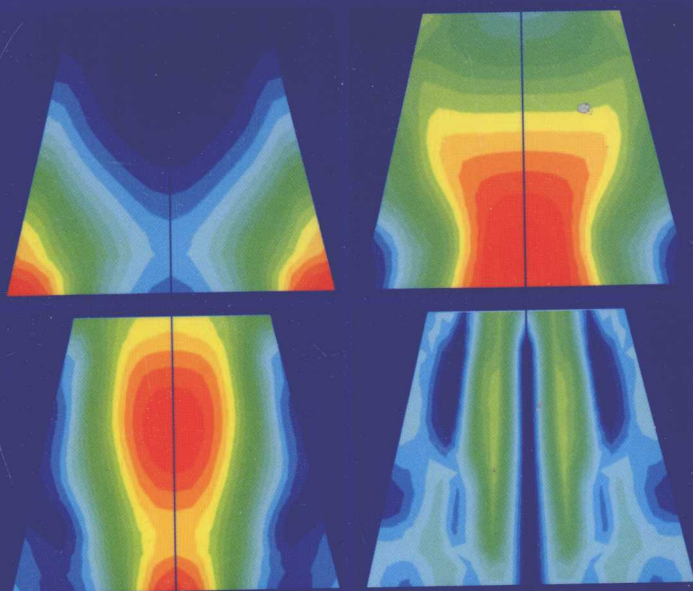


高建华 陆林 何洋扬 著

浅水中爆炸 及其破坏效应



国防工业出版社
National Defense Industry Press

浅水中爆炸及其破坏效应

高建华 陆林 何洋扬 著

国防工业出版社

·北京·

前 言

水下爆炸研究最早可以追溯到 19 世纪 60 年代。海战需要始终是这项研究最主要的驱动力。第二次世界大战中大规模的海战使人们的注意力又一次集中到水下爆炸问题上,一些国家(特别是美国和苏联)专门设立了水下爆炸研究机构,广泛研究水下爆炸现象、理论和应用技术。经过 100 多年,特别是近 50 年的研究,水下爆炸问题的研究得到了迅猛发展。新中国成立后,国内也开展了该领域的广泛研究,特别是长江科学院、中科院力学所、航总 702 所等单位做了大量的探索性研究。

早在 20 世纪 60 年代,P. Cole(1948)就对水下爆炸现象进行了分析归纳,系统总结和研究了水下冲击波形成及传播理论、冲击波测量、界面效应等,形成了一套较为完整的水下爆炸理论。S. Temkin(1988)评述了小药量水下爆炸产生的压力脉冲的传播规律,肯定了非线性声学方法的实用性,同时指出在很大程度上甚至可以忽略非线性效应。B. Mehaute 和 S. Wang(1994)汇集了有关爆炸形成水下波系形成和传播的理论基础及实验结果,分析了各种理论的适用条件。

而目前浅水中的爆炸作用研究仍然是个难点和热点。近年来,在开展浅水中爆炸的相关试验过程中,遇到了爆炸冲击波以及聚能装药对浅水中障碍物的毁伤作用问题。此后,又花费了大量的时间和精力去收集研读相关的文献资料,期望能从中找到解释试验现象的机制和理论分析方法。目前国内仍未建立这方面较为系统的理论,难以满足认识相关问题的需要。在这种情况下,我们开始了较为深入和系统的研究工作。

本书较为系统地论述了浅水中爆炸冲击波理论、水下爆炸冲击波的边界效应、空化的形成以及浅水中爆炸破坏效应等多方面内容。其中包括了作者本人以及合作者近年来所获得的部分研究成果。相对于过去的水下爆炸方面的出版物而言,本书的针对性更强,它着力阐述了浅水中爆炸作用研究的新方法、新认识、新进展和新方向。全书共分 8 章。第 1 章为绪论,对水下爆炸问题的主要研

究方法做了概要介绍和分析,列举了目前国内外在此方面工作存在的问题。第2章为水下爆炸现象,研究水下爆炸的基本现象和爆炸效应,以及在无限水介质中(即不考虑水面、水底边界影响的条件下)爆炸载荷(压力、冲量等)的计算。第3章和第4章阐述了浅水中爆炸冲击波理论,研究了水下爆炸所产生气泡运动的特点和参数计算。第5章为水下爆炸参数量测技术。第6章为水下爆炸数值模拟研究,采用目前国内外最流行的计算软件 LS-DYNA 对浅水中的爆炸问题做了数值模拟研究,很好地解释了一些试验现象。第7章和第8章分别对浅水中爆炸毁伤混凝土试件进行了理论,数值计算和试验研究。书中还列举了大量的参考文献,其目的在于帮助读者全面而深入地了解浅水中爆炸及其相关理论,并为进一步研究提供必要的基础和线索。

衷心欢迎读者对本书提出宝贵意见。

作者

2009 年 8 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 水下爆炸问题研究的意义	1
1.2 水下爆炸问题的国内外研究现状	3
1.2.1 水下爆破技术的发展概述	3
1.2.2 水下爆破理论研究现状	4
1.3 水下爆炸问题研究的发展趋势	6
1.4 水下爆炸问题研究的基本方法	9
1.4.1 水下爆炸的数值模拟	9
1.4.2 水下爆炸的测试技术	11
1.4.3 水下爆炸试验与实践	12
1.5 目前存在的问题与难点	13
1.5.1 浅层水中爆炸的界面效应	13
1.5.2 水下爆炸的毁伤效应	13
1.5.3 作用目标的动态响应问题	13
参考文献	14
第2章 水下爆炸现象	20
2.1 水下爆炸的基本现象	20
2.1.1 水下冲击波的形成及其特点	20
2.1.2 水面上的现象	21
2.2 水下爆炸的气泡现象及运动	24
2.3 水下冲击波的初始参数	27
2.4 水下爆炸的边界效应	28
2.4.1 冲击波自由水面规则反射与无规则反射	28
2.4.2 自由水面对冲击波影响的线性理论	28
2.4.3 水底对冲击波影响的线性理论	33

2.4.4 浅层水中爆炸的界面影响	36
参考文献	37
第3章 浅水中爆炸冲击波理论	38
3.1 浅水爆炸	38
3.1.1 浅水爆炸参数	38
3.1.2 初始条件的评估	39
3.1.3 空化形成	42
3.1.4 临界深度的上限与下限	44
3.2 冲击波水面反射原理	46
3.2.1 冲击波在自由水面线性反射	46
3.2.2 水下冲击波在自由水面的非线性反射	48
3.3 浅水中爆炸流体动力学方法	54
3.3.1 浅水爆炸相似性分析	54
3.3.2 可压缩动力学阶段	55
3.3.3 不可压缩流体动力学阶段	56
3.3.4 势流法	58
3.3.5 流行的理论方法	59
3.3.6 线性波场的研究工作简介	62
3.3.7 透过线性波理论看水中爆炸波的主要物理特点	63
参考文献	67
第4章 水下爆炸气泡运动	69
4.1 运动的一般性质	69
4.2 不可压缩和无重流体的径向运动	72
4.3 气泡在重力作用下的运动	76
4.3.1 能量和动量方程式	76
4.3.2 泰勒方程式的无因次形式	78
4.3.3 不考虑内能影响所得的结果	80
4.4 可压缩性和非圆球性对气泡运动的影响	82
4.4.1 可压缩性的影响	83
4.4.2 重力的影响	85
4.4.3 气泡形状的变化	85
4.5 边界面的影响、映像法	88

4.5.1	流体动力源	89
4.5.2	用于刚性边界的映像法	90
4.5.3	在自由表面和刚性底情况下的近似解	93
4.6	边界面附近气泡运动的计算	96
4.6.1	振动周期	96
4.6.2	最大半径	99
4.6.3	在重力作用下气泡的位移	99
4.6.4	表面附近气泡位移的近似公式	101
	参考文献	104
第5章	水下爆炸参数量测	105
5.1	水下爆炸冲击波	105
5.1.1	概述	105
5.1.2	水下爆炸冲击波特征参数的估算	109
5.2	爆炸冲击波压力量测系统	113
5.2.1	压电式压力传感器	113
5.2.2	测量电路的选择(放大器)	119
5.2.3	记录分析仪	125
5.3	水下爆炸冲击波测试	126
5.3.1	水下爆炸冲击波测试系统	126
5.3.2	水下爆炸冲击波测试技术问题	128
5.4	传输线与信号不失真传输	129
5.4.1	均匀传输线简单理论	131
5.4.2	常用传输线的特征阻抗	135
5.4.3	传输线的几种匹配方法	135
5.5	压力传感器及系统的标定	136
5.5.1	标定激波管	137
5.5.2	正弦压力发生器	138
	参考文献	138
第6章	水下爆炸数值模拟	140
6.1	数值软件及数值模型	141
6.1.1	LS-DYNA 软件简介	141
6.1.2	LS-DYNA 软件的基本算法	142

6.1.3	材料本构模型及状态方程	147
6.1.4	数值模型的假设和建立	151
6.2	水下冲击波绕射效应数值模拟	153
6.2.1	平面冲击波绕射效应的数值分析	153
6.2.2	柱面冲击波绕射效应的数值分析	161
6.2.3	球面冲击波绕射效应的数值分析	164
6.2.4	冲击波反射及绕射效应的几个特征	170
6.3	浅水中冲击波绕射效应数值模拟	171
6.3.1	混凝土试件面压力特性	171
6.3.2	水下冲击波与混凝土试件作用的反射和绕射效应	173
6.3.3	炸高对绕射效应的影响	178
	参考文献	179
第7章	浅水中装药对混凝土材料的爆炸毁伤效应分析	181
7.1	混凝土材料的力学性能	181
7.1.1	混凝土简介	181
7.1.2	混凝土的原材料	182
7.1.3	混凝土的制备	182
7.1.4	混凝土的性能	183
7.1.5	普通混凝土的结构	184
7.2	水下爆炸载荷作用下混凝土材料动态响应	184
7.2.1	混凝土脆性损伤本构	184
7.2.2	混凝土的损伤机理	186
7.3	混凝土非线性动力损伤模型	189
7.3.1	混凝土材料的非线性动力损伤特性	189
7.3.2	非线性动力损伤模型的基本结构	192
7.4	集团装药水下爆炸破坏混凝土试件的数值分析	197
7.5	聚能装药浅水中毁伤效应的数值分析	202
7.5.1	水介质中聚能战斗部侵彻效应的数值模拟	202
7.5.2	射弹对混凝土试件侵彻的数值模拟	204
	参考文献	208
第8章	装药浅水中爆炸毁伤混凝土试件试验研究	211
8.1	引言	211

8.2	浅水中爆炸毁伤试验方案设计	213
8.2.1	集团装药浅水中爆炸毁伤混凝土试件	213
8.2.2	聚能装药浅水中爆炸毁伤混凝土试件	215
8.3	试验状态与结果	218
8.3.1	集团装药爆炸毁伤试验结果	218
8.3.2	聚能装药爆炸毁伤试验结果	221
8.4	试验结果分析	224
8.4.1	试验结果的理论分析	224
8.4.2	试验结果与数值模拟计算结果的对比分析	227
8.4.3	结论	229
	参考文献	229

第1章 绪 论

1.1 水下爆炸问题研究的意义

装药在水下爆炸与在空气中爆炸的特性有许多不同之处,不仅爆炸的物理现象有不同之处,在载荷作用上也有它们各自的特点,这主要是因为水与空气这两种介质的物理性质有许多不同造成的,图 1.1 为装药在水下的爆炸瞬间图象。

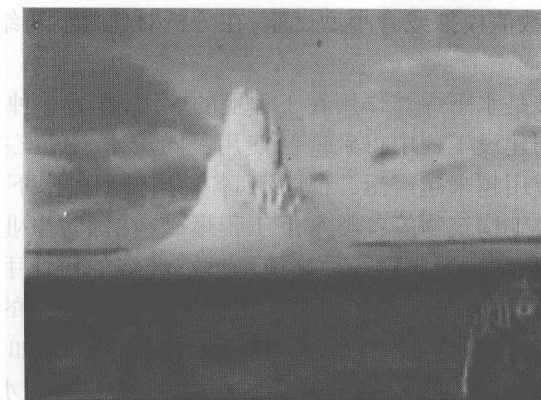


图 1.1 装药水下爆炸瞬间

20 世纪 60 年代初,随着国家核试验技术的发展,相关科研单位和院校对水下爆炸理论和量测技术手段开展了较为广泛的试验研究工作。1965 年,在广东新丰江水电站以清华大学为主的课题组,开展了水下爆炸相似律的试验研究工作,爆炸试验先在试验水池中进行,后来又在水库中进行。1986 年到 1988 年期间,中国水利水电科学研究院接受国防任务(承担了水面爆炸的试验研究工作),在广西建造了水域面积 1800m^2 ,最大水深 3.5m 的模型试验场,开展了国内首次不同比爆高条件下的水下冲击波特性和水中结构受力破坏试验研究。其后在一系列工程实践中(如葛洲坝大江围堰拆除、三峡工程二期围堰拆除、鸭河口电厂进水口水下钻孔爆破、丰满水库、密云水库岩塞爆破以及宝钢马迹山港围堤扩建爆破挤淤等工程)都承担了结构安全评估分析、水中冲击波监测或咨询

工作等,积累了大量的资料数据,丰富了水下爆炸的理论并提高了工程实践水平,为水下爆炸冲击波量测技术从传感器的选用、标定和系统的配置等方面积累了宝贵的经验。

水下爆炸作用机理是长期以来一直在进行研究与探索的问题之一,与一般的陆上爆炸相比,水下爆炸具有一定的特殊性。此外,水下爆炸对设备设施、爆炸材料、爆破技术要求比较高,在安全方面也有很严格的要求。尤其是水下爆炸理论的实际水平与水下爆炸技术的发展和需求之间具有相当大的差距。由于水介质的特殊性以及其他影响水下爆炸产生的水下爆炸冲击波参数的外界因素(如水深、水底介质、水底地形等)错综复杂,使得目前的研究手段仍然是以试验实测数据为基础,然后对物理现象进行描述,通过分析所获得的试验数据而拟合特定条件下的经验公式,没有经过理论推敲,没有得到世人所公认的较为合适的计算模型和公式。目前这种状况下,人们进行水下爆炸、水下爆破时,仍然还是以经验为主,进行数值模拟或者小型试验,在分析对比之后再结合具体情况进行大规模爆破作业。

水下工程爆破是水下爆炸作用在工程上的应用,作为一种重要的施工手段,已经在航道和水利建设工程中得到广泛使用。随着水下施工技术的飞速发展,水下爆破技术的应用越来越广泛,既涉及到各种条件下的水下爆炸效应,又包括水底土岩地基和水工构筑物等各类水下工程爆破,在国防事业和经济建设中都显示出巨大的作用,并逐渐成为一种高速、有效、经济的作业手段。就国防事业而言,水下爆炸理论对于研制和优化水下兵器具有举足轻重的作用。对于经济建设工程,水下爆破技术也在其中许多领域得到了应用。例如,利用水下爆炸释放的巨大能量进行水下切割、焊接机械零件;新建港口、桥梁、水中建筑物等的水下岩石基础爆破开挖;采用水压爆破方式拆除建筑物;利用水下爆炸产生的地震波进行物理勘探等。为了有效地达到预期的目的,必须加强对水下爆炸作用和水下爆破原理的全面理解。

目前,无限水介质水下爆炸基本理论比较成熟,而对于装药在多界面影响下的水下爆炸过程的研究还远远不够,很大程度上落后于实践的需求。特别对于应用最广、炸药利用率最高的水下钻孔爆破,由于涉及到水介质、岩石介质及覆盖层等多种影响因素,使得对其的理论研究很不完善。一边是广泛的应用和行之有效的爆破形式;一边是研究水平的相对薄弱,使得对水下爆破的研究显得越发迫切。无论是对于爆破理论的丰富和发展,还是切实满足工程实践和军事任务的需求,对水下钻孔爆破、水中冲击波的传播规律研究都是十分必要的,也是一项非常重要而有意义的工作。

对水下冲击波的反射和绕射进行理论分析,根据水下结构物的强度,特别是

动载下的强度,就可以研究结构物承受水下冲击载荷的限度,对需要保护的目标进行有效防护。战时,诸如桥梁、大坝、码头及港口等水下结构物是极易受到攻击的目标,如何采用合理的防护措施,减小弹药直接命中的破坏程度,研究水下爆炸冲击波与目标的相互作用就成为一个重要内容。

1.2 水下爆炸问题的国内外研究现状

水下爆炸研究最早可以追溯到 19 世纪 60 年代,海战的需要始终是这项研究最主要的驱动力。第二次世界大战中大规模的海战使人们的注意力又一次集中到水下爆炸问题上,一些国家(特别是美国和苏联)专门设立了水下爆炸研究机构,广泛研究水下爆炸现象、理论和应用技术。经过 100 多年,特别是近五六十年的研究,水下爆炸问题的研究得到了迅猛发展。

1.2.1 水下爆破技术的发展概述

爆炸作用到一定介质上,使其发生变形和破坏,称为爆破。其中重要的一个分支就是水下爆破。水下爆破是有一面或一面以上临空自由面在水面以下的爆破形式,由于水下爆破在军事及国民经济建设等领域的广泛应用,水下爆炸和爆破作用研究一直受到国内外相关专家和工程技术人员的重视,水下爆破的研究历史悠久,早在 19 世纪 60 年代,人们便开始进行水下爆炸试验,研究水下爆炸问题。第二次世界大战以前,鱼雷和漂雷的出现使人们认识到研究水下爆炸问题的重要性,水下爆破技术主要用于破坏水中目标(如舰船、水雷)等军事目的以及零星的水下炸礁等工程;第二次世界大战以后,随着水下爆破技术在军民多领域的广泛应用,使得水下爆炸的物理现象、爆炸的基本理论、爆炸对目标的作用和水下爆破技术开发与应用等成为各国科学家和工程技术人员研究的热点、难点问题。但至 20 世纪中期,水下爆破作业基本上处于初级阶段。

随着船体对爆炸波的反应研究和水下核爆的研究以及新的试验技术、手段的出现和应用,使得对水下爆破问题的研究得到了进一步深入。世界上许多技术先进的国家都先后建立了专门的水下爆炸研究机构,特别是美国、苏联以及其他一些欧洲国家,这方面的工作开展得都比较好。从当前国外的情况来看,经过 40 多年的发展,不论在试验方面,还是理论方面,都已有了相当的进步。可以说,近 100 多年以来,尤其是第二次世界大战以来,水下爆炸与爆破问题的研究得到了迅猛发展。

20 世纪 50 年代末,瑞典的 Atlas 和 Skanska Cementgjuteriet 公司在开挖林多运河时,首次应用穿过覆盖层的水下钻孔爆破法(Overburden Drilling Method, OD

法),利用双套管式回转冲击凿岩机钻孔加快了水下爆破速度、降低了爆破成本,开始了较大规模的水下爆破工程。20 世纪 60 年代末至 80 年代,世界性贸易促使海上运输业迅速发展,各国开始致力于新建停泊数十万吨的轮船的新港,开挖沉埋式水底隧道基坑,水下爆破技术得到进一步发展。20 世纪末以来,新的耐水压的防水性能好的专用炸药和雷管、导爆管及无线遥控起爆、起爆帷幕防护技术等新产品新技术的出现,极大地促进了水下爆破的应用深度和广度。而计算机手段和仿真模拟技术的飞速发展,也为人们研究水下工程爆破和水下爆炸作用提供了更方便的工具和更广阔的平台。水下爆破从理论研究到数值模拟,从试验分析到工程实践,都取得了前所未有的高速进步。

我国的水下爆破技术在解放后也取得了很快的发展。解放初的川江航道治理工程中,炸除了数以百万方计的水下礁石。在新丰江水电站泄洪洞施工中,水深 30m 以下成功进行了水下爆破开挖。1986 年元月进行的葛洲坝水电站大江上游围堰两道混凝土防渗心墙的水下爆破拆除,在当时创我国多段微差爆破新纪录。2006 年三峡围堰的成功爆破拆除标志着我国水下爆破技术已经达到一个相对较为成熟的阶段。近 20 多年来,我国航道、水利、铁道和中国科学院力学研究所等单位在开拓水下爆破领域和发展水下爆破技术方面做了不少工作,很大程度上推动了水下爆破技术的推广和应用。在理论和试验方面,众多院校科研单位,尤其是长江科学院、中科院力学所、航总 702 所等单位做了大量的探索性工作,通过不同条件下的各种试验而获得了许多宝贵的数据,使得对水下爆破理论有了进一步的认识。钱胜国等对近自由面水下爆炸时的激波特性进行了研究。通过大量水下爆炸试验和水下爆破工程实践,我国不仅在水下爆破施工技术积累了许多宝贵经验,还在水下爆破理论探索方面得到不少成果,为今后水下爆破技术发展打下了坚实的基础。

1.2.2 水下爆破理论研究现状

对水下爆炸的理论研究,J·亨利奇总结了无限水下爆炸试验研究的结果,提出了比例距离在(0.05,50)范围内冲击波超压的计算公式。P. Cole 在大量试验研究的基础上,对无限水下爆炸情况,全面阐述了水下爆炸的物理现象与基本规律,描述了水下爆炸的试验研究方法,建立了一定范围内爆炸流场中冲击波压力峰值、比冲量及能量密度的计算公式,此理论被大量试验所验证,并有很高的精度。对于浅水中爆炸问题,M. Holt 研究了海面兴波的临界上限深度效应,指出,当爆炸点水深大约为装药半径一半的时候海面兴波幅度最大。在 Holt 和 Ballhaus(1970)理论研究的基础上,John F. Goarrnor 等研究了水面下、小深度处爆炸流场的解析解。B. Mehaute 和 S. Wang 汇集了有关爆炸形成水中波系和传

播的理论基础及试验结果,分析了各种理论的适用条件。作者在简要概述水下爆炸的物理过程及其数学表述之后,给出了运用线性理论的分析结果及其试验修正,强调了水中波系与海底相互作用(特别是当波系沿着大陆架传播时)导致能量散逸过程的重要性,指出对于浅水爆炸情形采用非线性理论是很必要的。对于深水沉底爆炸问题,James R. Britt 把 L. Cagniard 的弹性界面反射理论与 J. H. Rosenbaum 的水底反射模型相结合,建立了水底线性反射理论,作者忽略了装药沉底爆炸成坑过程,用入射指数压力脉冲代替水下爆炸冲击波,用平面波代替球面波,用卷积分求解水底面反射压力,此理论为计算较远处爆炸弱冲击波水底反射压力提供了理论依据。B. V. Zamyshlyayev 运用线性与非线性反射理论,对水下爆炸的水面及水底反射做了更全面的概括,形成了较完整的水底、水面反射理论。G. R. Hamilton 和 G. B. Tirey 等在测量气泡尺寸和运动数据的基础上,运用冲击波理论计算了武器总的能量输出。K. C. Heaton 研究了气泡脉动过程中,当气泡压缩至最小半径时的偏球性效应。作者采用对称轴独立变化的椭球体修正模型,同时考虑传播过程中的能量损失,导出并求解了相应的拉格朗日方程,计算结果与试验观察结果比较吻合。S. Temkin 通过对小药包水下爆炸,压力脉冲特性的研究后,发现在距装药一定范围内冲击波的衰减是非线性的,而其他范围内冲击波的衰减都可用线性声学理论加以预估。M. Cowperthwaite 等学者论述了描述非理想炸药水下爆炸过程的流体热动力学初步模型。S. Menon 运用数值计算方法对水下爆炸的若干问题进行理论分析,与试验数据取得了较好的一致。其中,试验和数值计算结果一致的表明,Rayleigh-Taylor 不稳定性是引起气泡界面不稳定性的主要原因,而界面不稳定性在爆炸能量的散逸过程中起着重要作用。美国军事工程水道试验站(Army Engineer Waterways Experiment Station)用重 100 磅^①的熔铸 TNT 球形装药在深 0.41 英尺^②、水底分别为沙子和混凝土的水下爆炸,通过设置于水面上、下的电气石压电计测量距装药 22、30 和 50 倍装药半径处的压力—时间曲线,试验结果表明,与空气中爆炸相比,浅水中爆炸时不小于 22 倍装药半径处水下冲击波可忽略不计。

王中黔通过对集中药包在水下裸露爆炸情况的测试,分析了单个药包水下爆炸时冲击波最大压力值与水深之间的关系,并发现群药包(8 个~16 个药包)水下爆炸时冲击波压力波形曲线出现了强烈的振荡现象。姚熊亮和陈建平建立了在考虑水面效应和气泡运动时舰船受到二次脉动压力的计算模型并借用二维切片和水弹性方法计算了船体梁在水下爆炸二次脉动压力下的响应特征。万泉

① 1 磅=0.454kg。

② 1 英尺=0.3048m。

等学者根据小型水下圆柱壳状结构受爆炸冲击后散射现象严重的特点,提出了一种新的冲击加速度的近似计算方法。首先把带加强筋的柱壳结构简化为光滑柱壳,并将冲击波分解为不同频率谱和平面波的叠加,然后采用耦合模态法分析了受爆炸冲击水下圆柱壳状结构周围的散射场,求出了圆柱壳状水下结构的表面接收压力,进而分析其受到爆炸冲击后的冲击加速度,并研究了结构的弹性变形、材料特征对冲击加速度响应的影响。工程应用实例的分析结果表明,该方法具有物理概念清晰,运用方便,准确度高的特点,可用于分析小型水下圆柱壳状结构受到冲击后的冲击加速度响应。李润珊等通过对触、近水面化爆试验水中冲击波的测量,探索了触、近水面爆炸冲击波在水面和水中的传播规律,并总结了一些计算冲击波参数的实用经验公式。钱胜国等通过分析近自由水面水下爆炸情况下,自由水面对冲击波传播过程中的影响和冲击波反射后的变化规律,提出从爆深与爆炸能量逸出的关系来修正 P. Cole 冲击波压力公式的观点。顾文斌等对浅层水中单个药包和两个药包的爆炸作用问题进行了试验研究,并给出了经验公式,本书作者采用任意拉格朗日—欧拉有限差分方法分析了浅层水中爆炸荷载条件下混凝土结构物的加速度及压力响应,对浅层水中爆炸“流—固耦合”动力学问题数值解进行了初步尝试。

1.3 水下爆炸问题研究的发展趋势

从水下爆炸的国内外研究现状看,目前研究的主要内容大致有五个方面:

1. 水下爆炸冲击波的形成和传播、气泡脉动规律、气泡与介质界面相互作用等力学和理化过程的基础性研究

炸药水下爆炸冲击波研究主要针对水下非接触爆炸状态。1948 年美国 Cole 出版了研究水下爆炸的经典著作《水中爆炸》,对有关水下爆炸的物理效应做了系统的阐述,介绍了水下爆炸所依从的基本规律、水下爆炸的实验研究方法及其破坏作用过程等。对冲击波、气泡的运动、二次压力脉冲这三个水下爆炸的主要过程进行了论述,并提出了一些经验计算公式,尤其是对于中远场的水下爆炸冲击波计算至今仍被广泛使用。在 Cole 研究的基础上,目前对于水下爆炸冲击波的研究主要集中于对不同类型水下炸药的爆轰机理,对经典理论进行不同适用范围修正,并从理论上进行说明。

由于水下爆炸的突出特点是气泡脉动问题,因此,关于水下爆炸气泡脉动现象和能量输出的基础理论,国外开展了广泛的理论和实验研究,并进行了大量的数值模拟工作。研究方向主要集中在水下爆炸气泡的运动规律、界面能量输出以及气泡的形状控制技术等。美国 NSWC 收集了 175 次水下爆炸试验

的数据,对于气泡能和冲击波能量的关系进行了详细研究,建立了冲击波能量和气泡能量的估算公式,研究了水下兵器战斗部壳体对水中爆炸冲击波和气泡的影响。

2. 为研制、改进水下兵器而进行的武器相应研究

舰船作为水面或水下各种作战装备的平台,在战时不可避免会遭受各种武器的攻击。鱼雷、水雷等水下攻击武器由于装药量大,在水下爆炸时对船舶有致命的威胁。因此,如何有效地计算分析船舶的水下爆炸冲击环境,提高船体结构抗冲击性能,并提高其战斗力和生命力,是现代船舶研究的重大课题。在该领域内,已报道了一些研究成果。

3. 水面舰船和潜艇等水下结构的抗爆性能研究

舰船抗水下非接触爆炸研究主要包括四个部分:非接触水下爆炸的流场特征(水下爆炸载荷)、瞬态流场与结构相互作用所决定的舰船动响应分析方法、以弹—塑性动变形响应分析为依据的舰船结构水下爆炸安全性评估与防护技术、以船体结构动响应为输入条件的船用设备冲击环境的确定方法及相应的设备抗冲击设计分析方法等。

水下非接触爆炸作用下结构的破坏以弹塑性动变形为特征。而舰船的所有使命任务都要靠设备系统执行,一旦关键设备系统遭到严重破坏,其战斗力将完全丧失。研究舰船设备的抗冲击问题首先要确定其所受到的冲击载荷,即设备的冲击环境。水下爆炸载荷即是舰船水下爆炸动响应冲击环境的激励源,爆炸载荷的准确描述是保证舰船爆炸动态响应分析精度的基础。水下爆炸作用下舰船的动响应理论是舰船抗冲击设计的基础。它一方面能够预报舰船结构的破坏;另一方面能够提供设备基础的冲击环境,为设备抗冲击分析提供输入载荷。流固相互作用效应对结构承受的载荷和结构的响应都有非常大的影响,是舰船水下爆炸动态响应分析中的难点。

4. 运用水下爆炸技术进行的炸药能量测试及炸药工艺研究

水下爆炸能量输出的评价参数不同于空中爆炸,一般可以通过水下爆炸的超压、衰减时间常数、气泡脉动周期、比冲击波能、比气泡能和总能量等参数来描述。水下爆炸主要特点是对于同一实验,可将炸药的能量分解为两个主要分量,即动力作用的冲击波能和静力作用的气泡能,并能同时测出。其总能量(总膨胀功)数值上通常很接近用爆热弹测量炸药爆轰所释放的化学能(爆热)。

钝感高能炸药和含铝炸药能量的评估是研究水下兵器爆炸威力和毁伤效应、研制常规兵器和战略武器的基础。由于钝感高能炸药和含铝炸药必须在重约束条件下才能实现完全反应,而水介质恰好符合重约束条件,所以可以利用水

下爆炸法评估钝感高能炸药和含铝炸药的能量。

5. 水下爆破工程技术研究

水下爆破工程中遇到的多属浅水爆炸类型,即部分炸药能量将要冲出水体在空气中释放,此时,由于边界条件的变化,水下冲击波的压力作用时间等参数计算及波形不再是理想的状态,它受到水下界面反射、水面切割等作用而呈现出较为复杂的波形。但总体上说,当药包置于水下岩石介质内爆炸时与理想的水下爆炸相比较,其特性为伴随爆炸水面会出现水柱并有较大的波浪,此时水下冲击波压力值有所减小,冲击前缘变缓,使冲击波频率大为降低,而作用时间稍有延长。水下钻孔爆炸的另一特点是由于炸药直接与岩石接触以及岩隙裂缝被水充填,因此产生的地震波较强,对周围邻近建筑结构的振动影响较大,在安全评估分析中需要注意。文献[40]指出,在近距离实施水下钻孔爆破,通过采用水下预裂、气泡帷幕、多段延时起爆等措施,能有效地削减地震波和水中冲击波。

炸药在水下爆炸时产生的诸多力学效应如水下压力、作用时间、冲量等参数计算和对结构的破坏作用等在 20 世纪 60 年代初国内基本还处于空白状态,主要参考资料为美国、英国、苏联等国家的。而美国、英国在第二次世界大战期间均已耗费巨资开展了水下爆炸的系统或专题试验研究工作。无限水介质和半无限水介质水下爆炸情况下,通过运用爆炸相似律,J. B. Gaspin 分析了获得相同的冲击波压力—时间曲线、爆深与装药能量之间的关系。P. Cole 通过大量试验研究,并在总结前人成果基础上,全面阐述了水下爆炸的物理现象与基本规律,建立了一定范围内、爆炸流场中冲击波峰值压力、比冲量及能量密度的计算公式。

从对国内外有关水下爆炸效应研究成果的分析,可以看出,国内外的研究水平相差较大。确切地说,国外在水下爆炸动态响应方面做了大量的工作,特别是在数值模拟和模拟试验方法方面取得了很大的成绩,这些成果可以借鉴。与国外相比较而言,国内在水下爆炸方面的研究则起步较晚,加之经费、试验仪器等条件的限制以及同行间的交流较少,水下爆炸研究仅局限在前文所列举的几个方向上。近些年来,解放军理工大学在浅层水中爆炸研究方面做了大量而富有成效的工作,弥补了国内在该领域研究中的一些空白。

数值模拟技术和大型有限元程序的出现及广泛应用,使水下爆炸效应研究如虎添翼,国外已有单纯利用有限元程序开发新型飞机的尝试。由于硬件和软件的限制以及科研思维的束缚,国内在数值模拟技术研究方面也与国外相差甚远。目前还是以国外较为成熟的软件为主,自主开发的软件为数不多,国内在计算机硬件技术和软件开发方面任重道远。