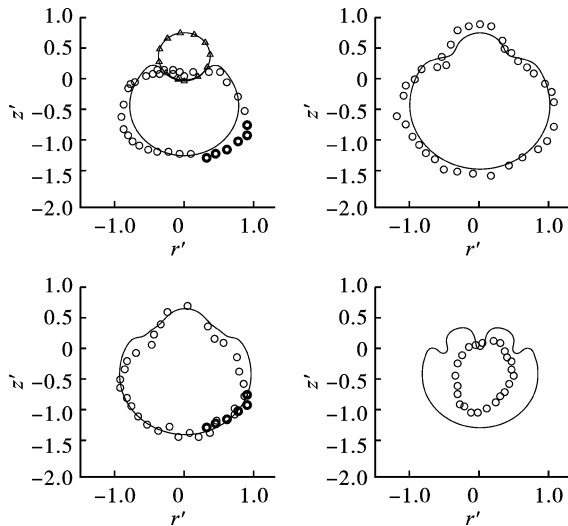


图9 异相气泡的融合过程

Fig. 9 Fusion process of heterogeneous bubbles

Bremond 等同样对多气泡的相互作用进行了数值研究^[78],如图10所示,利用轴对称边界积分法模拟位于一条线上五个气泡的耦合作用,结果表明最外侧的气泡脉动周期缩短,率先出现射流,内侧气泡脉动周期增大。姜忠涛等建立3个气泡的数值模型^[79],研究了无量纲参数气泡间距对气泡运动形态的影响,观察到中间气泡的运动形态随气泡间距的增大,由“圆柱形”转化为“球形”,且两侧气泡的射流速度增大的现象。

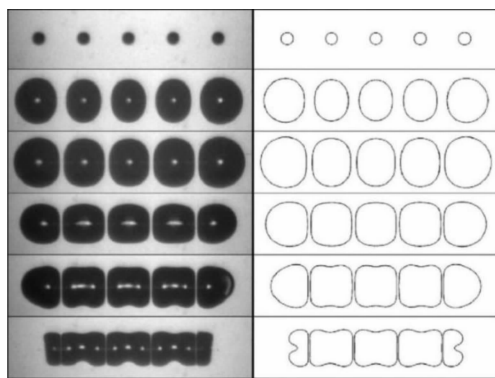


图10 位于一条线上五个气泡的耦合作用

Fig. 10 Coupling of five bubbles on a line

总体来说,针对单气泡动力学的数值模拟研究发展较为系统,现有的数值模型对自由场中的单气泡运动模拟效果比较理想,也可针对气泡在自由面、水下结构表面附近的脉动以及射流冲击过程进行深入研究,但还不能很好的模拟气泡破碎后期的动力学行为,水下爆炸气泡破碎后期涌流等问题的数值模拟仍处于探索阶段;多气泡数值模拟研究大多是在自由场条件下进行的,气泡动力学行为与刚性壁

面附近的单气泡运动等效,其中轴对称模型可以对两个气泡的融合现象进行初步研究,但难以解决任意边界条件下的气泡融合问题,多气泡在近自由面、近壁面等不同边界附近的运动特性将会是未来气泡动力学数值模拟研究的热点问题。

3 结束语

水下爆炸气泡动力学经过多年发展,在气泡产生及脉动过程、气泡载荷的形成与传递、气泡与水中结构的耦合作用和水中结构的动态响应等方面积累了大量的研究成果。但水下爆炸气泡动态特性的研究依旧涉及气泡与弹塑性结构的流固耦合、高速射流冲击后的变形和破孔效应、多气泡耦合过程的力学机理和气泡破碎后流场的不连续性等难点问题,为深入揭示水下爆炸气泡的运动特性规律、准确预估气泡载荷对水下舰船结构的毁伤作用,还需从以下几方面做进一步的研究工作:

(1)完善近场水下爆炸气泡运动理论模型。近场水下爆炸会产生水底反射、自由面截断、局部空化等现象,气泡与复杂结构边界的流固耦合作用也更加强烈,而气泡内部压力的变化与爆轰产物气体成分密切相关。因此,有待建立一个综合考虑气泡内部因素和水中不同环境因素的近场水下爆炸气泡理论模型。

(2)非理想炸药水下爆炸气泡运动特性的研究。非理想炸药水下爆炸的能量释放方式直接影响着气泡内压变化及其运动特性,而现有的理论和模拟仿真方法都不能准确解释非理想炸药水下爆炸这种复杂爆炸体系,因此要完善实船实弹水下爆炸实验技术,综合热化学能量、装药尺寸效应和能量释放速率等多方面影响因素,深入研究非理想炸药水下爆炸能量释放规律及其气泡运动特性

(3)多气泡耦合特性的研究。气泡作为一种特殊边界,对其他气泡的影响也更加复杂。多气泡之间会发生气泡融合、对射流、反向射流等现象。气泡间距、气泡尺寸及形态、浮力等特征参数均会对多气泡耦合作用产生影响,开展近自由面、近壁面等不同边界条件下的多气泡耦合数值模拟研究,有利于揭示多气泡耦合过程的载荷特性和力学机理。

参考文献 (References)

[1] 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.
 [1] YAO Xiong-liang, LIU Wen-tao, ZHANG A-man, 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. (in Chinese)
- [2] COLE R H. Underwater explosion[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.
- [3] ANH Tu Nguyen. The application of CEL technique to simulate the behavior of an underwater explosion bubble in the vicinity of a rigid wall[J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 4796:126-139.
- [4] CHEN G Q, ZHANG A M, HUANG X. On the interaction between bubbles and the free surface with high density ratio 3D lattice Boltzmann method[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2018, 8(4):252-256.
- [5] JAYAPRAKASH A, SINGH S, CHAHINE G. Experimental and numerical investigation of single bubble dynamics in a two-phase bubbly medium[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(12):121305.
- [6] 金 键, 朱 锡, 侯海量, 等. 水下爆炸载荷下舰船响应与毁伤研究综述[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(6):396-409.
- [6] JIN J, ZHU X, HOU H L, et al. Review of dynamic response and damage mechanism of ship structure subjected to underwater explosion load[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(6):396-409. (in Chinese)
- [7] HUNG C F, HWANGFU J J. Experimental study of the behavior of mini-charge underwater explosion bubbles near different boundaries[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 651:55-80.
- [8] BETHE H A. On the theory of shock waves for an arbitrary equation of state [C] // JOHNSON J N, CHÉRET R. Classic Papers in Shock Compression Science. High-Pressure Shock Compression of Condensed Matter. New York, NY: Springer, 1998:421-495.
- [9] 姚熊亮, 汪 玉, 张阿漫. 水下爆炸气泡动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012:22-76.
- [10] 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.
- [10] ZHU Xi, MU Jin-lei, HONG Jiang-bo, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(4):365-368. (in Chinese)
- [11] 张阿漫, 汪 玉, 闻雪友, 等. 水下爆炸气泡动态特性研究综述[J]. 船舶力学, 2009, 13(5):828-840.
- [11] ZHANG A-man, WANG Yu, WEN Xue-you, et al. Review of the dynamics of the underwater explosion bubble [J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(5):828-840. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] GEERS T L. Doubly asymptotic approximations for transient motions of submerged structures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 64:1500-1508.
- [14] 荣吉利, 赵自通, 冯志伟, 等. 黑索今基含铝炸药水下爆炸性能的实验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(11):2177-2183.
- [14] RONG Ji-li, ZHAO Zi-tong, FENG Zhi-wei, et al. Experimental study of underwater explosion performance of RDX-based Aluminized Explosive[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(11):2177-2183. (in Chinese)
- [15] 李 梅, 马宇宇, 蒋建伟, 等. 双爆源气泡与水面相互作用的实验[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(12):1219-1224.
- [15] LI Mei, MA Yu-yu, JIANG Jian-wei, et al. Experiments of the interactions between double explosive bubbles and free surface [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(12):1219-1224. (in Chinese)
- [16] HAN R, WANG S P, YAO X L. Dynamics of an air bubble induced by an adjacent oscillating bubble[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2016, 62:65-77.
- [17] BESANT W H. Hydrostatics and hydrodynamics[M]. London: Cambridge University Press, 1859.
- [18] RAYLEIGH J W. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. Philos Mag, 1917, 34:94-98.
- [19] GEERS T 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.
- [20] NOLTINGK B E, NEPPIRAS E A. Cavitation produced by ultrasonics[J]. Proc Phys Soc. London, 1950, 63B:674-685.
- [21] GILMORE F R. The growth and collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid[J]. Hydro Lab Calif inst Tech Report, 1952, 26(4):62-83.
- [22] HICKS A N. Explosion induced hull whipping[M]. Advances in marine structures, Elsevier Applied Science Publishers, 1986:390-410.
- [23] VERNON T A. Whipping response of ship hulls form underwater explosion bubble loading [R]. AD-A178096, 1986.
- [24] 王振宇, 唐兆田, 王 善, 等. 水下爆炸气泡脉动的数值计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(1):22-27.
- [24] WANG Zhen-yu, TANG Zhao-tian, WANG Shan, et al. Numerical calculations of the bubble pulsation forces of underwater explosions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(1):22-27. (in Chinese)
- [25] KLASEBOERE, KHOO B C. A modified Rayleigh-Plesset model for a non-spherically symmetric oscillating bubble with applications to boundary integral methods[J]. Engi-

- neering Analysis with Boundary Elements,2006,30(1):59-71.
- [26] 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.
- [27] HARKIN A,KAPER T J,NADIM A. Coupled pulsation and translation of two gas bubbles in a liquid[J]. Journal of Fluid Mechanics,2001,445:377-411.
- [28] KELLER J B,KOLODNER I I. Damping of underwater explosion bubble oscillations [J]. Journal of Applied Physics,1956,27(10):1152-1161.
- [29] PROSPERETTI A,LEZZI A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 1: first-order theory[J]. Journal of Fluid Mechanics,1986,168:457-478.
- [30] LEZZI A,PROSPERETTI A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 2: second-order theory[J]. Journal of Fluid Mechanics,1987,185:289-321
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] WANG Q X. Non-spherical bubble dynamics of underwater explosions in a compressible fluid [J]. Physics of Fluids(1994-present),2013,25(7):072104.
- [34] 余俊,刘国振,汪俊,等. 水下爆炸气泡射流载荷计算的新方法研究[J]. 计算力学学报,2021,38(1):120-125.
- [34] YU Jun,LIU Guo-zhen,WANG Jun,et al. Research on new method of calculation of bubble jet load of underwater explosion[J]. Journal of Computer Mechanics,2021,38(1):120-125. (in Chinese)
- [35] 汪斌,张远平,王彦平. 一种水中爆炸气泡脉动实验研究方法[J]. 高压物理学报,2009,23(5):332-337.
- [35] WANG Bin,ZHANG Yuan-ping,WANG Yan-ping. An experimental research method for water explosion bubble pulsation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2009,23(5):332-337. (in Chinese)
- [36] BRETT J M,YIANNAKOPOULOS G,VAN Der SCHAAF 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.
- [37] 张姝红,周华,权琳,等. 水下爆炸气泡脉动试验研究[J]. 爆破,2014,31(1):106-109.
- [37] ZHANG Shu-hong,ZHOU Hua,QUAN Lin,et al. Experimental study for bubble impulsion in underwater explosion[J]. Blasting,2014,31(1):106-109. (in Chinese)
- [38] O'DANIEL J L,HARRIS G,ILAMNI R,et al. Underwater explosion bubble jetting effects on infrastructure[R]. DTIC Document,2011.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [41] WANG Bin,ZHANG Yuan-ping,WANG Yan-ping. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(6):572-576. (in Chinese)
- [42] 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.
- [42] WANG Bin,ZHANG Yuan-ping,WANG Yan-ping. 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. (in Chinese)
- [43] 崔雄伟,陈莹玉,苏标,等. 水下爆炸中气泡射流壁压特性实验研究[J]. 爆炸与冲击,2020,40(11):64-75.
- [43] CUI Xiong-wei,CHEN Ying-yu,SU Biao,et al. Characteristics of wall pressure generated by bubble jets in an underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves,2020,40(11):64-75. (in Chinese)
- [44] LAUTERBORN W,BOLLE H. Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics,1975,72(2):391-399.
- [45] GIBSON D C. Cavitation adjacent to plane boundaries [C] //Proc 3rd Conf Hydraulic Fluid Mech. Sydney,P R, Austr Inst Eng.,1968:210-214.
- [46] MITCHELL T M,HAMMITT F G. Asymmetric cavitation bubble collapse[J]. J Fluids Engng. Trans ASME,1973,195:29-37.
- [47] PHILIPP A,LAUTERBORN W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles[J]. Journal of Fluid Mechanics,1998,361:75-116.
- [48] LI Shuai,ZHANG A-Man,HAN Rui,et al. Experimental and numerical study of two underwater explosion bubbles: Coalescence, fragmentation and shock wave emission[J]. Ocean Engineering,2019,190,106414.
- [49] TIPTON R E,STEINBERG D J,TOMITA Y. Bubble ex-

- plosion and collapse near a rigid wall[J]. JSME Intl J Series II,1992,35:67-75.
- [50] CHAHINE GL. Interaction between an oscillating bubble and a free surface[J]. Trans ASME, Journal of Fluids Engineering,1977,99(77):709-716.
- [51] 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.
- [52] 郑 监,张 舵,蒋邦海,等. 气泡与自由液面相互作用形成水射流的机理研究[J]. 物理学报,2017,66(4):173-182.
- [52] ZHENG Jian,ZHANG Duo,JIANG Bang-hai,et al. Formation mechanism of water jets induced by the interaction between bubble and free surface[J]. Acta Physica Sinica. ,2017,66(4):173-182. (in Chinese)
- [53] 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.
- [53] ZHANG A-man,WANG Shi-ping,BAI Zhao-hong,et al. Experimental study on bubble pulsation characteristics in different environments[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2011,43(1):71-83. (in Chinese)
- [54] 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.
- [54] CUI Jie. Experimental study on underwater explosion bubble loads and damage on the structure nearby[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2013. (in Chinese)
- [55] ZHANG S,WANG S,ZHANG A. Experimental study on the interaction between bubble and free surface using a high-voltage spark generator[J]. Physics of Fluids,2016,28(3):032109.
- [56] 韩 蕊. 多气泡(气泡群)非线性耦合作用及融合特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [56] RUI Han. Study on the nonlinear interaction and coalescence of multiple bubbles[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2017. (in Chinese)
- [57] BLAKE J,TAIB B,DOHERTY G. Transient cavities near boundaries. Part 1. Rigid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics,1986,170:479-497.
- [58] ZHANG A M,SUN P N,MING F R. An SPH modeling of bubble rising and coalescing in three dimensions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2015,294:189-209.
- [59] AKIHIRO Y,HIROYUKI T. Numerical analysis of temperature fields inside non-spherical bubbles in the final stage of collapse[Z]. CAV2001:sessionB6. 003.
- [60] LIU L T,YAO X L,ZHANG A M,et al. Research on the estimate formulas for underwater explosion bubble jet parameters[J]. Ocean Engineering,2018,164:563-576.
- [61] 牟金磊,朱 锡,黄晓明. 水下爆炸载荷作用下舰船结构响应研究综述[J]. 中国舰船研究,2011,6(2):1-8.
- [61] MOU Jin-lei,ZHU Xi,HUANG Xiao-ming. Summary of research on ship structure under underwater explosion load[J]. Chinese Journal of Ship Research,2011,6(2):1-8. (in Chinese)
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 张阿漫,王诗平,彭玉祥,等. 水下爆炸与舰船毁伤研究进展[J]. 中国舰船研究,2019,14(3):1-13.
- [64] ZHANG A M,WANG S P,PENG Y X,et al. Research progress in underwater explosion and its damage to ship structures[J]. Chinese Journal of Ship Research,2019,14(3):1-13. (in Chinese)
- [65] 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.
- [66] HSU Ching Yu,LIANG Cho Chung,NGUYEN Anh Tu,et al. A numerical study on the underwater explosion bubble pulsation and the collapse process[J]. Ocean Engineering,2014,81:29-38.
- [67] TIAN Zhao-li,LIU Yun-long,ZHANG A-man,et al. Jet development and impact load of underwater explosion bubble on solid wall[J]. Applied Ocean Research,2020,95(C):102013-102013.
- [68] LIU Yun-long,ZHANG A-man,TIAO Zhao-li,et al. Investigation of free-field underwater explosion with Eulerian finite element method[J]. Ocean Engineering,2018,166:182-190.
- [69] 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.
- [69] SU Yi-ran,TANG Wen-yong,ZHENG Shao-wen,et al. A high efficiency eulerian method for numerical simulation of underwater bubbles[J]. Journal of Vibration and Shock,2013,32(23):32-37. (in Chinese)
- [70] BEST J P. The formation of toroidal bubbles upon the collapse of transient cavities[J]. Journal of Fluid Mechanics,1993,251:79-107.
- [71] 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.
- [72] LI S,LI Y B,ZHANG A M. Numerical analysis of the bubble jet impact on a rigid wall[J]. Applied Ocean Re-

- search,2015,50:227-236.
- [73] 李章锐,宗 智,董 靖,等.两个气泡相互作用的某些动力特性研究[J].船舶力学,2012,16(7):717-729.
- [73] LI Zhang-ru,ZONG Zhi,DONG Jing,et al. Some dynamic characteristics of the interactions of two bubbles[J]. Journal of Ship Mechanics,2012,16(7):717-729. (in Chinese)
- [74] 张淑君.气泡动力学特性的三维数值模拟研究[D].南京:河海大学,2006.
- [74] ZHANG Shu-jun. Three dimensional numerical simulation of bubble dynamics[D]. Nanjing:Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [75] PHAN Thanh Hoang, NGUYEN Van Tu, PARK Warn Gyu. Numerical study on strong nonlinear interactions between spark-generated underwater explosion bubbles and a free surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,163:120506-.
- [76] RUNGSIYAPHORN R S, KLASEBOER E, KHOO B, et al. The merging of two gaseous bubbles with an application to underwater explosions [J]. Computers & Fluids,2003,32(8):1049-1074.
- [77] 张阿漫,曾令玉,王诗平,等.水下爆炸气泡融合动态特性研究[J].应用数学和力学,2010,31(2):163-170.
- [77] ZHANG A-man,ZENG Ling-yu,WANG Shi-ping,et al. Study on fusion dynamics of underwater explosion bubbles [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(2):163-170. (in Chinese)
- [78] BREMOND N, ARORA M, DAMMER S M, et al. Interaction of cavitation bubbles on a wall [J]. Physics of Fluids,2006,18(12):121505.
- [79] 姜忠涛,韩 蕊,李 帅.多气泡耦合作用下非球状特性数值研究[J].哈尔滨工程大学学报,2015,36(8):1019-1023.
- [79] JIANG Zhong-tao,HAN Rui,LI Shuai. Numerical study of nonspherical characteristics under coupling action of multiple bubbles [J]. Journal of Harbin Engineering University,2015,36(8):1019-1023. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第86页)

- [5] 欧明鑫,舒大强,张承睿,等.三种隧洞掏槽型式的破碎机理及振动特性分析[J].爆破,2020,37(1):27-31,39.
- [5] OU Ming-Xin, SHU Da-qiang, ZHANG Cheng-ru, et al. Analysis on fracture mechanism and vibration characteristics of three types of tunnel cut [J]. Blasting, 2020, 37(1):27-31,39. (in Chinese)
- [6] 温 贺,吴新红,麦小章,等.花岗岩质小断面隧洞爆破参数优化研究[J].采矿技术,2018,18(5):200-202.
- [6] WEN He, WU XIN-hong, MAI Xiao-zhang. Study on blasting parameters optimization of granite small section tunnel [J]. Mining Technology, 2018, 18(5):200-202. (in Chinese)
- [7] 刘 泽,朱川曲,谢东海,等.小断面硬岩巷道爆破参数优化设计与实践 [J].采矿与安全工程学报,2007(1):70-73.
- [7] LIU Ze, ZHU Chuan-qu, XIE Dong-hai, et al. Optimized design and practice of blasting parameters for hard rock roadway with small cross section [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007(1):70-73. (in Chinese)
- [8] CHAKRABORTY A K, JETHWA J L. Tunnel blasting techniques in difficult ground conditions [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1994(12):219-239.
- [9] 朱传云.预裂与光面爆破对围岩的影响 [J].爆破,1994,11(2):33-39.
- [9] ZHU Chuan-yun. Effect and analysis of surrounding rock from presplit and smooth blasting [J]. Blasting, 1994, 11(2):33-39. (in Chinese)
- [10] MOXON N T, MEAD D, RICHARDSON S B. Air-decked blasting techniques: some collaborative experiments [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, 1993, 30(5):25-30.
- [11] LOU Xiao-ming, ZHOU Ping, YU Jin, SUN Ming-wu. Analysis on the impact pressure on blast hole wall with radial air-decked charge based on shock tube theory [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 128.
- [12] 谢圣权,程荣芳,杨继云,戴剑勇.大石山隧道光面爆破开挖技术 [J].爆破,2002(3):38-40.
- [12] XIE Sheng-quan, CHENG Rong-fang, YANG Ji-yun, et al. Smooth blasting techniques for excavation of the tunnel in guiyang project [J]. Blasting, 2002(3):38-40. (in Chinese) [13] 朱荣华,林 云,徐学勇,程康.空气间隔装药光面爆破技术探讨 [J].爆破,2004(3):32-33.
- [13] ZHU Rong-hua, LIN yun, XU Xue-yong, et al. Analysis of smooth blasting technology for air-deck charge [J]. Blasting, 2004(3):32-33. (in Chinese)
- [14] 杨仁树,车玉龙,孙 强,等.地铁区间隧道不同装药结构光面爆破应用研究 [J].爆破,2013,30(2):90-94.
- [14] YANG Ren-shu, CHE Yu-long, SUN Qiang, et al. Applied research on smooth blasting with different charge structure in metro running tunnel [J]. Blasting, 2013, 30(2):90-94. (in Chinese)

英文编辑:柯 波