网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20160119.1455.018.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：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 Jianhu, ZHOU Xintao, PAN Jianqiang, 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.

舰艇抗爆抗冲击技术现状和发展途径

刘建湖[1]，周心桃[2]，潘建强[1]，王海坤[1]
1 中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082
2 中国舰船研究设计中心，湖北 武汉 430064

摘　要：抗爆抗冲击能力是舰艇生命力的重要组成部分，直接影响着舰艇战斗力的发挥，是一项影响全舰（艇）综合性能发挥的总体能力。与世界先进的舰艇相比，我国舰艇的抗爆抗冲击能力总体上比较落后，迫切需要全面提高。提高舰艇抗爆抗冲击能力需要从资源、技术和管理几个方面共同努力，其中技术提升是非常关键的一环，而技术途径对于技术工作的效率和效益具有很大影响。首先，从技术层面综述了国内外舰艇抗爆抗冲击技术和能力的现状与发展趋势，然后，分析了制约我国舰艇抗爆抗冲击水平提升的瓶颈问题，根据工作的轻重缓急程度，给出了提升舰艇抗爆抗冲击能力的技术途径建议，可为舰艇抗爆抗冲击研究、设计与评估工作提供参考。

关键词：舰艇；抗爆抗冲击；易损性；恢复性；生命力
中图分类号：U674.7+0　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.1673-3185.2016.01.007

The state analysis and technical development routes for the anti-explosion and shock technology of naval ships

LIU Jianhu[1], *ZHOU Xintao*[2], *PAN Jianqiang*[1], *WANG Haikun*[1]
1 China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China
2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: The Anti-Explosion and Shock Capability (AESC) of naval ships or submarines is a primary index that influences the comprehensive marine performance and is an important prerequisite of the survivability, which can directly affect the performance of combat effectiveness. The AESC of naval ships or submarines of our country is poorer than that of the developed countries and needs immediate and overall enhancement. The task involves resource assignment, technological development, and management measurement, where the technology is the key, and the technical routine is of vital significance. In this paper, some viewpoints are proposed on the technical routine of enhancing the AESC of naval ships or submarines. First, the status and the tendency of the AESC of inner and abroad naval ships and submarines are reviewed from the aspect of technology. Next, the key problems hindering the AESC enhancement are analyzed. Finally, certain proposals are presented for the technical routine of enhancing the AESC according to the works with different importance and emergency. In brief, the proposals serve as good references for the research, design, and assessment of enhancing the AESC of naval ships and submarines.

Key words: naval ship; Anti-Explosion and Shock Capability (AESC); vulnerability; recoverability; survivability

收稿日期：2015-06-13　　**网络出版时间：**2016-1-19 14:55
基金项目：国家部委基金资助项目
作者简介：刘建湖（通信作者），男，1963年生，博士，研究员。
周心桃，女，1969年生，硕士，高级工程师。

downloaded from www.ship-research.com

0　引　言

舰艇生命力的研究一直受到各海军强国的重视,多年来已投入了大量的人力和物力。舰艇生命力是战斗力的载体和基础,战斗力是生命力保障的根本目标,两者虽然存在支撑与被支撑的关系,但不存在孰轻孰重的问题,都是舰艇最重要的标志性能力。生命力是战斗力的基础和保障,没有生命力的支撑,战斗力就变成无皮之裘、无本之木。舰艇生命力主要由3个方面组成:易击性(含隐蔽性和武器对抗性)、易损性和恢复性。舰艇的易损性和恢复性均属舰艇抗爆抗冲击的范畴,因此舰艇抗爆抗冲击技术是支撑舰艇生命力提升的核心技术。

随着我国海军战略向中、远海推进,舰艇的抗爆抗冲击性能亟需提升。为了能够在提升舰艇抗爆抗冲击能力的过程中抓住要点、少走弯路、稳步发展,需要掌握舰艇抗爆抗冲击的现状,科学分析技术瓶颈和能力差距,提出全面提升舰艇抗爆抗冲击能力的技术途径。

1　舰艇抗爆抗冲击能力的实战价值

从美国学者Pusey[1]的观点来看,生命力技术包括23项内容,其中有14项基础性的工作涉及舰艇结构和设备的抗爆抗冲击,主要有打击致命性评估、破坏现象、破坏和失效模式、系统的响应、损伤数据库、剩余强度、损伤管制和快速修复等。

历史上的历次海战战例可以说明舰艇抗爆抗冲击能力对于实战的价值。在马岛战争中,英国的“谢菲尔德”号巡洋舰被一颗“飞鱼”导弹击中便导致沉没。而第二次世界大战(简称“二战”)中美国一艘叫做“拉菲”的军舰,排水量只有3 200 t,在冲绳海战中被日本的4枚炸弹和5架装满炸弹的“神风”飞机击中,却并没有造成致命的伤害,顺利返回军港[2],显示出了舰艇抗打击能力的极端重要性。自20世纪80年代后期以来,美国共有5艘军舰在波斯湾冲突和“沙漠风暴”行动中遭受到各种不同现代化武器的攻击,其中“斯塔克”号(FFG31)被反舰导弹击中,“塞缪尔”号(FFG58型)、“特里波里”号(LPH10)和“普林斯顿”号(CG59)、“科尔”号分别被水雷、鱼雷和恐怖小艇击中(图1),都没有造成致命的伤害,显示出了美国军舰较强的抗打击能力。

美国军舰之所以具有较强的抗打击能力,与美国自上世纪40年代以来利用在二战、越南战争、海湾战争和“沙漠风暴”行动中积累的大量实战资料和试验资料,始终不渝地坚持舰艇生命力的研究有着直接的关系。

(a) USS Tripoli-1991

(b) Cole-2000

图1　舷侧被炸后的破口

Fig.1　The damaged ship hull after struck

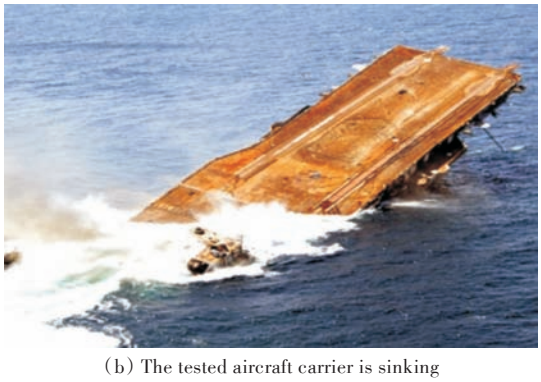
二战以后,为提高海军装备的战斗力和生命力,美、俄、英、德、荷、意等国家投入大量人力、物力和财力,对爆炸与防护技术的各关键领域进行了系统性的理论和试验研究,包括大量常规水中兵器的实船水下爆炸试验。此外,美国还对二战缴获的轴心国的300多艘水面舰船和潜艇进行了“面包师”、“比基尼岛”等多次核武器爆炸试验,以研究核爆炸对舰艇的毁伤效应。长期以来,北大西洋公约组织(NATO)大约每两年就要进行一次实船联合水下爆炸试验。美国每研制一新型舰艇,均会实施大量的各种尺度的模型爆炸试验,以验证其抗爆抗冲击措施的有效性和先进性,最后,其首制舰均须进行系列水下爆炸考核,合格后方能服役,不合格的则必须改进直至达到抗爆抗冲击要求,并在整个型号内更改固化。该要求已列入美国的国家规范[3]。

20世纪80年代,美国海军为了加强舰艇抗爆抗冲击技术的研究,充分利用相关方面的资料和信息成立了冲击与振动信息分析中心[1]。其功能是收集实战中和科研中有关爆炸、冲击与振动的信息资料以便向各有关从事生命力研究的单位提供服务,同时建立舰艇生命力数据库。

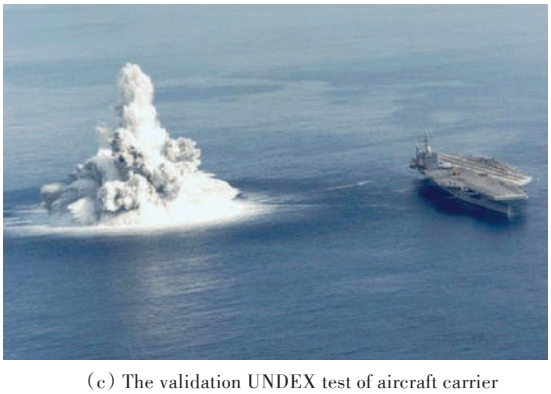
downloaded from www.ship-research.com

同时，在美国的退役航空母舰（简称“航母”）中，除少量用作博物馆以外，其他几乎全部作为爆炸试验的靶船，以验证新技术和新武器的效果，积累爆炸试验数据。2005年，“小鹰”级航母“美国”号退役后作为靶船，进行了鱼雷、巡航导弹和自杀性小艇等各种武器打击下的损伤、火灾控制等专项试验（图2），最终，炸沉于大西洋。

（a）A contact underwater explosion（UNDEX）test of aircraft carrier



（b）The tested aircraft carrier is sinking



（c）The validation UNDEX test of aircraft carrier

图2 美国航母开展的实船爆炸试验

Fig.2 Aircraft carriers are tested with explosion in America

2 国外舰艇抗爆抗冲击技术水平现状

2.1 国外舰艇抗爆抗冲击的整体水平和趋势

通过系统性的理论和试验工作，目前，以美国为代表的西方国家已经形成了比较系统的爆炸与冲击防护技术体系，并在此基础上形成了比较完整的舰艇结构/设备抗爆抗冲击设计和评估标准体系。

美国海军装备代表了国际上最高水准，其总体技术水平为：水面舰船能够承受龙骨冲击因子为0.66的水下非接触爆炸攻击而保持完全战斗力；潜艇能够承受壳板冲击因子为1.32的水下非接触爆炸攻击而保持完全战斗力；航母能够承受14枚鱼雷的水下接触爆炸而不沉；大型水面舰能承受3枚鱼雷的水下接触爆炸而不沉，承受3枚对舰巡航导弹的攻击后仍然能保持机动能力。另外，美国航母抗导弹打击的能力尚无准确的指标数据，但美国航母的一次事故可以说明其抗导弹爆炸的能力。美国“企业”号核动力航母在1969年承受了9枚导弹爆炸的严重后果，经过数小时的损伤管制处理，恢复了除飞机起降以外的全部功能。这件事间接说明美国航母抗导弹打击的能力非常强。

2.2 标准规范

自上世纪80年代以来，美国多家海军研究机构对舰艇的抗爆抗冲击进行了极其广泛、深入的研究，将舰艇的整船生命力指标提高到了与战斗力指标同等重要的地位，从舰艇概念设计时就贯彻到舰艇设计的整个过程中，并就生命力问题建立了很多规范和指导性文件。规范有：MIL-STD-2072，MIL-STD-2072（AS），MIL-STD-1629A，MIL-STD-2089和MIL-STD-2069等。指导性文件有：NAVMAT Instruction 3920.4A，DODINST 5000.2，NAVMAT Instruction 3900.16，OPNAV Instruction 9070.1/9072.2和NAVSEA 0908-LP- 000-3010（REV-1）等。舰艇设备冲击与振动考核试验方法有：MIL-S-901D，MIL-STD-810G，MIL-STD-798，MIL-DTL-28840和MIL-STD- 167A系列等。由于照顾到北约国家之间的差异，北约颁布的有关标准在条款执行的严格性方面留了很多操作空间，不如美国的标准严格。以德国为代表的西欧国家也十分重视舰艇抗冲击规范工作，于上世纪80年代制定了BV043/85标准来规范舰艇抗爆抗冲击试验和评估工作。英国的标准有英国国防标准军用品的环境试验—机械试验DEF STAN 07-55、冲击手册BR3021及英国皇家海军船用设备设计标准RNBASP1274/76等。

2.3 紧跟新型号/结构/设备开展抗爆抗冲击研究

西方海军强国经过二战的技术积累以及战后70年的研究发展，有关传统的船型结构和设备的抗爆抗冲击技术已经相当成熟，但随着舰艇新型号的研发、新装备的研制以及新材料的应用，又带来了一些新的抗爆抗冲击问题需要加以解决。近

期,主要研究的新问题包括:

1)先进的双层船体(Advanced Double Hull,ADH)概念研究[4]。双层船体由纵向板梁连接内壳、外壳而成,该结构形式显著增强了船体抵抗海洋载荷和武器打击的能力(图3)。

(a) Graphic depiction of ADH concept

(b) ADH structures in UNDEX and air explosion (AIREX) tests

图3　ADH结构爆炸试验[4]

Fig.3　Explosion test of ADH concept[4]

2)玻璃钢船体结构的抗爆研究[5]。研究内容既包括主船体结构,也包括上层建筑结构(图4)。

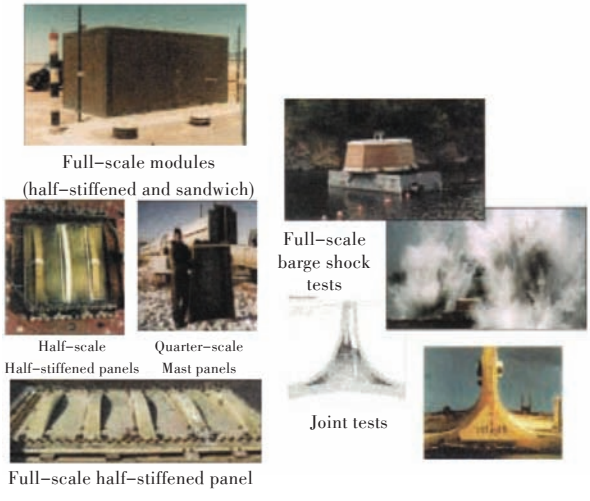
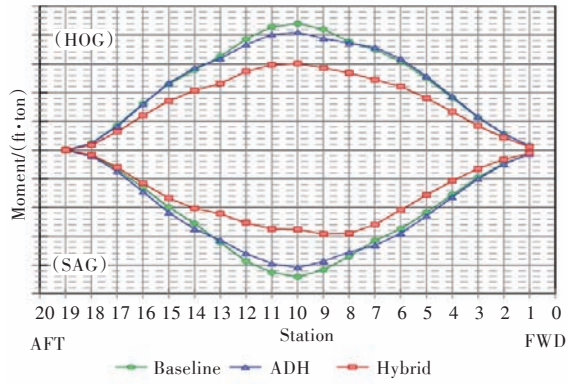


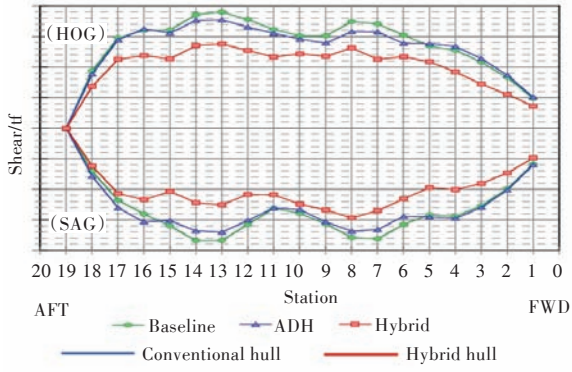
图4　复合材料结构的空爆、冲击试验[5]

Fig.4　Blast and shock tests of composite structures[5]

3)玻璃钢与钢的混合船体概念[6-7]。图5所示的试验研究结果显示,混合船体将鞭状响应降低了30%~40%,从而显著提升了生命力。



(a) DDG-51 UNDEX bending moment envelopes (KSF)

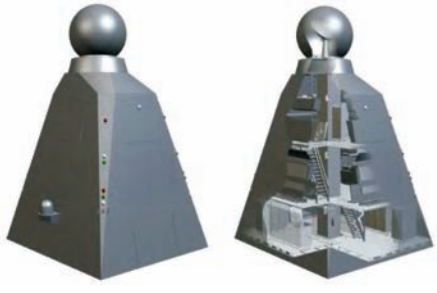


(b) DDG-51 UNDEX shear envelopes (KSF)

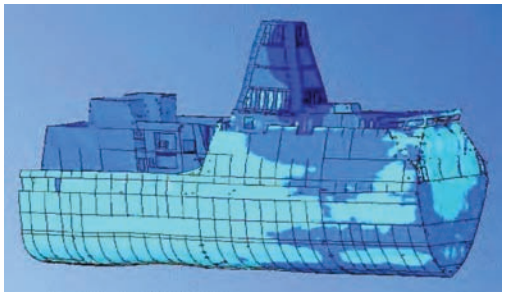
图5　钢与复合材料混合船体的水下爆炸鞭状响应比较[6-7]

Fig.5　Comparing the whipping responses of a hybrid hull with the steel hull to UNDEX[6-7]

4)舰艇集成模块桅杆(Integrated Modular Mast,IMM)抗爆抗冲击[8]。该桅杆结构集成了设备仪表、传感器和天线等,开展了包括空中爆炸、破片和水下爆炸的损伤研究及冲击环境分析与防护设计(图6)。



(a) Integrated modular mast



(b) UNDEX induced deformations analysis

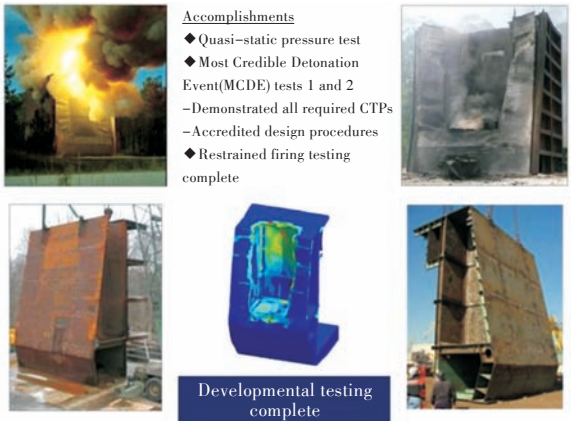
图6　为RNLN巡逻船设计的集成桅杆[8]

Fig.6　IMM for RNLN patrol ship[8]

5）箱型纵桁和双层舱壁结构抗爆研究。F124型护卫舰上装有3根首尾相连的纵向箱型梁和6道双层水密横舱壁，这种采用箱型梁和双层水密舱壁的构造使船体结构具备了更好的抗爆能力。

6）模块化舷侧导弹垂直发射系统对舰艇抗爆性能的影响[9]。据称，这样的设计可以保护舰艇内部舱室和设备，即使导弹在舷侧引爆造成外部结构破坏，也不会影响到内部的结构和设备，同时，也可大幅减小进水体积，从而提高剩余浮力和强度，提高生命力（图7）。

（a）DDG-1000 destroyer



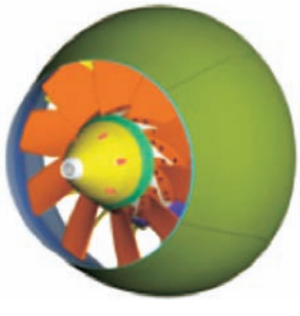
（b）Missile vertical launching system

图7 DDG-1000驱逐舰及其导弹垂直发射系统[9]

Fig.7 DDG-1000 destroyer and its missile vertical launching system[9]

7）多体船抗爆特性研究[10]。小水线面双体船、侧壁式气垫船和多体船的爆炸动响应及其损伤特性与传统的单体船存在很大的差异，因此开展了系统的研究。

8）复合材料混合结构泵喷推进器和舵的抗爆研究[11]。图8所示为英国“机敏”级潜艇的泵喷推进器。



（a）Unclassified representation of a pump jet propulsor

（b）Underwater shock testing

图8 英国“机敏”级潜艇泵喷推进器[11]

Fig.8 The pump jet propulsor of Astute submarine[11]

2.4 技术发展水平和趋势

到目前为止，美国在舰艇设计过程中使用了基于经验的工程化设备和系统失效判断法、毁伤体积法，并基于随机理论和数值计算评估方法等3种手段进行了抗爆性能评估，在交船（艇）时采用实射试验和评估方法（Live Fire Test and Evaluation，LFT&E）。实射试验评估是一个将试验、工程分析和仿真计算结合在一起进行舰艇生命力评估的有效方法[12]，其目的是在小批量生产之前纠正或弥补通过测试评估所发现的抗爆抗冲击方面的设计缺陷。实射试验项目一般包括交付的装备试验和替代物试验。根据试验结果和部分仿真结果开展装备的抗爆抗冲击能力与生命力的评定。

在世界海军强国的舰艇抗爆抗冲击技术中，符合性考核仍然以模拟实际冲击环境的试验考核为主，以实船试验、整机试验、分机试验和零部件试验的体系保证舰艇结构与设备的抗爆抗冲击性能。同时，在试验的基础上，结合计算力学的最新成果，开发高性能计算软件，提升舰艇抗爆抗冲击的分析和预报水平。代表性的成果是水下爆炸冲击分析程序（USA）和液固气瞬态相互作用分析软件（DYSMAS）。另外，在测量技术上，与舰艇抗爆抗冲击相关的电测和光学测量的探头与二次仪表向高精度、高可靠性及强环境适应性方向发展。

2.5 技术基础和能力的发展趋势

美国等海军发达国家的舰艇抗爆抗冲击技术已达到相当高的水平，这与其长期重视基础性的工作密不可分。美国自二战以来，对每一艘被攻击或试验受损的舰艇均仔细勘验受损情况，分析损伤得严重或不严重的原因，提出改进建议，其以这种方式积累了大量的基础数据并形成了基础数据库。同时，在结构动力学、计算力学、动态断裂力学和多场耦合力学等基础理论方面也开展了大量工作，支撑着舰艇抗爆抗冲击力学向前发展。

目前的研究热点有:

1)专为海军增强的Sierra力学软件(Navy Enhanced Sierra Mechanics,NESM)。

这是一款专为海军设计的、基于Sierra计算方式的多场耦合力学分析软件,与现有的流固耦合分析软件相比,它具有分布式网格管理、场管理和力学算法等独特的功能,适用于爆炸产物、周围介质与结构的相互作用。美国试图在开发该软件后部分替代物理实验,目前,正在进行严格的测试与考核。

2)近场动力学(Peridynamics)。

美欧正在努力将近场动力学应用于舰艇抗爆抗冲击分析之中。近场动力学是一种适于分析不连续变形,尤其是断裂的一种连续介质力学,它基于空间积分方程描述物质的力学行为,而不是采用通常的微分方程,避免了在处理不连续问题时的奇异性。该方法在研究结构爆炸冲击断裂扩展以及结构的失效方面具有良好的应用前景。

3)焊接工艺对冲击强度的影响。

船用钢、铝合金是船(艇)体结构的常用材料,其焊接后的结构,尤其在焊接热影响区,冲击强度下降将直接影响这个结构的抗爆抗冲击性能。美国近期在焊接工艺参数对结构爆炸的影响方面开展了系统的研究,以期获得优化的焊接参数,提高加工工艺水平。

4)电子元器件抗冲击计算和试验模拟。

全舰所有的信息和绝大部分控制活动均由电子元器件承担,其抗冲击设计及考核是舰艇抗爆抗冲击工作的重要组成部分。由于电子元器件和组件多种多样,新结构和新材料的应用一日千里,故给抗冲击试验模拟提出了新的技术需求;另外,其在舰艇上的安装位置千差万别,其冲击载荷的确定也非易事。因此,国际上对于电子元器件抗冲击计算和试验模拟持续给予了大量的人力和物力的投入,以满足舰艇总体抗爆抗冲击设计研究的要求。

5)试验和测量能力。

目前,美国进行实船爆炸试验时各类参数的实时测试通道达到了2 000多个;在设备冲击试验考核方面,建立了涵盖潜艇和水面舰船的完整体系,水面舰船安装设备的考核重量达到181 t,潜艇设备的考核重量达到300 t。在测量技术方面,形成了完整的爆炸压力、应变和加速度的电测与光测系统,基本满足了舰艇抗爆抗冲击技术的发展需求。目前,正在大力开展3D-DIC动态位移场测量、动态数字散斑法、超高速光纤应变测量和高速多普勒速度测量等技术的研究,以进一步提高强爆炸严酷环境条件下结构动响应的测量。

2.6　舰艇抗冲击技术活动与组织

作为世界上最强的军事大国,美国非常重视水下爆炸与防护技术的研究工作。自1947年以来,共进行了85届冲击与振动学术交流会,现在每年举办一次,参会的有来自美国本土、欧洲、亚洲和大洋洲的人员,进行超过200篇论文的交流。另外,每年还开办5场以上的专题培训,以普及基本概念、抗冲击设计和试验考核等专业知识为主,提升行业的整体认识水平和技术。目前,这项工作由美国冲击与振动交流中心(Shock and vibration exchange)负责运作,该中心挂靠在专门从事舰艇抗爆抗冲击试验研究、不隶属于军方的高冲击测试实验室(High Test Laboratory,HTL)。另外,美国水面武器研究中心的水下爆炸研究分部(Underwater explosion research division)也是重要的研究力量之一,一直在持续开展水下爆炸高效毁伤机理、水中舰艇目标易损性及毁伤评估、试验方法、测量评估标准等的研究。在该分部的统筹协调和技术推动下,完成了水下爆炸与防护技术理论体系工作,完成了航母、核潜艇、大型驱逐舰的所有海上实船爆炸试验,建立了系统、全面的舰船易损性数据库,有力地推动了美国海军装备的创新发展。同时,美国麻省理工学院、加州大学伯克利分校、伊利诺伊大学香槟分校、密西根安娜堡大学、西北大学、罗德岛大学和海军研究生院等高校也均在从事舰艇抗爆抗冲击的研究工作[13-14]。美国海军作战部长是舰艇抗爆抗冲击的责任人,舰艇特性和改进委员会是舰艇抗爆抗冲击工作的执行与支撑机构。

英国、澳大利亚、俄罗斯、德国、印度、加拿大、韩国、意大利和荷兰等国家均建有专门的舰艇抗爆抗冲击研究机构,负责水下爆炸技术发展规划、重大基础试验研究设施建设、专用测试技术研究、应用技术研究、设计和试验验收标准的制定以及重大试验研究项目的实施[15-16]。

3　国内现状以及与国际先进水平的差距分析

我国舰艇的抗爆抗冲击能力与国际先进水平有着较大差距,主要表现在舰艇的总体抗爆抗冲击水平比较低。在抗非接触爆炸方面,设备的抗冲击能力良莠不齐,整体抗爆能力不清,尤其在潜艇方面;在抗空中和水下接触爆炸方面,开展的研

究更少，技术比较落后。

3.1 国内现状

我国舰艇抗爆抗冲击技术研究起步晚、累计投入少，跟踪多、创新少，应用多、基础少，计算多、试验少，导致我国舰艇抗爆抗冲击性能与西方军事强国相比差距较大。虽然通过几十年的追赶，目前我国舰艇抗爆抗冲击能力已有一定的提升，但仍处于整体落后的局面。

以水面舰船抗爆性能为例，2007年，对一艘退役舰进行了实船水下爆炸试验，该舰的抗爆水平具有一定的代表性。试验表明，该舰在龙骨冲击因子很小时即出现轻微破坏、管道断裂漏水、照明灯熄灭；当龙骨冲击因子适当加大后，即出现中等程度破坏，自动操舵系统和导航电子设备部分失效，通海阀漏水，配电板漏电起火；当龙骨冲击因子较大时，出现了较严重的破坏，动力设备的减振元器件大量破坏、通海阀严重破坏、推进轴卡死、全舰失电。而美国和欧洲均要求全舰在龙骨冲击因子为0.66时尚能确保执行全部作战任务。因此，我国水面舰船抗爆的工程总体水平估计与美欧上世纪60年代相当，部分单项技术达到美欧上世纪90年代水平。但由于整体上全舰（艇）抗爆的系统性和均衡性较差，不同设备的抗冲击能力良莠不齐：新研设备虽然提高了抗冲击标准，选用设备仍然保持较低的抗冲击能力，从而导致舰艇整体抗爆性能不高。此外，我国潜艇从未进行过实艇水下爆炸试验，整体的抗爆抗冲击能力更不见底。而美国潜艇的抗爆要求比水面舰更高，估计差距更大。

3.2 基础和能力差距

舰艇抗爆抗冲击技术体系应当包含技术基础、应用技术、试验与评估技术、工程开发和验收评估等方面。目前，我国在舰艇抗爆抗冲击的基础研究方面，能全面跟踪国际上先进的爆轰理论、冲击波理论、流固耦合理论、材料动态本构关系和结构弹塑性理论的研究进展，全面掌握了国际动态。在跟踪国外先进理论的基础上，已经具备在基础理论领域自我创新的能力，目前已发展了三维水弹性理论、冲击波在自由面和底部传播的非线性理论、炸药能量输出结构控制理论、声学双重渐近方法、朱—王—唐本构关系等一批具有创新性的理论，与国外先进水平的差距相对较小。但在理论方法的集成形成商用化计算软件方面差距却非常大，广泛使用的商用软件都是国外的，缺乏自己的基础计算平台，制约了在计算方法和技术上的进一步发展。在舰艇抗爆抗冲击试验方面，已拥有了一系列的试验研究和考核设备，如各型冲击机、浮动冲击平台等，但试验考核能力还不如国外。我国舰艇装舰设备的试验考核能力只能做到50 t重的设备，美国已达到300 t，并且各家单位的试验考核的冲击烈度也不一致。另外，虽然设备的抗冲击计算都在开展，但计算结果的可靠性也不够，从而极大地制约了我国舰艇抗爆抗冲击水平的提升。

3.3 经验和创新的差距

我国的海军舰艇没有经历过大规模的海战，爆炸试验也开展得不多，因此经验和数据积累与海军强国相比差距很大。国内虽然具备了进行理论创新的能力和理论基础，但是创新的面还比较窄，大多数的基础理论还是沿用国外的理论成果，理论创新的深度和广度与先进国家相比有较大的差距。

3.4 技术普及和培训差距

我国舰艇抗爆抗冲击技术体系的基础比较薄弱，在组织上缺乏责任人和执行机构，对舰艇抗爆抗冲击工作的长期性和艰巨性认识不足，科研经费投入有限，并且由于没有共享的信息平台，低水平重复的研究工作也很多，导致资源的浪费。另很多从业人员并未经过系统的学习和培训，对舰艇抗爆抗冲击技术的一些基本概念并不清晰，致使有限经费的使用效率大打折扣。

3.5 技术开发和工程应用差距

我国在新型绿色环保试验技术、新船型技术抗爆问题、新型装备（如各种先进推进设备）的抗冲击问题、新型抗爆防护结构（如箱型梁、双层船体双层舱壁）的研究与设计、一体化集成上层建筑研究与设计及新型抗爆材料的研究等方面，与国外存在着较大差距。在工程应用方面，由于研究成果的有效性没有经过严格的试验考核和评估，很多技术在产品上得不到应用。

4 舰艇抗爆抗冲击技术的结构分析

4.1 舰艇抗爆抗冲击技术的构成

1）舰艇抗爆抗冲击总体技术。

该技术用于从总体上提出舰艇抗爆抗冲击要求、指标分配方案，为总体设计和评估提供方法、工具和基础数据，包括舰艇抗爆抗冲击指标论证、

分配与评估技术、总体布置优化和冗余设计技术、损伤管制技术、抗爆分舱设计技术、其他总体性能的兼容与权衡设计技术以及新技术应用的费效评估技术。

2）舰艇爆炸载荷预报技术。

该技术为舰艇在核/常规武器水下爆炸和空中爆炸以及常规武器舱内爆炸攻击下爆炸载荷的确定提供预报方法、工具和基础数据,包括核武器水下/空中爆炸冲击波预报技术、核武器水下爆炸引起的水波预报技术、常规武器水下爆炸气泡载荷预报技术、瞬态流固耦合分析技术、冲击波在结构表面的绕射技术、冲击波在实际海洋环境下的传播分析技术、爆炸载荷试验和测量技术等。

3）结构抗爆防护技术。

该技术为舰艇结构的抗爆强化、提高结构抗爆防护效率提供方法、工具和基础数据,包括结构爆炸损伤评估技术、防护结构构型/设计与评估技术、典型结构爆炸冲击破坏模式和判据研究、舱室防护结构设计技术、结构爆炸动力学试验与测量技术等。

4）舰艇设备和人员抗冲击技术。

为强化舰艇设备(包括管路)的抗冲击能力,提高对设备和人员的冲击防护能力提供方法、工具和基础数据,包括设备抗冲击设计与评估技术、设备冲击防护技术、设备冲击环境预报和控制技术、人员冲击损伤模式和判据、冲击防护元器件技术、设备冲击考核试验与测量技术等。

4.2　技术的输入

舰艇抗爆抗冲击技术发展的动力在于提升舰艇在高水平实战对抗条件下的生命力需求,舰艇新船型、新装备的产品升级换代不断对舰艇抗爆抗冲击技术提出新的需求;同时,材料学、力学、测量技术和计算机技术等基础学科的发展,以及新材料、新结构的应用为本技术的发展提供了科学基础。

4.3　技术的输出

舰艇抗爆抗冲击技术的输出是建立舰艇抗爆抗冲击技术体系和能力,包括设计方法、设计判据、评估方法、试验和考核方法、基础数据和数据库;应用这些技术和能力解决实际工程问题,在开发出高抗爆抗冲击能力的舰艇产品的同时进一步提出提高技术及装备水平的基础问题,以满足不断增长的实战对性能的需求。舰艇抗爆抗冲击技术的输入输出结构如图9所示。

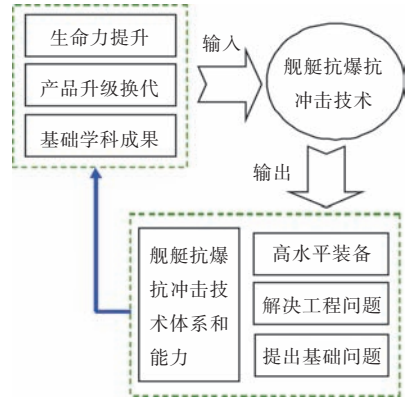


图9　舰艇抗爆抗冲击技术的输入输出结构

Fig.9　The makeup of input and output of naval ships anti-explosion and shock technology

5　瓶颈分析

5.1　结构接触爆炸防护设计与评估

舰艇无论是被空中还是水中兵器攻击下的接触爆炸损伤,其结构的损伤机理均十分复杂,不仅涉及到爆炸的损伤效应评估,还涉及到如何应用结构、空间及质量等资源,使接触爆炸产生的破坏效应降低到最小。我国在这方面的技术非常薄弱,迫切需要发展舰艇在空中和水下接触爆炸作用下的防护结构设计与评估技术。制约结构抗接触爆炸防护设计与评估的关键技术体现在:高强载荷测量技术、多层次爆炸载荷耗散技术和多模式结构毁伤分析技术、结构爆炸损伤判据等。

5.2　结构抗导弹穿透设计与评估

由于舰船水上部分的重量受到严格限制,现代舰船要使用传统的厚装甲来防护对舰导弹的穿透在重量上是难以承受的。而大型水面舰船的关键舱室又必须要具备对导弹的防护能力,一旦导弹在关键舱室爆炸,后果不堪设想。因此,必须寻找新的防护方式,综合利用结构的不均匀性和空间来实现对导弹穿透的防护。这项技术涉及到多种结构动力学和运动学的理论,以及多结构参数对防护效果的影响规律等难题,而国内对于这项工作的研究还基本空白,是大型舰船重要舱室防护设计的关键问题。

5.3　轴系抗冲击设计与评估

轴系是舰艇动力系统的重要组成部分,轴系的冲击安全性直接关系到舰艇动力系统的可靠性和安全性,是舰艇生命力的重要组成部分。国内在一系列实船水下爆炸试验中,多次出现爆炸距离较远、大部分设备工作正常,而推进轴系卡死的

现象，使舰艇无法机动，导致舰艇基本丧失战斗力。由于轴系难以实现冲击载荷的隔离和防护，成为舰艇抗爆安全性的薄弱环节，必须引起足够的重视而予以提高。轴系抗冲击问题极其复杂，涉及到多点冲击输入环境、滑动轴承冲击特性、轴系—轴承—支撑结构弹塑性耦合响应、冲击破坏判据、轴系—轴承座—舱壁—设备基座之间的强度和刚度匹配性设计等多项关键技术难点，国内在轴系的抗冲击设计方法、设计验证和装舰前的试验考核等方面还缺乏有效的手段，导致轴系抗冲击技术水平不高。

5.4 结构抗舱内爆炸设计与评估

导弹穿透舷侧外板后在舰艇舱内爆炸，会产生冲击波、破片和准静态压力等多种载荷，造成舰艇的大面积严重破坏，是舰艇舱室结构抗爆设计的一个关键问题。但目前对于这方面的研究很少，尤其是对于舱内爆炸载荷以及舱室结构的破坏模式、抗爆结构强化等方面的研究还鲜有高水平、可靠的创新性成果可供应用，严重影响舰艇抗舱内爆炸水平的提高。

5.5 重大设备抗爆抗冲击设计与评估

舰艇上的重大设备一般是与动力和武器相关的大型设备，如核动力装置、燃气轮机、导弹发射装置、舰炮和大型雷达等，这些设备均是体现舰艇生命力和战斗力的核心设备，一旦失效就会产生极大的影响。而这些设备的结构以及在爆炸冲击条件下的损伤机理均十分复杂，在缺乏可靠的整机试验考核和实船试验验证的基础上，完成可靠的抗爆抗冲击性能设计和评估非常困难，需要通过深入地研究冲击载荷在安装基础、机脚、零部件之间的传递特性，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，在缺乏整机试验条件时，形成重型设备抗冲击设计与评估方法。

5.6 人员冲击损伤阈值和防护

人员是舰艇执行任务的主体和灵魂，人员损伤预报和防护方法对于保持舰艇战斗力至关重要。我国在人员冲击防护研究方面虽然积累了不少经验与试验数据，但不完整、不全面，如国家军用标准《水面舰艇冲击对站姿人体作用安全限值》也局限于垂向冲击情况，没有坐姿和卧姿的数据。在冲击损伤机理和阈值方面，对颅脑、脊柱、胸腹、神经、内脏器官和各类关节损伤的研究均未达到实用化的程度，导致我国舰员在实际战斗条件下的损伤阈值不清，引起舰员在冲击损伤后的战斗力的评估缺乏可靠的依据。另外，在三维复合冲击载荷作用下，人体的耐受性、在由爆炸引起的强声波和次声波作用下的耐受性方面的研究需要深入。

5.7 舰艇结构在爆炸作用下的冲击响应特征

舰载设备的冲击环境是抗冲击设计、试验和评估的载荷输入，是进行全舰抗爆抗冲击性能的基础数据。而舰艇结构在爆炸作用下的响应特征以及与设备的相互作用特性是决定装舰设备冲击环境的基础。我国舰艇设备抗冲击设计和考核的冲击环境数据主要来自于国外的资料。由于没有完全掌握舰艇在水下爆炸、空中爆炸和舱内爆炸条件下的结构响应及其传递时域和频域特征，不了解舰艇设备的重量、频率和阻尼对船体结构的反作用量化规律，导致既对国外的数据和计算方法存在诸多疑问，又无法自己建立起科学依据充分、整体协调一致、符合我国国情的舰艇设备抗冲击设计和考核的冲击环境要求，严重制约了我国舰艇设备抗冲击能力的根本提高。

5.8 舰面系统抗冲击设计与评估

舰面电子信息系统是舰艇的“眼睛”，暴露在外部，加上其功能的特殊性，在作战时扮演着极其重要的角色，因此战时也必将成为对方攻击的首选目标，一旦失效，将严重影响战斗力。舰艇的舰面电子系统由雷达、天线等构成，其结构均力求质轻而强度高，大多柔度较大，极易与舰艇结构的低阶模态耦合而造成损伤。它们不但会受到安装基础的冲击载荷，还会受到空中爆炸冲击波和飞片载荷，破坏机理复杂。但我国在舰面系统防护方面所开展的工作甚少，对其在战时的敌方攻击损伤模式、损伤规律均不清楚，损伤评估方法也未建立起来，可能会严重影响其战时功能的发挥，需要加大研究力度。

5.9 潜艇实艇抗冲击试验技术

潜艇抗爆抗冲击水平的提升必须依靠潜艇实船冲击试验，不实施实艇水下爆炸试验，潜艇的生命力难以有实质性的提高。和水面舰船爆炸试验相比，潜艇水下爆炸试验的难度要大很多，在潜艇抗冲击能力评估、有波浪和海流条件下实施潜艇的水下可靠定位、药包可靠定位、试验后可靠回

收、意外情况处理等方面均需要有力的技术支撑,而我国在这方面既没有基础,又没有开展实质性的深入研究,致使我国长期以来不具备技术能力实施潜艇的水下爆炸试验,严重制约我国潜艇抗爆技术水平的提高。

6　全面提高舰艇抗爆抗冲击能力的技术途径建议

6.1　摸清家底,补齐“短板”

我国舰艇抗爆抗冲击性能提高最紧迫的问题不是技术落后,而是家底不清,不清楚主战及辅助舰艇的整体以及各系统和设备的抗爆抗冲击能力,给部队的备战和损伤管制以及功能恢复造成了很大的不确定度和困难。近年来的几次实船水下非接触爆炸试验表明,我国装舰设备的抗冲击能力良莠不齐,一些对执行使命任务非常关键的抗冲击A类设备的抗冲击能力也非常差,会导致舰艇过早丧失机动能力和战斗能力。究其原因,是在我国舰艇发展的过程中,早期主要以解决产品的有无为目标,对抗冲击性能重视不够。因此,目前舰艇上的很多设备既没有经过冲击试验考核,也没有通过严格的计算考核。因此建议:

1)梳理出装舰(艇)设备中尚未按标准冲击试验考核过的抗冲击A类和B类设备清单,在相关的型号研制中安排专项补充试验,掌握实际情况,摸清设备,尤其是减振元器件、浮筏系统、雷达天线和超过一定重量的重型设备等的抗冲击能力。对不满足抗冲击要求的设备,安排抗冲击强化和改进抗冲击防护的工作,尽快满足抗冲击标准,补齐设备抗冲击“短板”。

2)由于我国潜艇尚未开展过实艇水下爆炸试验,整艇的抗爆能力完全不清,而抗冲击薄弱环节对潜艇的战斗力具有重大影响。因此,需利用退役潜艇开展潜艇水下爆炸试验,通过对试验结果的分析和评估,发现薄弱环节;通过与现役潜艇技术状态的比对,摸清现役潜艇系统级的抗冲击能力,提出改进措施,实施现役潜艇抗冲击改进计划,全面提升潜艇抗爆抗冲击能力,同时带动潜艇实艇抗冲击试验技术的发展。

3)由于我国水面舰船抵抗对舰导弹攻击的能力基本不清楚,迫切需要利用退役水面舰船开展对舰导弹攻击损伤的科学研究试验,以及由攻击引起的火灾控制和损伤修复试验,其性质类似于美国的“美国”号航母的爆炸试验,以评估水面舰船在对舰导弹攻击下的损伤模式和损伤程度,发现舰艇的抗穿甲、抗舱内爆炸薄弱环节,验证计算模型,提出改进措施和新型抗爆结构,以应用于新研舰艇。

6.2　搭建平台、夯实基础

舰艇抗爆抗冲击是一项技术性很强的工作,涉及面广、理论深、技术含量高,需要高水平的基础研究、技术研发和工程开发团队的协同努力、共同促进、共同提高,需要一个集技术开发、技术交流和培训、数据收集和共享、技术验证和评定于一身的公共平台。建立服务于全行业的舰艇抗爆抗冲击技术中心,具体功能包括:

1)拥有较为齐全的水下爆炸、空中爆炸、舱内爆炸和海上爆炸试验设施及开放式的重点实验室,重点开展前瞻性、基础性研究和重大技术的研究,关注近场动力学、塞拉力学等前沿结构冲击动力学的研究进展,建立具有自主知识产权的、由大型数据库支撑的综合性舰艇抗爆抗冲击计算、分析和评估软件系统,夯实技术基础,推动技术发展。

2)承担培训责任,每年面向行业定期培训舰艇抗爆抗冲击的基础理论、应用技术并介绍最新进展和技术动态,提升业内人员的技术水平。

3)负责舰艇抗爆抗冲击信息的收集、分析和共享,建立服务于全行业的舰艇抗爆抗冲击数据库,包括试验模型、试验数据、理论模型和计算方法等。

4)具备新技术、新产品进行客观公正的评估/评定的试验测试能力和理论分析能力。

6.3　重点突破、全面推广

经过50多年的发展,我国已经具备了一定的舰艇结构和设备的抗爆抗冲击设计、计算和试验能力,能够在重点型号产品的研制中实现抗爆抗冲击性能的跨越式提升。拟在水面舰船和潜艇中各选择一型重点型号,将其抗爆抗冲击指标作为重要的硬指标考核,从方案设计阶段就把提升其抗爆抗冲击能力作为重点目标之一。通过顶层设计、平衡迭代、综合评估,不断应用新思路和新技术,不断消除短板,尤其是核动力系统、主推进系统、操船系统和舰面系统等,实现抗爆抗冲击能力的跨越式提升。同时积累应用经验,完善应用技术,向其他型号推广,全面提升装备的抗爆抗冲击水平。

6.4 成果共享、保护创新

舰艇抗爆抗冲击技术的进步,需要源源不断的创新性成果。创新性研究成果的取得均花费了巨大的人力和物力,来之不易,应该尽快以标准的方式推广应用,通过全行业共享来发挥最大的军事效益。从另一个方面看,创新成果只有得到保护,才是尊重创新性劳动,才会有更多的人投入到创新性工作中,才会有更多的创新型成果出现。应杜绝抄袭和剽窃,拒绝对科研成果的强抢豪夺。建议建立严格的全行业舰艇抗爆抗冲击成果检测鉴定制度和登记制度,所有研究成果需先经过检测和评估,得到客观的性能指标认定后再进行登记,将成果所使用的原理、方法和效果均登录在数据库内,供业内相关人员查阅和参考,推动技术的发展。

6.5 统一标准、严格考核

我国的舰艇抗爆抗冲击标准长期以来比较混乱,舰艇本身没有严格的抗爆抗冲击标准,导致舰艇上安装的设备系统执行的抗冲击标准五花八门:有舰艇设备的标准,有电子产品的标准,有航空的标准,有航天的标准,也有核动力的标准等。这些标准都有抗冲击指标,但指标的严酷度差别甚大,极易产生"短板"效应。同时,我国舰艇设备的抗冲击要求也存在很大的漏洞,抗冲击试验标准只有冲击试验机及试验方法,没有对冲击机所模拟的环境条件提要求的标准,导致冲击机的环境差异较大,即使设备通过了冲击试验,其抗冲击性能差异也很大。近年来,业内有参考BV043标准,提出了不同于GJB150的试验方法,两个标准之间在制定标准的思路、计算方法、冲击环境施加位置和冲击合格性判据等方面的差异性尚没有经过评定,但已经在型号产品中应用,给型号产品的抗冲击评定的尺度造成了不利影响。由此反映出抗爆抗冲击标准应用的混乱情况。因此,需要统一的标准有:

1)舰艇抗爆抗冲击要求;

2)舰艇设备抗冲击试验考核方法;

3)舰艇设备抗冲击设计准则;

4)舰艇设备冲击考核试验装置要求和检测方法;

5)舰艇设备抗冲击性能计算评定方法等。

同时,舰艇抗爆抗冲击的标准从产品的行政线和技术线都要制定严格的制度以保证其实施。

7 结 语

通过对国内、外舰艇抗爆抗冲击技术基础、技术发展和工程能力的现状与发展趋势的分析,对比了我国舰艇抗爆抗冲击技术和装备与国际先进水平的差距,从该技术的结构体系上分析了我国的主要瓶颈技术,从而提出了全面提高舰艇抗爆抗冲击技术水平的6点建议,可以作为推动舰艇抗爆抗冲击技术发展规划和决策的参考。

参考文献:

[1] PUSEY H C. Technical information support for survivability[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1983, 53(1): 21-31.

[2] SAID M O. Theory and practice of total ship survivability for ship design[J]. Naval Engineers Journal, 1995, 107(4): 191-203.

[3] HERING F S. United states fleet survivability of US naval combatant ship[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1983, 53(1):16-20.

[4] 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.

[5] POTTER P. Surface ships put composites to work[J]. AMPTIAC Quarterly, 2003, 7(3): 37-40.

[6] BARSOUM R G S. The best of both worlds: hybrid ship hulls use composites and steel [J]. AMPTIAC Quarterly, 2003, 7(3): 55-61.

[7] BARSOUM R G S. Hybrid composite and metallic hulls-affordability, stealth, strength and durability [C]//ASNE Engineering the Total Ship (ETS) Symposium. McLean, VA, 2008.

[8] VAN AANHOLD J, PEL S, KAPPEL E, et al. Design for UNDEX survivability of an integrated modular mast [C]//78th Shock and Vibration Symposium, SAVIAC Unlimited Distribution Proceedings. Philadelphia, PA, 2007.

[9] DOWNEY J. DDG 1000 class destroyer[R]. The American Society of Naval Engineers (ASNE), Flagship Section, 2013.

[10] PARK J W. Underwater explosion testing of catamaran-like structure vs. simulation and feasibility of using scaling law[D]. Korea: Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2012.

[11] BANKS S. Submarine propulsor technical developments, opportunities and challenges [C]//Warship 2011: Naval Submarines and UUVs. Bath, UK,

(下转第71页)

acoustics,2009,(3):177-197.

[111] BOGEY C,BAILLY C,JUVÉ D. Noise investigation of a high subsonic, moderate Reynolds number jet using a compressible large eddy simulation[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2003, 16(4):273-297.

[112] BOGEY C, BAILLY C. Decrease of the effective Reynolds number with eddy-viscosity subgrid-scale modeling[J]. AIAA Journal,2005,43(2):437-439.

[113] PIOMELLI U, STREETT C, SARKAR S. On the computation of sound by large-eddy simulations[J]. Journal of Engineering Mathematics,1997,32(2/3):217-236.

[114] SEROR C, SAGAUT P, BAILLY C, et al. Subgrid-scale contribution to noise production in decaying isotropic turbulence[J]. AIAA Journal,2000,38(10):1795-1803.

[115] HE G W,WANG M,LELE S K. On the computation of space-time correlations by large-eddy simulation [J]. Physics of Fluids,2004,16(11):3859-3867.

[116] 孟堃宇. 基于大涡模拟的潜艇脉动压力与流噪声性能数值计算[D]. 上海:上海交通大学,2011.

[117] 张允,傅慧萍,缪国平. 基于大涡模拟的开孔潜体流噪声数值模拟[J]. 上海交通大学学报,2011,45(12):1868-1873.

ZHANG Yun, FU Huiping, MIAO Guoping. LES-based numerical simulation of flow noise for submerged body with cavities[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2011,45(12):1868-1873.

[118] DEARDORFF J W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 41(2):453-480.

[119] WANG M , MOIN P. Dynamic wall modeling for large-eddy simulation of complex turbulent flows [J]. Physics of Fluids,2002,14(7):2043-2051.

[120] SPALART P R , JOU W H , STRELETS M , et al. Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES approach [C]//Advances in DNS/LES, Conference of 1st AFOSR on DNS/LES. Columbus:Greyden Press,1997.

[121] HEDGES L S , TRAVIN A K , SPALART P R. Detached-eddy simulations over a simplified landing gear[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2):413-423.

(上接第56页)

2011.

[12] 张树吉, 凌如镛, 蔡秀生. 舰船生命力技术的若干新概念[J].舰船科学技术,1996(5): 1-7.

[13] HARNEY R C. Broadening the trade space in designing for warship survivability [J]. Naval Engineers Journal, 2010, 122(1): 49-63.

[14] COPLEY S M, REUTZEL E W, MERDES T A, et al. Design, manufacturing, and testing of an improved watertight door for surface ships[J]. Naval Engineers Journal, 2010, 122(4): 93-103.

[15] EVANGELOS K. Optimization of the survivability of naval ships by genetic algorithms[C]//3rd Euro-Conference on Computer Applications and Information Technologies in the Maritime Industries. Siguenza, Spain, 2004.

[16] CULLIS I G, SCHOFIELD J, WHITBY A. Assessment of blast loading effects-types of explosion and loading effects[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(9): 493-503.