

哈尔滨工程大学“十一五”研究生教材建设专项资金资助

舰船结构毁伤 与生命力基础

JIANCHUAN JIEGOU HUI SHANG
YU SHENGMINGLI JICHU

张阿漫 郭君 孙龙泉 编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

舰船结构毁伤与 生命力基础

张阿漫 郭 君 孙龙泉 编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分7章。第1章对舰船结构毁伤与防护做了简要概述;第2章介绍了武器对舰船的破坏作用;第3章介绍了舰船结构的毁伤机理;第4章介绍了舰船结构局部毁伤与防护;第5章介绍了舰船结构总体毁伤与剩余强度;第6章介绍了冲击环境与设备人员抗冲击;第7章介绍了火灾与剩余强度。

本书可作为船舶与海洋工程专业及相关专业的研究生教材使用,也可作为从事船舶与海洋工程专业研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

舰船结构毁伤与生命力基础 / 张阿漫, 郭君, 孙龙
泉编. —北京: 国防工业出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-118-07710-0

I. ①舰... II. ①张... ②郭... ③孙... III. ①船舶结构 - 损伤 - 研究 IV. ①U663

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 009884 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17½ 字数 402 千字
2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776
发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

前 言

随着军事科学技术的发展,反舰武器种类不断增加,攻击能力日益增强,近年来舰船结构毁伤与生命力基础研究获得了长足发展,新成果不断涌现,作者感到迫切需要一本既能介绍本领域相关基础知识又能反映该领域新知识的教材,这就是编写本教材的初衷。

舰船结构毁伤与生命力是船舶与海洋工程领域中舰船工程的重要基础课程之一。它涉及范围较广,与船舶结构力学、结构动力学、爆炸冲击动力学、流固耦合动力学及塑性动力学都有密切的联系。本书可作为船舶与海洋工程专业及相关专业研究生教材使用,也可作为从事船舶与海洋工程专业的研究人员的参考用书。

本书分为绪论和综述、攻击武器与毁伤现象、毁伤机理、直接毁伤效应与防护、间接毁伤效应与防护共5个部分。第1部分主要介绍了舰船毁伤与防护的研究方法、研究现状、相应的标准与规范、研究展望等内容。第2部分介绍了舰炮、鱼雷、水雷、航空炸弹、反舰导弹等武器的攻击特征,在此基础上,按照武器装药分类阐述了它们对舰船的破坏作用。第3部分主要介绍了舰船结构毁伤研究中最为基础的理论知识,包括弹塑性应力波、弹塑性梁的塑性动力分析、薄板塑性动力响应、冲击绝热线等内容,旨在让读者明晰舰船结构毁伤分析的理论图景,而不侧重实际工程应用。第四部分包含第4章、第5章,分别介绍了爆炸作用下舰船的局部毁伤与防护、舰船总体毁伤与剩余强度,这两部分分别与爆炸的两大基本载荷冲击波和气泡脉动有关。第5部分包含第6章、第7章,分别介绍了舰船冲击环境与设备人员抗冲击、舰船火灾损伤效应,这两部分属于爆炸冲击的后期效应。

本书中部分图片来源于网络,部分理论和成果来源于前人的著作,在此,对这些作者表示真诚的感谢。本书的第3章、第4章由郭君负责编写,第2章、第5章由孙龙泉负责编写,第七章由杨娜娜负责编写,本书由张阿漫负责统稿和内容编排,由姚熊亮担任主审。对本书做出贡献的还包括庞福振博士、冯麟涵博士、王奂钧博士、王诗平博士、杨文山博士、戴绍仕博士以及课题组的其他师生,在此表示感谢。本书同时还在国家自然科学基金重点项目(50939002),国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(10976008),第十二届霍英东教育基金(121073)等资助下完成。

本书在编写过程中力图突出近几年来学术界的最新研究成果,但因编者水平所限,难免存在不妥之处,恳请广大读者予以批评和指正。

编 者

于哈尔滨工程大学

2011年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 舰船毁伤与防护概述	1
1.2 舰船毁伤与防护研究方法	2
1.3 舰船结构毁伤效应研究现状	4
1.3.1 试验研究现状	4
1.3.2 数值仿真研究现状	4
1.4 毁伤评估和规范标准研究	5
1.5 舰船防护结构研究现状	6
1.6 舰船结构毁伤与防护展望	6
参考文献	7
第2章 武器对舰船的破坏	9
2.1 概述	9
2.2 典型武器攻击特征	10
2.2.1 舰炮的攻击特征	10
2.2.2 水雷的攻击特征	12
2.2.3 鱼雷的攻击特征	14
2.2.4 航空炸弹的攻击特征	17
2.2.5 反舰导弹的攻击特征	19
2.3 普通武器对舰船的破坏作用	21
2.3.1 普通武器空中爆炸对舰船的破坏作用	22
2.3.2 普通武器水中爆炸对舰船的破坏作用	33
2.4 核武器对舰船的破坏作用	55
2.4.1 概述	56
2.4.2 核武器的杀伤破坏特点	58
2.4.3 核武器的杀伤破坏因素	59
2.4.4 核武器对舰船的破坏	60
参考文献	63
第3章 舰船结构损伤机理	65
3.1 弹塑性应力波	65

3.1.1	应力波基本方程和本构关系	65
3.1.2	弹性波相互作用	79
3.1.3	弹塑性波相互作用	88
3.2	弹塑性梁塑性动力分析	99
3.2.1	基本方程	99
3.2.2	弹塑性梁在突加载和作用下的动力响应	103
3.3	薄板塑性动力响应	110
3.3.1	刚塑性薄板动力分析	110
3.3.2	刚塑性圆板在矩形脉冲载荷作用下的动力响应	118
3.3.3	应变率效应的影响	127
3.4	冲击绝热线	134
	参考文献	141
第4章	舰船结构局部毁伤与防护	142
4.1	空爆对舰船结构的局部毁伤	142
4.1.1	舰船结构在空中爆炸载荷作用下的毁伤判别标准	142
4.1.2	舰船结构在空中爆炸载荷作用下的冲击响应	143
4.1.3	舰船空爆损伤评估方法	145
4.2	水下爆炸对船体结构的局部毁伤	146
4.2.1	非接触爆炸载荷作用下舰船板架的变形与破损	146
4.2.2	接触爆炸载荷作用下船体结构毁伤计算	150
4.3	船体局部结构冲击毁伤防护方法	158
4.3.1	多层舱壁结构防护形式	160
4.3.2	复合结构防护形式	161
4.3.3	夹层板结构防护形式	163
	参考文献	168
第5章	舰船结构总体毁伤与剩余强度	170
5.1	舰船剩余强度分析	170
5.1.1	剩余强度的基本概念	170
5.1.2	船体破损后的受力分析	170
5.1.3	受损船体剩余强度分析法	179
5.1.4	船体结构毁伤等级评估	183
5.2	水下爆炸对船体结构的总体毁伤	184
5.2.1	水下爆炸气泡的毁伤效应	185
5.2.2	水下爆炸作用下舰船总体毁伤计算实例	188
5.3	舰艇结构抗冲击设计	198
5.3.1	船体结构抗冲击设计的指导原则	198

5.3.2 船舶抗冲击设计判断参考衡准	199
参考文献	201
第6章 船体冲击环境与设备人员抗冲击	203
6.1 船体冲击环境分析方法	203
6.1.1 冲击运动常用描述方法	203
6.1.2 水下爆炸冲击环境计算理论	204
6.1.3 船体冲击响应数值方法介绍	206
6.2 船体冲击环境特征	208
6.2.1 冲击谱原理	208
6.2.2 冲击谱的用途及规范	210
6.2.3 舰船典型冲击环境	210
6.3 冲击环境工程预报方法	212
6.3.1 舰船冲击环境工程化预报方法	212
6.3.2 新型冲击因子	219
6.4 设备抗冲击性能与要求	221
6.4.1 舰载设备冲击环境特点	221
6.4.2 舰载设备抗冲击计算方法	223
6.4.3 设备抗冲击的工程估算	225
6.5 设备抗冲击防护方法	230
6.5.1 水中非接触爆炸对设备的损伤	230
6.5.2 舰载设备抗冲击防护概念	231
6.5.3 设备抗冲击防护方法介绍	231
6.6 人员抗冲击防护方法	233
6.6.1 水中非接触爆炸对人员的冲击	233
6.6.2 人体冲击损伤评估方法	234
6.6.3 人体冲击损伤防护技术	236
参考文献	238
第7章 火灾与剩余强度	240
7.1 火灾种类与灭火材料	240
7.1.1 燃烧理论与舰船火灾	240
7.1.2 舰船火灾的特征及风险评价	243
7.1.3 灭火材料与灭火技术	246
7.2 温度对钢材本构关系的影响	248
7.2.1 应力与应变状态	248
7.2.2 钢材的本构关系	249
7.2.3 温度对本构关系的影响	253

7.3 火灾与船体结构剩余强度	256
7.3.1 研究火灾对船舶剩余强度影响的意义	256
7.3.2 火灾下钢结构的强度	256
7.3.3 火灾对剩余强度的影响	260
7.4 防火防爆的基本原则与措施	262
7.4.1 防火防爆的基本原则	262
7.4.2 火灾爆炸的预防措施	264
7.5 舰船消防装备与布置原则	266
7.5.1 舰船消防装备	266
7.5.2 消防装备布置原则	267
参考文献	271

第 1 章 绪 论

进入 21 世纪以来,随着经济和军事实力的增强,各国纷纷加强了对海洋及海洋资源的开发和利用,制定了适合于本国的海洋战略计划。中国是一个拥有 300 多万海洋国土的海洋大国。为保护国家海洋的完整和主权的独立,开发和利用海洋资源,迫切地需要发展强大的海军。舰船作为海军的中坚力量,在历次海战中都起着极其重要的作用,研究舰船的毁伤机理与防护结构对提高舰船的抗爆抗冲击性能和生命力尤为必要。

1.1 舰船毁伤与防护概述

舰船在历次海战中都起着举足轻重的作用,然而在服役期间却也极易遭受到敌方武器的攻击,比如沉底水雷、深水炸弹、鱼雷、半穿甲反舰导弹等。在现代海战中,反舰武器作战时立体性、突然性、隐蔽性等特点成为现代舰船面临的日益严重的威胁,舰船的生存环境愈加恶劣,舰船在战时面临的威胁日益多样化、复杂化。从图 1.1.1(本章及后续章节的部分图片来源于互联网,对相关知识感兴趣的读者可以进行了解)可以清楚地看到 2000 年美国海军阿利·伯克级驱逐舰“科尔”号在中东遭受恐怖分子炸弹袭击后所造成的毁伤效果。图 1.1.2 为水下爆炸导致的舰船折断。

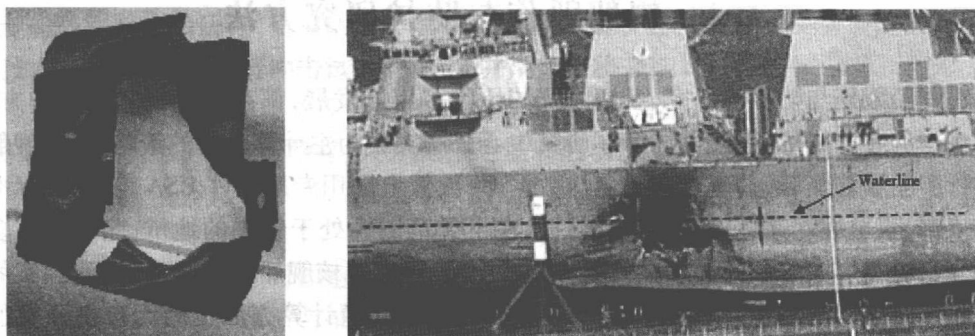


图 1.1.1 美国海军“科尔”号驱逐舰在也门遭受恐怖袭击所造成的毁伤

造成舰船毁伤的原因主要有以下三种:接触爆炸,如遭受导弹、激光炸弹直接攻击,造成舰体损伤及舰船机电设备损伤;水中非接触爆炸,如遭受鱼雷、水雷爆炸的冲击,主要破坏舰载机电设备;自身武器发射时反冲击造成的毁伤,其会影响到舰载机电设备的正常运转。在这其中,接触性爆炸和水中非接触性爆炸对舰船的毁伤的影响占主要地位,但是自身武器发射时反冲击造成的毁伤,也是一个不可忽视的因素。

接触爆炸形成高强度的局部破坏,会波及部分舱内设备,但大部分能量耗于船体结构的损伤,严重的情况下使船体进水,甚至沉没;非接触爆炸是指船体位于水下反舰兵器爆

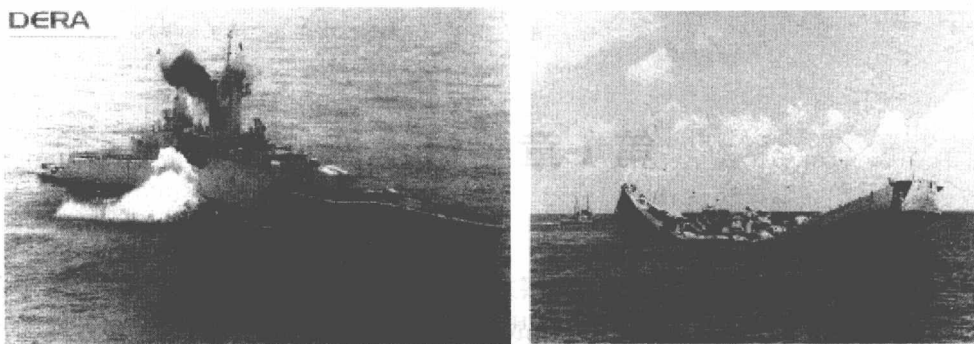


图 1.1.2 水下爆炸导致舰船折断

炸产生的气泡半径之外,爆炸冲击作用以水为介质传播到船体的湿表面上。由于水的密度远大于空气密度,与空中爆炸不同,水下非接触爆炸产生的冲击波、气泡脉动和滞后流等复杂冲击作用遍及整船,除造成船体结构冲击损伤外,往往会造成舰船设备、人员的大范围破坏或伤亡,严重影响舰船的生命力和战斗力。

如何有效地抵御各种战术武器的攻击,保证舰船在受到各种武器攻击条件下产生的破损或毁伤程度被控制在允许的状态和范围内,提高舰船的生存能力和作战能力这些都是舰船结构毁伤与防护所研究的问题,也是世界上普遍关注的问题。

防护结构作为各种水面舰船抵御各种战术武器攻击的有效手段,一直受到各个国家的重视。尤其是舰船内部的各种动力设备、电力设备、武器装备是舰船安全性和战斗力的有效保证,典型防护结构的设置能够对上述设备起到有效的保护作用。

1.2 舰船毁伤与防护研究方法

对舰船毁伤与防护的研究,各海军强国历经多年的发展,都有一套行之有效的方法。美国海军有着严格的标准,美国海军研究中心采用实验为主计算为辅的策略,对每艘舰船都进行实船爆炸实验,并建立实船爆炸数据库,数值上采用专用软件 USA,以 MIL 标准为校核依据,直至舰船达标后才允许其服役,在世界范围内处于领先的地位;北约国家多结合部分实船爆炸实验和各通用数值软件,按照 BV 标准校核舰船的安全性;而我国实船海上实验方面才刚刚起步,尚未形成一套规范及标准,数值计算方面也尚无自主开发的软件,多采用他国开发的通用软件,但是也逐渐走向实验为主,数值计算为辅的道路。

1. 试验法

试验法主要有实船爆炸试验、模型试验。

1) 实船试验

进行实船试验的目的主要是考核舰船遭到毁伤时能否满足研制总要求规定的技术指标,验证船上主要设备抗冲击性能及抗冲击措施的有效性。实船爆炸试验是一种带有破坏性的试验,往往造成船体、结构或船上机械、设备的损坏,严重时导致舰船失去战斗力或沉没,通常分为远场的验证性实船试验和近场的对比性实船试验。如图 1.2.1 及图 1.2.2 所示分别为美国和我国进行的水下爆炸实船试验。



图 1.2.1 美国驱护舰海上实船水下爆炸试验

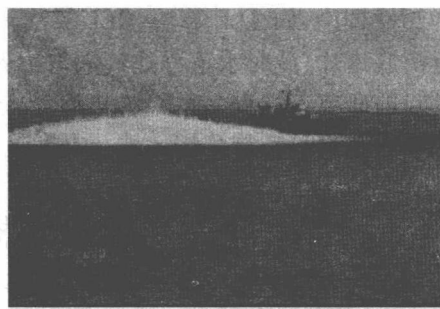


图 1.2.2 我国某次大规模实船水下爆炸试验

2) 模型试验

模型试验是指将实船按几何相似、动力相似等相似原理,缩小一定比例制成模型,同时将炸药当量也相应减小,并在试验水池中进行的试验。由于花费较少,试验开展灵活,因而在研究中得到了广泛的运用。

但是若采用水下爆炸缩尺比模型试验,则受到水下爆炸相似理论的限制。缩比试验涉及到结构动力学、材料非线性以及水下爆炸载荷等相似问题,由于模型加工工艺、试验条件等因素的约束,即使是模型与实船的缩尺比较小,也难以保证船体结构、材料以及载荷均完全满足相似准则。由于水下爆炸模型试验属于瞬态强非线性动力学相似问题,至今人们尚未找到相似规律,将模型试验的结果推广到实船。

2. 数值仿真方法

实船试验需要大量的费用和时间,而模型试验存在着一定的不足之处,试验次数极其有限,难以得到从概率统计学角度看来有意义的试验结果;而计算机建模、仿真的巨大发展又为数字化的虚拟研究提供了广阔的空间。因此,不仅发展中国家海军更依赖仿真来进行舰船毁伤与防护研究,而且诸如美国等发达国家海军也在大力发展基于仿真的虚拟冲击技术,以期能弥补现行冲击试验的不足,并期望在将来能替代冲击试验。

根据水下爆炸的物理现象及其对水中结构的毁伤特性,将水下爆炸分为接触爆炸(近场或近边界爆炸)和非接触爆炸(包括中近场和远场爆炸)^[1]。对于远场非接触爆炸,主要是冲击波与船体结构在弹性范围内相互作用,目前有认识一致的二阶双渐近法(DAA2)^[2]、声固耦合方法等^[3-4],而且实践证明,这些方法均有较好的精度。远场爆炸时,气泡对舰船的毁伤效应可以忽略,气泡的运动形态不受舰船的影响^[5]。

对于中近场爆炸,冲击波与船体结构相互作用产生片空化现象,出现气、液、固耦合效应^[6-7]。目前主要的理论和方法包括:弹塑性理论及任意拉格朗日欧拉算法(ALE)^[8]、声固耦合理论及相应的求解方法、流固耦合理论及二阶双渐近法等。现有的水下爆炸实验研究表明^[9],中近场气泡的毁伤威力不仅与装药有关,而且与作战环境(如装药距水面、海底的距离,海底特征等)以及目标特性(舰船本身的结构特性)有关,只有在一定的条件下,气泡的毁伤威力才能最大化,但迄今为止,水下爆炸气泡对舰船结构的毁伤效能仍未被有效利用。

随着精确制导武器的快速发展,如鱼雷等武器可贴近船体表面爆炸,即接触爆炸,接触爆炸冲击压力可达 GPa 量级,接触面出现流动、破碎^[10-13],与中远场爆炸在机理上存在着很大的差别,前者属于爆炸动力学范畴,后者属结构动力学范畴。目前仍采用大变形

的弹塑性理论,如 ALE 算法、CEL 算法等。与鱼雷接触爆炸类似的物理现象,还有沉底水雷近海底爆炸,此时水下爆炸气泡与边界相互作用,出现撕裂、不稳定、融合等特殊物理现象。目前研究人员大多采用绝热假设、流体有限元(FEM)、边界元理论(BEM)以及相应的求解方法进行计算分析。

1.3 舰船结构毁伤效应研究现状

1.3.1 试验研究现状

水下爆炸对结构的破坏主要是水下爆炸冲击波和脉动压力波作用的结果,作用时间短,过程复杂。水下爆炸的试验测试方法主要有 3 种,包括:水下爆炸高速摄影技术、水下爆炸载荷测试技术和水下爆炸载荷作用下结构动态响应的测试技术^[14]。根据试验对象的不同,试验研究又可以分为模型试验和实船试验两种。

由于水中目标一般由板、壳组成,因此在水下爆炸的模型试验中一般考察圆板或方板在水下爆炸冲击载荷作用下的动态响应。国内外学者对板、壳结构进行了大量的试验研究,主要集中在板、壳结构的动响应和毁伤模式方面。在板、壳结构动响应方面,通过对固支方板进行水下爆炸试验,得到了不同部位的应变分布和位移分布值^[15-16]。根据能量守恒的方法,采用刚塑性本构模型,仅考虑膜力效应,在爆炸冲击波载荷作用下靶板变形的基础上,得出了四边固支方板在水中爆炸冲击载荷作用下的塑性动力响应解析解,通过对固支方板进行水下爆炸试验验证了解析解的正确性^[17]。在毁伤模式方面,通过对加筋板架结构进行水下爆炸试验,得到了加筋板架的四种毁伤模式:加筋板架塑性大变形、加筋板架首先产生边界拉伸撕裂、加筋板架首先产生边界剪切破口和加筋板架首先产生中间剪切破口。得到了不同毁伤模式之间的临界载荷值及从毁伤模式的角度提出了接触爆炸与非接触爆炸的判别条件^[18]。

实船水下爆炸试验属于破坏性试验,一般很少进行。据报道,美国曾对退役航空母舰进行了大量的实船爆炸试验,包括空中爆炸和水中爆炸,用以改进航空母舰的设计。意大利对退役的驱逐舰进行了 6 次水下爆炸试验,考察了水下爆炸对全船的破坏情况以及加筋板在爆炸载荷作用下的动态响应情况,并对 1 艘退役的 2500t 级的驱逐舰进行了实船水下爆炸试验,获得了舰船振荡效应下的振型和频率。世界主要海军强国在历次海战中积累了大量的宝贵数据,美国、俄罗斯等海军强国都认识到舰船遭到水下爆炸攻击后产生的严重后果,都投入了大量的精力开展水下爆炸对舰船的毁伤试验和研究,并不断完善军用规范的舰船抗冲击能力,以保证新研制的舰船具有良好的抗水下爆炸的能力。在我国,开展舰船水下抗爆抗冲击性能的研究与国外相比并不算晚,但由于实船试验需要大量的费用和时间,研究工作进展较慢,仅进行过少量几次实船试验。但通过实船试验得到了一些宝贵资料。

1.3.2 数值仿真研究现状

水下爆炸仿真主要进行水下爆炸对目标毁伤的物理、数学模型研究,建立水下爆炸边界条件处理方法;研究目标建模技术、水下爆炸数值建模技术;研究水下爆炸的计算方法、

仿真结果后处理技术。通过研究实现水中兵器爆炸威力以及舰艇抗爆抗冲击的数值模拟与全过程仿真。

有限元法是基于网格的数值方法,运动方程同邻近的网格形状无关,适合于形状复杂的计算区域,且便于编制通用程序。由于这些优点,有限元法在水下爆炸数值模拟中得到了愈来愈广泛的应用。但有限元法在分析涉及特大变形、奇异性或裂纹动态扩展等问题时遇到了许多困难,同时,复杂三维结构的网格生成和重分也是相当困难和费时的。近年来,随着计算机科学及仿真技术的发展,计算模拟方法的研究在规模和深度方面都取得了很大的进展^[19]。光滑粒子流体动力学被运用于水下爆炸计算,该方法与有限元程序结合使用可以解决水下爆炸数值模拟的一系列难题^[20]。另外,有限元方法采用的单元通常为低阶单元,在解决波的传播问题时会有较大的发散,要想得到准确的数值结果需要十分精细的网格,从而导致计算量很大,影响计算效率。谱单元作为一种高阶单元,可以不需要细化网格便获得收敛性,可以极大地简化计算,在保证精度的同时提高计算速度。

在水下爆炸数值建模技术方面,考虑流场大小、网格大小对计算结果的影响,发现在进行船体结构冲击载荷下的强度分析时,采用适当的局部流场是非常简单、精确的。在计算全船加速度响应时,采用局部流场计算时必须进行修正^[21]。考虑耦合法的选取及边界条件对计算的影响,指出用声固耦合算法模拟舰船水下爆炸是可行的,并提出了采用声固耦合算法进行水下爆炸数值模拟分析时应注意的方法和技巧^[22]。另外大量学者利用数值仿真方法从结构的变形损伤形式、能量吸收和冲击环境等方面研究了舰船结构在水下爆炸载荷作用下的破坏机理和响应特征^[23-25]。

1.4 毁伤评估和规范标准研究

国外十分注重毁伤评估和标准规范研究。1948 年建立了美军《船用机器设备和系统强冲击规范》,该规范随着后续的不间断试验、改进和技术进步而一再进行修改,最初于 1954 年 4 月 9 日颁布的 MIL-S-901B(海军)标准,1963 年 1 月 15 日修改订正为 MIL-S-901C(海军)标准,1989 年 3 月 17 日再次修订为 MIL-S-901D(海军)标准。以德国代表的东西欧国家也十分重视舰船抗冲击规范工作,在 20 世纪 80 年代制定了与 MIL-S-901D 相当的 BV-4385 标准来规范舰艇抗爆抗冲击工作。

与 MIL-S-901 军标相对应的是,美国同时还发展和建立了《美国海军舰船试验总纲》^[26],总纲规定:“对于战斗舰船,要将每一种舰级中的一艘做冲击试验。”美国之所以如此重视对舰船的冲击试验,是因为“战斗舰船的作战使用及模拟试验的经验表明,与舰上有效的负载相比,船员及舰体具有固有的高度抗冲击能力,舰上采用高度精密的复杂系统已使设备增加了对强冲击的敏感度。”这段话表明的直接意义是,非接触水中爆炸虽然难以对舰船结构和人员造成致命的损伤,但却能对舰上精密的复杂系统构成严重的破坏。

关于实船爆炸试验方法、测试要点等,《美国海军舰船试验总纲》中都有明确的规定,例如炸药当量、爆炸次数、爆炸距离等是严格规定的。虽然对于美国实船爆炸试验详细的情况尚不可知,但有一点是肯定的,美国实船冲击试验一般分科研试验和考核试验:科研试验是利用退役舰艇进行破坏极限试验,同时为制定修改各种评估标准提供数据;考核试验时舰船一般处于航行状态,这试验状态不仅有利于考核舰船抗冲击性能,同时试验的组

织实施和测试技术也提出了相当高的要求。实船爆炸试验的目的在于暴露并改进舰船总体防护设计中的缺陷,在战时受攻击而不致其丧失生命力。正是由于进行了大量系统、科学而严谨的爆炸试验,使美国发展和完善了舰船抗冲击设计与防护技术,使各种规范标准保持了生命力。

我国在舰船水下爆炸冲击载荷、舰船结构冲击响应和舰用设备冲击响应等方面开展了大量研究工作,提出了多项仿真计算方法,具备一定的冲击仿真计算能力。但是,国内至今未能真正掌握舰船爆炸冲击流固耦合作用分析等关键技术,没有形成成熟的、经过试验验证的、标准化的舰船冲击防护优化设计、仿真评估方法、模型和软件,无法将仿真评估手段应用于舰船研制的各个阶段。

1.5 舰船防护结构研究现状

舰船不仅要有较强的作战能力,同时要有相应的生存能力,特别是在遭受敌方攻击条件下所具有的生存能力。设置防护结构能有效地抵御各种战术武器的攻击,保证舰船在受到各种武器攻击条件下所产生的破损或毁伤程度被控制在允许的状态和范围内,从而提高舰船的生存能力和作战能力。

目前防护结构型式主要有:箱型结构型式、多层舱壁结构型式、复合结构型式和夹层板型式。箱型结构型式是传统的防护型式,常见的有在甲板下或舷侧间设置箱型结构。水下舷侧防雷舱结构是舰艇多层舱壁防护结构形式的重点,大型水面舰船都设有专门的防雷舱结构,而对于现代中小型舰船则由于受到排水量限制通常不会设置这样的结构。普通的船舶一般为单壳或双层壳,它们之间用普通肋骨连接,Y型舷侧结构是指船体舷侧在物理模型上的双壳之间用横向Y字型板代替部分肋骨,借此提高舰船结构抗冲击性能,Y型舷侧结构是一种典型的复合结构型式。夹层板属于复合材料板的一种,它是由多层性能不同,厚度不一的板件叠和而成的叠和合成板。从材料科学的角度来看,夹层板可分为:复合材料夹层板,金属材料夹层板。从结构型的分类来看,夹层板按其芯层结构分为离散芯层夹层板和连续芯层夹层板。

1.6 舰船结构毁伤与防护展望

水下爆炸对舰船结构的毁伤是一个非常复杂的问题,理论研究有很大的局限性,主要有以下几个方面问题需要关注:

(1) 随着现代制导技术的发展,水下兵器直接命中目标的可能性越来越大,而水下接触爆炸对结构的毁伤问题的理论研究开展的还不够深入,这将是今后理论研究的一个关注点;

(2) 现代舰船抗水下爆炸冲击的能力与以往的舰船相比有了很大的提高,水下非接触爆炸对舰船的毁伤效应评定如果仍然依靠以往的标准就难以反映真实情况,因此有必要针对现代舰船在水下爆炸场中的易损特性制定新的毁伤准则;

(3) 现代弹药的一个发展方向是灵巧化,对于直接命中的小装药量战斗部对舰船结构的毁伤问题值得关注;

(4) 大中型船舶一般采用双层船底结构,而且有众多水密舱。对于水下灵巧弹药如何高效毁伤双层船底结构有待于进一步研究;

(5) 在结构载荷确定和传递方面,冲击波作用早期结构应力波与冲击波卸载段耦合问题值得关注。

数值仿真是研究水下爆炸对结构毁伤效应的有力工具,如何提高数值仿真的精度和效率是研究的关键问题,主要有以下几个方面值得关注:

(1) 水下爆炸涉及到爆轰波的形成、传播,爆炸及其作用和气泡脉动等问题,这需要比一阶更精确的高阶求解技术进行模拟;

(2) 通常情况下水下爆炸的数值仿真效率很低,主要原因是计算资源大多浪费在流体单元中,而爆炸冲击波在自由场中是球对称的,因此能够把一维场中的计算结果转化到三维场中继续计算的影射技术能大大提高计算效率。

参 考 文 献

- [1] 浦金云. 舰船生命力. 北京:海潮出版社, 2000.
- [2] Geers T L. Doubly asymptotic approximations for transient motions of submerged structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 64:1500 - 1508.
- [3] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军, 等. 基于 ABAQUS 软件的舰船水下爆炸研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(1): 451 - 455.
- [4] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军. 声固耦合方法在舰船水下爆炸中的应用. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, 26(6): 707 - 712.
- [5] 张阿漫. 水下爆炸气泡三维动态特性研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2006, 12.
- [6] Sprague M A, Geers T L. A spectral/finiteelement analysis of a frigate-like structure subjected to an underwater explosion. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195:2149 - 2467.
- [7] Sprague M A, Geers T L. A spectralelement method for modeling cavitation in transient fluid structure interaction. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60(15): 2467 - 2499.
- [8] 姚熊亮, 郭君, 许维军. 船舶结构远场爆炸冲击动响应的数值试验方法. *中国造船*, 2006, 47(2): 24 - 34.
- [9] 李玉节, 潘建强 等. 水下爆炸气泡诱发舰船鞭状效应的实验研究. *船舶力学*, 2001, 5(6): 78 - 83.
- [10] 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. *中国造船*, 2003, 44(1): 47 - 52.
- [11] 唐献述, 龙源, 王树民, 等. 接触爆炸作用下板的塑性变形分析与实验. *解放军理工大学学报*, 2006, 7(3): 242 - 246.
- [12] 施兴华, 张婧, 王善. 接触爆炸载荷作用下单层薄板临界破坏分析. *南京理工大学学报*, 2009, 33(2): 238 - 241.
- [13] Wang Q X, Yeo K S, Khoo B C, Lam K Y. Strong interaction between a buoyancy bubble and a free surface. *Theoretical Computational Fluid Dynamics*, 1996, 8:73 - 88.
- [14] 尹群, 陈永念, 胡海岩. 水下爆炸研究的现状和趋势[J]. *造船技术*, 2003(6): 6 - 13.
- [15] 吴成, 金俨, 李华新. 固支方板对水下爆炸作用的动态响应研究[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(4): 275 - 283.
- [16] 牟金磊, 朱锡, 张振华, 等. 水下爆炸载荷作用下加筋板变形及开裂试验研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(1).
- [17] 吴成, 金俨, 李华新. 固支方板对水中爆炸作用的动态响应研究[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(4).
- [18] 朱锡, 牟金磊, 张振华. 水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(3).
- [19] Marcus M H. The Response of a cylindrical shell to bulk cavitation loading, DTIC ADA130030[R]. 1983.
- [20] Swegle J W, Attaway S W. On the feasibility of using smoothed particle hydro - dynamics for underwater explosion calcu-

- lations[J]. *Computational Mechanics*, 1995, 17(3): 151 – 168.
- [21] 姚熊亮, 徐小刚, 张凤香. 流场网格划分对水下爆炸结构响应的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, 6(3).
- [22] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军. 声固耦合方法在舰船水下爆炸中的应用[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, 26(6): 707 – 712.
- [23] 方斌, 朱锡. 不同边界条件下水下爆炸气泡的数值模拟[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(2): 85 – 90.
- [24] 张振华, 朱锡, 等. 水下爆炸冲击波作用下自由环肋圆柱壳动态响应的数值仿真研究. *振动与冲击*[J]. 2005, 24(1).
- [25] 金乾坤, 丁刚. 水下爆炸对船板冲击作用仿真. *计算机仿真*[J]. 2005, 22(6).
- [26] Cole R H. *Underwater Explosion*. New Jersey: Princeton University Press, 1948: 118 – 127.
- [27] 宗智, 邹丽, 刘谋斌, 等. 模拟二维下爆炸问题的水光滑粒子 (SPH) 方法. *水动力学研究与进展 (A)*, 2007, 22(1): 61 – 67.
- [28] 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. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 537: 387 – 413.
- [29] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, ed. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations. *Shock Waves*, 2003, 12(6a): 509 – 520.
- [30] 荣吉利, 李健. 基于 DYTRAN 软件的三维水下爆炸气泡运动研究. *兵工学报*, 2008, 29(3): 331 – 336.
- [31] Wilkerson S A. A boundary integral approach to three dimensional underwater explosion bubble dynamics [D]. Johns Hopkins University, Baltimore, 1990.
- [32] Zong Z. A hydro plastic analysis of a free – free beam floating on water subjected to an underwater bubble. *Journal of Fluids and Structures* 2005, 20: 359 – 372.
- [33] 汪斌, 张远平, 王彦平. 一种水中爆炸气泡脉动实验研究方法. *高压物理学报*. 2009, 23(5): 332 – 337.
- [34] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学理论与应用. 无锡: 中国船舶科学技术研究所, 2002: 89 – 112.
- [35] Kalumuck K M, Chahine G L, Duraiswami R. Bubble dynamics fluid – structure interaction simulation by coupling fluid BEM and structural FEM codes. *Journal of Fluids and Structures*, 1995, 9: 861 – 883.
- [36] Pozrikidis C. Three – dimensional oscillations of rising bubbles. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 2004, 28: 315 – 323.
- [37] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [38] 美国海军舰船试验总纲[S]. 1989.

第2章 武器对舰船的破坏

2.1 概述

海洋与人类息息相关。当历史的航船驶向 21 世纪的时候,也伴随着海洋世纪的到来,围绕着海洋资源和海洋国土的军事斗争日趋激烈,不论是超级大国、传统的海上强国,还是处在临海位置的发展中国家,都密切关注着本国未来海军的发展。舰船是海军装备的主要力量,科学技术的进步是促使舰船不断发展创新的永恒动力。要想在未来的海上战争中占据优势,必须提升舰船自身的防护能力。舰船结构毁伤和生命力是舰船自身防护能力的体现。但是舰船结构毁伤与生命力,直接与武器和技术装备的发展紧密相连。因此研究舰船结构毁伤和生命力,应该首先了解各种武器的特点及其对舰船的攻击方式和破坏作用。

现在人类已经步入了信息社会,战争的形态也由机械化转向信息化,海军装备的整体面貌发生了翻天覆地的变化。现代军舰上的武器种类很多,如图 2.1.1 所示,常见的有舰炮、水雷、鱼雷、航空导弹以及反舰导弹等。随着科技水平的不断提高和各次战争的推动

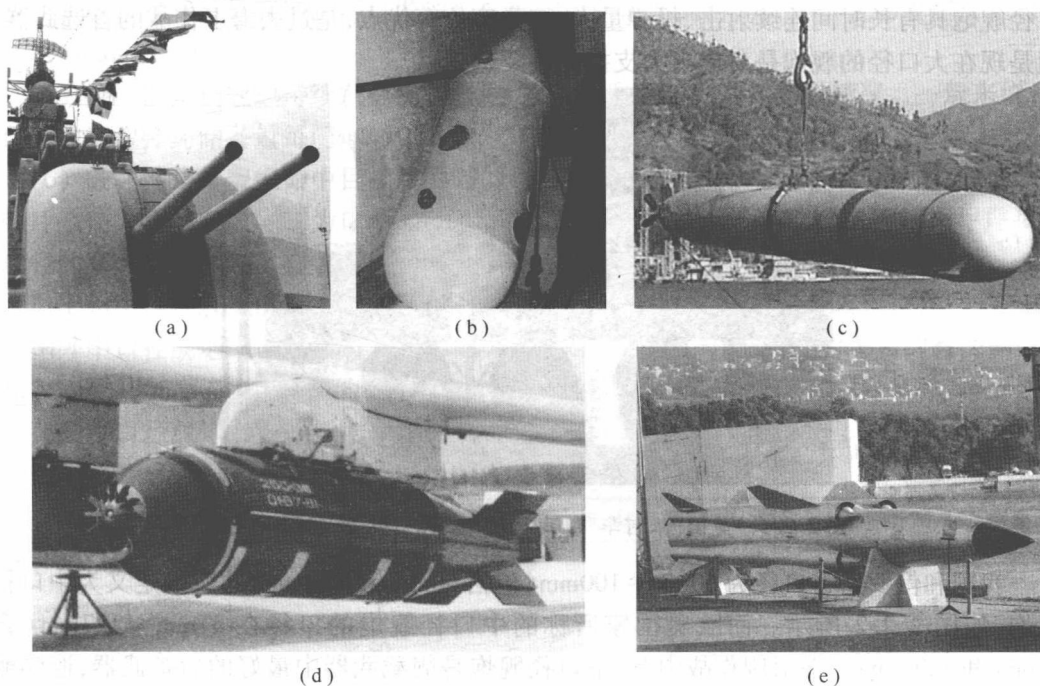


图 2.1.1 各种舰载武器

(a) 舰炮; (b) 水雷; (c) 鱼雷; (d) 航空炸弹; (e) 反舰导弹。