

引用格式: 周心桃, 吴国民, 李德聪. 舰船抗爆抗冲击技术体系探析[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 127-139.

ZHOU X T, WU G M, LI D C. Analysis of naval warship blast and shock resistance technology system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 127-139.

舰船抗爆抗冲击技术体系探析



扫码阅读全文

周心桃*, 吴国民, 李德聪

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要:舰船抗爆和抗冲击技术概念宏观, 内涵广泛, 对其认识理解、设计研究都需要技术体系的顶层划分和牵引。首先, 基于武器攻击对舰船的爆炸毁伤类型, 对舰船抗爆与抗冲击这两个概念进行划分; 然后, 基于舰船总体抗爆抗冲击设计技术需求, 区分不同的研究对象及技术的基础理论, 提出包含6大类型的舰船抗爆抗冲击技术体系的划分方案, 即水上/水下防护结构设计、新型抗爆结构与毁伤分析、设备系统及人员抗冲击、舰船抗爆抗冲击试验验证及技术标准规范; 最后, 分别对舰船抗爆和抗冲击技术内涵进行详细阐述。所做研究可为我国舰船抗爆抗冲击技术体系的形成提供一个初步构想, 供从事舰船抗爆抗冲击设计、研究及管理人員参考。

关键词: 舰船抗爆抗冲击; 技术体系; 技术内涵

中图分类号: U674.7

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02362

Analysis of naval warship blast and shock resistance technology system

ZHOU Xintao*, WU Guomin, LI Decong

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: The concept of blast and shock resistance for naval warships has wide and profound connotations, and should be viewed from the macroscopic perspective. Therefore, it needs a system-driven approach and top-level design of the technology system for the enhanced understanding and development of the blast and shock resistance technologies. In this paper, the conceptual distinction between blast and shock resistance for naval warships is presented in the context of ship damage modes due to weapon attacks. Then, based on the technological requirements of blast and shock resistance in view of overall warship design, different research objectives and diverse basic theories of technology are categorized. In this way, a proposed classification scheme for blast and shock resistance technology system design is formed, including technology such as explosion protection structures above and below the waterline of ships' hulls, analysis of innovative explosion protection structures and structural damage, shock-proof system equipment and sailor shock protection, evaluation and testing, standards and criteria. Finally, the technological connotations implied by blast and shock resistance technology systems are detailed. By making a primary classification of the formulation of technology systems, this study can provide references for engineers, researchers and managers in related fields.

Key words: warship anti-blast and anti-shock; technology system; technological connotation

0 引言

舰船抗爆抗冲击技术在业内是一个很热门的话题, 但也是一个非常宏观的概念, 其内涵广泛, 既含有舰船结构的爆炸冲击波毁伤, 也涉及舰载设备设施及人员的冲击毁伤。对于爆炸来源, 既包括了水下武器(如鱼雷、水雷、水下核爆炸等),

也包括空中的反舰导弹、核爆炸, 甚至还有可能来源于水面自杀式小艇的舷外爆炸攻击。舰船结构的抗爆抗冲击包括了特殊的局部防护结构(如防雷舱、装甲防护等), 还包括箱形梁、双壳体等抗爆抗冲击的主体结构。常规的主船体结构也需要在总强度、局部强度方面满足一定的抗爆抗冲击能力。

我国舰船抗爆抗冲击设计研究起步较晚,舰船抗爆抗冲击设计的整个技术体系还未形成。因此,业内人员对其的认识理解不够全面、准确,对于相关概念、名词术语也未形成统一的认识,有关基础理论研究、关键技术攻关缺少顶层的规划和牵引。

舰船总体设计是包含舰船工程顶层技术的综合集成技术^[1],而抗爆抗冲击是总体设计越来越受到重视的综合性能,是对顶层技术需求的充分体现。本文将基于水面舰船总体设计对于抗爆抗冲击技术的需求,从顶层角度对抗爆抗冲击技术进行分类,分析其适用的不同研究对象及其涉及的主要力学基础理论和研究技术手段,厘清相关概念和技术内涵,旨在为我国舰船抗爆抗冲击技术体系的形成提供一个初步构想,为舰船抗爆抗冲击技术发展规划和全方位的舰船抗爆抗冲击技术攻关提供参考,使技术研究更贴近舰船总体设计需求,研究成果更适用于工程实际,共同促进我国舰船抗爆冲击技术全面发展。

舰船生命力是一个更广泛的范畴,包括易击性、易损性和恢复性^[2]。本文所指舰船抗爆抗冲击技术只是指其中的易损性(也称为抗毁伤性)设计与毁伤分析,以及船体平台安全性的评估,不包括易击性和恢复性,也不包括基于各种理论和假设的毁伤后舰船生命力评估。

水面舰船抗爆抗冲击技术范围更广,潜艇的抗爆抗冲击技术包含在水面舰船技术体系之中,因此本文主要以水面舰船为对象进行技术体系的梳理。

1 舰船抗爆与抗冲击

1.1 舰船受武器攻击时的爆炸毁伤类型

各类爆炸作用下的舰船毁伤主要分为3大类型:第1类是船体平台的毁伤,体现在船体结构的破坏对舰船总体性能(即船体强度、不沉性、稳性)的影响。船体结构不同的破坏程度对应不同的剩余强度,可能不影响舰船的正常作战航行,也可能限制海况、航速航行,或仅能漂浮,严重时可能船体直接断裂沉没;而船体结构水线以下有多处破损时,可能导致船体内多舱进水超过舰船总体不沉性或稳性的能力,从而缓慢或迅速沉没。第2类是舰载设备、设施及人员在爆炸冲击和破片直接作用下的毁伤,包括水线下舱室破损进水后设备人员浸水造成的毁伤,舱内爆炸还可能引起火灾和二次爆炸。第3类是舰载设备设施

及人员在冲击波作用下的毁伤,体现在各种爆炸时船体整体及局部运动引起的冲击环境导致舰载设备、设施及人员的冲击响应毁伤,包括在一定加速度冲击作用下设备和人员的损伤以及局部大位移造成的管路毁伤等。

一般而言,导弹等水上武器的舱内爆炸主要产生第1和第2类毁伤,即有较大范围的船体结构毁伤和爆炸作用范围内的设备和人员受到的直接损伤^[3]。另外,还可能产生一定的冲击环境,造成第3类毁伤,毁伤程度因爆炸当量和舰船吨位而异,冲击环境分布特点是爆点附近的冲击环境恶劣,向周边衰减较快。导弹的舱外爆炸主要产生舰面设备的毁伤,对船体结构和内部舰载设备的威胁较小。

水下武器的远程爆炸主要产生第3类毁伤,即引起全船恶劣的冲击环境,造成舰载设备、设施及人员大面积的毁伤,而船体结构一般不会破损。随着爆点向船体靠近,爆炸对船体结构也可能造成一定的程度的损伤,导致永久变形、破口进水、船体鞭状运动等而产生第1类毁伤,并伴随着设备舱室进水产生第2类毁伤,同时还产生强烈的冲击环境产生第3类毁伤。当武器贴近船体爆炸时,包括自杀式小艇的炸药接触爆炸,主要产生第1类毁伤,即造成船体较大范围的破损、多舱进水,对船体的剩余强度和下沉性构成威胁。同时,舱室进水范围可能增大,第1类毁伤增强,而冲击环境造成的第2类毁伤则会相对减弱或者作用范围减小。

空中核爆炸主要是对上层建筑结构和舰面设备的毁伤,同时也伴随着一定程度的冲击环境导致的第2类毁伤。对于核污染的防护不包括在本技术体系内。

1.2 抗爆与抗冲击概念划分

抗爆抗冲击是与爆炸冲击毁伤相对立的概念,而且抗爆与抗冲击也是两个不同的概念。抗爆是指抵抗爆炸直接作用的毁伤,抗冲击是指抵抗冲击环境造成的毁伤。上节分析的第1和第2类毁伤都是由武器爆炸产生的冲击波、破片等毁伤元直接作用引起的,包括设备浸水引起的,均属于抗爆的范畴。第3类毁伤来源于各种爆炸引起的冲击环境,属于抗冲击的范畴。

第1类毁伤主要针对船体结构。对于导弹在舱内爆炸,船体结构破坏主要来源于爆炸冲击波和破片。对于水下爆炸,主要来源于爆炸冲击波、气泡及射流等,外板破口时还可能进水引起不沉性、稳性等问题。对应的抗爆技术主要指抗

爆结构的设计、对船体平台抗毁伤能力的评估等。

第2类毁伤主要针对设备和人员。爆炸冲击波和破片直接作用下的设备损毁由于牵扯的因素太多,问题过于复杂,很难对设备和人员是否毁伤进行评估。一般而言,舱内爆炸时,直接假设在船体结构损伤范围内的设备和人员全部损毁,也无法单独进行防护,对于重要舱室则通过结构防护对整个舱室进行保护,使舱室内的设备和人员不受爆炸直接作用。舱外爆炸时,假设冲击波和破片直接作用到的设备损毁,对于重要设备可以通过设置防护罩予以保护。因此,对应的抗爆技术主要指针对导弹的水上防护结构设计和针对鱼雷等武器的水下防护结构设计。

第3类毁伤也主要针对舰载设备和人员。它们的毁伤均来源于各种爆炸引起的冲击环境,对应的是抗冲击技术,包括对其抗毁伤能力的评估和抗冲击防护。

简言之,抗爆是指抗爆炸直接毁伤,抗冲击是指抗冲击环境造成的设备和人员毁伤。

2 舰船抗爆抗冲击技术体系划分

2.1 技术体系划分方法

技术体系划分一般需要遵循一定的原则。例如,按照研究手段分为理论分析、试验方法、数值仿真方法;按照载荷特性分为水上武器爆炸防护、水下武器爆炸防护;按照防护对象分为结构防护、设备防护、人员防护等。本文将按照上述舰船毁伤类型,结合总体设计工作中某一方面设计技术需求的完整性来划分,以使技术研究的目的更明确,研究成果更有利于在总体设计中应用。

基于上文抗爆与抗冲击的概念划分,首先将舰船抗爆抗冲击技术分为抗爆和抗冲击两个大的体系。抗冲击对应第3类毁伤,主要涉及设备和人员的抗冲击设计与评估,是一个单独的技术类型。抗爆对应第1和第2类毁伤。其中,第1类毁伤对应船体结构,涉及的抗爆技术主要是分析评估船体结构在各种武器攻击下的破坏程度及其对船体安全性的影响,并通过改进船体结构设计来提高抗毁伤能力,针对的毁伤源主要是广义的爆炸冲击波,因此被单独划分为一个技术类型;第2类毁伤仍然对应的是设备和人员,但主要通过特种结构防护来实现抗爆,涉及的技术主要是防护结构设计,并有明确的防护指标要求。结构防护是指通过设计特殊的船体局部结构(以下简称“防护结构”)来保护重要舱室内的设备、设施

和人员不受武器攻击的直接损伤,舱外设备则采用类似的防护罩。由于水上和下水武器的攻击模式、毁伤元素以及作用介质均不相同,水上和下水防护结构形式也完全不同,涉及的技术类型也有很大的区别,因此从技术体系上将其单独列出。

2.2 技术体系划分方案

舰船抗爆抗冲击技术体系包括如下:

1) 水上防护结构设计技术。

水上防护结构特指针对导弹战斗部穿甲和战斗部舱内爆炸后破片及冲击波破坏的特殊装甲防护结构,一般围绕重点舱室局部设置。

导弹的穿甲和爆炸毁伤主要来自于战斗部。战斗部舱内爆炸产生大量高速破片和强冲击波,将造成普通船体结构大面积损伤,对船体结构强度产生或大或小的不利影响,更重要的是舱内设备系统和人员将受到严重毁伤。若导致诸如作战指挥室内的重要人员伤亡,则可能使舰船战斗力受到很大影响;若弹药库、油料舱等易燃易爆舱室受到侵害,可能引起二次爆炸,造成全舰毁灭。因此,需要对这些重要舱室予以特别的保护,通过设置特殊的局部防护结构形成堡垒,以抵御破片和冲击波的直接侵害。

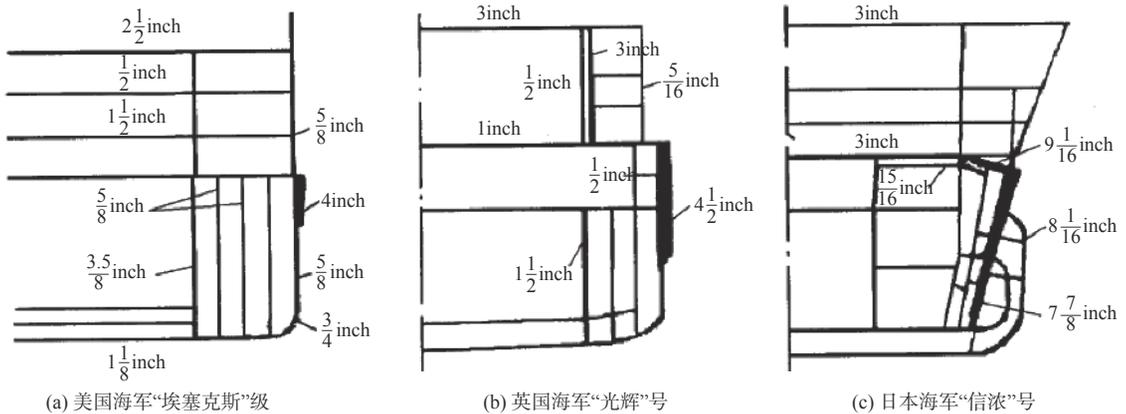
水上抗导弹的防护可分为两个层次,一是抗导弹战斗部穿甲,二是抗战斗部舱内爆炸产生的破片和冲击波。对于第1层次的抗导弹战斗部穿甲,因战斗部的质量大、速度高、壳体强度高、穿甲能力强,使得传统结构抗导弹战斗部穿甲的资源代价太大,目前还没有成熟的防护方法,因而抗导弹战斗部穿甲还不是水上防护结构设计技术的主流。资料显示,美国航空母舰(以下简称“航母”)采用了凯夫拉复合装甲对重要舱室进行防护,但是否在舷侧外板上敷设凯夫拉以阻碍战斗部穿入尚无定论。对于第2层次的抗战斗部舱内爆炸产生的破片和冲击波,从防护装甲材料到结构形式都是研究的热点,可应用于各类水面舰船。

雷达等舰面设备的抗破片防护、小型执法舰艇的抗子弹防护,都类似于第1层次的水上防护结构设计,也都可归属于本技术类型。

2) 水下防护结构设计技术。

水下防护结构特指针对舷外接触爆炸的鱼雷(或水雷),保护内部重要舱室不受损害(主要指进水)的特殊多舱结构,也称为防雷舱,一般沿船长在一定范围内连续设置。

目前的防雷舱主要针对鱼雷舷侧爆炸,利用舷侧多个舱室的纵深空间来消耗吸收爆炸能量,避免重要舱室的舱壁破损进水,如图1所示,因此

图1 早期航母防雷舱设计示意图^[4]Fig. 1 Cabin design schemes of early aircraft carrier for protection against torpedo attack^[4]

一般只有航母有足够的空间设置防雷舱。

舷侧防雷舱一般由空舱、液舱等多个舱室组合而成。当鱼雷在船体外板外爆炸时,通过不同舱室的阻抗失配阻止冲击波向内部直接传递,同时船体外板及内部结构的破损吸收大部分能量,内部液舱还可以起到沉淀结构破片、弥散冲击载荷的作用,从而降低作用在重要舱室舱壁上的载荷,使其免受破损。

目前的鱼雷技术有舰船尾流寻的、底部攻击爆炸的发展趋势,水下防护结构设计技术的重点将向底部防雷舱转移。但底部空间有限,采用类似舷侧的多舱结构并不现实,需要寻找新的方式。

另外,传统的水雷一般为远距离爆炸,不属于防雷舱设计针对的对象,但随着水雷技术的发展,可能出现新型移动式水雷,产生接触爆炸,从而成为防雷舱设计针对的对象。

3) 新型抗爆结构设计及结构毁伤分析技术。

除了采用特种防护结构对重要舱室予以专门防护外,为了保证舰船的生命力,船体结构整体上还需要具有一定的抗舱内爆炸和舷外水下爆炸的能力,以及进行船体结构局部和总体的抗爆强度校核、破损情况分析和剩余强度评估。为了进一步提高整个船体的抗爆能力,各国还兴起了箱形梁^[5]、双层舱壁^[6]、双层壳体^[7]等非传统结构形式的新型抗爆结构的研究和应用^[2],如图2所示。这类结构多应用于驱护舰,其主要作用是尽量减小战斗部舱内爆炸毁伤程度,提高船体剩余强度,防止舱内爆炸毁伤蔓延,提高抗水下爆炸冲击波的能力。由于这类结构属于全船性的主船体结构设计,采用的是不同形式的钢质结构,与抗爆有关的主要技术是对其结构的毁伤分析,因此将其与结构毁伤分析合并为一个技术类型。自杀式小艇的舷外爆炸毁伤也属于本技术类型。本技术类型适用于各类水面、水下舰船。

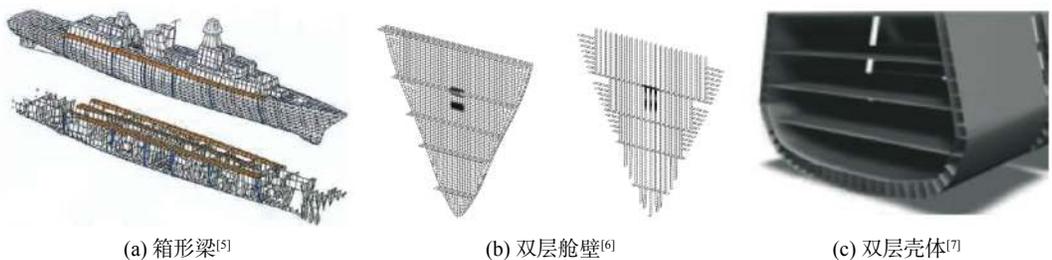


图2 非传统结构形式的新型抗爆结构

Fig. 2 Innovative designs of non-traditional anti-blast structure

4) 设备系统及人员抗冲击技术。

此抗冲击技术是一个独立的技术类型。舰船的动力系统、电力系统、保障系统、操控系统、通信导航以及作战指挥系统等各系统的设备、设施及管路(包括轴系),在各类爆炸引起的舰船冲击环境下,可能因冲击加速度、速度或者相对位移超出设备或管路的承受能力和容许范围而导致损

坏。人员因冲击加速度过高或飞起撞击而造成伤亡,从而影响舰船的航行能力、保障能力、作战能力。

舰船在战时遭受导弹或水下武器攻击时都会造成较大程度和范围的设备、管路和人员的毁伤,是影响舰船生命力的最主要因素。目前,舰船研制对重要设备和重要战位的人员均有一定的抗冲击要求,需要通过实物试验或计算分析等技

术手段考核舰船的抗冲击能力,必要时,还将采取一定的技术措施对该能力予以增强,以提高舰船的总体生命力。因此,设备系统及人员抗冲击技术是舰船抗爆抗冲击技术的重要组成部分,适用于各类水面、水下舰船。

5) 舰船抗爆抗冲击试验验证技术。

舰船结构在爆炸载荷作用下的响应及破损是高度非线性、高应变率、多物理场耦合的复杂现象,理论计算及数值仿真都很难准确模拟和求解,因此模型试验是验证各种理论及仿真结果的最好方法。在舰船研制过程中,经常需要用到的试验验证包括:船体特殊防护结构防护性能的局部实体模型或舱段缩比模型试验验证、船体结构抗水下非接触爆炸或舱内爆炸毁伤的缩比模型试验验证、复合装甲抗弹试验验证、轴系或水下附体抗冲击舱段或全船缩比模型试验验证等。实船抗爆抗冲击考核试验是对舰船抗爆抗冲击能力最真实、最全面的综合验证,特别是对于无法进行抗冲击试验的大型设备、管路和人员战位等。

上述试验复杂度高、不可重复、不可预测因素多,且费用高、保障难度大,试验模型及爆源的设计制作、参数测量、试验实施等都需要大量的技术支撑。包括大型复杂设备系统在内的抗冲击试验验证是舰船抗爆抗冲击技术的重要环节,涉及了上述各技术类型。因此,本文将该技术作为舰船抗爆抗冲击技术体系中的一个独立技术类别。

6) 舰船抗爆抗冲击技术标准规范。

舰船抗爆抗冲击技术标准规范是行业技术发展成熟的重要体现,是对行业技术发展成果的总结、提炼和应用,也是舰船抗爆抗冲击设计、计算分析、试验验证、验收等各环节的规范化约束和指导。标准规范虽然不能算作一个技术类型,但因其独特的地位和作用,本文将其作为技术体系的一个类型。

3 各技术类型的技术内涵分析

3.1 水上防护结构设计技术

水上防护结构设计技术包括防御对象、战斗部爆炸毁伤载荷、防护结构的防御指标与防护等级、防护结构设计、防护结构防护能力计算分析与评估几个大的方面。具体分析如下:

1) 防御对象。

防御对象是指水上防护结构设计针对的导弹类型。舰船结构防护设计的主要原则是相对性,一是指保护相对重要的部位,二是指防御对象的

相对性。不是所有的武器都要防,特别是未来的武器。对于某种武器,也不一定百分之百地防。因此,首先需要根据作战使命任务及国际上反舰导弹的发展情况^[8]来确定防御的导弹类型。

确定导弹类型后,需要进一步掌握导弹的攻击模式,包括导弹攻击部位、攻击速度和角度、战斗部参数以及起爆方式。攻击部位指舷侧攻击或顶部攻击、舷侧攻击时距水面的高度及纵向位置。现代海战中水面舰船主要面对的是掠海飞行、舷侧攻击的反舰导弹,随着导弹技术的发展,顶攻式弹道反舰导弹的发展成为一种新的趋势。攻击速度指战斗部撞击船体结构的入射速度,攻击角度指战斗部轴向与船体结构接触面的夹角,主要用于分析战斗部的穿甲能力。起爆方式指是否延时爆炸、延迟时间等,用于分析爆点位置。战斗部参数包括壳体材料、尺寸、厚度、装药类型及药量等,用于分析爆炸毁伤元。攻击模式的很多参数通常无法准确确定,需要基于概率分析,选取一定的概率模式进行防御,同时通过对这些参数的分析确定防护结构设置的范围是侧面防护,还是前后防护或是顶部防护。

2) 战斗部爆炸毁伤载荷,包括破片载荷和爆炸压力载荷。

破片载荷指破片质量分布和速度。现代导弹的战斗部一般为自然破片,破片质量分布和速度与战斗部参数密切相关,具有较大的不确定性。目前,主要采用经典的 Mott 公式计算破片质量分布,该公式在适用范围上具有一定的局限性,也有学者通过模型试验修订该公式^[9]或采用仿真分析获得^[10-11],然后采用 Gurney 公式计算破片的初始速度,距离远时还需要考虑其在空中飞行时的速度衰减。

爆炸压力载荷是指作用在水上防护结构复合装甲舱壁上的爆炸冲击波及准静态压力的时历载荷。与地面防御工事的室内爆炸冲击波载荷反射、形成准静态压力的特点不同,战斗部在船舱内爆炸时,周围普通的船体结构一般会受到破坏,与地面防御工事的泄爆口有相同的作用。因此,对于冲击波压力载荷,除了要分析初始爆炸冲击波的产生和传播外,还必须考虑与上、下甲板及周围舱壁结构的耦合,以及弱结构的毁伤,是一个十分复杂的时空演变过程。目前,多采用数值仿真方法进行上述压力载荷的计算分析。

3) 防护结构的防御指标与防护等级。

防护结构的指标与防护等级也可被视为防护结构设计要求,指水上防护结构设计的具体防御

指标。对于复合装甲舱壁而言,一般指可防御破片的最大质量和速度,涉及了对有效防御破片的定义(即破片是完全不穿过或以一定的概率穿过,还是穿过时的剩余速度不大于某个值),也可指有效防御破片的概率。同时,还可能指可承受的爆炸冲击波载荷(压力峰值或冲量)或在一定TNT当量下的爆距。这些指标的确定需要基于对防御对象、战斗部爆炸毁伤载荷以及被保护对象的抗爆需求分析,并结合总体资源代价、防护效能的需求分析获得。不同吨位、不同使命任务的舰船,由于其总体资源可承受能力和防护需求不同,防御指标可能有较大差异,因此可将其划分为不同等级。

4) 防护结构设计。

该设计指针对防护结构的防御指标,采用结构重量相对较小、占用空间较少的结构形式及材料以满足防护要求,包括构型设计(结构形式和材料)和构件尺寸设计。目前,防护结构设计主要指复合装甲舱壁的设计。

对于小质量的抗弹要求,采用一定厚度的防弹钢板即可。在要求较高时,一般采用钢板与复合抗弹材料合成的复合装甲舱壁。钢板主要用于保证舱壁结构的强度,并起到一定的抗弹作用。目前,常用的复合抗弹材料包括玻璃纤维、聚乙烯纤维、芳纶纤维和由它们组成的混杂纤维增强复合材料,以及由片状金属、陶瓷与纤维增强树脂混杂复合的超混杂复合材料^[12-13],这些材料抗弹性能好,面密度低,与均质钢板相比有很大优势,而抗弹性能更好、更轻的抗弹材料还在不断发掘之中。在结构形式上,可采用钢板前置复合材料、钢板后置复合材料或者两块钢板中间夹芯复合材料。复合材料可以用一种,也可以根据防御对象的质量速度及材料自身特性采用多种材料层合。复合材料厚度则根据防护能力的需要,以及材料制备工艺确定。防护结构设计一般根据防护等级(不同破片质量或速度)要求,基于防护机理分析或设计经验,选取合适的结构形式进行设计计算,最后通过打靶试验验证其抗侵彻能力。

复合装甲舱壁主要功能是抵御破片穿甲,同时其具有很强的抗冲击波局部破坏能力,在冲击波作用下的毁伤模式主要是周围边界结构破坏或者边界与周围结构连接焊缝撕裂而整体倒塌。因此,复合装甲舱壁的抗冲击波能力主要体现在边界结构设计上,也就是复合装甲舱壁与周围甲板、舱壁结构的连接形式。边界结构设计包括3个方面:一是对与复合装甲舱壁连接的边界结

构进行局部加强,尽量提高结构的抗破坏能力;二是改变直角连接形式,尽量减小复合装甲舱壁边界的冲击波汇聚,降低破坏载荷;三是复合装甲舱壁尽量垂向、纵向连续,减少边界焊缝,从而减小边界被破坏的可能性。

5) 防护结构防护能力计算分析与评估。

结构与性能计算总是相辅相成的,通过设计、计算和设计的多次迭代才能达到结构与性能的最佳匹配状态。防护能力计算分析包括复合装甲抗破片侵彻能力的计算分析、复合装甲舱壁抗冲击波强度或者破片与冲击波联合作用的计算分析,若进行抗导弹穿甲设计研究,还需要结构抗导弹侵彻能力的计算分析。

复合装甲抗破片侵彻能力的计算分析不仅涉及多层结构、不同材料的穿甲、材料的高应变率特性、破片侵彻的判据,而且与破片材料、形状、质量、速度及靶标材料类型和厚度都密切相关。但复合装甲舱壁抗冲击波强度计算分析因其载荷是一个与结构耦合的时空演变过程,结构力学性能与传统的板筋结构有较大差异,破坏模式主要是边界结构破坏,与焊缝性能密切相关,也非常复杂。因此,无论是理论分析、经验公式计算还是数值仿真,都需要大量的试验数据支撑和验证。

复合装甲抗破片侵彻能力一般都需要通过局部实体模型的打靶试验予以验证,这也比较容易做到。若条件允许,对复合装甲舱壁抗冲击波能力以及抗破片和冲击波联合作用的能力试验验证最好采用1:1比例的模型。目前,试验验证一般通过较大比例的缩比模型进行,或者小比例模型试验与数值仿真分析相结合的方法,但模型相似律尚不完善,需要试验技术的支撑。

3.2 水下防护结构设计技术

水下防护结构设计技术包括防御对象、防雷舱结构设计、防雷舱防护效能评估几个方面。具体分析如下:

1) 防御对象。

防御对象指水下防护结构设计针对的鱼雷(或者水雷)类型。确定防御对象需要从作战使命任务、自身防御能力、总体资源代价等方面综合论证,以最小的代价达到对最可能发生的威胁进行最有效的防护,这本身也是一项技术。

确定防御对象后,需要进一步掌握其攻击模式,包括鱼雷攻击部位(爆炸水深)、起爆方式,用于分析鱼雷最危险爆点工况,并且还需要明确鱼雷装药当量,作为防雷舱的设计输入。

2) 防雷舱结构设计。

防雷舱结构设计涉及结构构型、防护机理及参数设计,包括防雷舱多舱组合形式、各舱宽度匹配、各舱内部结构形式和构件尺寸、液舱液体类型及装载容量等,还可能设置专门的吸能结构,这些都将影响到防雷舱的防护效能。

3) 防雷舱防护效能评估。

防雷舱防护效能评估包括基于能量法的理论计算方法和流、固、气多物理场耦合的数值仿真分析方法。能量法涉及爆炸能量有效作用比例、结构变形及破损吸收能量的计算方法、结构破损以外的能量耗散等,是一种比较粗的估算方法。数值仿真分析方法目前用得较多,主要涉及爆炸载荷模拟及加载方法、结构流体及空气建模方法、结构响应求解方法、结构材料特性及破坏判据(考虑应变率)等技术^[14]。对于防雷舱有效防护的定义(或者说失效判据)则是理论计算和数值仿真分析方法共同面临的问题。

3.3 新型抗爆结构与结构毁伤分析技术

新型抗爆结构主要指在传统的主船体结构形式基础上,通过局部改进来提高整个主船体的抗爆能力,例如箱形梁、双层舱壁/壳体、抗爆金属夹层舱壁等。结构毁伤分析主要针对各类舰船船体结构(包括传统船体结构、新型抗爆结构等),计算分析在水上/水下武器远、近、接触各类爆炸载荷作用下结构的响应与毁伤,即评估结构的抗爆炸毁伤能力。

因新型抗爆结构设计主要技术内涵就是针对局部改进的主船体结构,对其抗爆能力即结构毁

伤状态进行分析,结构毁伤分析技术应用范围更广,所以将两者合在一起作为一个技术类型,其所包含的技术内涵范围比较广、内容比较多。具体分析如下:

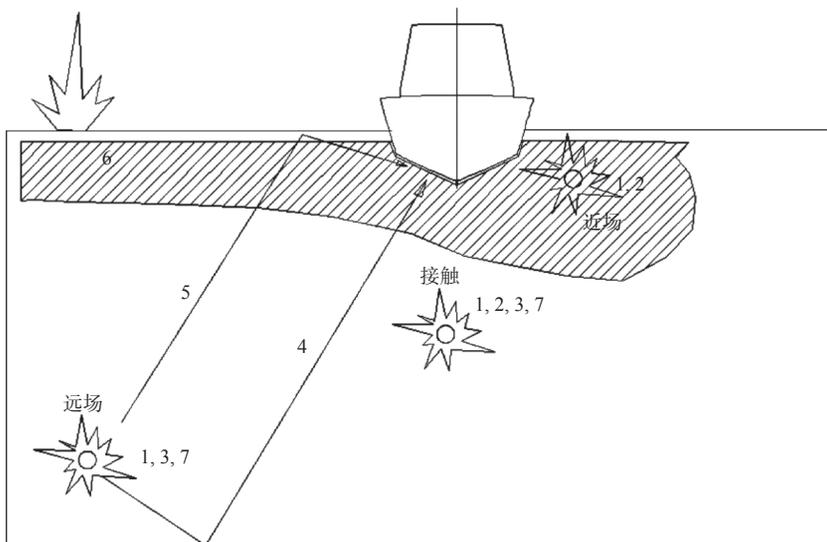
1) 水下爆炸类型的定义,也即接触爆炸、近场(非接触)爆炸及远场爆炸的界定划分。

在炸药当量一定时,爆点和爆距不同,载荷作用类型不同。如图3所示,因水下爆炸对船体结构的作用机理不同,由此带来的毁伤模式和程度也不同。对于水下爆炸的类型,目前还没有清晰的划分,更没有统一的定量标准,通常将其模糊地称为水下接触或近距爆炸、水下非接触爆炸^[15]。在接触爆炸时,爆炸冲击波和爆轰产物直接作用在船体结构上,作用载荷大,作用范围小,一般会产生产生很大的局部破口。在远场爆炸时,主要是水传递的冲击波作用在船体结构上,作用范围大,作用载荷小,船体结构不易破损。在近场(非接触)爆炸时,船体结构不仅受到水传递的冲击波载荷作用,并可能因此造成船体结构的损坏,而且还可能承受气泡及射流的作用。气泡破灭时产生的射流可能引起船体结构严重的局部破坏,气泡脉动时可能引起船体大幅度的鞭状总纵弯曲运动(即船体梁冲荡),局部有破口时,很可能发生船体折断,例如韩国海军的“天安”号舰^[16]。

科学界定不同水下爆炸类型,有利于在工程应用中通过对水下爆炸问题进行分类,采取合理的载荷、响应分析方法及衡准。

2) 水下接触爆炸作用下船体结构毁伤分析。

主要用于计算分析船体结构在遭受鱼雷攻击或水雷近距离攻击(接触或近场非接触爆炸)后



1-冲击波; 2-气泡破裂; 3-滞后流; 4-海底反射; 5-水面截断; 6-水面空泡; 7-气泡脉动

图3 水下爆炸载荷^[17]

Fig. 3 Loads of underwater explosion^[17]

的毁伤状态(破口尺寸及塑性变形范围),载荷类型与防雷舱防护效能评估相近,但针对的对象不同,结构形式的复杂程度不同,计算分析方法也不相同。因此,在本技术类型中也单独列出这一项。

3) 水下爆炸冲击波作用下船体动态响应分析。

主要用于分析校核在一定冲击因子的水下非接触爆炸冲击波作用下,船体结构是否完好或者破损。该分析在技术上与水下接触爆炸作用下船体结构毁伤分析有一定的相似性,也包括能量法理论计算和数值仿真分析,但载荷类型只考虑爆炸时水传递的冲击波,对于潜艇还需要考虑静水压力。船体结构动态响应可能在弹性范围内,也可能板或者板架产生一定程度的塑性变形,还可能产生板的破裂,这主要取决于船体结构抗爆炸冲击波的实际能力或者要求。

4) 水下爆炸气泡及射流作用下船体结构强度分析。

主要用于分析特定水下爆炸条件下船体结构在气泡脉动压力及射流作用下的安全性,其重点在于气泡作用及射流产生的条件^[18]、气泡及射流作用载荷(作用压力和时历、作用范围等)的计算方法(包括理论解法、半经验公式及数值仿真方法^[19-22])、气泡及射流载荷作用下的结构局部动态响应(包括是否破损、破口尺寸等)计算、船体局部破损状态下及完好状态下气泡脉动作用时的船体总纵弯曲动态响应分析等。

5) 战斗部舱内爆炸时结构破损分析。

主要用于分析舰船遭受导弹攻击战斗部在舱内爆炸时船体结构的破坏模式、程度和毁伤范围,包括基于能量理论的经验公式估算方法和基于模型试验验证的数值仿真分析方法。毁伤源主要考虑爆炸冲击波的作用。破片对结构的破坏模式主要是穿孔、增大冲击波的破坏程度,但在技术上分析难度很大,因此一般不予单独考虑。船体结构形式一般是常规的板筋结构,也可能是金属夹芯等新型抗爆结构。

对于不同对象的结构破损分析,若是分析战斗部爆炸冲击波直接作用下某特定局部结构(假定边界下的舱壁或甲板)的破损情况,可以采用经验公式估算(迄今还没有现成有效的公式)或数值仿真分析;若是一个假定的舱室六面结构^[23],常采用数值仿真方法,此时舱室结构的边界处理非常重要;若是针对整个船体舱段,对于仿真分析而言,其边界条件比较真实,但结构建模、载荷计算都更加复杂;若是估算战斗部爆炸对船体结构的破坏半径,可采用经验公式,根据战斗部炸

药当量、各方向(纵向、横向、垂向)舱壁或甲板结构距离、结构相当板厚,逐层估算结构是否破坏,从而粗略确定结构破坏的范围。

数值仿真分析的重点在于船体结构(材料的动态本构关系及失效判据)与爆源的建模、舱内爆炸冲击波载荷的形成与传播、冲击波载荷与舱室结构的耦合作用、结构的动响应求解以及结构破损的判据等。这些与水上防护结构设计技术中的冲击波压力载荷分析基本相同。

6) 空中核爆炸时的结构动态响应分析。

一般是针对水面舰船上层建筑结构或者其他舰面结构的分析,要求在一定超压或冲量的空中爆炸冲击波作用下,舰面结构必须完好或者不能破损等。需要弄清楚的问题包括空中核爆炸时作用在船体上的载荷(准静态超压或压力时历)、结构动态响应计算方法、结构变形及破坏判据、容许的破坏程度等。对于规则的板架结构,一般采用理论计算方法进行计算。若要分析整个上层建筑结构以及特殊的不规则结构在空中核爆载荷作用下的动态响应,则需要采用有限元方法进行计算。

7) 新型抗爆结构的设计及应用。

新型抗爆结构指的是箱形梁、双层舱壁、双层壳体、金属夹芯结构等有别于传统主船体结构的新型结构形式或材料的设计及在实船上的应用,采用上述相关技术对抗爆结构抗爆性能进行计算分析^[24],研究抗爆原理,并与传统结构进行比较,以提高主船体抗爆能力。

8) 船体破损后的总体性能评估及衡准。

该衡准指不沉性、稳性和剩余强度,一般针对船体破损后的不沉性、稳性及其能承受的总强度进行计算评估,其关键技术主要包括考虑船体进水后的稳性和总强度静水弯矩及波浪载荷计算方法、船体任意部位破损时的极限弯矩计算方法、船体多处破损时的船体总强度计算方法、船体破损后剩余强度和稳性的安全判据及对应的安全航行工况(如航速和海况)等。

3.4 设备系统及人员抗冲击技术

设备系统及人员抗冲击技术包括船体冲击环境预报、设备抗冲击设计及抗冲击能力评估、系统管路抗冲击设计及抗冲击能力评估、人员损伤评估及抗冲击防护器具开发等几个方面。具体分析如下:

1) 船体冲击环境预报。

船体冲击环境预报是指对各种特定爆炸载荷

作用下的船体结构冲击动态响应进行预报,获得重要设备安装部位、管路固定部位及人员战位等结构基础的运动加速度、速度或位移。冲击环境一般以冲击谱的方式反映,是设备系统及人员抗冲击设计和评估的载荷输入。

对于不同的爆距、当量、位置 and 不同吨位的舰船以及舰船中的不同部位,船体的冲击环境各不相同。在舰船研制时,最好根据各舰船的抗冲击要求对其不同部位的船体冲击环境进行预报,以便对设备提出更合理的抗冲击要求,如此才能对舰船总体抗冲击能力进行准确评估。

船体冲击环境预报一般采用数值分析方法,包括全船有限元建模和各种爆炸方式下的载荷产生、传递和加载,以及船体冲击响应的分析求解(需考虑与设备的相互耦合)、典型部位冲击谱的提取等^[25]。其中,全船有限元建模的重点是结构简化和单元网格的合理划分、船体结构和舰载设备设施重量的模拟以及大型设备的耦合模拟等,这些都会对计算成本和计算结果产生比较重要的影响。船体的冲击环境也可以通过模型试验进行预报,或者通过模型试验对数值分析方法的准确性予以验证。

2) 设备抗冲击设计及抗冲击能力评估。

对于设备(含电子元器件),主要是通过设备分级和相关标准对重要的舰载设备提出抗冲击要求,并进行考核评估。设备自身抗冲击能力无法满足要求时,可通过抗冲击安装方式来提高其抗冲击能力。设备抗冲击设计和抗冲击能力评估技术分支包括设备冲击毁伤模式分析、设备自身抗冲击设计、设备抗冲击力考核评估以及设备自身抗冲击能力不足时采用的抗冲击弹性安装设计及其抗冲击能力评估。

在设备研制时就需要考虑设备自身的抗冲击能力。对于机械设备,可采用诸如高强度和高韧性金属材料、避免截面突变和尖缺口等引起应力集中、避免悬臂结构、焊缝避开高应力区、连接件(插件)尽量避免垂向连接、大型复杂设备的多部件应安装在一个平台上等^[26]方法,来提高设备的抗冲击能力。对于雷达、天线等电子设备,应该力求其结构均匀、重量轻而强度高。机械设备的弹性安装既能够起到隔振降噪的作用,又可起到一定的抗冲击作用,设计时需兼顾这两个方面性能的平衡。

设备抗冲击能力评估以实物冲击试验验证考核为主,不具备试验条件时,可采用设备冲击动态响应理论计算或数值仿真分析方法进行评估,而毁伤判据是二者共同的技术问题。试验验证技

术成熟时,可直接选用合适的试验方法或标准,必要时还需要试验验证技术的支撑。

对于一些损伤机理复杂、重量体积偏大的大型设备,无论是抗冲击设计还是能力评估都是技术难题,需要通过研究冲击载荷在安装基础、机脚、零部件间的传递特性,形成经过试验验证的零部件冲击载荷和冲击响应计算方法,结合关键零部件的冲击试验,形成抗冲击设计与评估方法^[2]。

3) 系统管路抗冲击设计及抗冲击能力评估。

系统的破坏主要来自于连接系统下属各设备之间管路(线路)的破坏。试验研究表明^[26],在冲击环境下,管路的破坏一般发生在管路与设备的连接处、管路上阀件安装部位、管路连接部位以及固定部位,因变形不协调而产生剪切破坏。对于通海管路,还可能因舷外冲击波传递到管路内部造成管壁破坏。管路抗冲击措施包括挠性接管、弹性吊架以及合理的管路布置等。

对于管路,目前没有专门的标准提出具体的抗冲击要求,但对管路布置进行抗冲击设计和安装并对其抗冲击能力进行评估是有必要的,其能力评估以理论计算和数值分析为主。因此,本技术分支主要包括管路冲击破坏模式、管路抗冲击布置设计、管路抗冲击弹性安装元器件开发、管路抗冲击能力计算分析及毁伤判据。同样,管路的抗冲击能力也可以通过模型试验予以验证,或者通过模型试验对数值分析方法的准确性予以验证,而模型试验方法需要试验技术的支撑。

此外,推进轴系的抗冲击设计与评估也属于本技术分支。在爆炸冲击环境下,轴系(螺旋桨)可能出现卡死现象,从而影响舰船的机动性乃至战斗力。轴系抗冲击设计及评估问题涉及多点冲击输入、轴系-轴承-支撑结构耦合与刚度匹配以及冲击破坏判据等^[2],而艉轴和螺旋桨裸露在船体外,还可能承受水下冲击波的作用,因此比管路抗冲击技术更加复杂。

4) 人员损伤评估及抗冲击防护器具开发。

人员是舰船执行任务的主体,对重要战位的人员进行冲击损伤评估及抗冲击防护也是非常重要的。本技术分支主要包括人员冲击损伤评估、抗冲击地板等提高舱室整体抗冲击环境硬件的开发,以及抗冲击座椅、头盔、鞋等个人抗冲击防护器具的开发及其抗冲击能力试验或计算分析方法。其中,人员的损伤判据和试验方法是重要环节,试验常常采用假人或动物进行代替。

3.5 舰船抗爆抗冲击试验验证技术

本技术类型主要是为上文所述各类结构防护

效能试验验证、结构响应与毁伤分析方法试验验证、设备系统试验验证以及实船抗爆试验提供技术支持。从舰船抗爆冲击试验种类来分析,本技术类型包括以下几个方面:

1) 穿甲试验验证技术。

穿甲包括有导弹战斗部穿甲和破片穿甲。战斗部穿甲常采用缩比舱段模型或靶板模型进行试验,有条件时可采用大型1:1靶板模型。破片穿甲一般采用1:1局部靶板模型进行试验。穿甲试验验证技术包括穿甲缩比模型试验中战斗部及靶板的缩比相似性问题、破片的模拟和发射速度控制问题、破片入射速度及剩余速度的测量方法、穿甲试验有效性及数据分析等。

由于缩比后的弹丸和靶板应变率发生变化,会引起材料特性的偏差、弹丸速度与靶板厚度的比例发生变化,可能对侵彻机理产生一定的影响,使得缩比穿甲试验很难完全相似,需要一定的修正,因此战斗部穿甲能力考核试验时一般采用1:1模型试验。

在穿甲试验时,弹丸发射速度、角度往往很难精准控制,试验结果也有较大的离散性。如何判断试验的有效性、多少次试验才能确定统计规律、如何分析数据才能得出抗侵彻能力的结论,以及如何提高弹丸发射技术等,都属于本项技术的内涵。

2) 舱内爆炸毁伤试验验证技术。

对包括炸药爆炸和战斗部爆炸的舱内爆炸毁伤试验验证,一般采用缩比模型。舱内爆炸毁伤试验验证技术主要包括爆炸源与结构模型的缩比相似性问题(对于战斗部爆炸还需考虑爆炸冲击波与破片双重的相似性问题)、缩比结构模型设计时的结构(包括焊缝)简化等效原则和采用不同材料时的材料代换等效原则、模型范围及舱室结构边界等效原则等,以及试验时模型的搁置环境和方式、爆炸时冲击波载荷的测量及结构动态响应的测量、爆炸毁伤过程的影像采集等。

舱内爆炸试验模型范围较大,一般会涉及到几个舱,同时为有效模拟舱室结构边界,还需要向各方向延伸一定的距离。因此,为便于实施、控制经费,缩尺比例会较小。在设计模型时,需要简化结构(如省略加强筋等效为板厚),材料也会采用能获得的其他材料进行代换。在模型制作时,因空间限制,需要采用特殊焊接工艺,导致与实船的不一致,而焊缝对毁伤结果有重要影响。在对战斗部缩比时,破片质量分布也很难相似,预置破片又影响爆炸能量的相似性。这些问题都

给模型试验的相似性带来影响。此外,在数据测量时,传感器会受到爆炸冲击波破坏,很难采集到理想的数据。舱内爆炸毁伤试验一般将模型搁置在地面上进行,根据需要也可漂浮在水面上进行。上述这些技术都有待不断总结和不断改进提高。

3) 水下爆炸结构响应与毁伤试验验证技术。

水下爆炸结构响应与毁伤试验验证包括水下接触爆炸时的结构毁伤试验、非接触爆炸时的结构动态响应测试及毁伤试验。

水下接触爆炸模型试验用于水下防护结构的防护效能试验验证时,缩尺比例较大,而用于防护机理研究时,则采用原理性小模型试验。水下接触爆炸模型试验也常用于验证局部结构在接触爆炸时的破坏范围及计算分析方法。

非接触爆炸模型试验用于验证船体结构抗爆炸冲击波能力。例如,在验证一定爆炸条件下的安全距离或比较不同结构形式或结构方案的抗爆炸冲击能力时,一般采用较大缩尺比的局部板架模型。研究船体结构水下附体、轴系等抗爆炸冲击波及冲击能力时,一般采用小比例多舱段模型。研究水下爆炸作用下船体冲荡效应时,可能采用小比例全船缩比模型,若经费允许,还可能采用大比例全船缩比模型对船体在不同水下爆炸条件下的抗爆能力进行较为全面的试验验证。

水下爆炸船体结构毁伤试验验证技术主要包括的问题类型与舱内爆炸类似,主要是模型相似性^[27-29]、爆炸时冲击波载荷的测量、数据和影像采集等问题。不同的是,水下爆炸的爆源一般采用药包,不涉及战斗部破片的模拟,但由于是在水中爆炸,药量的相似性是否受到影响还有待研究明确。另外,水下爆炸试验需要考虑试验模型的水中定位和防沉问题。

4) 水下爆炸船体冲击环境缩比试验验证技术。

水下爆炸船体冲击环境缩比试验与结构毁伤试验有很大的相似性,但冲击环境测试中重力是重要的影响参数,缩比模型试验中其相似原则和换算关系与结构强度试验有所不同。由于船体冲击运动是全船相互关联的,舱段缩比模型试验必须考虑如何模拟边界以外的船体对试验模型运动的影响。另外,结构及舰载液体、设备管路重量分布的模拟、重要设备的模拟以及阻尼准确的模拟也对试验结果有重要影响。

5) 设备系统及人员抗冲击试验验证技术。

冲击试验验证技术关键在于冲击环境的模拟,包括模拟方式和模拟冲击谱的定量控制。模拟方式主要有摆锤式冲击台、水下爆炸式浮动冲

击平台。摆锤式冲击台主要用于小型设备,通过摆锤重量和摆动高度控制需要模拟的冲击谱,针对不同重量的设备、不同的抗冲击要求,配置合适的摆锤重量和高度是其主要技术内涵,这些可通过大量试验研究形成标准,供设备试验验证考核选用。水下爆炸式浮动冲击平台主要用于大型复杂设备及系统^[30],通过水下爆炸药量、爆距、爆点等控制需要模拟冲击环境,其难度更大。此浮动冲击平台的结构设计、结构与设备安装的耦合、爆炸药量与爆距、爆点配置等是其技术内涵。对于不同的大型设备或系统,水下爆炸式浮动平台通常需要单独进行设计。

人员的抗冲击试验一般采用假人或动物来代替,其技术内涵除了冲击环境的模拟外,还包括假人或动物与人的相似性。

6) 实船抗爆抗冲击试验验证技术。

实船抗爆抗冲击试验包括新研舰船考核性试验验证和科研性实船爆炸试验。前者必须考虑如何安全实施,既能达到考核船体及设备设施抗爆抗冲击性能指标的目的,又要避免造成实船的重大破坏,是一次性试验;后者一般使用旧船或报废改装船舶进行试验,并由一系列强度不断增加的爆炸试验组成,直至将船炸成严重破坏为止。

实船抗爆抗冲击试验的实施包括爆炸工况(含炸药当量、爆距、深度等)的选取、起爆方式(含沉底法、系带法、平行法等)^[31]、舰船状态(含航行状态、装载状态、设备开启状态)、参数测量(含测量参数类型、测点规模、传感器及测试设备布放及保护、数据有效采集及分析)。对于新研舰船,还必须考虑试验前如何进行安全性评估及试验后如何进行设备完好性检查和评判、如何进行实船安全性评估等。与水面舰船相比,潜艇的水下爆炸试验更加复杂,艇体和药包的水下定位难度更大,还需要考虑试验后回收及意外情况处理等。

3.6 舰船抗爆抗冲击技术标准规范

舰船抗爆抗冲击技术标准规范的形成包括标准规范体系的建立、各项标准规范的编制、标准的执行。

1) 标准规范体系的建立。

舰船抗爆抗冲击技术标准规范体系应包括舰船抗爆抗冲击设计或建造要求、抗爆抗冲击能力计算分析方法以及标准化软件、试验验证方法等。舰船抗爆抗冲击主体又分为特殊防护结构、船体结构、设备系统及人员。特殊防护结构分为水上防护结构和水下防护结构,设计要求包括防

护等级的划分及不同防护等级的设计要求。船体结构抗爆计算分析方法又分为舱内爆炸、水下爆炸以及空中核爆等不同爆炸类型。标准化软件包括舰船抗爆抗冲击数据库、舰船结构毁伤计算分析、舰船毁伤后安全性分析评估等。

试验验证方法包括爆炸冲击源的模拟方法、参数测量方法、试验流程、合格判据等。标准规范可以是相互独立的单本,共同组成完整的体系,相互之间可能有关联,但在内容上不应该有重复。当整个技术体系比较成熟时,也可以形成整体的合本,例如劳氏舰船入级规范。

2) 标准规范的编制。

编制要求类标准规范时,应对舰船抗爆抗冲击有成熟的认识,并有相关技术的支撑,具有科学性、合理性。编制计算和试验方法类标准规范时,应具有成熟的技术、足够的权威性和良好的可操作性。由于舰船抗爆抗冲击能力是重要保密事项,在编制要求类标准时应注意仅描述级别划分及其通用要求,即定义性描述。具体要求在产品研制时由军方协商设计方另行确定。

3) 标准的执行。

标准的执行是指在舰船产品论证、设计、建造及试验验证、鉴定等各阶段按标准执行,是强制执行还是指导性执行,可在产品研制时由军方协商设计方确定。

3.7 舰船抗爆抗冲击技术体系框图

综上所述,舰船抗爆抗冲击各技术类型所包含的技术分支及其内涵、关键技术、相互关系、应用对象等,如图4所示。

4 结 语

本文从水面舰船总体抗爆抗冲击设计技术需求出发,将舰船抗爆抗冲击技术分为6大技术类型,形成了第1层次的技术体系,包括水上防护结构设计技术、水下防护结构设计技术、新型抗爆结构与结构毁伤分析技术、设备系统及人员抗冲击技术、舰船抗爆抗冲击试验验证技术和舰船抗爆抗冲击技术标准规范。

潜艇抗爆抗冲击设计技术主要是针对鱼雷、水雷、深水炸弹等水下武器的远程爆炸进行研究和设计,除了水上、水下防护结构的设计技术外,其他类别的技术均可以适用,只是针对的舰船对象不同。

本文对舰船抗爆抗冲击各类技术的内涵予以了解,各技术分支之间包含的内容可能有一定的重复,但各有侧重,可以互相借鉴。

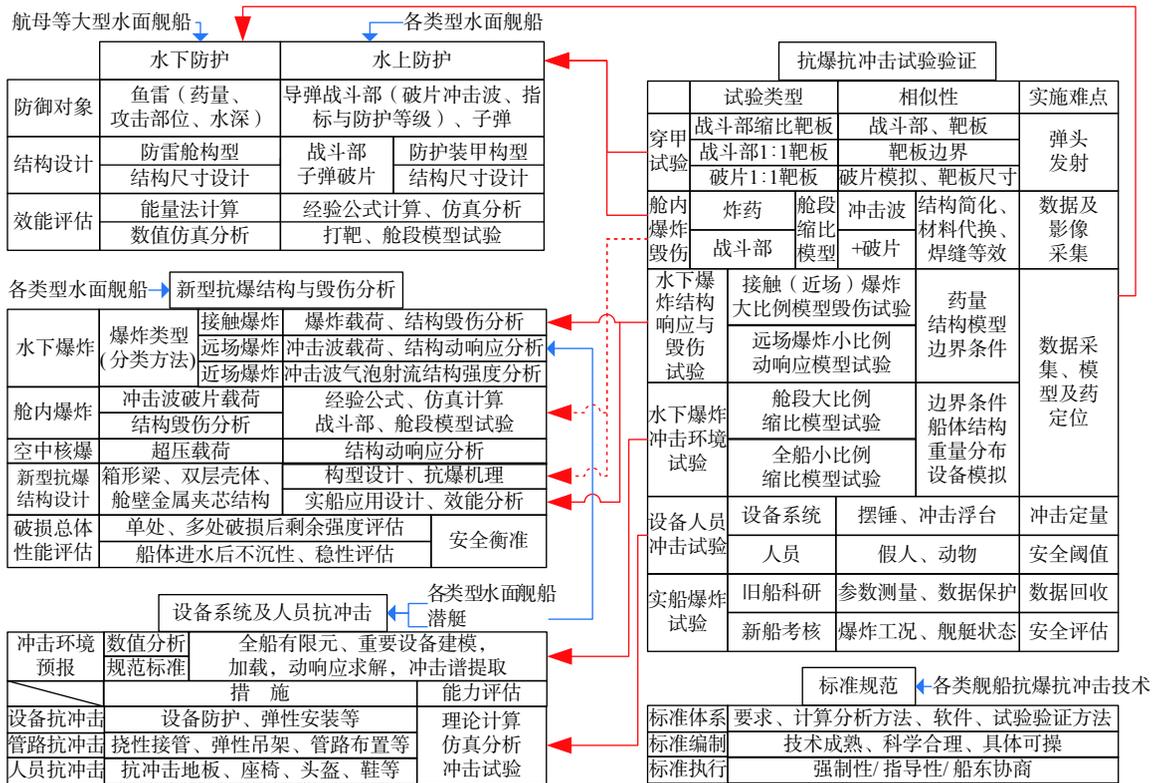


图4 舰船抗爆抗冲击技术体系图

Fig. 4 The framework of anti-blast and anti-shock technology system for naval warships

参考文献:

[1] 邵开文, 马运义. 舰船技术与设计概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
SHAO K W, MA Y Y. Concepts of warship technology and design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese).

[2] 刘建湖, 周心桃, 潘建强, 等. 舰艇抗爆抗冲击技术现状和发展途径 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 46-56, 71.
LIU J H, ZHOU X T, PAN J Q, et al. The state analysis and technical development routes for the anti-explosion and shock technology of naval ships [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 46-56, 71 (in Chinese).

[3] 于文满, 何顺禄, 关世义. 舰艇毁伤图鉴 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
YU W M, HE S L, GUAN S Y. Illustrated handbook of warship damage [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991 (in Chinese).

[4] 朱锡, 冯文山, 宋文翰. 航母的装甲防护系统 [J]. 现代舰船, 1991(1): 31-36.
ZHU X, FENG W S, SONG W H. Armour protection system of the aircraft carrier [J]. Modern Ships, 1991(1): 31-36 (in Chinese).

[5] 王正国, 熊治国. 决定舰船生命力的因素 [J]. 国外舰船工程, 2005(12): 1-6.
WANG Z G, XIONG Z G. The factors determining warship survivability [J]. International Ship Engineering, 2005(12): 1-6 (in Chinese).

[6] 王海. 新型夹芯板双层舱壁在侵彻载荷作用下的结构动响应研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.

WANG H. Research on dynamic response of new sandwich double bulkhead under penetration load [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).

[7] BEACH J E, BRUCHMAN D D, SIKORA J P. Advanced double hull concept reduces costs, increases capabilities [J]. AMPTIAC Quarterly, 2003, 7(3): 5-11.

[8] 隋先辉, 董受全, 王少平, 等. 新一代的反舰导弹及其应用技术 [J]. 战术导弹控制技术, 2010, 27(1): 36-39.
SUI X H, DONG S Q, WANG S P, et al. A new generation of anti-ship missiles and its application technology [J]. Control Technology of Tactical Missile, 2010, 27(1): 36-39 (in Chinese).

[9] 郭超, 宫小泽, 李向东. 弹体破片分布及破碎性系数计算 [J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(3): 39-42.
GUO C, GONG X Z, LI X D. Calculation of fragmentation distribution and fragmentation coefficient of projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(3): 39-42 (in Chinese).

[10] 张鹏, 任杰, 王绪财, 等. 高强度钢壳体战斗部爆炸破碎无网格法数值仿真 [J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(4): 47-52.
ZHANG P, REN J, WANG X C, et al. Numerical simulation on fragmentation of high strength steel warhead shell driven by explosion based on grid-free method [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(4): 47-52 (in Chinese).

[11] 孔祥韶, 吴卫国, 杜志鹏, 等. 圆柱形战斗部爆炸破片特性研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(1): 243-249.
KONG X S, WU W G, DU Z P, et al. Research on

- fragments characteristic of cylindrical warhead[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(1): 243–249 (in Chinese).
- [12] 朱锡, 侯海量, 吕岩松, 等. 舰艇结构 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
ZHU X, HOU H L, LV Y S, et al. Structure of navy ships[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014 (in Chinese).
- [13] 李典, 侯海量, 朱锡, 等. 舰船装甲防护结构抗弹道冲击的研究进展 [J]. *中国造船*, 2018, 59(1): 237–250.
LI D, HOU H L, ZHU X, et al. Review on ballistic impact resistance of ship armor protection structure[J]. *Shipbuilding of China*, 2018, 59(1): 237–250 (in Chinese).
- [14] 吴庭翱, 张弩, 侯海量, 等. 水下接触爆炸下多舱防护结构载荷特性及动响应研究进展 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(3): 1–12.
WU T A, ZHANG N, HOU H L, et al. Research progress on load characteristics and dynamic response of multicamerate defense structure subjected to contact underwater explosion[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 1–12 (in Chinese).
- [15] 朱锡, 刘燕红, 黄祥兵. 水面舰艇结构抗水下爆炸毁伤能力表征方法研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(2): 27–32.
ZHU X, LIU Y H, HUANG X B. Method research of charactering vitality of surface warship subjected to underwater explosion[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2008, 20(2): 27–32 (in Chinese).
- [16] Civilian-Military Joint Investigation Group. Joint investigation report: on the attack against ROK ship Cheonan[M]. Seoul: Ministry of National Defense, Republic of Korea, 2010.
- [17] 张振华. 舰艇结构水下抗爆能力研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2004.
ZHANG Z H. Study on explode-resistant of naval vessels subjected to underwater explosion[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2004 (in Chinese).
- [18] 库尔. 水下爆炸 [M]. 罗耀杰, 译. 北京: 国防工业出版社, 1960.
COLE P. Underwater explosion[M]. LUO Y J, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 1960 (in Chinese).
- [19] 姚熊亮. 舰船结构振动冲击与噪声 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
YAO X L. Vibration, shock and noise of ship structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007 (in Chinese).
- [20] GEERS T L, HUNTER K S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111(4): 1584–1601.
- [21] 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 [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 537: 387–413.
- [22] KLASEBOER E, KHOO B C, HUNG K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(4): 395–412.
- [23] 姚熊亮, 屈子悦, 姜子飞, 等. 舰船舱内爆炸载荷特征与板架毁伤规律分析 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(3): 140–148.
YAO X L, QU Z Y, JIANG Z F, et al. Analysis on characteristics of blast loading and stiffened plate damage due to internal blast in ship[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 140–148 (in Chinese).
- [24] 张弩, 刘均, 李凯, 等. 舱内爆炸载荷下箱型梁船体节点结构强度分析 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(3): 39–45.
ZHANG N, LIU J, LI K, et al. Strength analysis of box girder joint structures with frames subjected to internal blast loading[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 39–45 (in Chinese).
- [25] 钱安其, 嵇春艳, 王自力. 水下爆炸荷载作用下水面舰船设备冲击环境预报方法研究 [J]. *舰船科学技术*, 2006, 28(4): 43–47.
QIAN A Q, JI C Y, WANG Z L. Prediction method of shock environment for equipments on water ship under water explosion[J]. *Ship Science and Technology*, 2006, 28(4): 43–47 (in Chinese).
- [26] 许军, 刘见华. 舰艇总体抗冲击设计分析 [J]. *船舶*, 2013, 24(6): 23–26.
XU J, LIU J H. Design and analysis of overall shock resistance for warships[J]. *Ship & Boat*, 2013, 24(6): 23–26 (in Chinese).
- [27] HAMMOND L, SAUNDERS D. The applicability of scaling laws to underwater shock tests[M]. Fishermans Bend: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1997.
- [28] ZHANG X C. Scaling law for experiment of underwater explosion with several independent geometrical scales [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2008, 12(3): 490–499.
- [29] 张效慈. 水下爆炸试验模型律的若干问题 [J]. *船舶力学*, 2009, 13(5): 783–787.
ZHANG X C. Some problems for model law of underwater explosion tests[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(5): 783–787 (in Chinese).
- [30] 张磊, 杜志鹏, 吴静波, 等. 200 t级浮动冲击平台水下爆炸试验低频冲击响应数据分析 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(3): 60–65.
ZHANG L, DU Z P, WU J B, et al. Low-frequency shock response data analysis of underwater explosion test of 200-ton class floating shock platform[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 60–65 (in Chinese).
- [31] 董忠臣, 宁永成. 舰艇抗冲击试验爆源引爆方法研究 [M]//汪玉. 实船水下爆炸冲击试验及防护技术. 北京: 国防工业出版社, 2010.
DONG Z C, NING Y C. Research on detonation method of naval ships shock test[M]//WANG Y. Technology of Ships Shock Test and Protection Against Underwater Explosion. Beijing: National Defense Industry Press, 2010 (in Chinese).