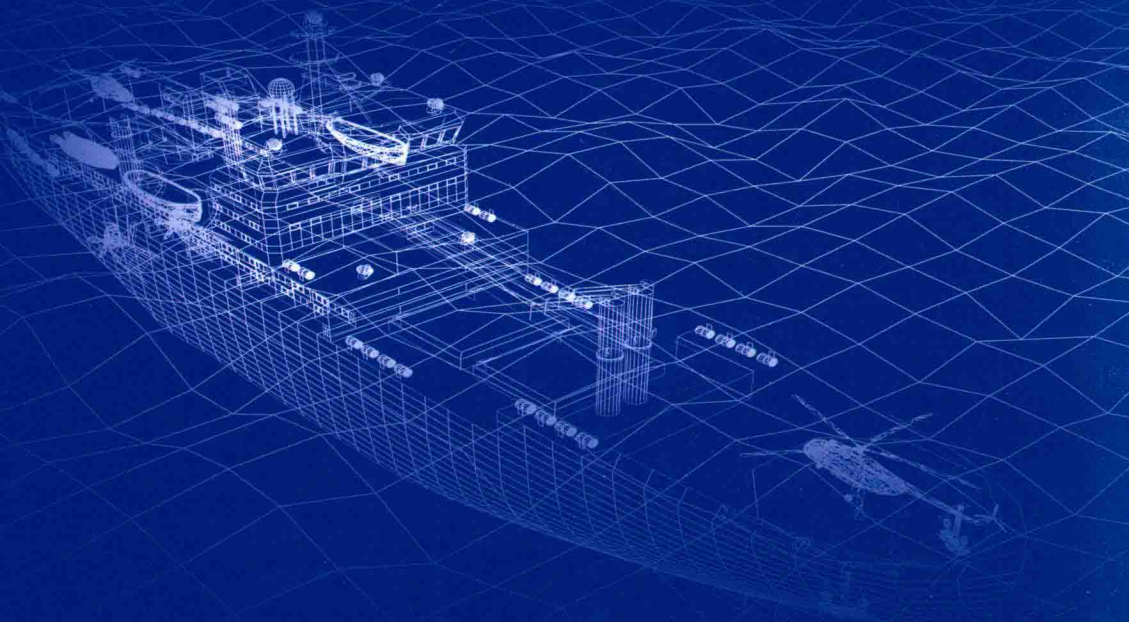


“ 十二五 ” 国家重点图书  
船舶与海洋出版工程

# 舰船舷侧结构 损伤与防护

张 婧 编著

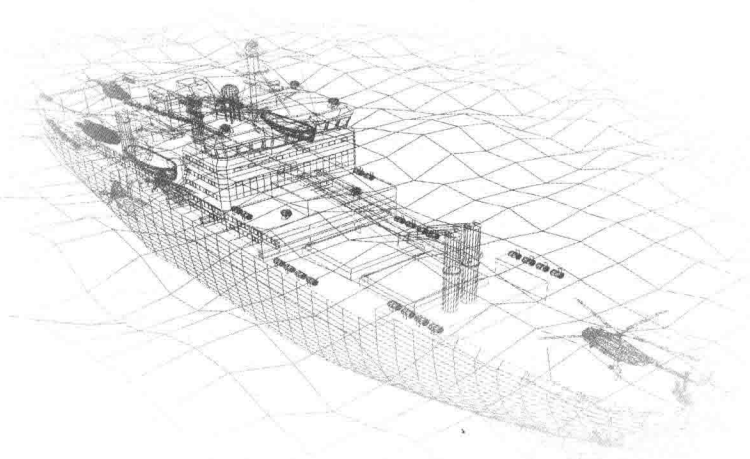


上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

“ 十二五 ” 国家重点图书

# 舰船舷侧结构 损伤与防护

张 婧 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书主要介绍接触爆炸对板架结构的破坏机理、船用加筋板结构的爆炸冲击破坏、舰船防护结构在爆炸下的破坏机理、舰船防护结构的抗爆影响、舰船舷侧在两发武器攻击下的破坏情况等内容。

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,也可供从事船舶与海洋工程专业的研究人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

舰船舷侧结构损伤与防护/张靖编著. —上海:

上海交通大学出版社, 2015

ISBN 978-7-313-14089-0

I. ①舰… II. ①张… III. ①军用船—船舷—船体结构—损伤(力学)—研究②军用船—船舷—船体结构—防护—研究 IV. ①U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 271632 号

## 舰船舷侧结构损伤与防护

编 著: 张 靖

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 常熟市文化印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 225 千字

版 次: 2015 年 11 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14089-0/U

定 价: 68.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 13.75

印 次: 2015 年 11 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

# 前 言

我国是海洋大国,海域辽阔,海岸线长,保护我国的领土完整和主权的独立是海军的神圣使命。研究及评估反舰武器对水面舰船造成的损伤,对我国舰船的防护设计也具有相当大的指导意义。以此来提高国防的现代化水平,走科技强军之路,对保卫我国的安全具有重要意义。舰船在战斗中可能会受到来自空中和水中兵器的攻击,按照作用距离的远近可分为接触爆炸、近场和远场爆炸。远场爆炸在大部分情况下很难使结构丧失不沉性,难以对舰船形成致命性的打击。接触爆炸的大部分能量耗于船体结构的损伤,使船体结构出现较大破口,导致船体结构进水,甚至沉没。因此,开展舰船防护结构在接触爆炸作用下的冲击破坏及防护机理,对提高舰船的生命力和战斗力是至关重要的。

舰船舷侧损伤与防护涉及的范围较广,与应力波的传播、爆炸冲击动力学及流固耦合动力学都有着密切的联系。本书力求内容新颖和切合实用,内容多为作者近年来取得的一些研究成果。本书为舰船结构的抗爆抗冲击防护设计提供依据,可作为相关学科的研究人员及研究生的学习和参考用书。

本书分为绪论、接触爆炸对板壳结构的破坏机理、船用加筋板结构的爆炸冲击破坏、舰船防护结构在爆炸作用下的破坏机理、舰船防护结构的抗爆影响研究、舰船舷侧在两发武器攻击下的破坏共6章。第1章主要介绍了舰船结构损伤与防护概述、大型水面舰船的结构及主要防护形式、舰船结构损伤响应研究现状等内容。第2章介绍了爆炸冲击波的基本理论、分析接触爆炸作用下板壳的临界状态、破口的计算方法、单层钢板的数值模拟及失效概率等。第3章分析了接触爆炸下加筋板的破口、加筋板在接触爆炸下的响应数值方法、加筋板的冲击破坏。第4章分析了单向应变平面波的传播、爆炸冲击波对多层结构的破坏、水下接触爆炸作用下舰船防护结构的试验和仿真研究,并对结构的破坏概率进行研究。第5章对防雷舱在接触爆炸作用下的毁伤进行理论分析,并对舰船防护

结构中空舱及液舱的抗爆影响进行分析。第 6 章考虑两发武器同时攻击和先后攻击下,分析结构的爆炸动响应。

在本书的形成和研究过程中,曾得到导师哈尔滨工程大学王善教授的悉心指导和帮助,对本书作出贡献的还包括施兴华博士、盖京波博士、欧阳志为博士、蔡金志硕士、张馨硕士,在此表示感谢。本书的部分理论来源于前人的著作,在此,对这些作者表示真诚的感谢。

由于作者水平和学识有限,书中肯定有欠妥和疏漏之处,恳请广大读者、同行和专家予以批评和指正。

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                 | 1  |
| 1.1 舰船结构损伤与防护概述          | 1  |
| 1.2 大型水面舰船的结构及主要防护形式     | 2  |
| 1.2.1 大型水面舰船的主要结构形式      | 2  |
| 1.2.2 舰船的毁伤等级            | 3  |
| 1.2.3 舰船的防护结构模型          | 4  |
| 1.3 舰船结构损伤响应研究现状         | 5  |
| 1.3.1 简单结构的爆炸冲击响应        | 5  |
| 1.3.2 水面舰船的破坏研究          | 11 |
| 1.4 舰船结构损伤与防护发展展望        | 16 |
| 参考文献                     | 17 |
| 第 2 章 接触爆炸对板壳结构的破坏机理     | 23 |
| 2.1 爆炸冲击波                | 23 |
| 2.1.1 爆轰的 CJ 模型          | 23 |
| 2.1.2 爆轰的二维模型            | 26 |
| 2.1.3 爆轰产物和固体的状态方程       | 28 |
| 2.1.4 爆轰波的传播和相互作用        | 29 |
| 2.1.5 钢板中爆炸冲击波的初始参数      | 32 |
| 2.2 接触爆炸作用下板壳结构的临界状态     | 34 |
| 2.2.1 固支圆板在接触爆炸载荷作用下的波动解 | 34 |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 2.2.2 | 临界装药量和临界位移 .....           | 49 |
| 2.3   | 接触爆炸下板壳结构的破口计算方法 .....     | 56 |
| 2.3.1 | 花瓣开裂的能量计算 .....            | 56 |
| 2.3.2 | 总能量及曲率半径的确定 .....          | 59 |
| 2.3.3 | 破口半径的计算 .....              | 60 |
| 2.4   | 爆炸作用下单层钢板数值仿真及失效概率 .....   | 62 |
| 2.4.1 | 有限元理论 .....                | 62 |
| 2.4.2 | 数值仿真算法 .....               | 66 |
| 2.4.3 | 有限元计算 .....                | 67 |
| 2.4.4 | 蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟法 ..... | 68 |
| 2.4.5 | 生成样本数据 .....               | 69 |
| 2.4.6 | 单层钢板的数值仿真 .....            | 70 |
| 2.4.7 | 结果统计分析 .....               | 74 |
| 2.5   | 两发武器命中板壳结构 .....           | 76 |
| 2.5.1 | 计算模型 .....                 | 76 |
| 2.5.2 | 结果及分析 .....                | 77 |
| 2.5.3 | 小结 .....                   | 81 |
|       | 参考文献 .....                 | 82 |
| 第3章   | 船用加筋板结构的爆炸冲击破坏 .....       | 83 |
| 3.1   | 接触爆炸下加筋板的破口 .....          | 83 |
| 3.1.1 | 加筋板的模型等效 .....             | 83 |
| 3.1.2 | 加筋板单位宽度相当极限抗弯弯矩 .....      | 84 |
| 3.1.3 | 加筋板的初始动能 .....             | 84 |
| 3.1.4 | 加筋板的塑性应变能 .....            | 86 |
| 3.1.5 | 运用能量守恒求解 $W_0$ .....       | 87 |
| 3.1.6 | 破口半径的确定 .....              | 88 |
| 3.1.7 | 初始破口大小的估计 .....            | 88 |

|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| 3.1.8 算例 .....                   | 88      |
| 3.2 加筋板在接触爆炸下响应数值方法 .....        | 89      |
| 3.2.1 有限元模型 .....                | 89      |
| 3.2.2 边界条件 .....                 | 91      |
| 3.2.3 加筋板的破坏准则 .....             | 92      |
| 3.2.4 计算结果及分析 .....              | 92      |
| 3.3 加筋板冲击破坏 .....                | 95      |
| 3.3.1 单层加筋板的冲击破坏分析 .....         | 97      |
| 3.3.2 加筋板的冲击破坏概率 .....           | 104     |
| 参考文献 .....                       | 114     |
| <br>第4章 舰船防护结构在爆炸下的破坏机理 .....    | <br>116 |
| 4.1 单向应变平面波的传播 .....             | 116     |
| 4.2 爆炸冲击波对多层结构的破坏 .....          | 120     |
| 4.2.1 弱冲击波对多层结构的破坏 .....         | 120     |
| 4.2.2 接触爆炸对舰船舷侧防护的破坏分析 .....     | 122     |
| 4.2.3 算例 .....                   | 129     |
| 4.3 水下接触爆炸载荷作用下舰船防护结构的试验研究 ..... | 130     |
| 4.3.1 试验背景及目的 .....              | 130     |
| 4.3.2 试验装置及其模型 .....             | 131     |
| 4.3.3 试验准备 .....                 | 132     |
| 4.3.4 预备试验 .....                 | 136     |
| 4.3.5 模型试件试验及试验结果描述 .....        | 137     |
| 4.3.6 试验结果分析 .....               | 148     |
| 4.3.7 结论 .....                   | 155     |
| 4.4 舰船防护结构模型的仿真分析 .....          | 155     |
| 4.4.1 有限元模型 .....                | 156     |
| 4.4.2 数值仿真结果 .....               | 156     |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 4.4.3      | 仿真结果与试验结果分析            | 158        |
| 4.5        | 水下接触爆炸载荷作用下防护结构的破坏概率分析 | 161        |
| 4.5.1      | 随机变量的确定                | 161        |
| 4.5.2      | 模型的建立                  | 162        |
| 4.5.3      | 破坏准则                   | 163        |
| 4.5.4      | 防护结构各层板的破坏概率计算         | 163        |
| 4.5.5      | 舷侧防护结构系统可靠性分析          | 167        |
|            | 参考文献                   | 167        |
| <b>第5章</b> | <b>舰船防护结构的抗爆影响研究</b>   | <b>169</b> |
| 5.1        | 舰船防护结构的简化模型            | 169        |
| 5.2        | 防雷舱在水下接触爆炸作用下的毁伤理论分析   | 170        |
| 5.2.1      | 舷侧外板破口半径               | 171        |
| 5.2.2      | 液舱外板破坏变形               | 171        |
| 5.2.3      | 液舱内板破坏变形计算             | 173        |
| 5.2.4      | 防御纵壁破坏变形计算             | 176        |
| 5.2.5      | 算例                     | 176        |
| 5.3        | 空舱和液舱尺寸对舰船防护结构的影响      | 177        |
| 5.3.1      | 有限元仿真模型                | 177        |
| 5.3.2      | 仿真时情况讨论                | 178        |
| 5.3.3      | 结果分析                   | 178        |
| 5.3.4      | 数值模拟的结果检验              | 185        |
| 5.4        | 舰船防护结构中液舱影响仿真分析        | 187        |
| 5.4.1      | 有限元模型                  | 187        |
| 5.4.2      | 液舱影响的数值结果及分析           | 188        |
| 5.4.3      | 液舱中不同水位的数值结果及分析        | 192        |
| 5.4.4      | 结果分析                   | 194        |
|            | 参考文献                   | 195        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第 6 章 舰船舷侧在两发武器攻击下的破坏     | 196 |
| 6.1 两发武器同时攻击船侧板架结构的破坏分析   | 196 |
| 6.1.1 有限元模型               | 196 |
| 6.1.2 仿真情况讨论              | 196 |
| 6.1.3 数值模拟结果分析            | 198 |
| 6.1.4 结论                  | 201 |
| 6.2 两发武器先后攻击船侧板架结构的破坏分析   | 202 |
| 6.2.1 有限元模型               | 202 |
| 6.2.2 仿真情况讨论              | 202 |
| 6.2.3 数值结果分析              | 202 |
| 6.2.4 仿真结论                | 206 |
| 6.3 两发武器同时和先后攻击对舷侧结构的破坏比较 | 206 |
| 6.3.1 两发武器同时和先后攻击的相同点     | 206 |
| 6.3.2 两发武器同时和先后攻击的不同点     | 207 |
| 6.4 小结                    | 207 |
| 参考文献                      | 207 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 舰船结构损伤与防护概述

近年来,随着先进军事技术突飞猛进的发展,新型的舰船、水中兵器的问世以及相应攻防技术、材料技术、信息与智能技术日新月异的更新,舰船抗爆抗冲击技术发展的需求正在增长、要求也愈益提高。因此,各国海军都把舰船的抗冲击能力和舰船的生命力研究作为其重要研究任务。

水面舰船由于其体积硕大,并且拥有护航和辅助船只形成舰船编队。这就造成舰船编队前呼后应,极易遭受敌方武器的攻击。当今世界各大强国的核动力攻击型潜艇均携带有大量的潜射反舰导弹和鱼雷,其数量多在 20 枚以上,攻击力极强。哪怕只有一两艘突破水面舰船编队的反潜警戒圈到达攻击阵位,就足以对舰船产生相当大的威胁。由于舰船自身的防御能力相对不足,在一定条件下,多艘核潜艇仅凭自身携带的反舰导弹和鱼雷,即可对舰船展开饱和攻击,对其造成致命打击,防不胜防。所以,水面舰船在作战时不可避免地会受到来自空中和水中武器的攻击。

对舰船所造成损伤的攻击主要是由爆炸引起的。舰船所遭受的爆炸冲击可以分为非接触爆炸和接触爆炸两类。所谓非接触水下爆炸通常是指沉底水雷、深水炸弹等武器在离舰船数米至上百米的位置爆炸。非接触爆炸在多数情况下很难使舰船产生破口而丧失不沉性,难以对舰船形成致命打击。这种爆炸通常会带来冲击波载荷和气泡脉动载荷,不会使船体产生严重的破损和变形而导致舰船的沉没,但是可能引起船体剧烈的振动和较大塑性变形,导致船上各类重要设备广泛的冲击破坏及舰船总体结构的破损,使舰船失去战斗力。接触爆炸主要是指半穿甲反舰导弹、鱼雷等攻击武器命中舰船,直接作用于舰船舷侧或是依靠自身动能穿透舰船外壳,进入舰船内部延时爆炸,产生爆炸冲击波并且形成大量爆炸破片,从而造成人员的伤亡、舰船结构及设备的破损。接触爆炸使船体局

部产生较大破口,部分舱室进水,严重情况下会造成大量舱室进水,甚至舰船沉没。对于舰船来说,不仅要有较强的作战能力,同时要有相应的生存能力,特别是在遭到敌方攻击下能够继续完成既定使命任务的能力。

舰船舷侧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,一直以来受到各个国家的重视。舰船设置防护结构的目的是为了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下所产生的破损或毁坏程度能控制在允许的状态和范围内,从而提高舰艇的生存和作战能力。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。因此,现代舰船为了提高其抗爆抗冲击能力,特别是在遭到敌方攻击条件下的生存能力,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,通常在舷侧设置多层防护结构。

舰船防护结构是舰船的最后一道防线,其功能则在于,当舰船遭到反舰导弹战斗部直接命中后能够保护内部重要设备、弹药和燃料舱不受损伤,以避免一旦命中就造成舰毁人亡的情况。一个优良的防护结构,可将敌方费尽周折最终侥幸突防成功的反舰导弹“消化吸收”,从而使敌方计划周密的进攻无功而返。相反,如果防护结构不可靠,一旦被敌方命中就会造成舰毁人亡的严重后果。因此,一艘舰船的防护结构是否安全可靠,关系到整个舰船的生命力。

## 1.2 大型水面舰船的结构及主要防护形式

### 1.2.1 大型水面舰船的主要结构形式

大型舰船的结构主要由主舰体、岛形上层建筑以及甲板设备等舰面部件构成。

现代大型舰船甲板以下的舰体部分为主舰体。主舰体在垂向以甲板和平台分成若干层空间。在纵向以水密横隔壁分为若干水密隔舱(见图 1-1)。现代大型非对称舰船把甲板作为主舰体的加强甲板,而将舰底到甲板看成一个巨大的钢质箱型结构进行设计,从而达到安全抗爆的目的。甲板是纵向连通的,平台是局部的。一般甲板之间的高度约在 2.4~2.8 m 范围内。机库的高度取决于舰载机的高度,有时机库的高度要占去 2~3 层甲板的空间。下层的机舱和辅机舱也需要较大的高度。

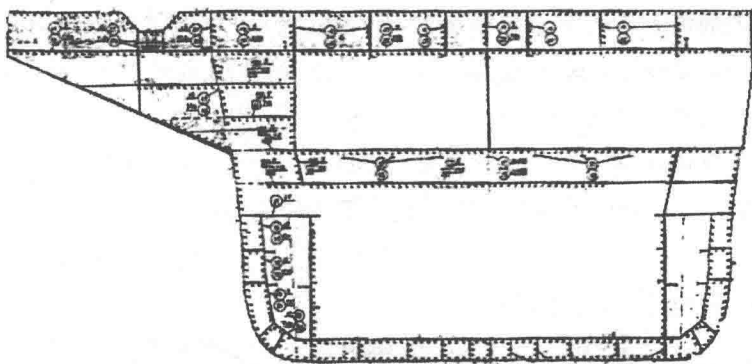


图 1-1 某型舰船的中横剖面

横向和纵向隔舱壁分割而成的是水密隔舱。水密隔舱可以防止舱室浸水蔓延到其他舱室,以保证舰船的安全。大型非对称舰船一般要求 4 舱进水不沉,而且稳性要求保持正值。水密舱壁达到的最高层甲板称为水密舱隔壁甲板。现代大型非对称舰船虽然已将甲板做成主舰体整体结构的一部分,但如果设置舷侧升降机,机库舷侧有较大的开口,故只能以机库甲板作为水密舱壁甲板。

由于大型舰船所担负的特殊使命,大型舰船的舰体结构和一般水面舰船有很大的差别。大型舰船的甲板要求有很大的舰长,必须保证大型舰船的主舰体有较强的总纵强度和刚度。大型舰船两舷的不对称外伸结构会造成剖面中和轴的偏转,导致剖面左右应力分布的差异。甲板和机库都会有一些较大的开口或开口群,在结构上有加强措施。

### 1.2.2 舰船的毁伤等级

现代化的大型水面舰船虽然装备了集攻防于一体的武器装备,但因目标大,航速低,易受到各种航空炸弹、空对地、地对地导弹、反舰导弹、鱼雷和水雷的攻击。现代对舰船攻击武器不仅破坏威力大大提高,而且命中精度和突防能力都有很大的改进。有关资料表明<sup>[1]</sup>:如果由 12 枚导弹同时攻击大型舰船编队,则导弹的突防概率为 42.5%;如果有 5 艘潜艇对大型非对称舰船编队以鱼雷为武器实施攻击,则大型舰船被击沉的概率为 7%,被击伤的概率为 23%。目前采用的舰船目标的毁伤等级分为 5 类<sup>[2]</sup>:

A 类:舰艇沉没,舰艇断裂或因严重火灾失控弃船,为完全丧失生命力。

B 类:舰艇无作战机动能力,漂浮水面仍具有不沉性,基本丧失生命力。

C类：舰体或主要设备系统遭受破坏，但仍具有不沉性；在 30 min 内修复后，仍具有手动操作下的舰艇机动能力和主要的防御作战能力，具有基本的生命力。

D类：舰体或主要设备系统遭受局部破坏，但仍具有不沉性；在 30 min 内修复后，仍具有手动操作下的舰艇机动能力和主要的防御作战能力，具有完全的生命力。

E类：舰艇完好，毫无损失。

### 1.2.3 舰船的防护结构模型

随着对舰攻击武器性能的提高，舰船装甲防护手段必须发生改变。大型舰船在关键部位都有装甲和隔舱等各种防护措施来提高整个舰船的生命力。大型舰船由于防护范围很大，而其有限的排水量对装甲结构的重量有严格的限制，舰船装甲防护结构不太可能采用很厚的装甲结构。大型舰船一般充分利用自身空间较大的优势，在结构上合理设计，采用较薄复合装甲的立体防护。目前，大型舰船装甲防护多采用结构化、立体化，充分利用空间来衰减攻击武器的破坏强度，从而在同样防护重量的前提下，进一步提高装甲防护的防护效果，以适应攻击武器发展的要求。大型舰船装甲—结构防护系统与舰体结构是相互交叉的，在一定条件下舰体结构可起到防护作用，而防护装甲又可以兼作舰体结构，参与保证舰体强度。

大型舰船装甲—结构防护系统主要是由甲板防护、水上舷侧防护、水下舷侧防护、底部防护和专门区域防护等部分组成。

大型舰船装甲—结构防护系统的作用是抵御武器攻击，使舰船在受攻击情况下的破损限制在允许的范围内。根据舱室的重要性，防护要求可分为 3 种：① 不允许任何弹片和气体进入；② 允许气体进入；③ 允许弹片进入，但不能扩大破坏的程度。例如弹药库破坏的危险最大，要求最高；动力机械舱的外层防护可以遭受破坏但不能被穿透；更次要的舱室可以允许弹片低速穿透。

舷侧结构防护主要包括水上结构防护和水下结构防护两方面。

水上结构防护可采用 4 种防护形式：一层防护壁、两层防护壁、栅状结构、屏蔽式结构。需要水上结构防护的舱室较为分散，所以水上防护类似“补丁”。

水下结构防护的范围比较大，它与整舰生命力要求密切相关，所以水下结构防护有很高的重要性。水下结构防护的主要对象是鱼雷和水雷。原则上不允许

鱼雷和水雷接近大型舰船,但在密集攻击时仍可能突破防御系统,使舰船侧面受鱼雷攻击。因此大型舰船侧面防护的目的在于当鱼雷战斗部与舷侧接触爆炸或在舰船附近与船舷非接触爆炸时,能防止海水从破损处浸淹舰船的内部重要舱室。

### 1.3 舰船结构损伤响应研究现状

在海战中,水雷、鱼雷和深弹等水中兵器在水下爆炸时会产生冲击波和气泡脉动压力等载荷,这些载荷能导致舰船局部或总体结构发生严重毁伤,使舰船丧失战斗力。为提高舰船抗爆能力,各国海军都在进行水下爆炸载荷及其对舰船结构毁伤作用的研究,特别是各海军强国,如美国、澳大利亚等,在装药的设计和性能、爆炸机理、舰船响应等方面,通过采用理论分析、数值模拟、模型试验和实船试验等手段,开展了大量研究工作,基本涵盖了水下爆炸及其对舰船毁伤作用研究的主要方面,其研究成果为提高舰船生命力提供了科学依据。我国海军也开始逐渐重视这一方面的研究工作,许多研究单位和学者都不同程度地投入到了这一领域中。

水下爆炸载荷作用下的舰船结构响应是一个高度非线性的动态响应过程,涉及流固耦合、塑性动力学、断裂力学等多个学科,研究方法也涉及理论、试验、仿真等多个方面。

#### 1.3.1 简单结构的爆炸冲击响应

舰船板架结构承受的爆炸载荷,是在很短时间内,在巨大冲击载荷作用下的一种复杂的非线性动态响应过程,属大变形、强非线性(包括材料非线性、几何非线性、运动非线性)问题,按其作用形式主要分为接触爆炸和非接触爆炸两种。通常接触爆炸主要造成舰船板架结构的局部损伤,而非接触爆炸的破坏作用则是全船性的。

舰船的生命力是舰船的一个重要的性能指标,舰船结构在爆炸冲击载荷作用下的变形与破损,是舰船结构动力学的一个重要课题。舰船主要是由板架结构组成的,研究板架结构在爆炸冲击载荷作用下的动态响应是研究舰船结构生命力的重点<sup>[3~7]</sup>。对于板、壳这一类结构,在3个方向的尺寸中,总有一个或两个方向的尺寸远较其他方向的尺寸为小,而突加载荷作用方向又往往就是尺寸

最小的方向。在这种情况下,应力波传播时间比载荷作用时间短得多<sup>[8]</sup>。在动载荷作用下,结构的塑性变形将随时间而不断发展,其塑性区将不断扩大,最终导致结构的破坏。如果载荷较大,但作用时间较短,则施加于结构的能量有限。在这种情况下,物体的运动和变形将在输入能量消耗完以后,停止于一个确定的状态。

### 1) 理论研究现状

舰船局部结构主要由板、壳、梁等基本元素构成,对舰船局部结构的响应研究可简化为对这些简单结构的研究。理论研究的方法主要是求解流固耦合的瞬态运动微分方程,但因理论求解具有局限性,因此,早期的工作基本限制在对相对简单结构(圆板、方板、圆柱壳等)的塑性动力响应上。

板的动态响应研究首先是从圆板开始的,圆板的主应力方向一致,情况较为简单,对于其他形状的板则复杂得多。对爆炸荷载作用下的动态响应问题的难点在于爆炸荷载的加载与历史有关,板的本构关系变为高度非线性,板的变形与加载率有关。20世纪40年代以来,根据变形行为和本构关系的各种基本假定,对板的动态响应作了大量的理论分析。对板结构变形行为的基本假定,包括线性弯曲理论和考虑膜力的小挠度和大挠度理论等。能量理论在早期是分析简单结构(如板、梁)在爆炸作用下永久变形的行之有效的方法。根据外载荷所做的功与结构的变形能相等的原理,采用塑性铰线或移动塑性铰线的方法预报结构永久变形,是最简单明了的方法之一<sup>[9]</sup>。

Cole最早给出了水下爆炸作用下圆板的永久变形计算公式<sup>[10]</sup>,Hopkins和Wang等对爆炸荷载作用下的圆板的塑性变形进行了很好的预报<sup>[11~13]</sup>,当时的这些研究只考虑了板内塑性弯曲变形能,没有考虑膜力和剪力的变形能影响,也没有考虑应变率的影响。Florence等对简支圆铝板和钢板的实验表明当变形达到使膜力不能忽略的程度后,板的强度明显增加,弯曲理论只有在变形较小时才能预报准确<sup>[14]</sup>。Wierzbicki和Florence对受冲击波作用的固支圆板进行了实验和理论研究,计入了应变率效应<sup>[15]</sup>。Youngdahl和朱国琦等分析了梁和板在冲击作用下的塑性响应,讨论了不同的载荷波形对结构塑性动力响应的影响,指出只要波形的冲量和形心位置相同,则冲击效果就是相同的<sup>[16,17]</sup>。国内也有不少学者对圆板塑性动力响应进行了研究,王延斌等根据不同材料选用不同强度标准的统一强度理论,求解了简支圆板在中等脉冲载荷作用下的动力响应问题<sup>[18]</sup>。谌勇等分析了刚塑性圆板受水下爆炸荷载时的动力响应问题,分析了圆

板的永久变形场,考察了流固耦合作用及空泡对结构响应的影响<sup>[19]</sup>。

对于非圆板的塑性动力响应,其情况要复杂得多。Cox 和 Morland 采用 Tohansen 屈服准则,给出了简支方板在均布载荷下的最终变形计算方法,但未考虑弹性应变、硬化和应变率的影响<sup>[20]</sup>。若考虑到水下爆炸载荷,问题会更加复杂。Taylor 采用一维笛卡儿坐标,将水视为线性流体,提出了空背板结构在水下爆炸弱冲击波作用下的精确解,但没有考虑水下爆炸的空穴效应<sup>[21]</sup>。之后,有人又采用模态法进一步研究了空背板结构在水下爆炸强冲击波作用下的动态响应。与 Taylor 不同的是,他们将水视为非线性流体,得到了一维笛卡儿坐标下的解析解,但他们同样也没有考虑空穴效应。Bleich 和 Sandler 则分析了空背板结构在水下爆炸弱冲击波作用下空穴现象产生的时间<sup>[22]</sup>。他们采用模态法,同时将水介质视为双线性流体,得到了空穴发生时间的解析公式。Huang 研究了二维轴对称弹性空背板在水下爆炸球面波作用下的瞬态变形,在不考虑空穴效应的情况下得到了该问题的理论解<sup>[23]</sup>。Jiang 等提出了一个分析加筋板在水下爆炸载荷作用下非线性动态响应的简化解析法<sup>[24]</sup>。他们沿用分析空爆作用下加筋板响应的方法,将加筋板模型视为刚塑性梁或交叉梁系,采用 Hains 线性声学理论近似考虑了流固耦合效应。在分析中,考虑了大变形和应变率效应等因素,通过控制水压力波形来计及空穴效应和二次加载现象,最后得到了理论解。Hains 模型的局限性在于,其只适用于求解结构的早期效应。他指出,如果要扩大该方法的适用范围,可以采用 Kirchhoff 的迟滞势理论来替代 Hains 模型。为此,Jiang 等提出了一个用迟滞势理论来分析水下爆炸载荷作用下圆板动态响应的有限元方法。用该方法计算的近场和远场爆炸作用下结构的响应与实验结果较为吻合<sup>[25]</sup>。Geers 通过引入“残余速度势”的方法,在三维空间内求解了弹性结构物与液流场间的相互耦合作用<sup>[26]</sup>。

对于舰船结构在水下爆炸载荷作用下的塑性动力响应问题,我国的研究主要是求出固支方板的理论响应解。吴成等借助能量原理和 Lagrangian 函数,研究了固支方板在水下爆炸载荷作用下变形的最终挠度的解析解<sup>[27]</sup>。吴有生等应用能量法提出了一种适用于非接触爆炸条件下单向加筋船体板架塑性变形的能量公式<sup>[28]</sup>。刘土光等利用能量法及刚塑性结构模型,研究了在爆炸载荷作用下加筋板的塑性动力响应,提出了该类结构爆炸冲击载荷作用下的变形模式及判别条件<sup>[29]</sup>。唐文勇等利用能量法及刚塑性本构模型,对加筋板结构的塑性动力响应进行了分析,导出了指数载荷作用下加筋板塑性动力响应的持续时间及