



国防科技图书出版基金



# Damage mechanics of warship structure subjected to explosion

## 舰船结构毁伤力学

朱锡 张振华 梅志远 侯海量 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金



NUAA2014004294

U674  
1025-2

# 舰船结构毁伤力学

DAMAGE MECHANICS OF WARSHIP  
STRUCTURE SUBJECTED TO EXPLOSION

朱 锡 张振华 梅志远 侯海量 著



国防工业出版社

· 北京 ·

2014004294

图书在版编目(CIP)数据

舰船结构毁伤力学/朱锡等著. —北京:国防工业出版社,  
2013.9

ISBN 978-7-118-08713-0

I. ①舰... II. ①朱... III. ①军用船—船体结构—损伤  
(力学)—研究 IV. ①U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 203442 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 21¼ 字数 389 千字

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 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

9855002105

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨

大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金

## 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

# 前 言

目前,舰船船体结构强度设计主要是考虑自然环境载荷作用下的坚固性和可靠性问题,如静水中舰体强度计算校核、波浪中舰体强度计算校核、波浪冲击力作用下首部局部强度计算校核、潜艇深水压力下耐压壳体强度和稳定性计算校核等,而对战争环境载荷,在规范设计中考虑较少。

舰船的主要功能是作战,因此舰船在遭受对舰攻击武器命中后可能造成舰体的毁伤程度,应该在舰船设计中就给出较为准确的评估和计算,这对于提高舰船的抗毁伤能力和生命力优化设计极为重要。舰船结构毁伤力学就是研究在战争环境载荷(即毁伤载荷)作用下舰船船体结构抗爆与防护设计方法和毁伤程度评价方法的一门科学,它是涉及舰船结构力学、结构动力学、塑性动力学、爆炸力学和舰船强度等多个学科的一门交叉科学。舰船结构毁伤力学的发展与完善,不仅可以对舰船在战争环境下的抗毁伤能力和生命力进行评估,而且将使战争环境载荷成为舰船强度的设计载荷,从而在舰船设计阶段就能进行舰体结构抗爆与防护设计,定量给出舰船在战争条件下的生存能力。

本书著入了作者团队成员 20 多年对舰船船体结构抗爆抗冲击与装甲防护的研究成果,并部分结合国内外最新研究成果,主要阐述了舰体结构在武器命中后可能受到爆炸与冲击载荷的表征与计算方法、舰体结构在该载荷作用下的动力响应或毁伤破损程度计算方法,以及舰体结构毁伤程度的表征和评价方法等问题。期望本书能对我国舰艇抗爆抗冲击与装甲防护研究以及舰船船体结构生命力优化设计的提高有所贡献。

本书章节设计和内容编排由朱锡教授完成,第 1 章至第 3 章及第 6 章由朱锡教授撰写;第 4 章、第 5 章和第 7 章由张振华副教授撰写;第 8 章由梅志远副教授撰写;第 9 章由梅志远副教授、侯海量高工与张振华副教授撰写。参与本书相关编写工作的团队成员还有:黄骏德教授、冯文山教授、徐顺棋高工和刘润泉高工,以及博士生和硕士生刘燕红、袁建红、白雪飞、方斌、陈昕、李海涛、黄晓明、牟金磊、王晓强、李伟、谷美邦、王恒、陈长海等同志。本书由武汉理工大学吴卫国教授和华中科技大学程远胜教授主审,吴有生院士对全书进行了审查,并提出了许多宝贵意见。朱红英同志承担了部分打字和绘图工作。对此一并表示诚挚的感谢。

鉴于作者水平,书中难免存在错误与不当之处,敬请读者指正。

# 目 录

|       |                                    |    |
|-------|------------------------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论 .....                           | 1  |
| 1.1   | 舰船结构毁伤力学的基本内涵 .....                | 1  |
| 1.2   | 舰船结构毁伤力学的主要研究内容 .....              | 1  |
| 1.2.1 | 战争环境毁伤载荷研究 .....                   | 2  |
| 1.2.2 | 舰体结构毁伤响应计算方法和抗毁伤<br>防护设计方法研究 ..... | 2  |
| 1.2.3 | 舰体结构抗毁伤能力评价方法和评价衡准研究 .....         | 3  |
| 1.3   | 舰船结构毁伤力学的主要研究方法 .....              | 4  |
| 1.3.1 | 理论研究方法 .....                       | 5  |
| 1.3.2 | 实验研究方法 .....                       | 6  |
| 1.3.3 | 数值计算方法 .....                       | 8  |
| 第 2 章 | 毁伤载荷及其计算方法 .....                   | 10 |
| 2.1   | 对舰攻击武器及其破坏威力 .....                 | 10 |
| 2.1.1 | 对舰攻击武器种类和破坏特点 .....                | 10 |
| 2.1.2 | 导弹战斗部对舰攻击破坏威力 .....                | 15 |
| 2.1.3 | 鱼雷、水雷战斗部对舰攻击破坏威力 .....             | 21 |
| 2.2   | 舰船结构毁伤载荷的类型及计算方法 .....             | 23 |
| 2.2.1 | 舰船结构毁伤载荷的主要类型 .....                | 23 |
| 2.2.2 | 空中爆炸冲击波载荷计算 .....                  | 24 |
| 2.2.3 | 水中爆炸冲击波载荷计算 .....                  | 26 |
| 2.2.4 | 水中爆炸气泡的产生与特征参数的计算 .....            | 29 |
| 2.3   | 对舰攻击武器威力表征方法和舰船结构抗毁伤设计载荷 .....     | 31 |
| 2.3.1 | 对舰攻击武器威力表征方法 .....                 | 31 |
| 2.3.2 | 舰船结构抗毁伤能力的设计载荷 .....               | 32 |
| 第 3 章 | 舰船结构抗毁伤能力的评价方法 .....               | 37 |
| 3.1   | 概述 .....                           | 37 |
| 3.2   | 舰船结构毁伤形式和抗毁伤能力表征参数 .....           | 37 |
| 3.2.1 | 舰船结构典型目标类型的划分 .....                | 38 |
| 3.2.2 | 舰船结构毁伤形式的分类 .....                  | 38 |

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 3.2.3 | 舰船结构抗毁伤能力的表征参数 .....              | 39 |
| 3.3   | 舰船结构抗毁伤能力的表征方法和评价衡准 .....         | 42 |
| 3.3.1 | 舰船结构抗毁伤结构完好性等级划分 .....            | 42 |
| 3.3.2 | 舰船结构抗毁伤能力表征参数阈值及其完好性等级 .....      | 43 |
| 第4章   | 船体材料及典型结构在爆炸载荷作用下的动态特性 .....      | 48 |
| 4.1   | 常用船体结构钢材料的动态屈服特性 .....            | 48 |
| 4.1.1 | 船用钢动态屈服性能的压缩试验 .....              | 49 |
| 4.1.2 | 船用钢动态性能的拉伸试验 .....                | 51 |
| 4.1.3 | 921 钢材料动态模型数据拟合 .....             | 53 |
| 4.2   | 潜艇典型结构在爆炸载荷作用下的动态断裂极限应变 .....     | 55 |
| 4.2.1 | 试验研究方案 .....                      | 56 |
| 4.2.2 | 极限应变分析 .....                      | 58 |
| 4.2.3 | 开裂判据的确定 .....                     | 59 |
| 4.3   | 水面舰艇典型结构在水下爆炸作用下的动态断裂极限应变 .....   | 61 |
| 4.3.1 | 模型设计与试验实施 .....                   | 61 |
| 4.3.2 | 模型试验结果 .....                      | 62 |
| 4.3.3 | 极限应变分析 .....                      | 64 |
| 第5章   | 舰船局部结构毁伤强度计算方法 .....              | 66 |
| 5.1   | 爆炸载荷作用下固支方板的应变场及破坏分析 .....        | 66 |
| 5.1.1 | 试验设计 .....                        | 66 |
| 5.1.2 | 试验现象 .....                        | 67 |
| 5.1.3 | 应变场的推导 .....                      | 67 |
| 5.1.4 | 试验验证 .....                        | 70 |
| 5.1.5 | 破裂分析及破裂临界压力 .....                 | 71 |
| 5.1.6 | 小结 .....                          | 73 |
| 5.2   | 刚塑性板在柱状炸药接触爆炸载荷作用下的花瓣开裂研究 .....   | 74 |
| 5.2.1 | 系统能量分析 .....                      | 75 |
| 5.2.2 | 花瓣旋转半径和裂瓣数 .....                  | 78 |
| 5.2.3 | 弯矩扩大因子 .....                      | 79 |
| 5.2.4 | 接触爆炸破口确定 .....                    | 80 |
| 5.2.5 | 算例 .....                          | 81 |
| 5.3   | 空中非接触爆炸载荷作用下舰船板架的塑性动力响应 .....     | 82 |
| 5.3.1 | 计算模型和基本假设 .....                   | 82 |
| 5.3.2 | 板架塑性变形能计算 .....                   | 83 |
| 5.3.3 | 板架塑性极限弯矩 $M_0$ 及极限中面力 $N_0$ ..... | 84 |

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 5.3.4 | 板架初始动能计算 .....                   | 85  |
| 5.3.5 | 求解板架挠度 .....                     | 85  |
| 5.3.6 | 算例 .....                         | 85  |
| 5.3.7 | 小结 .....                         | 87  |
| 5.4   | 空中接触爆炸作用下船体板架塑性动力响应及破口研究 .....   | 87  |
| 5.4.1 | 计算模型与假设 .....                    | 88  |
| 5.4.2 | 板架破口计算 .....                     | 88  |
| 5.4.3 | 对若干问题的讨论 .....                   | 91  |
| 5.4.4 | 算例 .....                         | 93  |
| 5.4.5 | 小结 .....                         | 95  |
| 5.5   | 船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验研究 .....      | 95  |
| 5.5.1 | 试验研究方案 .....                     | 96  |
| 5.5.2 | 加强筋对破口长度的影响分析 .....              | 96  |
| 5.5.3 | 修正后的破口估算公式的验证 .....              | 98  |
| 5.5.4 | 小结 .....                         | 99  |
| 第6章   | 水下爆炸作用下舰船结构总强度计算方法 .....         | 100 |
| 6.1   | 概述 .....                         | 100 |
| 6.2   | 近场水下爆炸冲击波作用下船体梁毁伤研究 .....        | 102 |
| 6.2.1 | 理论计算模型 .....                     | 102 |
| 6.2.2 | 动力平衡方程的推导 .....                  | 104 |
| 6.2.3 | 塑性运动过程的数值计算及结果分析 .....           | 110 |
| 6.2.4 | 试验验证 .....                       | 111 |
| 6.3   | 水中爆炸气泡作用下舰体结构鞭状运动试验现象与理论分析 ..... | 115 |
| 6.3.1 | 爆炸气泡作用下舰体结构鞭状运动的试验现象 .....       | 115 |
| 6.3.2 | 爆炸气泡作用下舰体结构鞭状运动理论计算方法 .....      | 123 |
| 6.3.3 | 爆炸气泡作用下舰体结构鞭状运动数值计算 .....        | 129 |
| 6.4   | 近距爆炸冲击波和气泡联合作用下水面舰艇总强度计算方法 ..... | 133 |
| 6.4.1 | 概述 .....                         | 133 |
| 6.4.2 | 冲击波作用下船体梁冲击振动弯矩计算方法 .....        | 133 |
| 6.4.3 | 近距气泡作用下船体梁动弯矩计算方法 .....          | 136 |
| 6.4.4 | 近距爆炸冲击波和气泡联合作用下舰船极限强度计算 .....    | 139 |
| 6.4.5 | 算例 .....                         | 140 |
| 6.5   | 近距爆炸冲击波和气泡联合作用下舰船整体毁伤试验研究 .....  | 145 |
| 6.5.1 | 试验目的 .....                       | 145 |
| 6.5.2 | 船体梁模型设计 .....                    | 146 |

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 6.5.3 | 试验设计 .....                            | 147 |
| 6.5.4 | 试验实施 .....                            | 147 |
| 6.5.5 | 试验结果及分析 .....                         | 148 |
| 6.5.6 | 小结 .....                              | 161 |
| 6.6   | 水面舰艇舰体结构破损剩余强度 .....                  | 162 |
| 6.6.1 | 概述 .....                              | 162 |
| 6.6.2 | 外载荷计算 .....                           | 163 |
| 6.6.3 | 非对称剖面要素计算及总纵弯曲应力计算 .....              | 166 |
| 6.6.4 | 板的失稳折减及有初挠度骨架梁相当面积折减方法 .....          | 171 |
| 6.6.5 | 破损后舰体总纵弯曲的弹性极限弯矩计算 .....              | 175 |
| 6.6.6 | 算例 .....                              | 177 |
| 第7章   | 舰艇结构水下爆炸响应数值计算方法 .....                | 179 |
| 7.1   | 概述 .....                              | 179 |
| 7.1.1 | 运动现象的数学描述 .....                       | 179 |
| 7.1.2 | 流固耦合算法种类 .....                        | 180 |
| 7.1.3 | MSC. Dytran 流固耦合计算功能 .....            | 180 |
| 7.2   | 水平弹塑性边界下水下爆炸气泡动态特性的数值仿真研究 .....       | 182 |
| 7.2.1 | 势流及气泡基本理论 .....                       | 183 |
| 7.2.2 | 离散方程及耦合算法 .....                       | 184 |
| 7.2.3 | 数值模拟 .....                            | 184 |
| 7.2.4 | 结果及分析 .....                           | 185 |
| 7.2.5 | 小结 .....                              | 189 |
| 7.3   | 舰艇在远场水下爆炸载荷作用下动态响应的数值<br>计算方法研究 ..... | 190 |
| 7.3.1 | 计算方法 .....                            | 191 |
| 7.3.2 | 算例 .....                              | 192 |
| 7.3.3 | 小结 .....                              | 197 |
| 7.4   | 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 .....      | 198 |
| 7.4.1 | 一般耦合算法 .....                          | 198 |
| 7.4.2 | 有限元模型 .....                           | 198 |
| 7.4.3 | 计算结果及分析 .....                         | 199 |
| 7.4.4 | 小结 .....                              | 202 |
| 7.5   | 潜艇艇体结构在水下爆炸冲击载荷作用下损伤研究 .....          | 203 |
| 7.5.1 | 有限元建模 .....                           | 204 |
| 7.5.2 | 艇用钢材料动态性能的试验确定 .....                  | 205 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 7.5.3 | 结构开裂判据的试验确定                       | 206 |
| 7.5.4 | 加载方式                              | 206 |
| 7.5.5 | 计算结果及分析                           | 206 |
| 7.5.6 | 小结                                | 209 |
| 7.6   | 水下爆炸载荷作用下受损加肋圆柱壳的剩余屈曲强度计算         | 211 |
| 7.6.1 | 简述                                | 211 |
| 7.6.2 | 结构模型与计算模型                         | 212 |
| 7.6.3 | 计算过程及结果                           | 213 |
| 7.6.4 | 结果分析                              | 215 |
| 7.6.5 | 小结                                | 216 |
| 第8章   | 舰船结构毁伤中穿甲问题的分析方法                  | 217 |
| 8.1   | 引言                                | 217 |
| 8.2   | 低速锥头弹对薄板穿孔的破坏模式研究                 | 218 |
| 8.2.1 | 薄板穿甲的一般计算方法                       | 218 |
| 8.2.2 | 隆起—剪切破坏模式的薄板穿甲变形功计算方法             | 219 |
| 8.2.3 | 碟形弯曲—花瓣开裂破坏模式的薄板穿甲变形功<br>计算方法     | 220 |
| 8.2.4 | 薄板穿甲公式的试验验证                       | 221 |
| 8.3   | 高速破片穿透船用钢剩余特性研究                   | 224 |
| 8.3.1 | 高速破片穿透船体钢的穿甲力学分析                  | 224 |
| 8.3.2 | 船体钢高速破片穿透试验研究                     | 229 |
| 8.3.3 | 算例                                | 235 |
| 8.3.4 | 小结                                | 235 |
| 8.4   | FRC 层合板抗弹机理研究                     | 236 |
| 8.4.1 | FRC 层合板抗弹道侵彻常用经验公式                | 236 |
| 8.4.2 | FRC 层合板的抗弹理论分析模型                  | 239 |
| 8.4.3 | 两阶段分析模型                           | 240 |
| 8.4.4 | 算例及结果分析                           | 246 |
| 8.4.5 | 小结                                | 248 |
| 8.5   | 有限元数值分析技术在 FRC 弹道冲击上的运用与发展        | 249 |
| 8.5.1 | 有限元数值分析技术在 FRC 弹道冲击研究领域<br>的现状与发展 | 250 |
| 8.5.2 | 高速冲击下 FRC 层合板受力特征的数值分析            | 252 |
| 第9章   | 现代舰船防护结构设计                        | 261 |
| 9.1   | 舰船防护结构的发展                         | 261 |

|            |                        |     |
|------------|------------------------|-----|
| 9.1.1      | 水上防护结构的发展 .....        | 261 |
| 9.1.2      | 水下防护结构的发展 .....        | 265 |
| 9.1.3      | 舰用装甲材料的发展 .....        | 266 |
| 9.2        | 水上防护结构设计 .....         | 269 |
| 9.2.1      | 舰船装甲防护结构形式 .....       | 269 |
| 9.2.2      | 装甲防护结构设计方法 .....       | 271 |
| 9.2.3      | 抗动能穿甲装甲防护结构设计 .....    | 271 |
| 9.2.4      | 舰用复合装甲防护结构设计 .....     | 273 |
| 9.2.5      | 抗爆加筋板结构设计 .....        | 282 |
| 9.3        | 水下舷侧防雷舱结构设计与评估 .....   | 289 |
| 9.3.1      | 防雷舱结构初步设计 .....        | 289 |
| 9.3.2      | 防雷舱结构能量法和模型试验法评估 ..... | 296 |
| 9.3.3      | 防雷舱结构抗爆能力数值仿真评估 .....  | 305 |
| 参考文献 ..... |                        | 311 |

# Contents

|                  |                                                                                                                         |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>CHAPTER1</b>  | <b>Introduction</b>                                                                                                     | 1  |
| 1.1              | Basic connotation of Warship-structure Damage-mechanics                                                                 | 1  |
| 1.2              | The main research content of Warship-structure                                                                          |    |
|                  | Damage-mechanics                                                                                                        | 1  |
| 1.2.1            | Research of the damage load in combat environment                                                                       | 2  |
| 1.2.2            | Research for the calculation methods of warship-structure's<br>damage-response and anti-damage defense-design           | 2  |
| 1.2.3            | Research of the evaluation method and criterion for<br>warship-structure's anti-damage ability                          | 3  |
| 1.3              | The main methods for the research of Warship-structure                                                                  |    |
|                  | Damage-mechanics                                                                                                        | 4  |
| 1.3.1            | Theoretical research method                                                                                             | 5  |
| 1.3.2            | Experimental research method                                                                                            | 6  |
| 1.3.3            | Numerical calculation method                                                                                            | 8  |
| <b>CHAPTER 2</b> | <b>Damage load and its' calculation method</b>                                                                          | 10 |
| 2.1              | Anti-warship weapons and their damage powers                                                                            | 10 |
| 2.1.1            | Anti-warship weapons' category and damage character                                                                     | 10 |
| 2.1.2            | Missile-warhead's damage power on warship                                                                               | 15 |
| 2.1.3            | Torpedo and mine-warhead's damage powers on warship                                                                     | 21 |
| 2.2              | Type and calculation method of the damage-load on<br>warship structure                                                  | 23 |
| 2.2.1            | Main type of the damage-load on warship structure                                                                       | 23 |
| 2.2.2            | Calculation for the shock-wave load caused by aerial explosion                                                          | 24 |
| 2.2.3            | Calculation for the shock-wave load caused by<br>under-water explosion                                                  | 26 |
| 2.2.4            | Calculation for the production and characteristic parameter<br>of under-water-explosion bubble                          | 29 |
| 2.3              | The method for the token of anti-warship weapon's power and<br>the load in the anti-damage design for warship structure | 31 |
| 2.3.1            | The method for the token of anti-warship weapon's power                                                                 | 31 |

|                 |                                                                    |           |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2           | The load in the anti-damage design for warship structure .....     | 32        |
| <b>CHAPTER3</b> | <b>Evaluation method for warship-structure's anti-damage</b>       |           |
|                 | <b>ability .....</b>                                               | <b>37</b> |
| 3.1             | Introduction .....                                                 | 37        |
| 3.2             | Form of warship-structure's damage and functions for the token     |           |
|                 | of warship-structure's anti-damage ability .....                   | 37        |
| 3.2.1           | Classification of warship-structure typical-object .....           | 38        |
| 3.2.2           | Classification of warship-structure's damage form .....            | 38        |
| 3.2.3           | The parameters for the token of warship-structure's                |           |
|                 | anti-damage ability .....                                          | 39        |
| 3.3             | The token method and evaluation criterion for                      |           |
|                 | warship-structure's anti-damage ability .....                      | 42        |
| 3.3.1           | Classes of warship-structure's anti-damage structural              |           |
|                 | intactness .....                                                   | 42        |
| 3.3.2           | The threshold and intactness classes of the token parameters       |           |
|                 | for warship-structure's anti-damage ability .....                  | 43        |
| <b>CHAPTER4</b> | <b>Dynamic property of ship steel under impact load .....</b>      | <b>48</b> |
| 4.1             | Dynamic property of common ship steel under impact load .....      | 48        |
| 4.1.1           | Dynamic property of common ship steel under compress               |           |
|                 | impact load .....                                                  | 49        |
| 4.1.2           | Dynamic property of common ship steel under pull impact load ..... | 51        |
| 4.1.3           | Data fitting of the parameter of 921 steel under impact load ..... | 53        |
| 4.2             | The dynamic limit strain of typical structure of submarine         |           |
|                 | under impact load .....                                            | 55        |
| 4.2.1           | Design of model and experiment scheme .....                        | 56        |
| 4.2.2           | Analysis of dynamic limit strain .....                             | 58        |
| 4.2.3           | Determination of craze criterion .....                             | 59        |
| 4.3             | The dynamic craze strain of typical structure of surface           |           |
|                 | warship subjected to undex .....                                   | 61        |
| 4.3.1           | Design of model and experiment scheme .....                        | 61        |
| 4.3.2           | Experiment result .....                                            | 62        |
| 4.3.3           | Analysis of dynamic limit strain .....                             | 64        |
| <b>CHAPTER5</b> | <b>The calculation method for the design of</b>                    |           |
|                 | <b>warship-local-structure's damage strength .....</b>             | <b>66</b> |
| 5.1             | The damage analysis of clamped square plate                        |           |
|                 | subjected to blast load .....                                      | 66        |

|       |                                                                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.1 | Experiment design .....                                                                                | 66 |
| 5.1.2 | Experiment phenomenon .....                                                                            | 67 |
| 5.1.3 | Establish of strain field .....                                                                        | 67 |
| 5.1.4 | Validation of result by experiment .....                                                               | 70 |
| 5.1.5 | Analysis of crack and criterion .....                                                                  | 71 |
| 5.1.6 | Summary .....                                                                                          | 73 |
| 5.2   | Petal crack analysis of rigid plastic plate under contact<br>blast load of cylindrical dynamite .....  | 74 |
| 5.2.1 | Energy analysis of system .....                                                                        | 75 |
| 5.2.2 | Radius and number of petals .....                                                                      | 78 |
| 5.2.3 | Extend factor of bending moment .....                                                                  | 79 |
| 5.2.4 | Determination of the size of crevasse subjected<br>to contact explosion .....                          | 80 |
| 5.2.5 | Example .....                                                                                          | 81 |
| 5.3   | Dynamic response of stiffened plate of warship subjected<br>to non-contact air blast .....             | 82 |
| 5.3.1 | Theory mode and hypothesis .....                                                                       | 82 |
| 5.3.2 | Plastic energy of stiffened plate .....                                                                | 83 |
| 5.3.3 | Plastic limit bending moment and middle surface force .....                                            | 84 |
| 5.3.4 | Original kinetic energy of stiffened plate .....                                                       | 85 |
| 5.3.5 | Deformation of stiffened plate .....                                                                   | 85 |
| 5.3.6 | Example .....                                                                                          | 85 |
| 5.3.7 | Summary .....                                                                                          | 87 |
| 5.4   | Dynamic response of stiffened plate of warship subjected<br>to contact air blast .....                 | 87 |
| 5.4.1 | Theory mode and hypothesis .....                                                                       | 88 |
| 5.4.2 | The size of crevasse of stiffened plate .....                                                          | 88 |
| 5.4.3 | Discuss of some questions .....                                                                        | 91 |
| 5.4.4 | Example .....                                                                                          | 93 |
| 5.4.5 | Summary .....                                                                                          | 95 |
| 5.5   | Research of crevasse of stiffened plate of warship subjected to<br>under-water contact-explosion ..... | 95 |
| 5.5.1 | Scheme of experiment .....                                                                             | 96 |
| 5.5.2 | The influence of stiffen to the size of crevasse .....                                                 | 96 |
| 5.5.3 | Corrected formula of the crevasse .....                                                                | 98 |
| 5.5.4 | Summary .....                                                                                          | 99 |

|                 |                                                                                                                                         |            |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CHAPTER6</b> | <b>Calculation method for gross strength of the warship</b>                                                                             |            |
|                 | <b>structure subjected to under water explosion .....</b>                                                                               | <b>100</b> |
| 6.1             | Introduction .....                                                                                                                      | 100        |
| 6.2             | Research for damage of the ship-girder in shock waves<br>caused by under water explosion .....                                          | 102        |
| 6.2.1           | Theoretical calculation mode .....                                                                                                      | 102        |
| 6.2.2           | Deduction of the dynamic equilibrium functions .....                                                                                    | 104        |
| 6.2.3           | Numerical calculation and result analysis for the plastic<br>kinetic procedure .....                                                    | 110        |
| 6.2.4           | Experimental validation .....                                                                                                           | 111        |
| 6.3             | Experimental and theoretical analysis for flagelliform movement<br>of the warship structure subjected to explosion bubbles .....        | 115        |
| 6.3.1           | Experimental phenomena of flagelliform movement of the<br>warship structure subjected to explosion bubbles .....                        | 115        |
| 6.3.2           | Theoretical calculation method for flagelliform movement<br>of the warship structure subjected explosion bubbles .....                  | 123        |
| 6.3.3           | Numerical calculation for flagelliform movement of the<br>warship structure subjected to explosion bubbles .....                        | 129        |
| 6.4             | Calculation method for gross strength of the surface warship<br>under co-effect of close-explosion shock waves and bubbles .....        | 133        |
| 6.4.1           | Introduction .....                                                                                                                      | 133        |
| 6.4.2           | Calculation method for the impact-inducing vibration bending<br>of the ship girder in shock waves .....                                 | 133        |
| 6.4.3           | Calculation method for kinetic bending moment of the ship<br>girder in close shock waves .....                                          | 136        |
| 6.4.4           | Calculation for ultimate strength of the warship under co-effect<br>of close-explosion shock waves and bubbles .....                    | 139        |
| 6.4.5           | Example .....                                                                                                                           | 140        |
| 6.5             | Experimental research for holistic damage of the surface<br>warship under co-effect of close-explosion<br>shock waves and bubbles ..... | 145        |
| 6.5.1           | Aims of Experiment .....                                                                                                                | 145        |
| 6.5.2           | Design for the ship-girder specimen .....                                                                                               | 146        |
| 6.5.3           | Experiment design .....                                                                                                                 | 147        |
| 6.5.4           | Experiment .....                                                                                                                        | 147        |
| 6.5.5           | Experiment result and analysis .....                                                                                                    | 148        |