



国防特色学术专著·船舶与海洋工程

# 水下爆炸气泡动力学

SHUIXIA BAOZHA QIPAO DONGLIXUE

姚熊亮 汪 玉 张阿漫 编著

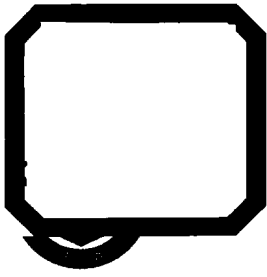
**HEUP** 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



特色学术专著·船舶与海洋工程

# 水下爆炸气泡动力学

姚熊亮 汪 玉 张阿漫 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

## 内容简介

本书主要介绍气泡动力学数值模型及稳定性、自由场中气泡动态特性、近自由面气泡动态特性、近壁面气泡动态特性、气泡与弹塑性结构相互作用、冲击波与气泡相互作用、气泡群动态特性等。本书不仅为舰船结构抗爆抗冲击防护设计提供了理论依据,同时为研制新型水中兵器提供了参考,可供相关学科的研究人员、研究生学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水下爆炸气泡动力学 / 姚熊亮, 汪玉, 张阿漫编著.  
—哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.5  
ISBN 978-7-5661-0113-6

I. ①水… II. ①姚… ②汪… ③张… III. ①水下爆炸—气泡动力学 IV. ①O38 ②O362

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 077626 号

## 水下爆炸气泡动力学

姚熊亮 汪玉 张阿漫 编著  
责任编辑 史大伟

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省教育厅印刷厂印刷 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:360千字

2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-5661-0113-6 定价:46.00元

# 前 言

鱼雷、水雷等兵器水下爆炸是舰船生命的主要威胁之一。以美国为代表的各海军强国为了确保海军舰船安全,自 20 世纪 50 年代以来对首制舰均采取了实船爆炸考核,寻找其薄弱环节,以求改进,并形成了专用软件,制定了舰船抗爆、抗冲击设计标准。在我国,舰船水下爆炸研究略有滞后,由于实船实验数据缺乏,且尚无自主开发的软件,这就影响到相关设计标准的制定。水下爆炸物理现象十分复杂,包括冲击波、爆轰产物形成的气泡、气泡脉动诱发的滞后流、气泡坍塌产生的脉动压力及高速射流等。通常,冲击波具有高频特征,对舰船结构产生局部破坏;而气泡运动引起的滞后流以及脉动压力呈现低频特征,对舰船造成总体破坏,危及舰船的总纵强度,且气泡坍塌形成的高速射流还将引起舰船结构的局部毁伤。因此,气泡载荷对船体结构的破坏作用不容忽视。以往人们把更多的注意力集中在冲击波的研究与分析上,对气泡的种种动态特性关注不多。但近年来,海上实船爆炸和水池模型实验研究表明,气泡载荷是造成舰船结构严重损伤的主要诱因。目前,气泡与自由面、水中结构等相互作用已成为国际上的研究热点,国内外一些研究机构在气泡动态特性方面展开了大量的实验研究和数值研究,取得了一系列值得重视的研究成果。但是,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。

针对以上现状,作者在水下爆炸气泡原理性实验研究的基础上,基于势流理论,建立了气泡动力学三维数值模型,提出了多边界耦合的气泡动力学计算方法。通过研究发现:无论是自由场中、还是近边界气泡运动及其载荷特征均呈现强烈的非线性特征,而且气泡运动不是孤立的,气泡运动对船体结构的毁伤与船体固有特性、海底、自由液面等环境参数密切相关。为此,本书从基础理论出发,系统地讲述了水下爆炸气泡动力学理论与应用,吸收并拓展了国内外最新研究成果,力求充分反映近十年来该领域的新技术和新成果,主要内容包括:气泡动力学数值模型及稳定性、自由场中气泡动态特性、近自由面气泡动态特性、近壁面气泡动态特性、气泡与弹塑性结构相互作用、冲击波与气泡相互作用、气泡群动态特性。本书不仅为舰船结构抗爆抗冲击防护设计提供理论依据,同时为研制新型水中兵器提供参考,可供相关学科的研究人员、研究生学习和参考。

本书是作者长期从事舰船水下爆炸研究以及在研究生教学工作的基础上形成的一本专著,一方面反映作者的工作积累和对一些复杂物理问题的思考和剖析,另一方面融合了作者所在团队的部分研究成果。在此,谨对长期以来共同工作、学习和生活的同事和研究生们表示深切感谢,感谢他们在长期科研工作中对本书的贡献。衷心感谢中国工程物理研究院刘仓理研究员和海军工程大学朱锡教授在百忙中审查书稿,并对书稿提出宝贵的修改意见。本书在

国家自然科学基金(50779007,50809018,10976008,50939022)、国际科技合作(2007DFR80340)、中国博士后科学基金特别资助(200801104)等项目资助下完成。同时,本书作为工业与信息化部国防特色“十一五”规划专著,得到了国防科工局的鼎力资助。

由于水下爆炸气泡运动的复杂性,并涉及多个学科,因此,我们认为本书呈现给读者的不可能是一部精辟的总结性研究成果,而更像是一个探索性的研究计划。在阅读本书的过程中,读者会发现实际上提出的问题比提供的答案要多得多。但愿本书能激发人们对水下爆炸气泡运动特征的好奇心,继而推动更多的研究者加入本项工作中,发现并凝炼出新的科学问题,把我们的探索工作引向深入。最后,在本书成稿过程中参考或引用了国内外一些学者的论著,在此表示感谢。同时由于时间仓促,水平所限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2010年11日

# 符号表

## 罗马符号

$a_c$	药包半径
$a_k$	局部等熵声速
$A_k$	冲击密度比率参数
$b(x)$	浮力曲线
$c$	水中声速
$C$	水中气体浓度
$C_b$	方形系数
$C_D$	阻力系数
$d$	气泡中心距自由面或壁面初始距离
$D$	气泡射流宽度
$D_g$	气体质量扩散率
$e_x$	浮力方向单位矢量
$E$	弹性模量
$E_l$	内能
$E_k$	动能
$E_p$	势能
$E_{\text{mesh}}$	弹性能量
$f$	频率
$f_0$	气泡脉动压力频率
$f_1$	舰船一阶垂向固有频率
$g$	重力加速度
$G$	格林函数
$h$	界面变形量
$H$	爆心初始深度
$J$	进速系数
$k$	线弹性系数
$L, B, T$	船长, 船宽, 吃水
$M$	共振质量
$M(x)$	总纵弯矩
$M_u$	极限弯矩
$n$	摩尔质量
$\mathbf{n}$	单位法向量
$N(x)$	总纵剪力

$O$	坐标原点
$P, p$	压力
$P_A$	冲击波(声波)幅值
$P_c$	饱和蒸汽压
$P_\mu$	单位面积粘滞力
$P_\infty$	无穷远处压力
$P_{in}$	气泡内压力
$p_{out}$	气泡外压力
$p_{max}$	气泡脉动压力峰值
$p$	边界固定点
$q$	边界积分点
$q(x)$	载荷曲线
$r_{pq}$	$p, q$ 二点间距离
$R, r$	位置矢量
$R$	气泡半径
$R_m$	气泡最大半径
$R_{00}$	冲击波运动到气泡时气泡半径
$R_{min}$	气泡最小半径
$s$	距离
$S$	边界表面
$S_f$	自由面边界
$S_s$	结构边界
$S_\infty$	无穷远界面
$S_{fs}$	流固耦合面
$t$	时间
$T$	气泡运动周期
$T_{in}$	气泡内温度
$u$	速度矢量
$u_s$	边界局部速度矢量
$u_r$	半径 $r$ 处径向速度
$U_0$	来流速度
$v$	滞后流速度
$V$	气泡体积
$V_c$	炸药初始体积
$\bar{V}$	流场体积
$V_{jet}$	射流速度
$V_{rel}$	相对射流速度
$V_{opp}$	气泡顶部速度
$w(x)$	重力曲线
$W$	装药质量

$W_{yh}$	最小剖面模数
$W_{acr}$	冲击波临界宽度
$X, Y, Z$	坐标轴
$x, y, z$	直角坐标分量
$z_c$	气泡形心 $z$ 向坐标

## 希腊符号

$r, \theta$	极坐标分量
$\xi, \eta$	局部坐标分量
$\alpha$	流体间密度比
$\beta$	壁面倾斜角
$\Omega$	流体域
$\varphi$	速度势
$\varphi^{re}$	残余速度势
$\varphi^{vr}$	涡环速度势
$\nabla$	哈密尔顿(Hamilton)微分算子
$\lambda(\mathbf{p})$	$\mathbf{p}$ 点处立体角
$\rho$	流体密度
$\rho_c$	药包密度
$\rho_{Rd}$	零压力下水的参考密度
$\gamma$	比热率
$\gamma_f$	距离参数
$\delta$	浮力参数
$\delta_{ij}$	克罗内克(Kronecker)符号
$\varepsilon$	强度参数
$\kappa$	应力储备参数
$\tilde{\omega}$	分布源密度
$\tau$	时间常数
$\mu$	动力黏性系数
$\nu$	运动黏性系数
$\sigma$	表面张力系数
$\sigma_s$	屈服应力
$\sigma_{max}$	最大应力
$\omega$	螺旋桨转速
$\omega_o$	固有频率
$\Gamma$	速度环量
$\in$	单位质量炸药爆炸能



## 上下标及其他规定

对于任意的变量  $Q$ , 如无特殊说明, 有如下定义:

$Q_0$	初始物理量
$Q_a$	气泡平衡状态的物理量
$Q_b$	气泡内或气泡壁上物理量
$Q_i$	第 $i$ 时间步的物理量
$Q_m, Q_n$	第 $m, n$ 单元的物理量
$Q_s$	静水中物理量
$Q_w$	波浪中物理量
$Q_s$	冲击波物理量
$Q_u$	冲击波波前物理量
$Q_1$	冲击波波后物理量
$Q_{\text{ref}}$	参考量
$Q_{\text{total}}$	总量
$Q^m$	结构的物理量
$\Delta Q$	增量、差量

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 水下爆炸气泡基本现象 .....	1
1.2 气泡动态特性研究方法 .....	4
1.3 近边界气泡动态行为 .....	9
参考文献 .....	13
<b>第 2 章 气泡动力学数值模型及稳定性</b> .....	19
2.1 基本理论与方法 .....	19
2.2 轴对称数值模型 .....	26
2.3 三维数值模型 .....	30
2.4 环状气泡模型 .....	37
2.5 数值稳定性方法 .....	45
2.6 不同模型计算精度 .....	49
参考文献 .....	54
<b>第 3 章 自由场中气泡动态特性</b> .....	57
3.1 气泡在自由场中运动 .....	57
3.2 数值实验与物理实验对比 .....	60
3.3 特征参数变化对气泡运动特性影响 .....	63
3.4 回弹气泡脉动压力 .....	66
3.5 装药形状对气泡形态影响 .....	72
3.6 气泡运动公式 .....	73
3.7 计及能量损失的气泡动态特性 .....	76
3.8 表面张力对气泡动态特性影响 .....	80
参考文献 .....	82
<b>第 4 章 近自由面气泡动态特性</b> .....	84
4.1 Bjerknes 力简述 .....	84
4.2 边界大小与数值实验 .....	84
4.3 数值实验与物理实验对比 .....	84
4.4 近自由面气泡环状回弹及水冢现象 .....	86
4.5 特征参数对气泡动态特性及水冢现象影响 .....	87
4.6 针对近自由面 Blake 准则讨论 .....	93
4.7 多气泡与自由面相互作用 .....	94
4.8 气泡与黏弹性边界相互作用 .....	99

4.9 瞬态气泡与弹性膜相互作用 .....	108
4.10 气泡与波浪相互作用 .....	110
4.11 关于自由面破碎现象的讨论 .....	111
参考文献 .....	113
<b>第5章 近壁面气泡动态特性 .....</b>	<b>115</b>
5.1 数值实验与物理实验对比 .....	115
5.2 气泡与水平壁面相互作用 .....	118
5.3 气泡与非水平壁面相互作用 .....	123
5.4 针对壁面 Blake 准则的讨论 .....	127
5.5 气泡与复杂壁面相互作用 .....	128
参考文献 .....	132
<b>第6章 气泡与弹塑性结构相互作用 .....</b>	<b>133</b>
6.1 流场中压力载荷及滞后流 .....	133
6.2 流体边界元法(BEM)与结构有限元法(FEM)耦合 .....	136
6.3 气泡与简单弹塑性结构相互作用 .....	138
6.4 气泡与复杂弹塑性结构相互作用 .....	144
参考文献 .....	161
<b>第7章 冲击波与气泡相互作用 .....</b>	<b>162</b>
7.1 冲击波与气泡相互作用数值模型 .....	162
7.2 规则波与气泡相互作用 .....	168
7.3 冲击波与气泡相互作用 .....	175
7.4 不同数值方法讨论及实例 .....	184
7.5 声波与气泡相互作用 .....	189
参考文献 .....	195
<b>第8章 气泡群动态特性及其溃灭噪声 .....</b>	<b>198</b>
8.1 气泡群动力学数值模型 .....	198
8.2 气泡群动力学数值模型快速解法 .....	201
8.3 气泡群相互作用 .....	206
8.4 气泡群溃灭辐射噪声 .....	220
参考文献 .....	225

# 第1章 绪 论

在自然界中,只要存在流体,就可能产生气泡,这些存在于流体中的气泡可能给人类带来巨大危害<sup>[1,81]</sup>。例如,船舶螺旋桨在水中高速运转时产生的空化气泡,是导致螺旋桨损坏的主要原因;又如,空化气泡曾在南亚毁坏了一个仅使用一个月的水电厂。在诸如这些现象中,脉动气泡形成了高速射流,而射流具有很强的破坏力,可使螺旋桨或叶轮机的叶片产生凹坑,从而破坏其结构<sup>[81]</sup>。此外,军舰在行进时,船尾后的气泡流,特别是大量的白色泡沫,很容易被敌方探测到。特别是由水下爆炸产生的大尺度气泡,直径可达到15米的数量级。气泡运动引起滞后流及脉动压力对舰船造成总体破坏,危及舰船的总纵强度,使舰船在中横剖面处断裂,气泡坍塌形成的射流还将引起结构的局部毁伤,气泡对舰船的毁伤如图1.1所示。近年来,海上实船爆炸和水池模型实验表明,水下爆炸气泡载荷会对水中结构造成严重损伤。目前,气泡与自由面、水中结构等相互作用已成为国际上的研究热点,但仍存在许多现象和本质未被揭示。

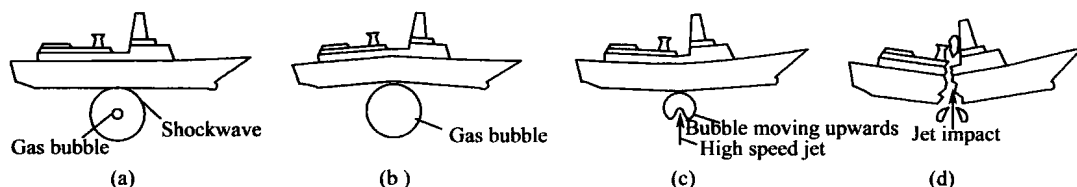


图 1.1 水下爆炸气泡对舰船毁伤示意图

气泡具有较大破坏性的同时,也有被有益应用的一面,如气泡发生器可用于防止冬天停靠在码头的船附近的水结冰,气泡帷幕可用于水下航行器的减阻降噪,气泡还可以应用于工程中以增加钻井速度<sup>[81]</sup>。气泡在治疗结石中还具有医疗价值:在冲击波碎石中,由冲击波产生的压力脉动波形成小的气泡,这些小气泡坍塌时形成射流对结石产生冲击,使结石破裂成较小的颗粒。另一个人们感兴趣的问题是对气泡声学的研究,气泡在产生和溃灭阶段充满噪声,对于研究气候学中的降雨量以及由船和水下潜器产生的水下噪声来说,研究气泡的声学问题很有科学意义<sup>[81]</sup>。总之,上述问题的机理均为气泡与物面、自由面等边界的相互耦合作用。为此,本书从气泡动态特性的基本现象入手,侧重于水下爆炸气泡,阐述气泡与刚性边界、柔性边界之间的相互作用,旨在揭示气泡与复杂界面的耦合特性及其对水中结构的毁伤机理。

## 1.1 水下爆炸气泡基本现象

数百年来,人们对气泡一直很感兴趣,大到水下爆炸气泡,小到医学上应用的微型气泡。由于本书侧重于分析水下爆炸气泡,下面详细叙述水下爆炸现象及其产生气泡的原理。

### 1.1.1 气泡脉动及滞后流

爆炸是指大量能量在有限体积和极短时间内快速释放或急骤转化的现象。通常爆炸后

会产生高温高压的气体,其温度可高达几千摄氏度,压力可达几万个大气压。因此,爆炸可以产生巨大的威力<sup>[9]</sup>。

水下爆炸是一个非常复杂的能量转换过程。但从它对结构的破坏角度来看,可以分为两个过程:(1)冲击波的产生和传播;(2)爆炸物气体与周围水的惯性作用<sup>[10]</sup>。

冲击波由引爆爆炸物产生,冲击波在产生之后,迅速到达水气交界面,进入水中,以极快的速度向外传播。冲击波的特点是:(1)压力特别高,在爆心压力可达几万个大气压;(2)持续的时间很短,一般为毫秒级。爆炸物在引爆之后,变成高温、高压气体,该气体被周围的水围成气泡。气泡内部的高压将驱使周围的流体以小于声速的速度向外扩散运动(滞后流),在此阶段,将水看成不可压缩的介质。由于惯性作用,气泡将过度膨胀,同时其内部压力减小,直至仅占外部流体静水压很小一部分,气泡表面的负压差使气泡的膨胀运动停止,并使气泡产生收缩(坍塌)运动,收缩过程由流场中周围流体静压力驱动,该过程将会继续直至不断增加的内部气泡压力将该过程瞬间逆转过来。气体和水的弹性特性为气泡振荡提供条件,该过程被称为气泡脉动,脉动过程直至气泡破裂为止。气泡排开一部分密度比内部气体大的流体,排开的流体质量远远超过了气泡内部气体的质量,这就提供了浮力。浮力使气泡向上移动,由浮力及重力作用产生的气泡运动及其向上迁移的过程如图 1.2 所示。水下爆炸脉动气泡的特点是:(1)脉动气泡能产生很高的压力,其幅值为冲击波压力的 20% 左右;(2)持续的时间约为秒级。气泡脉动是空中爆炸所没有而水下爆炸所特有的现象<sup>[11]</sup>。

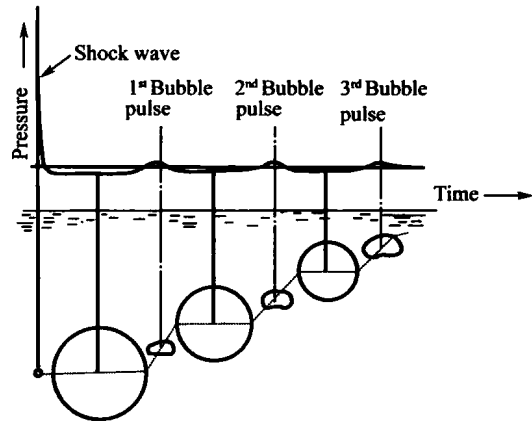


图 1.2 典型水下爆炸过程

水下爆炸冲击波和气泡载荷均会对附近的结构产生强大的破坏力,但由于它们的强度和作用时间不同,二者的结构损伤模式不同。冲击波所经过的物体,在冲击波强大的压力作用下,迅速地屈服,发生严重损伤,直至断裂。由于冲击波持续时间很短,冲击波对自振周期在毫秒级的结构具有非常大的损伤力,而自振周期在毫秒级附近的结构在船体上一般为局部结构,如板、板格或板架等,因此水下冲击波一般对局部结构的损伤很严重,对船体的总体破坏影响较小<sup>[9]</sup>。

在 20 世纪 80 年代以前,水下爆炸损伤的相关研究绝大部分集中于冲击波造成的结构破坏。但是从 20 世纪 80 年代中期起,人们意识到气泡对结构的损伤可能比冲击波来得更严重<sup>[11]</sup>。原因是水下冲击波往往造成局部损伤,而现代舰船的设计有足够的强度储备来抵抗局部损伤。因此,水下冲击波一般不会造成舰船的沉没。然而,气泡不同,气泡脉动驱使周围大面积流体的运动,形成滞后流,且气泡坍塌时产生脉动压力。低频的滞后流及脉动压力均对舰船造成总体破坏。如果气泡脉动频率与舰船的固有频率接近时,会引起船体结构“鞭状运动”,加剧对舰船的破坏作用,危及舰船的总纵强度,将船体拦腰折断。此时,船体结构通常还将遭受气泡坍塌形成的高速射流的破坏作用,以致折断的船体很快沉入水中,其破坏过程如图 1.1 所示。

### 1.1.2 高速射流

为了揭示气泡的动力学特性,最初人们研究的是球对称气泡的运动。多年之后,人们发现在大多数情况下,气泡在坍塌阶段呈现非球对称运动。一些物理实验和数值模拟清楚地显示:当气泡在结构表面附近振荡时(假设浮力可被忽略,且气泡处于稳定的流场中),气泡在膨胀阶段被结构表面轻微地排斥开,而在坍塌阶段被结构表面强烈地吸引,这时在气泡内部将会形成一股射流,这股射流产生于远离结构表面的一边,并高速穿过气泡,直到撞击到气泡壁的另一边,射流成因可以用著名的 Bjerknes 效应来解释<sup>[81]</sup>。在不计及浮力影响的情况下,边界附近气泡形成指向壁面的正射流,如图 1.3 所示<sup>[81]</sup>。实际上,在计及浮力的情况下,边界附近的气泡坍塌形成指向壁面的偏射流,参见本书的第 5 章。

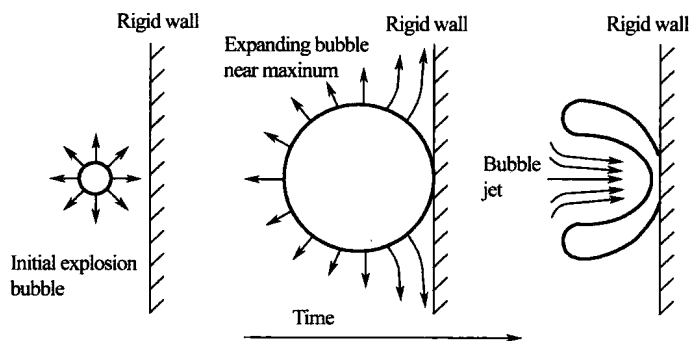


图 1.3 边界附近气泡射流形成过程

另一方面,如果气泡在自由表面附近振荡,再次假定气泡处于零浮力且稳定的流场中,这时在气泡的坍塌阶段也能形成一股射流,这股射流的方向远离自由面,通常气泡将会被自由表面击退。若计及浮力影响,自由面附近气泡产生射流方向不确定,与特征参数密切相关,参见本书第 4 章。由边界影响使气泡产生的射流,称为边界诱导射流。通过研究发现,即使当气泡附近不存在任何边界时,由于重力影响,气泡内部仍然会产生射流,如图 1.4 所示<sup>[81]</sup>。气泡射流由流体中的静压力梯度产生,这种类型的射流被称为引力诱导射流。随着气泡的运动,形成的射流可能会穿透到气泡的另一侧,气泡则变成多连通的,从而形成环状气泡。环状气泡将继续向上移动并收缩,直到某一平衡位置处气泡迅速停止收缩。在这个时候,气泡变得不稳定,可能破裂成更小的气泡或者膨胀时又融合成一个气泡。这种现象在大气泡和小气泡中均会发生,但是在水下爆炸气泡中更为普遍。

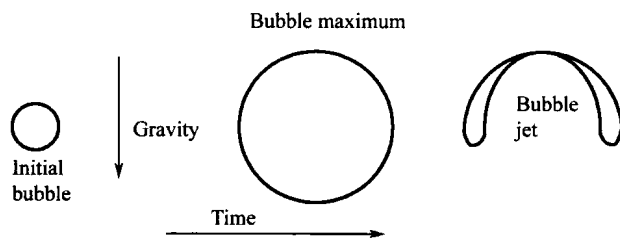


图 1.4 重力场中气泡射流形成过程

气泡射流由流体中的静压力梯度产生,这种类型的射流被称为引力诱导射流。随着气泡的运动,形成的射流可能会穿透到气泡的另一侧,气泡则变成多连通的,从而形成环状气泡。环状气泡将继续向上移动并收缩,直到某一平衡位置处气泡迅速停止收缩。在这个时候,气泡变得不稳定,可能破裂成更小的气泡或者膨胀时又融合成一个气泡。这种现象在大气泡和小气泡中均会发生,但是在水下爆炸气泡中更为普遍。

### 1.1.3 气泡能量份额

水下爆炸主要呈现两个阶段:冲击波和气泡。大量的物理实验分析表明,药包爆炸产生的冲击波能量占总能量的 53% 左右,气泡占总能量的 47% 左右。这个能量可以按气泡脉动周期的实验值算出,冲击波能量的计算公式为

$$E_s = K_1 \pi S^2 / (\rho c) \int_0^{6.7\tau} P_s(t)^2 dt \quad (1.1.1)$$

气泡能量的计算公式为

$$E_B = K_2 T_3 / W \quad (1.1.2)$$

式中,  $K_1$  和  $K_2$  为经验系数,  $S$  为药包到压力传感器的距离,  $W$  为药量,  $\rho$  为水密度,  $c$  为水中声速,  $P_s(t)$  为冲击波压力,  $\tau$  为冲击波时间常数,  $T_3$  为气泡脉动周期。

由此可知, 气泡运动所携带的能量与冲击波携带的能量相当, 冲击波具有压力峰值大、频率高等特征, 如图 1.2 所示; 而气泡脉动压力虽然压力峰值较小, 但作用时间很长, 具有低频特征, 对水中结构特别是水面舰船具有很强的破坏力, 危及舰船的总纵强度。分析表明, 气泡在第一次坍塌(脉动)后, 气泡内的剩余能量只有初始能量的 7% 左右, 故一般只考虑第一次脉动对水中结构的破坏作用。

近几年的实验研究成果表明, 改变装药成分可以改变冲击波和气泡所携带能量的比例, 例如炸药中的铝氧比影响水中爆炸能量输出结构, 当铝氧比增大到 1 时, 其水中爆炸的气泡能接近最大值, 气泡能大约能占到爆炸总能量的 70%, 接近普通 TNT 炸药的 1.5 倍, 如图 1.5 所示<sup>[63]</sup>。这种方法可使水中爆炸装置能量输出结构与爆炸目标的易损性相匹配, 借以提高爆炸毁伤效果。

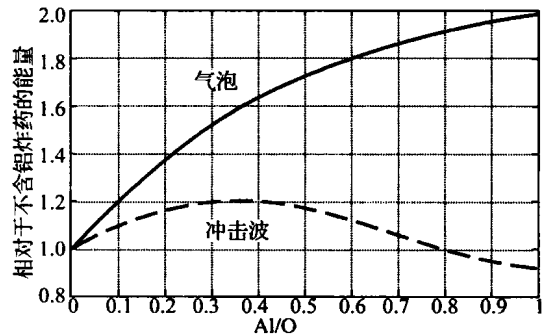


图 1.5 铝氧比对炸药水下爆炸的影响

## 1.2 气泡动态特性研究方法

水下爆炸在国民经济和国防建设中均具有重要的地位。其中冲击波及其对结构的损伤在 20 世纪 80 年代中期以前一直是水下爆炸研究的核心问题, 现在有大量的文献和研究成果, 也有较成熟的数值模拟方法和大量的实验数据支持。较著名的数值模拟方法有基于 Geers 提出的双渐近近似 DAA 方法<sup>[21]</sup>的水下冲击波分析程序<sup>[22]</sup>, 该程序对水下爆炸领域影响深远。在国内关于水下爆炸冲击波及其对结构的毁伤研究的文献也很多<sup>[23-26]</sup>, 因此, 关于冲击波在此不再赘述, 下面重点阐述关于气泡的研究方法及进展。

Rayleigh<sup>[7]</sup>是在 20 世纪初期第一个研究气泡的人, 自从 Reyleigh 建立不可压缩流场中球形气泡的运动方程以来, 许多学者不断完善和发展气泡溃灭的理论。20 世纪 50 年代初, 学者开始从实验方面对气泡溃灭进行研究。20 世纪 70 年代以来, 伴随着计算机技术的发展, 人们开始了对气泡溃灭的数值模拟方面的研究。大约经过半个多世纪的发展, 气泡动力学研究可以在很多领域看到: 从船舶推进器上的气泡到泵上的气泡<sup>[10]</sup>; 水下爆炸气泡<sup>[3]</sup>以及气泡声致发光的动力学特性<sup>[27]</sup>。下面从实验技术、理论分析、数值模拟等方面阐述气泡动力学的研究方法及进展。

### 1.2.1 实验技术

为了直观地显示气泡溃灭的过程, 20 世纪 50 年代末期人们开始利用电解泡、火花泡进

行气泡溃灭实验,这些实验方法初步解释了气泡在固壁附近溃灭时射流的成因<sup>[28]</sup>。但由于利用这些方法产生的气泡缺乏球对称性,仅可以用来观察气泡溃灭的大致情形而不能进行定量研究。自从利用激光产生气泡后,气泡溃灭的实验得到进一步的发展。激光泡的产生原理为:一束强激光脉冲作用于液体中的一点,使局部的液体电离产生一个等离子区,该等离子区迅速膨胀从而形成一个球形气泡。激光泡比电解泡、火花泡有着明显的优点。首先,可以通过调节激光控制气泡的产生时间及位置;另外,激光泡有良好的球对称性。这样保证了激光泡溃灭实验结果与数值解有可比性。研究人员利用激光泡做了大量气泡溃灭的实验,得到了自由场中、刚性边界以及弹性边界附近气泡溃灭产生射流的速度,对气泡溃灭的细节及空化噪声进行了较精确的测量,并利用高速摄影仪拍下气泡溃灭的整个过程,观察到气泡溃灭的射流现象,为数值模拟计算提供了宝贵的实验数据<sup>[29-46]</sup>。

上述均为采用火花泡、激光泡等代替炸药在水中爆炸研究气泡的动态特性,对水下爆炸气泡的动态特性研究有很大的参考价值,但与真实水下爆炸产生气泡的运动特征仍旧存在一定差异,因此,直接利用药包爆炸产生的气泡研究其动态特性亦十分必要。在真实的水下爆炸气泡领域,Cole<sup>[3]</sup>的工作包括很多至今还非常相关实验数据以及一些简单的理论模型。近年来随着电子技术、光测技术以及新材料新工艺的不断涌现,水下爆炸实验测试技术得到了很大的提高,特别是高速摄影技术的快速发展,使得捕捉气泡动力学行为成为可能。近年来,直接利用药包爆炸产生气泡的实验研究取得了较大的进展,在实验中采用高速摄影捕捉了水下爆炸气泡膨胀、坍塌以及射流形成的过程,如图 1.6 所示,并采用非接触激光传感装置测得气泡载荷对水中结构的破坏作用,发现气泡载荷对结构造成严重的损伤<sup>[47-48]</sup>。进一步的分析表明,水下爆炸气泡滞后流以及脉动载荷对舰船造成严重的总体破坏<sup>[48-51]</sup>,激起船体的鞭状运动,且是使频率为数十赫兹的舰船设备产生冲击振动的主要能源,同时气泡坍塌形成的射流载荷对水中结构造成局部毁伤。

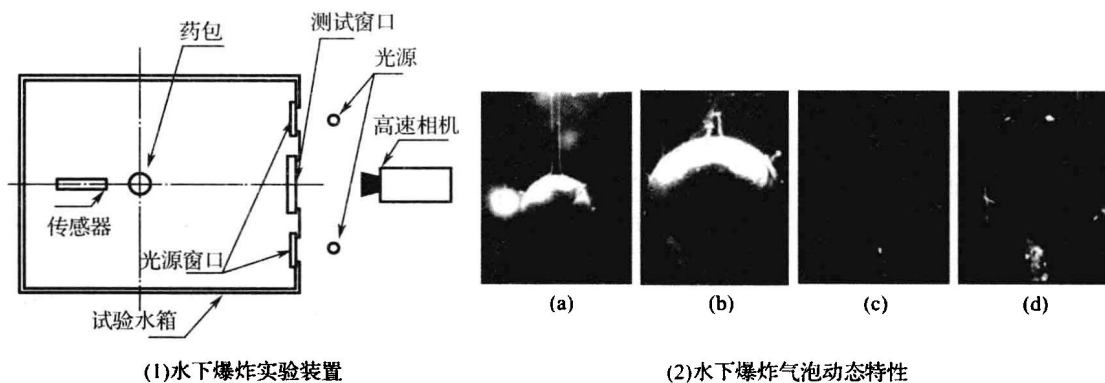


图 1.6 水下爆炸气泡实验

## 1.2.2 理论分析

### 1. 理论模型

对于气泡运动的研究在早期主要通过理论分析和实验相结合来完成,其中理论分析有助于研究简单的模型,揭示其机理。在推导气泡运动的理论模型过程中,通常的做法是将流



体看作不可压缩、无粘和无旋的理想流体,从而忽略压缩效应和黏性效应,认为在第一个脉动阶段压缩效应和黏性效应均不重要。在球对称气泡的发展和坍塌阶段,可以通过对连续方程进行积分得到径向速度场,产生类似源和汇的流场<sup>[46]</sup>。Rayleigh 采用这种方法得到了无限流域中的气泡解。建立了不可压缩流场中理想球形气泡的运动方程(Rayleigh - Plesset 方程,简称 RP 方程):

$$R \ddot{R} + 3/2 \dot{R}^2 = (P_R - P_0)/\rho_0 \quad (1.2.1)$$

利用此方程进行气泡溃灭的研究,在气泡的半径较大时,得到的结果具有一定的准确性,当气泡溃灭至很小的半径时,由于没有考虑气泡的含气量及表面张力、黏滞性、可压缩性等因素的影响,导致了一些不合理的结果。为了对 Rayleigh 理想气泡的运动方程进行修正,研究人员做了一系列的工作<sup>[52-54]</sup>,从不同的角度修正了 RP 方程,得到了考虑不同因素的气泡运动方程,其中,如考虑流体的黏性和表面张力,得到的气泡运动控制方程:

$$R \ddot{R} + 3/2 \dot{R}^2 = (P_R - P_0)/\rho_0 - \frac{2\sigma R}{\rho_0} - \frac{4\mu \dot{R}R}{\rho_0} \quad (1.2.2)$$

考虑气泡内气体成分影响导出的 Nolting - Neppiras 方程:

$$R \ddot{R} + 3/2 \dot{R}^2 = [P_R - P_0 + (P_R - P_0)(R_0/R)^{3\gamma}]/\rho_0 \quad (1.2.3)$$

计及流体可压缩性时,根据 Kirkwood - Bethe 假设导出的 Gilmore 方程式:

$$R \dot{R}(1 - \dot{R}^2/c_0) + 3/2 \dot{R}^2(1 - \dot{R}(3c_0)) = -P_0/\rho_0 \quad (1.2.4)$$

总之,基于上述理论,人们对气泡溃灭理论分析多数以球形溃灭的假设为基础。对于偏离球形不大的气泡,可采用对气泡壁作球面函数展开,推导出理想流体下的近似方程<sup>[55-57]</sup>。然而,对于偏离球形很大的气泡运动,目前理论上仍还没有很好的方法解决。当引入边界后,有几种解析方法可以采用。一种方法是根据球形谐函数来解,每一项系数均是时间的函数并满足非线性微分方程<sup>[58]</sup>,展开式的第一项是上述提到的瑞利解,而高阶项引入气泡形状的不对称性。该方法能显示射流形成的早期阶段,但是不能跟踪时域内射流的发展,对于气泡大变形情况存在局限性<sup>[59-60]</sup>。

从工程应用出发,Geers and Hunter<sup>[20]</sup>

建立的水下爆炸数值模型可以用来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的压力曲线,此模型方便了有关气泡脉动压力的工程计算,如计算 1 kg TNT 炸药在水下 20 m 深处爆炸,流场中距离气泡中心 10 m 处的冲击波压力、气泡脉动压力、气泡半径及气泡向上迁移的过程随时间变化的过程如图 1.7 所示。类似地,人们推导了关于流场中气泡脉动压力的估算模型<sup>[60-64]</sup>。然而,上述模型研究的均为球形气泡,未考虑气泡的非球状效应,而实际上,气泡在流场中的运动均呈现非球状特征,所以上述理论分析无法研究气泡射流引起的非球状现象。

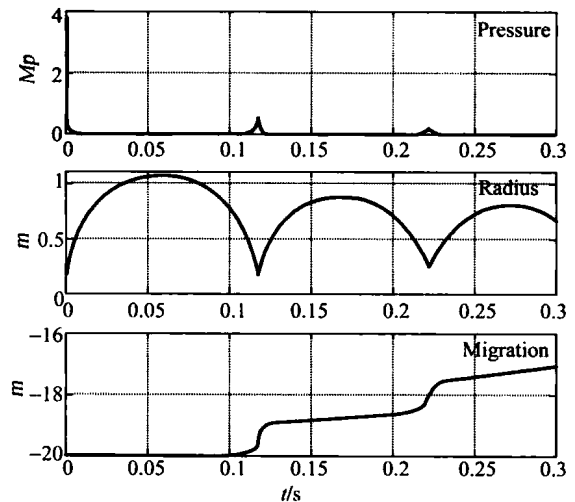


图 1.7 压力波、气泡半径及位移的时历曲线