



舰船结构爆炸毁伤分析 数值仿真与试验

吴卫国 孔祥韶 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

舰船结构爆炸毁伤分析 数值仿真与试验

吴卫国 孔祥韶 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书阐述舰船结构爆炸毁伤分析的数值仿真与试验方法,主要包括舰船抗爆防护结构形式和特点、爆炸与冲击问题分析中普遍采用的数值仿真方法、舰船舱室中的冲击波载荷的特性及其计算方法、弹体对舰船结构穿甲过程的数值仿真和理论分析模型、战斗部爆炸破片形成过程的数值仿真、战斗部内爆(冲击波和破片耦合)载荷对舰船多层防护结构毁伤的模型试验及其数值计算,以及考虑畸变因素的爆炸载荷作用下结构缩比模型试验相似规律分析等内容。

本书适合船舶与海洋工程、武器与弹药工程等相关领域科技人员参考使用,也可作为高校相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

舰船结构爆炸毁伤分析数值仿真与试验/吴卫国,孔祥韶著. —北京:科学出版社,2019. 11

ISBN 978-7-03-062846-6

I. ①舰… II. ①吴…②孔… III. ①军用船-船体结构-爆炸-冲击试验
IV. ①U674. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 240160 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:王萌萌

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2020 年 1 月第二次印刷 印张:17 1/2

字数:351 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2000 多年前,古罗马哲学家西塞罗说:“谁控制了海洋,谁就控制了世界”。面对日益复杂的国际形势,只有建立强大的人民海军,建立我国的海上长城,才能为“中国梦”的实现保驾护航。近年来随着我国海军现代化进程的加快,海军装备得到长足的发展。在信息化战争条件下,反舰导弹由于其隐蔽性好、命中精度高、战斗部破坏威力大、攻击距离长而成为非对称战争和超视距打击的主要武器,对舰船生命力造成极大的威胁。日益增强的攻击威胁对舰船的抗爆防护提出更高的要求。开展舰船抗爆防护研究,建立准确的舰船结构爆炸毁伤分析数值仿真试验方法,对我国装备发展具有重大的现实意义和战略价值。

由于舰船结构的特殊性,战斗部在其内部爆炸产生的冲击波和高速破片群的毁伤效应更加严重。冲击波和破片群对舰船结构的耦合损伤机理的探究,以及两者耦合效应的合理描述,是对舰船毁伤评估和抗爆设计提出的迫切需求。对于爆炸冲击载荷下舰船结构响应这类瞬态的、包含几何大变形和材料发生塑性损伤,乃至断裂破坏的强非线性问题,非线性有限元存在数值容易不稳定、材料的动态力学行为难以准确描述、多舱室结构破坏使冲击波与结构的耦合面捕捉困难等不足,使基于非线性有限元分析船体结构爆炸响应的方法很难突破瓶颈而被广泛使用。相对实船爆炸试验来说,缩比模型试验具有试验成本低,便于深入研究结构损伤机理的特点。然而,由于材料的动态力学行为与应变率的相关性和试验条件的限制,爆炸载荷下结构响应试验的原型和模型之间不满足完全相似的条件,存在由应变率效应和几何畸变导致的动态响应相似畸变问题等困难。

本书以舰船对反舰导弹被动抗爆防护的视角,从战斗部爆炸载荷和舰船结构特点两个方面破题立意,采用数值仿真和试验相结合的方法展开分析和论述。首先,对水面舰船面临的武器威胁、舰船的抗爆防护结构,以及爆炸与冲击问题的数值模拟方法进行必要的介绍,继而结合舱室中的爆炸特征提出舱内冲击波载荷的数值计算方法。为方便工程应用,给出舱室内爆冲击波压力简化计算方法。针对反舰导弹对舰船的穿甲过程,总结弹体对钢板侵彻过程的数值计算方法,介绍穿甲过程简化分析模型的建立和剩余速度公式的推导过程,并通过数值计算呈现反舰导弹以不同姿态对实际舰船舷侧板架穿甲的规律。对于穿入舰船舱室内的战斗部,主要分析战斗部爆炸的冲击波和破片载荷,以及两者的耦合效应,给出破片速度和等效裸装药的简化计算公式,介绍战斗部壳体破片空间、质量分布和速度特性计算的数值方法。在此基础上,介绍冲击波和破片耦合作用下舰船结构响应的模

型试验和数值计算方法,提出冲击波和破片对舰船结构的耦合毁伤模式。最后,从实船缩比试验研究的需求出发,探讨舰船结构爆炸响应缩比试验模型的设计方法,针对模型设计过程中存在的相似畸变问题,介绍结构在爆炸载荷作用下响应的相似规律。

本书是团队研究的成果、集体智慧的结晶。中国船舶重工集团公司第七〇一研究所段宏研究员、海军工程大学朱锡教授参与了本书的讨论,给出了许多宝贵的建议,在此对他们表示由衷的谢意。

本书的研究工作得到了国防基础科研项目、海军装备预研项目、型号科研项目、国家自然科学基金等多个科研项目的资助,在此表示诚挚的谢意。感谢国家科学技术学术著作出版基金给予本书的资助。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者和专家批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水面舰船面临的反舰导弹威胁	1
1.2 反舰导弹类型及其对舰船的爆炸载荷	3
1.2.1 反舰导弹的类型	3
1.2.2 反舰导弹的爆炸载荷	4
1.3 舰船抗爆防护结构	5
1.3.1 航空母舰防护结构的发展	5
1.3.2 驱逐舰对反舰导弹的防护结构	9
1.3.3 关键问题	10
第 2 章 爆炸与冲击问题的数值仿真方法	13
2.1 爆炸与冲击问题的数值模拟方法介绍	13
2.2 欧拉型计算方法	14
2.2.1 控制方程组	14
2.2.2 计算域的离散	19
2.2.3 偏微分方程组的差分离散	20
2.3 拉格朗日型计算方法	23
2.3.1 控制方程组	23
2.3.2 空间有限元离散化	25
2.3.3 高斯积分与沙漏问题	27
2.3.4 时间积分和时间步长控制	30
2.3.5 应力计算	30
2.3.6 冲击波与人体体积黏性	31
2.4 光滑粒子流体动力学方法	32
2.4.1 核估计	32
2.4.2 守恒方程组的离散	33
第 3 章 舰船舱室中的冲击波及其计算方法	40
3.1 引言	40
3.2 爆炸冲击波的特性	40
3.2.1 空气中冲击波的形成	40

3.2.2 冲击波阵面的兰金-于戈尼奥条件	41
3.2.3 冲击波的初始参数	43
3.3 爆炸冲击波的传播理论	44
3.3.1 基本控制方程	45
3.3.2 冲击波传播的计算方法	45
3.4 基于改进 WENO 的高精度冲击波数值计算	47
3.4.1 控制方程及维数分裂	47
3.4.2 数值计算方法	48
3.4.3 程序实现	52
3.4.4 改进 WENO 的数值验证	53
3.4.5 数值计算程序的试验验证	54
3.4.6 约束空间爆炸载荷的影响因素分析	62
3.5 基于 AUTODYN 程序的舱内爆炸载荷数值计算	63
3.5.1 舱内爆炸试验的数值计算	64
3.5.2 舱内爆炸载荷试验与数值计算结果对比	70
3.6 舱内爆炸冲击波载荷特性及舱室结构响应的试验	74
3.7 舱内爆炸载荷的简化计算方法	80
3.7.1 准静态压力载荷计算方法	80
3.7.2 欧拉-板单元完全耦合计算方法	83
3.7.3 基于压力流出模型的舱内爆炸载荷简化计算方法	84
3.8 总结	86
第 4 章 弹体对舰船结构的穿甲效应	88
4.1 引言	88
4.2 截锥形弹穿甲薄板数值仿真研究	88
4.2.1 弹、靶结构与材料模型	88
4.2.2 锥形弹、薄板网格划分	90
4.2.3 截锥形弹正穿甲数值仿真分析	90
4.2.4 正穿甲数值仿真与试验结果对比	92
4.2.5 45°斜穿甲数值仿真与试验结果对比	93
4.3 网格尺寸对穿甲数值仿真的影响	94
4.3.1 靶板网格尺寸划分	94
4.3.2 不同网格尺寸穿甲结果比较分析	94
4.4 锥形弹正穿甲薄靶板的数值计算	97
4.4.1 锥形弹对薄靶板的正穿甲过程	97
4.4.2 锥形弹对薄靶板的斜穿甲过程	99

4.4.3 斜撞击薄板破坏模式分析	100
4.4.4 锥形弹斜穿甲剩余速度分析	105
4.4.5 锥形弹低、高斜角穿甲区域的重新界定	106
4.5 锥形弹斜穿甲薄板剩余速度理论分析	111
4.5.1 锥形弹低斜角穿甲薄板剩余速度理论分析	111
4.5.2 锥形弹高斜角穿甲薄板剩余速度理论分析	119
4.6 反舰导弹穿甲舰舷侧板架过程的数值计算	130
4.6.1 导弹与舰舷板架数值仿真模型	130
4.6.2 不同打击位置分析	133
4.7 入射角对斜穿甲板架特性的影响	137
4.7.1 水平斜穿甲舰舷板架	137
4.7.2 垂向斜穿甲舰舷板架	140
4.8 总结	141
第5章 圆柱形战斗部等效载荷特性研究	142
5.1 引言	142
5.2 战斗部爆炸载荷	142
5.3 理论分析模型	148
5.3.1 圆柱形壳体形成破片过程	149
5.3.2 壳体对爆炸冲击波的影响	151
5.3.3 试验对比分析	152
5.4 圆柱形战斗部爆炸形成自然破片过程数值模拟	153
5.4.1 SPH 算法	154
5.4.2 Shock 状态方程	155
5.4.3 战斗部壳体材料本构	157
5.4.4 材料随机失效准则	158
5.4.5 数值计算方法的验证	159
5.4.6 数值计算结果	159
5.5 试验对比	172
5.5.1 破片分布情况对比	172
5.5.2 破片速度对比	173
5.6 半预制破片战斗部的破片特性	174
5.6.1 数值计算模型	174
5.6.2 网格尺寸影响分析	176
5.6.3 数值计算结果分析	178
5.6.4 结果对比分析	183

5.7 总结	185
第6章 冲击波和破片耦合作用下舰船结构响应的试验和数值计算	187
6.1 引言	187
6.2 多层防护结构内部爆炸试验模型	188
6.2.1 试验模型	188
6.2.2 测点布置及试验方法	190
6.2.3 试验结果及分析	192
6.3 冲击波和破片耦合作用下结构响应的数值计算	203
6.3.1 爆炸载荷与结构的耦合作用	204
6.3.2 计算模型和相关参数设置	207
6.3.3 复合多层防护结构模型响应的数值计算	209
6.3.4 液舱的防护机理	213
6.3.5 冲击波和破片的耦合破坏效应	215
6.4 总结	218
第7章 爆炸载荷下舰船结构缩比模型设计方法	221
7.1 引言	221
7.1.1 爆炸载荷下缩比模型试验	221
7.1.2 爆炸载荷下结构动态响应缩比试验模型的特点	221
7.1.3 国内外研究进展	223
7.1.4 需探索的问题	225
7.2 冲击载荷作用下结构动态响应相似分析	226
7.2.1 三类动态响应金属材料本构方程对比及选取	226
7.2.2 应变率效应的影响	231
7.3 爆炸载荷作用下结构动态响应相似性准则	236
7.3.1 基于冲量的爆炸载荷相似关系修正式	237
7.3.2 药量修正	240
7.3.3 相似修正法相关算例验证	244
7.4 几何畸变结构的动态响应相似性分析	248
7.4.1 两种畸变相似预报方法	248
7.4.2 爆炸载荷作用下板厚畸变模型动态响应相似预报	257
7.5 总结	264
参考文献	265

第 1 章 绪 论

1.1 水面舰船面临的反舰导弹威胁

随着反舰导弹技术的快速发展,其隐蔽性、命中精度和战斗部装药得到大幅提高,舰艇面临着越来越严酷的爆炸威胁。战斗部爆炸瞬间产生的冲击波和高速破片群会对舰艇的船体结构、舰载设备和人员造成不同程度的损伤,甚至致使舰艇沉没。1967 年 10 月 21 日,以色列驱逐舰“埃拉特”号被埃及导弹艇发射的“冥河”导弹击沉。这一战,以色列损失了这艘 1710 吨的驱逐舰,47 名水兵阵亡,91 人受伤,其中 9 人严重烧伤。埃及海军出动的两艘 75 吨的导弹艇无一伤亡。这次战斗震惊了全世界,从来没有哪一次战斗能使大型舰艇在对抗中还没还手就被如此彻底摧毁。传统的海军大国重新审视自己的海军舰队时,忽然发现面对装备导弹艇的敌人,竟然没有任何对抗手段。这些花费巨大财力、历经数十年建造完善的大舰巨炮都成了摆设。教训最深刻的以色列人,在 1969 年将所有的老式驱逐舰全部淘汰,而历来轻视反舰导弹的西方国家也纷纷开始加快反舰导弹的研制。这一海战史上导弹艇击沉驱逐舰的战例,同时让人们认识到反舰导弹对水面舰船的巨大威胁。1982 年 5 月 4 日,阿根廷“超级军旗”战斗机只用一枚法国制造的“飞鱼”导弹就击沉了英国“谢菲尔德”号驱逐舰,使人们进一步认识到反舰导弹对水面舰艇的破坏力,如图 1-1 所示^[1]。

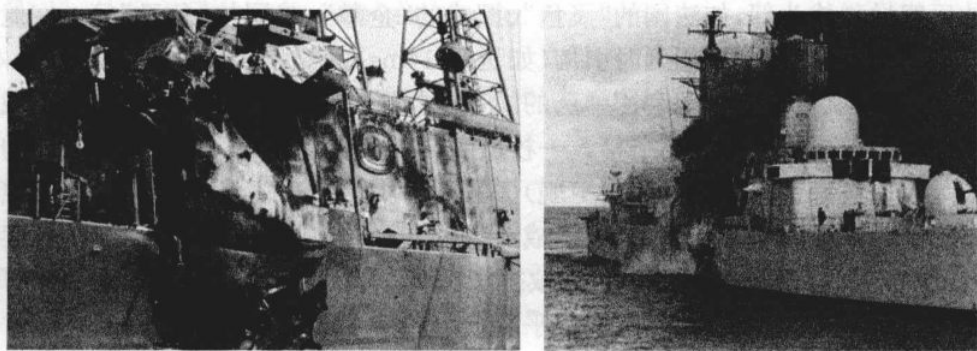


图 1-1 舰船被“飞鱼”导弹命中后的毁伤效果

反舰导弹的攻击过程和特点是,先掠海飞行接近攻击目标,以避开舰船雷达搜索。然后,末端以接近水平姿态撞击舰船舷侧,依靠自身动能穿透舷侧外板,同时

触发延时引信。最后,进入舰体内部爆炸,产生强烈的冲击波和高速破片群对舰体内部结构造成破坏。反舰导弹攻击舰船的命中部位在高度上大体有两类,一类在上层建筑或上甲板,另一类在舷侧。舷侧攻击易造成舱室大量进水,致使舰船沉没,因此是大型水面舰船主要防护的位置。半穿甲爆破型反舰导弹凭借自身的动能,穿破舰船舷侧外板,钻入舰体内部,战斗部在舰体内爆炸。爆炸产生的爆轰产物能摧毁爆炸点附近的舰体结构、设备和人员,形成的强大的冲击波对穿甲破孔起到扩孔作用,进而造成舱室大量进水^[2]。战斗部的壳体较厚,其质量约占整个战斗部的 65% 左右,这部分金属在爆炸后形成大量的破片。某些反舰导弹在爆炸时还可产生自锻破片,而舰船在冲击波作用下也易形成破片,这些高速破片会继续打击邻近舱室,造成更严重的破坏。图 1-2 是美国“鱼叉”Block II 反舰导弹攻击某集装箱船的过程,掠海飞行接近目标—穿破舷侧外板进入舱内—触发延迟引信,引爆战斗部。

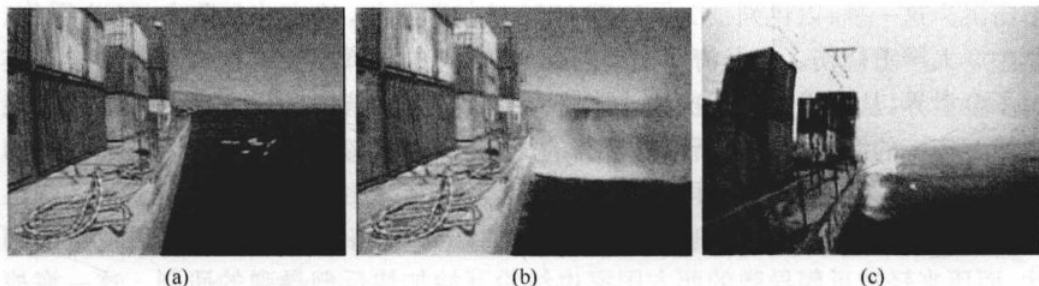


图 1-2 “鱼叉”Block II 反舰导弹攻击某集装箱船过程

与炸弹、鱼雷等传统的反舰武器相比,反舰导弹具有射程远、命中率高和威力大等优点^[3]。其战斗部大体可分为爆破型战斗部、聚能破甲爆破型战斗部和半穿甲爆破型战斗部。由于装药爆炸能量的利用率高,半穿甲爆破型战斗部是目前常用的反舰导弹战斗部,如法国的“飞鱼”、挪威的“企鹅”、美国的“鱼叉”等。在舱内爆炸的半穿甲战斗部,采用延时引信(如延时 14ms),使战斗部进入舰体内 3~4m 后爆炸,这样就可以充分地利用弹药的能量。同样的战斗部装药,采用半穿甲战斗部对目标的破坏效能可提高三倍。一枚反舰导弹(装药量 150~200kg TNT)的战斗部足以使典型目标(驱逐舰、护卫舰)失去战斗力。据美国海军的“鱼叉”反舰导弹实弹打靶试验的结果,采用半穿甲战斗部的导弹击中靶舰美国退役护航驱逐舰“Gunason”号(标准排水量 1400t,满载排水量 2100t)后,破坏的甲板长达 9m,打穿的船壳板被破坏到水线以下,整舰几乎沉没^[4]。

据统计,20 世纪 60 年代以来,国内外多艘舰船在实战或打靶试验中被反舰导弹损毁。根据对命中位置的统计,约有 70% 命中船艙或上层建筑。被反舰导弹命中的舰船均受到严重毁伤,甚至沉没。分析反舰导弹毁伤舰船的原因主要有如下几条^[5]。

① 在爆炸冲击波与准静态压力等作用下,舷侧出现大破口,舱内大量进水,最终导致舰船沉没。

② 爆炸破片毁伤舰船重要设备,导致战斗力丧失。

③ 后续火灾造成舱内火势蔓延,导致战斗力丧失,甚至由于温度升高而降低钢材承载能力,影响整体强度。

1.2 反舰导弹类型及其对舰船的爆炸载荷

1.2.1 反舰导弹的类型

海战史上首次导弹快艇击沉军舰的战例显示了导弹快艇具有小艇打大舰的作战效能。在其后的局部战争中,导弹快艇得到广泛运用,战果显赫,为越来越多的国家所重视。现在不仅中、小国家和发展中国家拥有导弹快艇,一些海军强国也在大力发展导弹快艇,同时也加快了研制新型反舰导弹的步伐^[3]。

现役的普通装药反舰导弹战斗部主要有两种类型,即聚能爆破型(外爆式)、半穿甲爆破型(内爆式)。这两种类型的反舰导弹战斗部的性能如表 1-1 所示。目前,反舰导弹普遍采用半穿甲爆破型战斗部,在毁伤效应和炸药利用率方面都具有优势。

表 1-1 反舰导弹战斗部性能表

类型	作用特点	毁伤效应	炸药利用率	典型导弹
聚能爆破型	触发引信起爆主装药后,爆炸波挤压药型罩,形成金属射流(10 000m/s),破坏厚重装甲;冲击波和随机破片破坏舰船设备	一般	偏低	“冥河”(苏联)
半穿甲爆破型	侵彻舰体内部,触发延时引信,引爆主装药;冲击波和随机破片摧毁舱内结构和设备	很好	较高	“飞鱼”(法国) “鱼叉”(美国) “鸬鹚”(德国)

反舰导弹至今已发展到第四代。目前,反舰导弹正朝着两条主线发展:亚音速和超音速。欧美等国主要以改进原有型号为主,研究开发超音速反舰导弹为辅。他们一方面着重改进“鱼叉”、“飞鱼”、“鸬鹚”、“迦伯列”和“海鹰”等反舰导弹,提高这些亚音速反舰导弹的性能,增强其杀伤能力,使这些导弹在 21 世纪仍可服役;另一方面制定超音速反舰导弹研究发展计划。俄罗斯是反舰导弹大国,很早就研究和开发超音速反舰导弹,并装备“日炙”、“宝石”、“阿尔法”、“反冲”、“氮”等^[6]反舰导弹。

1.2.2 反舰导弹的爆炸载荷

半穿甲内爆式反舰导弹进入防护结构舱内爆炸,舱壁与爆炸点的距离不等,因此受到的爆炸载荷也不同。对于距离爆炸点较近的结构,爆炸产物直接作用在其表面,接近爆炸载荷。对于距离爆炸点较远的结构,爆炸产物不能直接到达,而是由其膨胀引起的冲击波对结构产生压力(这里指压强,根据领域和行业习惯本书压力均指压强)载荷。无论对于哪种载荷,爆炸现象都是由炸药的爆轰开始的。当炸药中的爆轰波传播到炸药-空气交界面后,就开始了在空气介质中的传播^[7-10]。

前人对自由大气中爆炸冲击波的传播所做的研究得到了比较可靠的关于超压和比冲量等冲击波参数的经验公式。但战斗部进入舱内爆炸产生的冲击波在舱内经过多次反射,其流场具有比在自由大气中或外部爆炸情况下更复杂的性质,因此只能采用数值方法求解。现有的爆炸流体动力学程序在处理冲击波强间断时大多采用人工黏性技术。这种方法虽然有一定的优势,但也存在计算误差,因此其对舰船舱内爆炸冲击波载荷计算的适用性需要进一步验证。

1. 战斗部爆炸冲击波和破片载荷

半穿甲内爆式反舰导弹在船体内部舱室爆炸,对船体结构的破坏主要是战斗部的爆炸冲击波和破片群。对于离爆炸点较近的结构,冲击波和破片群的耦合作用将产生更大的毁伤效果。对于战斗部爆炸载荷,关心的问题包括以下三个方面^[11]。

① 破片速度。破片群是极具穿透力的高动能点群载荷。破片的速度和质量决定其穿透船体板的能力。

② 破片的空间分布和质量分布。破片群的空间分布在一定程度上影响对结构的破坏,尤其是在接近爆炸的情况下。破片的质量分布是战斗部自然破片统计的一个重要特性。确定某个质量范围内破片的个数,是破片群打击能力划分的重要依据。

③ 冲击波效应。战斗部爆炸后,内部装药的能量主要转变为破片的动能和冲击波。冲击波效应是由战斗部的等效裸装药产生的,即战斗部用于产生冲击波的药量。等效裸装药的准确计算是战斗部冲击波效应评估的重要依据。

用于计算战斗部破片和冲击波(等效裸装药)的经验公式和分析方法在实际应用时存在一定的局限,主要包括以下方面。

① 计算破片速度的公式和分析模型主要针对二维问题,没有考虑类似于圆柱形战斗部端部封盖的影响。从试验现象来看,圆柱形战斗部的破片分布及速度在其高度方向存在明显的差异。

② 由于涉及爆轰产物的膨胀、与壳体之间的流固耦合、壳体塑性大变形和破

裂,采用数值方法计算战斗部的破碎过程还存在一定的困难。

2. 冲击波和破片耦合效应

冲击波和破片是常规弹药爆炸对舰船结构产生的主要破坏效应因素,是舰船抗爆防护结构设计必须考虑的。破片与冲击波对舰船结构的复合破坏效应,与两者单独作用产生的破坏效应存在显著差别。

破片和冲击波的耦合效应不是两者载荷的简单叠加,会对结构产生更严重的破坏,尤其是在近场爆炸的情况下。当反舰武器战斗部在舰船舱内爆炸时,这一问题变得更加复杂。首先,需要对战斗部的破片特性进行评估,包括破片的空间分布和质量分布,以此确定舱室板架结构被打击的范围和板架上的破片穿孔密度。其次,战斗部的冲击波效应也需要量化,也就是要得到等效裸装药量。至此,结构响应计算的第一步工作,即结构的输入载荷才能被确定。这是结构响应计算的必要因素之一。

1.3 舰船抗爆防护结构

1.3.1 航空母舰防护结构的发展

航空母舰是迄今最大的水面舰船。在航空母舰不断发展的过程中,也包含着防护结构的不断更新。美国是较早拥有航空母舰的国家,至今已有 90 多年设计建造航空母舰的历史,从早期的改装航空母舰发展到“约克郡”级现代航空母舰,到“埃塞克斯”级、“中途岛”级、“福莱斯特”级和“小鹰”级等常规动力航空母舰。美国航空母舰从“企业”级开始进入核动力航空母舰时代,到 20 世纪 60 年代美国开始“尼米兹”级航空母舰的建造。下面以美国航空母舰发展为例,对复合多层防护系统的发展过程进行简要概述^[6,12]。

“兰利”号(Langley CV-1)航空母舰是美国海军的第一艘航空母舰,由 5500 吨的海军运煤船“木星”号改装而来,于 1924 年开始服役。

“列克星敦”(Lexington)级航空母舰共有两艘,分别是“列克星敦”号(Lexington CV-2)和“萨拉托加”号(Saratoga CV-3)(图 1-3)。“列克星敦”战列巡洋舰于 1921 年 1 月 8 日开工建造。一年后,由于受《华盛顿条约》限制,该舰停工。1922 年 7 月 1 日,美国海军利用其舰体开始转建标准排水量 3.6 万吨的航空母舰,并于 1925 年 10 月 3 日下水。图 1-4 是“萨拉托加”号航空母舰横剖面示意图,水下舷侧仍保留凸起防护外板,向内设有多层隔舱,水线附近设置倾斜式外板和防护装甲(图中尺寸为厚度,余同)。

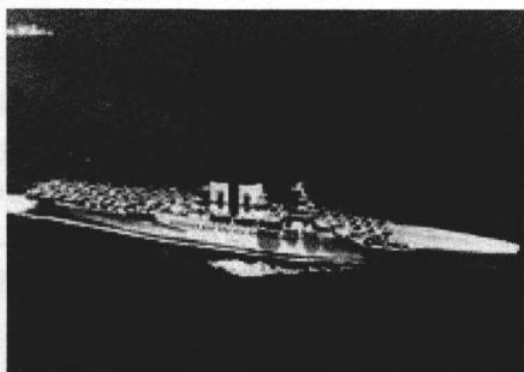


图 1-3 “萨拉托加”号航空母舰



图 1-4 “萨拉托加”号航空母舰横剖面示意图

“突击者”号(Ranger CV-4)是美国第一艘从一开始就作为航空母舰设计的舰船。相比日本和英国的“凤翔”号和“竞技神”号,“突击者”号整整晚了 12 年,但比上述两者更合理,其整体布局显得更加完善。“突击者”号的航速可以达到 29.5 节(1 节=1.852 千米/小时),比同期美国战列舰的航速快。

“约克郡”(Yorktown)级是美国首批现代航空母舰,共有 3 艘,分别是“约克郡”号(USS Yorktown CV-5)(图 1-5)、“企业”号(Enterprise CV-6)和改进型“大黄蜂”号(Hornet CV-8)。与“突击者”号航空母舰相比,加强了水下防护。从图 1-6 可知,“约克郡”级航空母舰去掉了外凸式舷侧,改用直立式,在增大排水量的同时,为防护舱室的布置带来方便,水线舷侧设有 3 层防护隔舱。1942 年,“约克郡”号在海战中沉没,“大黄蜂”号也在随后战沉,可见“约克郡”级的防护性能并不理想。



图 1-5 “约克郡”号航空母舰

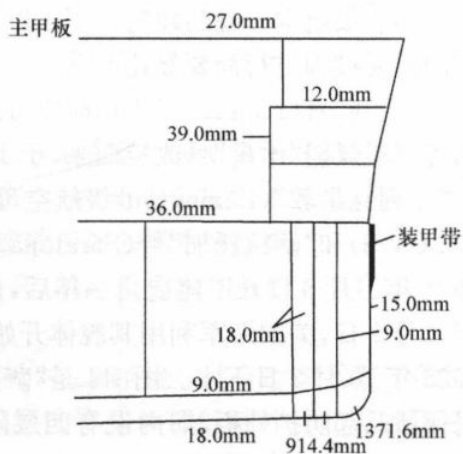


图 1-6 “约克郡”级航空母舰横剖面示意图

“埃塞克斯”(Essex)级航空母舰参照“约克郡”级航空母舰,并吸取先前各级航空母舰的优点,是“约克郡”级的扩大改进型,共建造 24 艘。“埃塞克斯”级航空母舰的水下、水平防护和对空火力都有所加强,水下舷侧设置 4 层隔舱,较“约克郡”级多了 1 层(图 1-7)。



图 1-7 “埃塞克斯”级航空母舰横剖面示意图

“中途岛”(Midway)级航空母舰根据英国航空母舰的作战经验和太平洋战争初期美国航空母舰受损的情况(主要遭受航空炸弹和自杀飞机的攻击)加强了飞行甲板防护。“中途岛”号航空母舰如图 1-8 所示。由于“埃塞克斯”级航空母舰水下舷侧防护能力得到了充分肯定,“中途岛”级仍沿用 4 层防护舱室(图 1-9)。

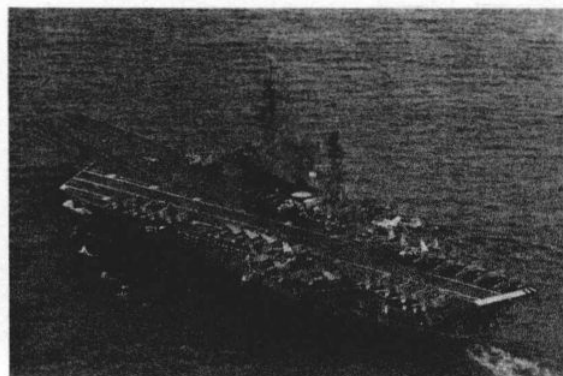


图 1-8 “中途岛”号航空母舰

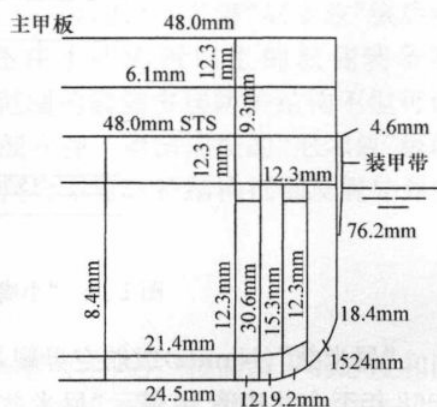


图 1-9 “中途岛”级航空母舰横剖面示意图

“福莱斯特”(Forrestal)级航空母舰被称为“超级航空母舰”。在服役过程中仍发现了一些不足,当建造第 5 艘时对其进行了大幅度改进,此后又连续建造了 3 艘,称为“小鹰”级。美国海军的最后一艘常规动力航空母舰是“肯尼迪”号(CV-67),它是“小鹰”级的第 4 艘,但由于变化稍大一些,因此国外将其单列为一

级——“肯尼迪”级。“福莱斯特”级水下舷侧防护(图 1-10)仍沿用“中途岛”级 4 层防护舱室设置,而“小鹰”级水下舷侧防护(图 1-11)相对“中途岛”级进行了加强,设置了 5 层防护舱室,且水下纵舱壁设置倾斜式,船底设置双层防护舱。

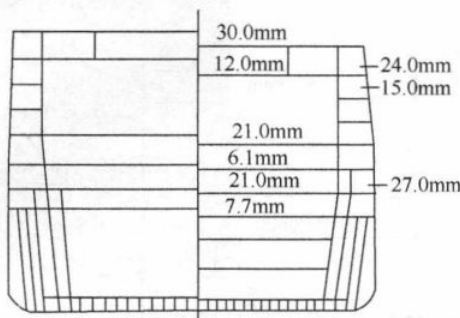


图 1-10 “福莱斯特”级航空母舰横剖面示意图

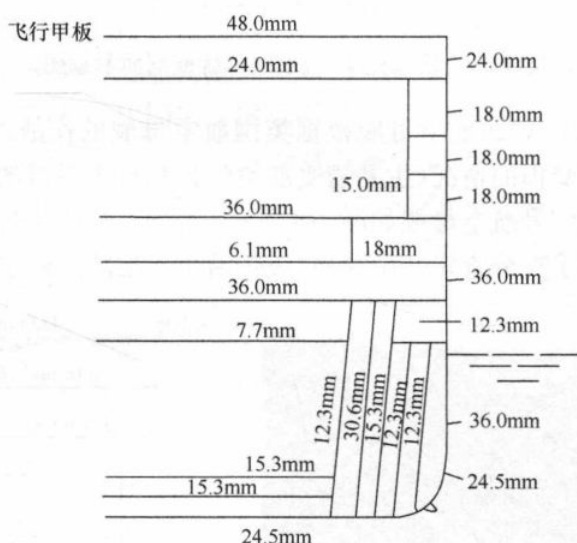


图 1-11 “小鹰”级航空母舰横剖面示意图

“尼米兹”(Nimitz)级航空母舰是当代航空母舰家族中最具代表性的一类。从 1968 年至今共建造 10 艘。“尼米兹”级航空母舰的生存力极强,舰体除设有若干道纵向隔舱,还有 23 道水密横隔壁和 10 道防火隔壁。舰体和甲板采用高弹性钢,可以抵御穿甲弹的攻击,舰舷采用复合多层防护结构,防护隔舱多达 6 层。“尼米兹”级后续舰的多层防护结构一直延伸到机库甲板,两舷水线附近还装有 63.5mm 厚的“凯芙拉”装甲,剖面示意图如图 1-12 所示。后续舰的舷侧复合多层防护系统不但对水线以下舷侧部分进行有利防护,对水线以上反舰导弹易攻击的位置也进行了防护。