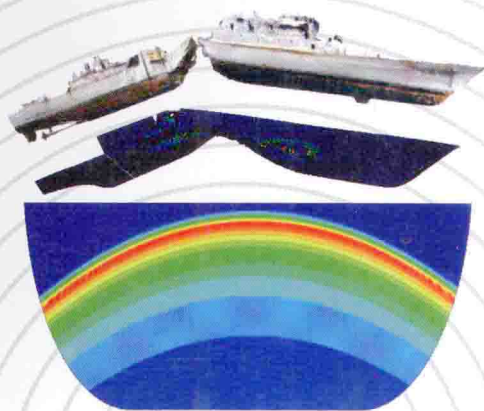


本书由大连市人民政府资助出版

# 水下爆炸

## 结构毁伤的数值计算

宗智 赵延杰 邹丽 著



科学出版社

# 水下爆炸结构毁伤的数值计算

宗 智 赵延杰 邹 丽 著

本书由大连市人民政府资助出版

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

水下爆炸对舰船结构构成了最严重的威胁。水下爆炸结构毁伤的数值计算技术是过去半个世纪水下爆炸领域取得的最显著的进展,大大节省了试验经费,缩短了研究周期。水下爆炸计算涉及流体、结构、炸药等多个学科,是计算力学中最困难的一个领域。既能保证工程精度又能完成全船冲击分析的计算技术首推 LS-DYNA 软件所提供的双渐近近似方法和 ABAQUS 软件所提供的水下爆炸数值方法(AUA)。前者对华禁运,后者是目前国内少有的全船分析有效工具。本书尽量使用简单语言对水下爆炸的物理现象和结构毁伤模式作一简单介绍;对 ABAQUS 水下爆炸分析方法及其实施作较为详细的说明;同时,提供试验验证例子,使读者对计算方法的精度和能力有一个全面的了解和掌握。

本书可供高校、研究所的研究人员和対水下爆炸感兴趣的读者参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

水下爆炸结构毁伤的数值计算/宗智,赵延杰,邹丽著. —北京:科学出版社,2014. 6

ISBN 978-7-03-040969-0

I. ①水… II. ①宗… ②赵… ③邹… III. ①水下爆炸-数值计算  
IV. ①TV139. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 123885 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:赵德静 / 封面设计:耕 者

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



2014 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:14 3/4 插页:6

字数:284 000

定价:109.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 引 言

水下爆炸结构毁伤数值计算的最大挑战是：算得准。

由于水下爆炸的物理过程瞬变复杂，结构毁伤模式多样，涉及当前多个科学前沿问题，既有机理上不清楚的地方，也有数值上的不确定之处，使得水下爆炸的数值模拟和试验结果相比，经常相差较大。直到最近，人们还是经常带着怀疑的态度来看待水下爆炸数值计算。

限制水下爆炸结构毁伤数值精度的力学因素就是机理不清楚。水下爆炸涉及多种载荷：水下冲击波、气泡、空化二次加载以及流体-结构耦合效应，这些载荷在时间尺度上相差较大，引起的结构响应范围变化也大。尽管结构的弹性响应已经很清楚，但是结构的动力毁伤还在研究中。冲击波引起的结构动力毁伤和气泡引起的结构动力学毁伤机理不同。因此，无论是载荷，还是结构毁伤，都很难统一到一种力学模型。

限制水下爆炸结构数值精度的数值因素主要是载荷计算方法和流体-结构耦合计算方法。尽管有很多计算流体-结构动力学耦合的方法，但是，在目前的计算条件限制下，流体使用线性声学近似，而结构采用非线性的计算方法，可以出人意料地得到相对令人满意的结果。特别是对中远场非接触水下爆炸，这种近似给出工程中最令人满意的结果。基于这种假设，开发出两种方法：声-结构耦合方法计算水下爆炸和双渐近近似(DAA)方法计算水下爆炸。后者一直对华禁运，前者是ABAQUS所采用的方法。

ABAQUS水下爆炸分析法体现在如下的三个统一：①冲击波和气泡载荷计算理论统一。由于都采用可压缩流体假定，气泡溃灭时的压力能够更准确地捕捉到；爆炸载荷计算基于试验。②流体-结构耦合方法统一。都采用声-结构耦合方法，大大提高了计算方法的精度。③流体和结构离散方法统一。无论流体，还是结构，都采用有限元离散，这是独一无二的，既降低了计算误差，又提高了计算稳定性和计算效率。这些独特的处理方法使得 ABAQUS 水下爆炸分析方法（或者 ABAQUS 水爆分析法，或者 AUA(ABAQUS UNDEX Analysis)成为诸多水下爆炸数值方法中中远场爆炸数值精度最好、功能最广和稳定性最强的方法。因此，有必要介绍这种方法。本书一方面通过算例重点介绍 ABAQUS 水爆分析法，同时通过算例和试验对比，来阐明数值方法的精度和结构毁伤机理。

水下爆炸的传统研究方法是进行海上实船试验。自 19 世纪 Abbot 将军首次进行了水下爆炸试验以来，人们对于水下爆炸的研究已经有一百多年的历史了。

由于战争的需要,水下爆炸研究在第一、二次世界大战得到了快速发展。日本以 Toshi 号舰为靶标,对其在首、中、尾三个地方遭遇攻击情况下的毁伤进行了海上实船试验,获得了大量的数据。这些数据总结在三部论文集中。这种研究,在第二次世界大战中得到了回报。日本的舰艇比美国舰艇的抗爆抗冲击性能好得多。这促使美国在第二次世界大战后对水下爆炸开展了广泛的研究,进行了大量的试验,积累了丰富的资料,并对美国的舰艇结构设计产生了深远的影响。美国在第二次世界大战期间和第二次世界大战后,对舰艇的抗爆问题进行了非常系统的研究,还在比基尼岛进行了多次规模巨大的实船核爆炸试验,取得了很多成果。在 2009 年美国对一艘退役的航母进行了海上毁伤试验,爆距由远及近,直至把该航母炸沉。澳大利亚在 20 世纪 80 年代开始了抗冲击研究,并在 20 世纪 90 年代进行了海上实船试验,使用鱼雷将一艘驱逐舰炸入太平洋底。

虽然试验研究是再现物理过程的最可靠手段,但是由于大多数水下爆炸试验都可能对目标产生破坏,实船试验研究需要消耗大量的人力、物力和财力,很难大规模进行。而在理论研究方面,舰船结构遭受水下爆炸载荷作用的过程,是一种复杂非线性动态过程,属大变形、强非线性(材料非线性、几何非线性、运动非线性)问题,涉及流体力学、固体力学以及结构力学等多学科,分析水下爆炸载荷作用下的结构响应非常复杂。对于实际问题,企图建立一个精确的数学模型而得到解析解是非常困难的。对于复杂的水下爆炸问题,数值方法从可行性及经济性上都是比较占优势的。因此,数值方法是目前水下爆炸的主要研究手段。

水下爆炸载荷作用下的结构弹性响应,在过去七十年里,已经有非常多的研究,计算方法也日趋成熟。从实际海战来讲,在水下爆炸载荷作用下,有意义的研究则是结构变形超出弹性,进入塑性,甚至折断(称为毁伤)。尽管水中兵器关心的是舰船毁伤效果,尽管舰船生命力关心的是舰船受打击后的剩余强度和生存能力,但是绝大多数研究都集中在水下爆炸载荷作用下结构的弹性响应,对于水下爆炸结构毁伤的研究非常不充分。因此,展开对水下爆炸结构毁伤的研究更有意义,特别对水中兵器的毁伤威力的评估和舰艇生命力的预报都是不可或缺的。

水下爆炸结构毁伤的数值计算技术还没有完全建立起来。无论在力学建模(机理),还是流体-结构耦合计算方法方面,尚在探讨之中。因此,迫切需要总结近年来在数值计算方面取得的成熟研究成果,特别是那些经过试验验证、揭示了毁伤机理的力学模型和计算方法,尽快呈现给读者;同时,为水中兵器毁伤效果和舰艇抗冲击性能的评估提供先进的数值计算。本书就是为了满足这种需求而完成的。

本书的目的有三:第一,简单介绍水下爆炸的物理过程和对舰船结构的毁伤效应。水下爆炸是高度专业化的很小领域;知之不多,熟知更少。第二,以 ABAQUS 水爆分析方法为中心,介绍水下爆炸结构毁伤的一种比较成功的数值预报方法,为进一步的水中兵器和舰艇抗冲击能力的评估提供数值工具。第三,对水下爆炸数

值计算方法进行初步的 V & V (Verification & Validation)。通过和试验结果对比,揭示水下爆炸毁伤机理,分析数值方法的精度。所以,物理过程和机理、计算方法、试验验证是本书所强调的水下爆炸的三个重要方面。这也是我们当初的设想,即在一本书中,有理论、有数值实施、有验证,让读者快速进入这个领域。因此,本书可以为进入水下爆炸领域的人提供一个快速的入门指导。

本书的安排如下:第 1 章简单介绍水下爆炸的现象和效应;第 2 章介绍水下爆炸载荷的计算方法和材料的弹塑性模型,这是 ABAQUS 软件的理论基础;第 3 章介绍声-结构耦合理论;第 4 章介绍冲击波作用下的结构毁伤;第 5 章介绍气泡作用下结构的毁伤;第 6 章则处理空化效应及其对结构的二次加载;第 7 章给出一个完整的实船分析例子。

由于时间仓促,本书离我们当初的设想还有差距,一些细节和理论被人为地忽略。恳请读者发现问题时,及时告诉作者,建立互动,共同搞好数值模拟水下爆炸的工作。

感谢以下基金或者项目的支持:国家自然科学基金(项目编号:50921001, 51221961, 51279030, 51379033);国家重点基础研究发展计划项目(项目编号:2010CB832700, 2013CB036101);工业和信息化部高技术船舶科研项目。感谢工业装备结构分析国家重点实验室。

感谢为本书做出贡献的所有人,特别是王婕、谢晖、许斐、徐永刚、叶帆、张艺凡、陈岗等学生。

作 者

2014 年 4 月 30 日

# 目 录

## 引言

第 1 章 水下爆炸物理现象和结构毁伤效应	1
1.1 水下爆炸物理现象	1
1.1.1 炸药	2
1.1.2 爆轰过程	2
1.1.3 冲击波	3
1.1.4 气泡运动	4
1.1.5 空化效应	7
1.2 水下爆炸造成的结构毁伤	8
1.2.1 局部毁伤	8
1.2.2 总体折断	8
1.2.3 后爆炸毁伤	10
1.3 水下爆炸软件的简介	11
1.3.1 LS-DYNA 软件在水下爆炸中应用	11
1.3.2 DYTRAN 在水下爆炸中的应用	12
1.3.3 ABAQUS 在水下爆炸中的应用	12
1.3.4 AUTODYN 在水下爆炸中的应用	12
1.4 小结	14
参考文献	14
第 2 章 水下爆炸载荷与材料弹塑性本构模型	16
2.1 水下冲击波	16
2.1.1 压力峰值 $P_m$ 及其计算参数	18
2.1.2 时间常数 $\theta$ 及其计算参数	19
2.1.3 冲量 $I$ 及其计算参数	20
2.1.4 能流密度 $E$ 及其计算参数	21
2.1.5 相似性验证	22
2.2 气泡运动	23
2.2.1 气泡的脉动	23
2.2.2 气泡的上浮	24
2.2.3 气泡的压力	25

2.3	水下爆炸载荷半经验公式	26
2.3.1	试验压力时程曲线	26
2.3.2	静止气泡压力时程曲线解析表达	26
2.3.3	上浮气泡运动求解	29
2.4	材料弹塑性本构关系	31
2.4.1	弹性模型	31
2.4.2	塑性模型	32
2.5	小结	34
	参考文献	35
<b>第3章</b>	<b>声-结构耦合理论</b>	<b>36</b>
3.1	声-结构耦合理论	36
3.1.1	基本控制方程	36
3.1.2	边界条件	37
3.1.3	离散的流体-结构耦合方程	39
3.1.4	水下爆炸载荷输入	40
3.2	显式动力分析	40
3.2.1	显式时间积分	40
3.2.2	显式方法的条件稳定性	41
3.3	水下爆炸造成结构毁伤的理论研究	42
3.3.1	水下爆炸冲击作用下圆板的黏塑性响应	43
3.3.2	水下气泡脉动下自由梁的动塑性响应	47
3.3.3	空化现象	52
3.4	小结	56
	参考文献	56
	附录:计算片空化的理论公式和 Matlab 程序	56
<b>第4章</b>	<b>水下冲击波结构毁伤计算</b>	<b>60</b>
4.1	水下冲击波结构毁伤建模	60
4.1.1	水下冲击波载荷的定义	60
4.1.2	流体-结构耦合定义	62
4.1.3	材料模型和破坏定义	62
4.1.4	水域几何建模与网格剖分	64
4.2	水下冲击波简单结构毁伤的验证	66
4.2.1	圆板模型	66
4.2.2	气背方板模型	69
4.2.3	圆桶模型	73



4.3	船模在水下冲击波作用下的毁伤验证	77
4.3.1	船模模型描述	77
4.3.2	网格收敛性验证	80
4.3.3	计算结果比较	85
4.4	实船冲击波响应验证	90
4.4.1	有限元模型及测点位置	90
4.4.2	结果分析	92
4.5	水面舰艇在近场水下爆炸下的毁伤模式研究	95
4.5.1	计算模型描述	95
4.5.2	毁伤演化过程	95
4.5.3	毁伤模式	98
4.6	小结	100
	参考文献	101
<b>第5章</b>	<b>气泡诱导的结构毁伤计算</b>	<b>102</b>
5.1	气泡毁伤建模	102
5.2	圆柱壳结构气泡毁伤的验证	103
5.3	简单箱型船冲击波-气泡毁伤的验证	110
5.3.1	试验比较	110
5.3.2	毁伤机理进一步研究	120
5.4	具有刚体位移的鞭状振动	130
5.5	冲击波和气泡联合作用下结构的三种运动	137
5.5.1	计算模型设计	137
5.5.2	计算工况及结果	138
5.6	整船自由振动	146
5.7	实船气泡响应	150
5.8	小结	151
	参考文献	152
<b>第6章</b>	<b>水下爆炸空化效应</b>	<b>153</b>
6.1	片空化效应计算和试验比较	153
6.1.1	片空化闭合溃灭试验	153
6.1.2	空化二次加载试验	158
6.2	空化效应对水面舰船二次加载的单机计算	163
6.2.1	单机计算模型说明	163
6.2.2	空化效应对船舶结构响应的影响	163
6.2.3	二次加载的分析	167

---

6.3	空化效应对水面舰船二次加载的并行计算 .....	170
6.4	冲击波、气泡和空化联合作用下背空板动态响应 .....	177
6.5	小结 .....	181
	参考文献 .....	181
<b>第7章</b>	<b>水面舰艇水下爆炸分析例</b> .....	<b>182</b>
7.1	实船主尺度 .....	182
7.2	建立全船的三维几何模型 .....	183
7.3	创建全船的有限元模型 .....	187
7.4	模态分析 .....	195
7.5	ABAQUS 水下爆炸关键字设置 .....	197
7.6	ABAQUS 水下爆炸结果分析 .....	207
	参考文献 .....	217
<b>索引</b>	.....	<b>218</b>

# 第 1 章 水下爆炸物理现象和结构毁伤效应

本章从爆炸载荷的角度,简单介绍水下爆炸的爆轰过程,以及后续产生的三种主要非接触爆炸载荷:冲击波、气泡和空化。然后对水下爆炸造成的结构毁伤进行简单分类总结。

## 1.1 水下爆炸物理现象

所谓水下爆炸指的是在水中很小区域有大量能量(爆源)突然释放的过程。从力学过程角度来讲,水下爆炸大致可以分为四个主要过程:炸药的爆轰,冲击波的形成和传播,气泡的脉动和上浮,以及冲击波在与自由水面和结构的相互作用下产生的空化。空化可能对结构造成二次加载。图 1.1 是水下爆炸的几个主要过程示意图。

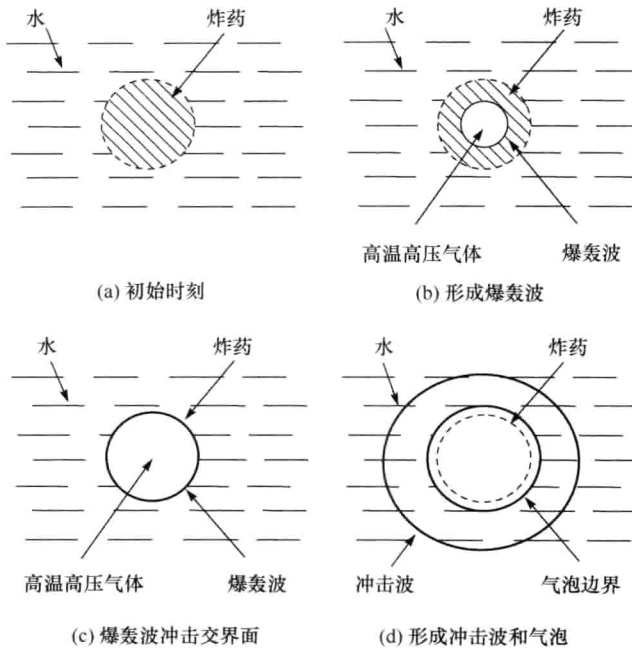


图 1.1 水下爆炸过程示意图

### 1.1.1 炸药

能够在水中很小空间中提供集中能量的最简单方法就是炸药。炸药是在一定的外界作用下(如受热、撞击)能发生爆炸,同时释放热量并形成高热气体的化合物或混合物。炸药可以是固态、液态,也可以是气体。如图 1.1(a)所示,在初始时刻炸药(图中阴影部分)置于水中。通常在能量突然释放的过程中(爆炸),还伴有光、热、声以及压力的产生。炸药中储存的势能可以是如下几种:

- (1) 化学能,如 TNT、粉尘;
- (2) 高压压缩气体,如气罐、喷雾罐;
- (3) 核能,如裂变同位素铀-235 和钚-239。

依照膨胀速度,炸药分为“高能炸药”和“低能炸药”。如果膨胀速度大于声速(称为爆轰,见 1.1.2 节),就是“高能炸药”。反之,称为“低能炸药”。本书只研究高能炸药。最常见的高能炸药有三硝基甲苯(TNT)、特屈儿(Tetryl)、黑索金(RDX)、熔黑梯铝(RS211)和太恩(PETN)等。除此之外,还有电流加热导体或击锤撞击产生的热量引燃某种特别敏感物质的化学爆炸,如液化天然气的爆炸。

为了方便起见,常把其他炸药的威力换算成同等威力 TNT 炸药的重量,即当量系数。表 1.1 给出几种常见炸药的当量系数,还给出常见炸药的爆热、爆速等,它们都是炸药的爆炸性能指标。

表 1.1 几种常见炸药的物理参数

炸药名称	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	爆速/(m/s)	爆热/(J/g)	当量系数
TNT	1.566	6852	4480	1
RS211	1.638	7350	6197	—
GUHL	1.798	5450	7800	—
RDX	1.816	8750	6025	1.5
Tetryl	1.73	7570	—	1.25
PETN	1.723	8083	6404	1.2

### 1.1.2 爆轰过程

爆轰是通过化学反应把炸药(固体、液体或者气体)以非常高的速度变成高温高压气体的过程。该化学反应将炸药在空间分成两部分:反应物——高温高压气体和未反应物——炸药。介于两者之间的就是反应面。爆轰过程的特点是高速性,在  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  s 内完成,造成反应面非常薄,在  $10^{-6}$  m 量级。实际上,对于所谓的理想炸药,这个反应面的厚度可以忽略,作为间断面来处理,如图 1.1(b)所

示。存在一个间断面是高能炸药爆炸的特点。另外,这个反应面在空间是移动的,像波一样传播,故称为爆轰波。爆轰波的速度非常快,一般为 $2000\sim 7000\text{m/s}$ ,超过声速。在图1.1(b)中显示了反应面(爆轰波)后面是反应生成物——高温高压气体。核爆炸几乎瞬间完成,爆轰过程可以忽略不计。但是对于常规炸药的化学反应过程,爆轰一般必须考虑。

爆轰波的速度极快,爆轰所产生的热量在极短的瞬间来不及扩散,在瞬间大量气体被强烈地压缩在近乎原有的体积之内,因而产生几万个大气压的高压,再加上反应的放热性,高温高压气体迅速对周围介质膨胀做功,这就造成了炸药所具有的功率。

爆轰过程决定了炸药的爆炸性能,主要包括爆热、爆容、爆速和爆压。爆热是在一定的条件下单位质量炸药爆炸时放出的热量,它取决于炸药的元素组成、化学结构以及爆炸反应条件;爆容是单位质量炸药爆炸时产生的气体量(用标准状态下的容积表示),一般为 $0.7\sim 1.0\text{m}^3/\text{kg}$ ;爆速是爆轰波(伴随化学反应的冲击波)在炸药中的传播速度,炸药在一定装药密度下的爆速可以精确测定,现有炸药的爆速一般为 $2000\sim 7000\text{m/s}$ ,很少有超过 $9000\text{m/s}$ 的;爆压是指炸药爆炸时爆轰波阵面的压力,可用实验方法间接测定,其值一般为 $10\sim 40\text{GPa}$ 。常见炸药的部分物理数据在表1.1中给出。

### 1.1.3 冲击波

一旦爆轰过程完成,就形成了一个高温高压的气球。如果是化学反应,气球内的温度可高达 $3000^\circ\text{C}$ ,压力高达 $50\,000$ 大气压。图1.1(c)所示的是爆轰波撞击药包的最外层。由于爆轰波初始压力非常大,爆轰产物(气体)就会突然膨胀,压缩药包周围的水介质,在水中产生冲击波。冲击波由两部分构成:波前和波尾。波前是一个压力间断面,压力突然升起;波尾变化复杂。刚开始时,波尾中压力近似为指数衰减,在后半部,压力尽管衰减很慢,但是已经变得不重要了。冲击波在水中传播速度快于后续的气泡膨胀速度,离开药包后基本上沿径向向外传播。除了在爆炸点附近,冲击波基本上可以用一个声学球形波来近似,亦即随着波的传播,压力峰值比到爆炸点的距离的倒数衰减稍微快一些,而压力持续时间随时间增加略微增加,冲击波传播的速度比水中声波(约 $1500\text{m/s}$ )稍微快一些。图1.2(a)给出了第二次世界大战中拍摄的 $30\text{mg}$ 类TNT炸药引爆 $0.000\,014\text{s}$ 后气泡和冲击波照片<sup>[1]</sup>。注意该照片是两次曝光合成的。第一次曝光是在爆轰后所拍,以准确标示药包的位置与形状。图1.2(b)拍摄的是 $3\text{g}$ TNT炸药产生的水中冲击波图像。图中可以清晰看到冲击波<sup>[2]</sup>。

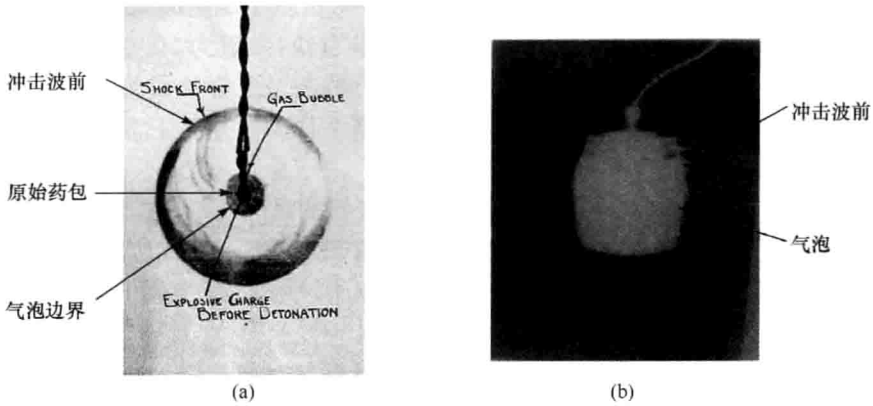


图 1.2 30mg 类 TNT 炸药引爆 0.000 014s 后气泡和冲击波照片<sup>[1]</sup> (a) 和 3g TNT 炸药水中爆炸拍摄的冲击波<sup>[2]</sup> (b)

冲击波在水中任意一点产生的压力时程曲线的特点是突然升高,然后以指数形式衰减,这个过程持续时间在毫秒级,如图 1.3 所示<sup>[3]</sup>。图中实线是冲击波在三个测点( $R=1.5\text{m}, 15\text{m}, 150\text{m}$ )处的压力峰值与波形。图中还用虚线给出了按照声学在相同测点的压力波形和幅值。比较而言,冲击波的衰减要快于声波;传播速度也略高于声波。采用声波近似水中冲击波时,速度可以采用声速,但是峰值要比声波衰减得快。

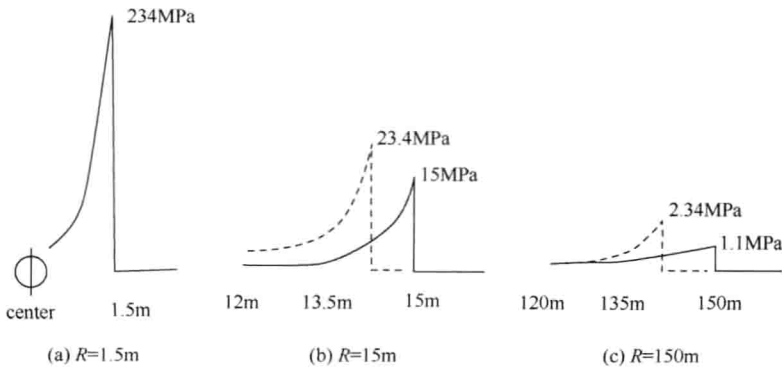


图 1.3 137kg TNT 炸药水中爆炸时不同位置处的压力分布<sup>[1]</sup> 虚线代表声学近似

### 1.1.4 气泡运动

在形成初始冲击波的同时,爆炸气体产物开始膨胀,以气泡的形式推动周围的水,如图 1.1(d)所示。气泡的压力随着膨胀而不断减小,当降到周围环境压力时,

气泡由于惯性继续膨胀,一直到最大半径。这时,气泡内的压力最小,且低于周围环境压力。周围的水开始反向运动,压缩气泡,使气泡不断收缩至最小;此时气泡内部压力又高于周围环境压力,气泡开始再次膨胀,产生第二个向外传播的波。一旦气泡再次膨胀到最大半径又开始收缩,相同的膨胀收缩过程可以重复很多次。这个过程通常被称为气泡脉动。报道中最多脉动次数是七次。图 1.4 所示的是 4.5g PETN 爆炸产生的气泡脉动过程<sup>[2]</sup>。气泡在开始膨胀阶段体积变化较快(15ms 之前);而当气泡快膨胀到最大时,气泡表面径向速度较低且持续时间较长(20~33ms);然后气泡开始收缩,半径迅速变小(40ms);当气泡收缩到最小时,可以从图像上很清晰地看到气泡底部的爆炸产物随着气泡表面的收缩而迅速进入气泡内部的过程,形成射流(45ms)。气泡射流将直接对舰体产生冲击作用,这将加强爆炸气泡对舰体的破坏作用。但本书讨论中远场爆炸,暂不讨论气泡射流。

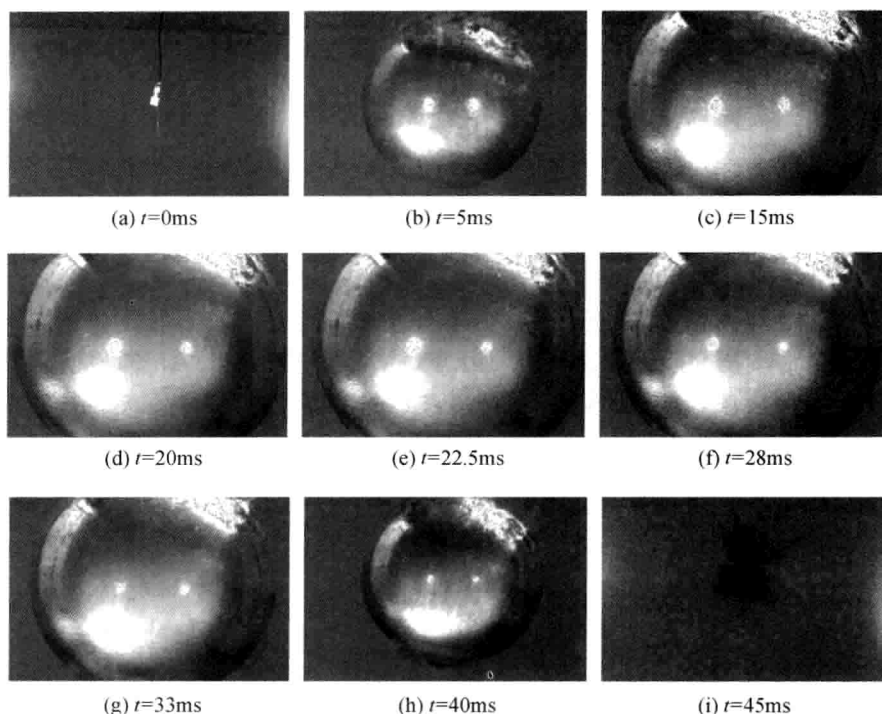


图 1.4 4.5g PETN 气泡脉动照片<sup>[2]</sup>

除了脉动外,气泡由于受到浮力的作用,还会产生向上的迁移运动。图 1.5 形象地表示了压力变化过程以及气泡脉动和迁移(气泡运动)的过程<sup>[4]</sup>。第一次气泡脉动后,气泡内的剩余能量只有初始能量的 7%左右(以 1500lb(1lb=0.453 592kg) TNT

炸药为例),因此一般在研究气泡脉动对舰船的毁伤效应时只关注第一次气泡脉动。冲击波和气泡在传播过程中携带不同的能量,冲击波大约占有 53% 的能量,而气泡占有 47%。在传播过程中,冲击波损失约 20% 的能量,剩余的造成结构物的毁伤;而气泡第一次膨胀、收缩过程损失约 13% 的能量,有 17% 的能量会在气泡被压到最小时散失,剩下的用于产生第二次的压力波。

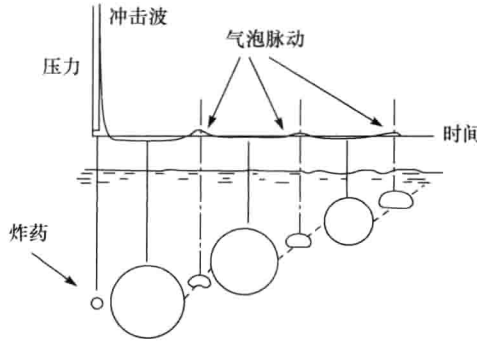


图 1.5 压力变化过程以及气泡的运动过程<sup>[4]</sup>

根据上述,典型球形水下爆炸的主要边界在图 1.6 中给出,其中,横坐标是径向位移,纵坐标是时间。图中阴影  $OO'M$  表示的是炸药。起爆发生在炸药原点  $O$ 。爆轰波以常速度沿  $OO'$  在炸药中传播,同时在爆轰波的后面,边界  $OA'$  把高压区和低压区区别开来。当爆轰波到达炸药外壳  $O'$  点后,一部分爆轰波继续向周围水介质传播,形成水中冲击波  $O'D$ ,另外一部分被水-气界面反射,形成向内的稀疏波  $O'A'$ 。反应物气体和周围介质水的交界面则沿着  $O'C$  以较慢的速度膨胀,这就是气泡。气泡在膨胀过程中,向内同样会形成稀疏波  $O'B$ 。稀疏波会影响气泡的压力,也会吸收能量,增加气泡的能量损失。这个波在水下爆炸载荷预报中是要考虑的。

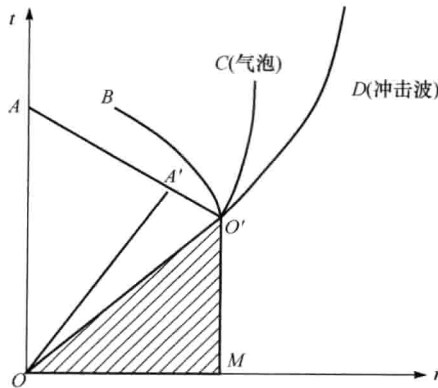


图 1.6 水下爆炸边界示意图(图中阴影为炸药)



### 1.1.5 空化效应

水下爆炸产生的初始冲击波遇到自由边界或结构边界后发生反射,反射波与入射波叠加后可能形成低压区;当低压区的压力达到水的蒸气压力时,水就会发生相变变成蒸气,称为空化效应。在水下爆炸中,主要有两种空化:片空化(bulk cavitation,也称块空化)和局部空化(local cavitation)。片空化主要形成于自由水面附近,局部空化主要产生于流体-结构耦合面处。

图 1.7 显示的是美国 DDG-81 驱逐舰进行水下爆炸海上试验时,45.36kg PETN 炸药在水面下 22.86m 处爆炸所产生的片空化,其空化区域范围很大<sup>[5]</sup>,和舰船的长度相当。

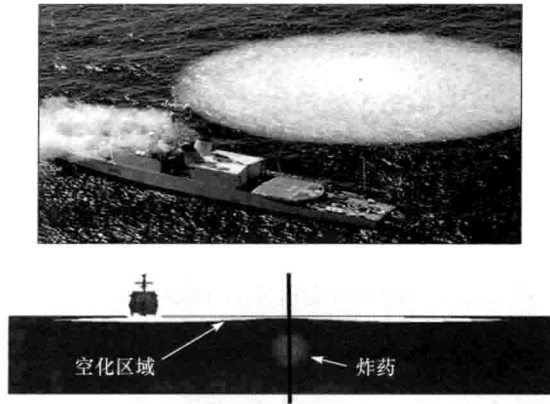


图 1.7 片空化范围示意图<sup>[5]</sup>

图 1.8 显示的是局部空化照片。使用激光产生冲击波(照片中并没有显示出冲击波,  $0\mu\text{s}$ )。当冲击波打到图中圆柱(圆柱基本是自由浮在水中,仅靠两边的绳子维持站立状态)时,圆柱迅速产生位移,带动周围水的运动。由于水质点运动速度过大,压力迅速降低,产生局部空化( $250\mu\text{s}$ ),包含大量的小气泡。这些小气泡进一步合并,形成一个大气泡,并溃灭打到圆柱的底部,形成冲击( $500\mu\text{s}$ )。



图 1.8 局部空化示意图<sup>[6]</sup>