

哈尔滨工程大学“十一五”研究生教材建设专项资金资助

舰船结构毁伤 与生命力基础

JIANCHUAN JIEGOU HUI SHANG
YU SHENGMINGLI JICHU

张阿漫 郭君 孙龙泉 编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

第1章 绪论

进入21世纪以来,随着经济和军事实力的增强,各国纷纷加强了对海洋及海洋资源的开发和利用,制定了适合于本国的海洋战略计划。中国是一个拥有300多万海洋国土的海洋大国。为保护国家海洋的完整和主权的独立,开发和利用海洋资源,迫切地需要发展强大的海军。舰船作为海军的中坚力量,在历次海战中都起着极其重要的作用,研究舰船的毁伤机理与防护结构对提高舰船的抗爆抗冲击性能和生命力尤为必要。

1.1 舰船毁伤与防护概述

舰船在历次海战中都起着举足轻重的作用,然而在服役期间却也极易遭受到敌方武器的攻击,比如沉底水雷、深水炸弹、鱼雷、半穿甲反舰导弹等。在现代海战中,反舰武器作战时立体性、突然性、隐蔽性等特点成为现代舰船面临的日益严重的威胁,舰船的生存环境愈加恶劣,舰船在战时面临的威胁日益多样化、复杂化。从图1.1.1(本章及后续章节的部分图片来源于互联网,对相关知识感兴趣的读者可以进行了解)可以清楚地看到2000年美国海军阿利·伯克级驱逐舰“科尔”号在中东遭受恐怖分子炸弹袭击后所造成的毁伤效果。图1.1.2为水下爆炸导致的舰船折断。

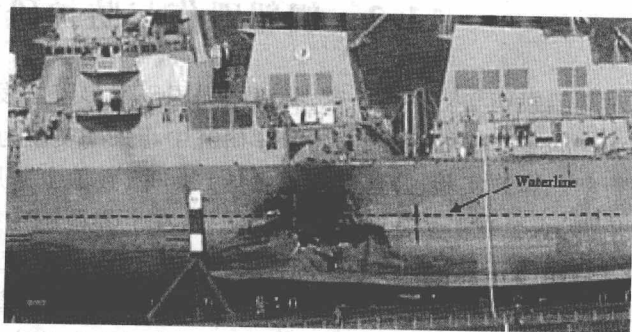
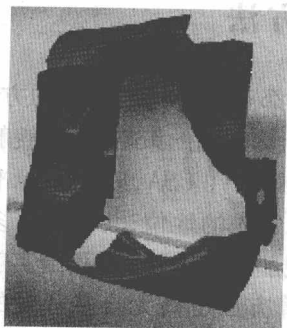


图1.1.1 美国海军“科尔”号驱逐舰在也门遭受恐怖袭击所造成的毁伤

造成舰船毁伤的原因主要有以下三种:接触爆炸,如遭受导弹、激光炸弹直接攻击,造成舰体损伤及舰船机电设备损伤;水中非接触爆炸,如遭受鱼雷、水雷爆炸的冲击,主要破坏舰载机电设备;自身武器发射时反冲击造成的毁伤,其会影响到舰载机电设备的正常运转。在这其中,接触性爆炸和水中非接触性爆炸对舰船的毁伤的影响占主要地位,但是自身武器发射时反冲击造成的毁伤,也是一个不可忽视的因素。

接触爆炸形成高强度的局部破坏,会波及部分舱内设备,但大部分能量耗于船体结构的损伤,严重的情况下使船体进水,甚至沉没;非接触爆炸是指船体位于水下反舰兵器爆



图 1.1.2 水下爆炸导致舰船折断

炸产生的气泡半径之外,爆炸冲击作用以水为介质传播到船体的湿表面上。由于水的密度远大于空气密度,与空中爆炸不同,水下非接触爆炸产生的冲击波、气泡脉动和滞后流等复杂冲击作用遍及整船,除造成船体结构冲击损伤外,往往会造成舰船设备、人员的大范围破坏或伤亡,严重影响舰船的生命力和战斗力。

如何有效地抵御各种战术武器的攻击,保证舰船在受到各种武器攻击条件下产生的破损或毁伤程度被控制在允许的状态和范围内,提高舰船的生存能力和作战能力这些都是舰船结构毁伤与防护所研究的问题,也是世界上普遍关注的问题。

防护结构作为各种水面舰船抵御各种战术武器攻击的有效手段,一直受到各个国家的重视。尤其是舰船内部的各种动力设备、电力设备、武器装备是舰船安全性和战斗力的有效保证,典型防护结构的设置能够对上述设备起到有效的保护作用。

1.2 舰船毁伤与防护研究方法

对舰船毁伤与防护的研究,各海军强国历经多年的发展,都有一套行之有效的方法。美国海军有着严格的标准,美国海军研究中心采用实验为主计算为辅的策略,对每艘舰船都进行实船爆炸实验,并建立实船爆炸数据库,数值上采用专用软件 USA,以 MIL 标准为校核依据,直至舰船达标后才允许其服役,在世界范围内处于领先的地位;北约国家多结合部分实船爆炸实验和各通用数值软件,按照 BV 标准校核舰船的安全性;而我国实船海上实验方面才刚刚起步,尚未形成一套规范及标准,数值计算方面也尚无自主开发的软件,多采用他国开发的通用软件,但是也逐渐走向实验为主,数值计算为辅的道路。

1. 试验法

试验法主要有实船爆炸试验、模型试验。

1) 实船试验

进行实船试验的目的主要是考核舰船遭到毁伤时能否满足研制总要求规定的技术指标,验证船上主要设备抗冲击性能及抗冲击措施的有效性。实船爆炸试验是一种带有破坏性的试验,往往造成船体、结构或船上机械、设备的损坏,严重时导致舰船失去战斗力或沉没,通常分为远场的验证性实船试验和近场的对比性实船试验。如图 1.2.1 及图 1.2.2 所示分别为美国和我国进行的水下爆炸实船试验。

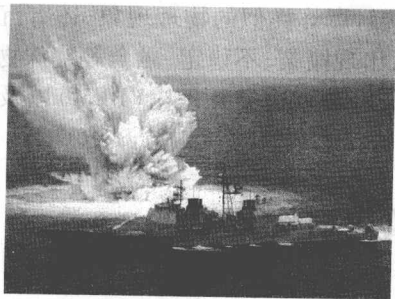


图 1.2.1 美国驱护舰海上实船水下爆炸试验

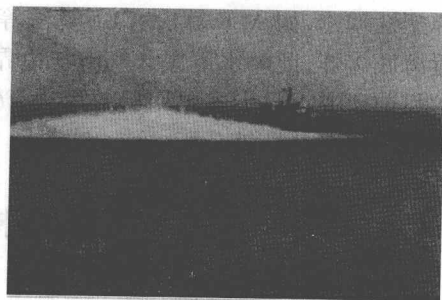


图 1.2.2 我国某次大规模实船水下爆炸试验

2) 模型试验

模型试验是指将实船按几何相似、动力相似等相似原理,缩小一定比例制成模型,同时将炸药当量也相应减小,并在试验水池中进行的试验。由于花费较少,试验开展灵活,因而在研究中得到了广泛的运用。

但是若采用水下爆炸缩尺比模型试验,则受到水下爆炸相似理论的限制。缩比试验涉及到结构动力学、材料非线性以及水下爆炸载荷等相似问题,由于模型加工工艺、试验条件等因素的约束,即使是模型与实船的缩尺比较小,也难以保证船体结构、材料以及载荷均完全满足相似准则。由于水下爆炸模型试验属于瞬态强非线性动力学相似问题,至今人们尚未找到相似规律,将模型试验的结果推广到实船。

2. 数值仿真方法

实船试验需要大量的费用和时间,而模型试验存在着一定的不足之处,试验次数极其有限,难以得到从概率统计学角度看来有意义的试验结果;而计算机建模、仿真的巨大发展又为数字化的虚拟研究提供了广阔的空间。因此,不仅发展中国家海军更依赖仿真来进行舰船毁伤与防护研究,而且诸如美国等发达国家海军也在大力发展基于仿真的虚拟冲击技术,以期能弥补现行冲击试验的不足,并期望在将来能替代冲击试验。

根据水下爆炸的物理现象及其对水中结构的毁伤特性,将水下爆炸分为接触爆炸(近场或近边界爆炸)和非接触爆炸(包括中近场和远场爆炸)^[1]。对于远场非接触爆炸,主要是冲击波与船体结构在弹性范围内相互作用,目前有认识一致的二阶双渐近法(DAA2)^[2]、声固耦合方法等^[3-4],而且实践证明,这些方法均有较好的精度。远场爆炸时,气泡对舰船的毁伤效应可以忽略,气泡的运动形态不受舰船的影响^[5]。

对于中近场爆炸,冲击波与船体结构相互作用产生片空化现象,出现气、液、固耦合效应^[6-7]。目前主要的理论和方法包括:弹塑性理论及任意拉格朗日欧拉算法(ALE)^[8]、声固耦合理论及相应的求解方法、流固耦合理论及二阶双渐近法等。现有的水下爆炸实验研究表明^[9],中近场气泡的毁伤威力不仅与装药有关,而且与作战环境(如装药距水面、海底的距离,海底特征等)以及目标特性(舰船本身的结构特性)有关,只有在一定的条件下,气泡的毁伤威力才能最大化,但迄今为止,水下爆炸气泡对舰船结构的毁伤效能仍未被有效利用。

随着精确制导武器的快速发展,如鱼雷等武器可贴近船体表面爆炸,即接触爆炸,接触爆炸冲击压力可达 GPa 量级,接触面出现流动、破碎^[10-13],与中远场爆炸在机理上存在着很大的差别,前者属于爆炸动力学范畴,后者属结构动力学范畴。目前仍采用大变形

的弹塑性理论,如 ALE 算法、CEL 算法等。与鱼雷接触爆炸类似的物理现象,还有沉底水雷近海底爆炸,此时水下爆炸气泡与边界相互作用,出现撕裂、不稳定、融合等特殊物理现象。目前研究人员大多采用绝热假设、流体有限元(FEM)、边界元理论(BEM)以及相应的求解方法进行计算分析。

1.3 舰船结构毁伤效应研究现状

1.3.1 试验研究现状

水下爆炸对结构的破坏主要是水下爆炸冲击波和脉动压力波作用的结果,作用时间短,过程复杂。水下爆炸的试验测试方法主要有3种,包括:水下爆炸高速摄影技术、水下爆炸载荷测试技术和水下爆炸载荷作用下结构动态响应的测试技术^[14]。根据试验对象的不同,试验研究又可以分为模型试验和实船试验两种。

由于水中目标一般由板、壳组成,因此在水下爆炸的模型试验中一般考察圆板或方板在水下爆炸冲击载荷作用下的动态响应。国内外学者对板、壳结构进行了大量的试验研究,主要集中在板、壳结构的动响应和毁伤模式方面。在板、壳结构动响应方面,通过对固支方板进行水下爆炸试验,得到了不同部位的应变分布和位移分布值^[15-16]。根据能量守恒的方法,采用刚塑性本构模型,仅考虑膜力效应,在爆炸冲击波载荷作用下靶板变形的基础上,得出了四边固支方板在水中爆炸冲击载荷作用下的塑性动力响应解析解,通过对固支方板进行水下爆炸试验验证了解析解的正确性^[17]。在毁伤模式方面,通过对加筋板架结构进行水下爆炸试验,得到了加筋板架的四种毁伤模式:加筋板架塑性大变形、加筋板架首先产生边界拉伸撕裂、加筋板架首先产生边界剪切破口和加筋板架首先产生中间剪切破口。得到了不同毁伤模式之间的临界载荷值及从毁伤模式的角度提出了接触爆炸与非接触爆炸的判别条件^[18]。

实船水下爆炸试验属于破坏性试验,一般很少进行。据报道,美国曾对退役航空母舰进行了大量的实船爆炸试验,包括空中爆炸和水中爆炸,用以改进航空母舰的设计。意大利对退役的驱逐舰进行了6次水下爆炸试验,考察了水下爆炸对全船的破坏情况以及加筋板在爆炸载荷作用下的动态响应情况,并对1艘退役的2500t级的驱逐舰进行了实船水下爆炸试验,获得了舰船振荡效应下的振型和频率。世界主要海军强国在历次海战中积累了大量的宝贵数据,美国、俄罗斯等海军强国都认识到舰船遭到水下爆炸攻击后产生的严重后果,都投入了大量的精力开展水下爆炸对舰船的毁伤试验和研究,并不断完善军用规范的舰船抗冲击能力,以保证新研制的舰船具有良好的抗水下爆炸的能力。在我国,开展舰船水下抗爆抗冲击性能的研究与国外相比并不算晚,但由于实船试验需要大量的费用和时间,研究工作进展较慢,仅进行过少量几次实船试验。但通过实船试验得到了一些宝贵资料。

1.3.2 数值仿真研究现状

水下爆炸仿真主要进行水下爆炸对目标毁伤的物理、数学模型研究,建立水下爆炸边界条件处理方法;研究目标建模技术、水下爆炸数值建模技术;研究水下爆炸的计算方法、

仿真结果后处理技术。通过研究实现水中兵器爆炸威力以及舰艇抗爆抗冲击的数值模拟与全过程仿真。

有限元法是基于网格的数值方法,运动方程同邻近的网格形状无关,适合于形状复杂的计算区域,且便于编制通用程序。由于这些优点,有限元法在水下爆炸数值模拟中得到了愈来愈广泛的应用。但有限元法在分析涉及特大变形、奇异性或裂纹动态扩展等问题时遇到了许多困难,同时,复杂三维结构的网格生成和重分也是相当困难和费时的。近年来,随着计算机科学及仿真技术的发展,计算模拟方法的研究在规模和深度方面都取得了很大的进展^[19]。光滑粒子流体动力学被运用于水下爆炸计算,该方法与有限元程序结合使用可以解决水下爆炸数值模拟的一系列难题^[20]。另外,有限元方法采用的单元通常为低阶单元,在解决波的传播问题时会有较大的发散,要想得到准确的数值结果需要十分精细的网格,从而导致计算量很大,影响计算效率。谱单元作为一种高阶单元,可以不需要细化网格便获得收敛性,可以极大地简化计算,在保证精度的同时提高计算速度。

在水下爆炸数值建模技术方面,考虑流场大小、网格大小对计算结果的影响,发现在进行船体结构冲击载荷下的强度分析时,采用适当的局部流场是非常简单、精确的。在计算全船加速度响应时,采用局部流场计算时必须进行修正^[21]。考虑耦合法的选取及边界条件对计算的影响,指出用声固耦合算法模拟舰船水下爆炸是可行的,并提出了采用声固耦合算法进行水下爆炸数值模拟分析时应注意的方法和技巧^[22]。另外大量学者利用数值仿真方法从结构的变形损伤形式、能量吸收和冲击环境等方面研究了舰船结构在水下爆炸载荷作用下的破坏机理和响应特征^[23-25]。

1.4 毁伤评估和规范标准研究

国外十分注重毁伤评估和标准规范研究。1948年建立了美军《船用机器设备和系统强冲击规范》,该规范随着后续的不间断试验、改进和技术进步而一再进行修改,最初于1954年4月9日颁布的MIL-S-901B(海军)标准,1963年1月15日修改订正为MIL-S-901C(海军)标准,1989年3月17日再次修订为MIL-S-901D(海军)标准。以德国代表的东西欧国家也十分重视舰船抗冲击规范工作,在20世纪80年代制定了与MIL-S-901D相当的BV-4385标准来规范舰艇抗爆抗冲击工作。

与MIL-S-901军标相对应的是,美国同时还发展和建立了《美国海军舰船试验总纲》^[26],总纲规定:“对于战斗舰船,要将每一种舰级中的一艘做冲击试验。”美国之所以如此重视对舰船的冲击试验,是因为“战斗舰船的作战使用及模拟试验的经验表明,与舰上有效的负载相比,船员及船体具有固有的高度抗冲击能力,舰上采用高度精密的复杂系统已使设备增加了对强冲击的敏感度。”这段话表明的直接意义是,非接触水中爆炸虽然难以对舰船结构和人员造成致命的损伤,但却能对舰上精密的复杂系统构成严重的破坏。

关于实船爆炸试验方法、测试要点等,《美国海军舰船试验总纲》中都有明确的规定,例如炸药当量、爆炸次数、爆炸距离等是严格规定的。虽然对于美国实船爆炸试验详细的情况尚不可知,但有一点是肯定的,美国实船冲击试验一般分科研试验和考核试验:科研试验是利用退役舰艇进行破坏极限试验,同时为制定修改各种评估标准提供数据;考核试验时舰船一般处于航行状态,这试验状态不仅有利于考核舰船抗冲击性能,同时试验的组

织实施和测试技术也提出了相当高的要求。实船爆炸试验的目的在于暴露并改进舰船总体防护设计中的缺陷,在战时受攻击而不致其丧失生命力。正是由于进行了大量系统、科学而严谨的爆炸试验,使美国发展和完善了舰船抗冲击设计与防护技术,使各种规范标准保持了生命力。

我国在舰船水下爆炸冲击载荷、舰船结构冲击响应和舰用设备冲击响应等方面开展了大量研究工作,提出了多项仿真计算方法,具备一定的冲击仿真计算能力。但是,国内至今未能真正掌握舰船爆炸冲击流固耦合作用分析等关键技术,没有形成成熟的、经过试验验证的、标准化的舰船冲击防护优化设计、仿真评估方法、模型和软件,无法将仿真评估手段应用于舰船研制的各个阶段。

1.5 舰船防护结构研究现状

舰船不仅要有较强的作战能力,同时要有相应的生存能力,特别是在遭受敌方攻击条件下所具有的生存能力。设置防护结构能有效地抵御各种战术武器的攻击,保证舰船在受到各种武器攻击条件下所产生的破损或毁伤程度被控制在允许的状态和范围内,从而提高舰船的生存能力和作战能力。

目前防护结构型式主要有:箱型结构型式、多层舱壁结构型式、复合结构型式和夹层板型式。箱型结构型式是传统的防护型式,常见的有在甲板下或舷侧间设置箱型结构。水下舷侧防雷舱结构是舰艇多层舱壁防护结构形式的重点,大型水面舰船都设有专门的防雷舱结构,而对于现代中小型舰船则由于受到排水量限制通常不会设置这样的结构。普通的船舶一般为单壳或双层壳,它们之间用普通肋骨连接,Y型舷侧结构是指船体舷侧在物理模型上的双壳之间用横向Y字型板代替部分肋骨,借此提高舰船结构抗冲击性能,Y型舷侧结构是一种典型的复合结构型式。夹层板属于复合材料板的一种,它是由多层性能不同,厚度不一的板件叠和而成的叠和合成板。从材料科学的角度来看,夹层板可分为:复合材料夹层板,金属材料夹层板。从结构型的分类来看,夹层板按其芯层结构分为离散芯层夹层板和连续芯层夹层板。

1.6 舰船结构毁伤与防护展望

水下爆炸对舰船结构的毁伤是一个非常复杂的问题,理论研究有很大的局限性,主要有以下几个方面问题需要关注:

(1) 随着现代制导技术的发展,水下兵器直接命中目标的可能性越来越大,而水下接触爆炸对结构的毁伤问题的理论研究开展的还不够深入,这将是今后理论研究的一个关注点;

(2) 现代舰船抗水下爆炸冲击的能力与以往的舰船相比有了很大的提高,水下非接触爆炸对舰船的毁伤效应评定如果仍然依靠以往的标准就难以反映真实情况,因此有必要针对现代舰船在水下爆炸场中的易损特性制定新的毁伤准则;

(3) 现代弹药的一个发展方向是灵巧化,对于直接命中的小装药量战斗部对舰船结构的毁伤问题值得关注;

(4) 大中型船舶一般采用双层船底结构,而且有众多水密舱。对于水下灵巧弹药如何高效毁伤双层船底结构有待于进一步研究;

(5) 在结构载荷确定和传递方面,冲击波作用早期结构应力波与冲击波卸载段耦合问题值得关注。

数值仿真是研究水下爆炸对结构毁伤效应的有力工具,如何提高数值仿真的精度和效率是研究的关键问题,主要有以下几个方面值得关注:

(1) 水下爆炸涉及到爆轰波的形成、传播,爆炸及其作用和气泡脉动等问题,这需要比一阶更精确的高阶求解技术进行模拟;

(2) 通常情况下水下爆炸的数值仿真效率很低,主要原因是计算资源大多浪费在流体单元中,而爆炸冲击波在自由场中是球对称的,因此能够把一维场中的计算结果转化到三维场中继续计算的影射技术能大大提高计算效率。

参 考 文 献

- [1] 浦金云. 舰船生命力. 北京:海潮出版社, 2000.
- [2] Geers T L. Doubly asymptotic approximations for transient motions of submerged structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 64:1500 - 1508.
- [3] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军, 等. 基于 ABAQUS 软件的舰船水下爆炸研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(1): 451 - 455.
- [4] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军. 声固耦合方法在舰船水下爆炸中的应用. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, 26(6): 707 - 712.
- [5] 张阿漫. 水下爆炸气泡三维动态特性研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2006, 12.
- [6] Sprague M A, Geers T L. A spectral/finiteelement analysis of a frigate-like structure subjected to an underwater explosion. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195:2149 - 2467.
- [7] Sprague M A, Geers T L. A spectralelement method for modeling cavitation in transient fluid structure interaction. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60(15):2467 - 2499.
- [8] 姚熊亮, 郭君, 许维军. 船舶结构远场爆炸冲击动响应的数值试验方法. *中国造船*, 2006, 47(2):24 - 34.
- [9] 李玉节, 潘建强 等. 水下爆炸气泡诱发舰船鞭状效应的实验研究. *船舶力学*, 2001, 5(6):78 - 83.
- [10] 朱锡, 白雪飞, 黄若波, 等. 船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验. *中国造船*, 2003, 44(1):47 - 52.
- [11] 唐献述, 龙源, 王树民, 等. 接触爆炸作用下板的塑性变形分析与实验. *解放军理工大学学报*, 2006, 7(3): 242 - 246.
- [12] 施兴华, 张婧, 王善. 接触爆炸载荷作用下单层薄板临界破坏分析. *南京理工大学学报*, 2009, 33(2): 238 - 241.
- [13] Wang Q X, Yeo K S, Khoo B C, Lam K Y. Strong interaction between a buoyancy bubble and a free surface. *Theoretical Computational Fluid Dynamics*, 1996, 8:73 - 88.
- [14] 尹群, 陈永念, 胡海岩. 水下爆炸研究的现状和趋势[J]. *造船技术*, 2003(6):6 - 13.
- [15] 吴成, 金俨, 李华新. 固支方板对水下爆炸作用的动态响应研究[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(4):275 - 283.
- [16] 牟金磊, 朱锡, 张振华, 等. 水下爆炸载荷作用下加筋板变形及开裂试验研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(1).
- [17] 吴成, 金俨, 李华新. 固支方板对水中爆炸作用的动态响应研究[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(4).
- [18] 朱锡, 牟金磊, 张振华. 水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(3).
- [19] Marcus M H. The Response of a cylindrical shell to bulk cavitation loading, DTIC ADA130030[R]. 1983.
- [20] Swegle J W, Attaway S W. On the feasibility of using smoothed particle hydro - dynamics for underwater explosion calcu-

- lations[J]. *Computational Mechanics*, 1995, 17(3): 151-168.
- [21] 姚熊亮, 徐小刚, 张凤香. 流场网格划分对水下爆炸结构响应的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, 6(3).
- [22] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军. 声固耦合方法在舰船水下爆炸中的应用[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, 26(6): 707-712.
- [23] 方斌, 朱锡. 不同边界条件下水下爆炸气泡的数值模拟[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(2): 85-90.
- [24] 张振华, 朱锡, 等. 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研究. *振动与冲击*[J]. 2005, 24(1).
- [25] 金乾坤, 丁刚. 水下爆炸对船板冲击作用仿真. *计算机仿真*[J]. 2005, 22(6).
- [26] Cole R H. *Underwater Explosion*. New Jersey: Princeton University Press, 1948: 118-127.
- [27] 宗智, 邹丽, 刘谋斌, 等. 模拟二维下爆炸问题的水光滑粒子 (SPH) 方法. *水动力学研究与进展 (A)*, 2007, 22(1): 61-67.
- [28] 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. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 537: 387-413.
- [29] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, ed. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations. *Shock Waves*, 2003, 12(6a): 509-520.
- [30] 荣吉利, 李健. 基于 DYTRAN 软件的三维水下爆炸气泡运动研究. *兵工学报*, 2008, 29(3): 331-336.
- [31] Wilkerson S A. A boundary integral approach to three dimensional underwater explosion bubble dynamics [D]. Johns Hopkins University, Baltimore, 1990.
- [32] Zong Z. A hydro plastic analysis of a free-free beam floating on water subjected to an underwater bubble. *Journal of Fluids and Structures* 2005, 20: 359-372.
- [33] 汪斌, 张远平, 王彦平. 一种水中爆炸气泡脉动实验研究方法. *高压物理学报*. 2009, 23(5): 332-337.
- [34] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学理论与应用. 无锡: 中国船舶科学技术研究所, 2002: 89-112.
- [35] Kalumuck K M, Chahine G L, Duraiswami R. Bubble dynamics fluid-structure interaction simulation by coupling fluid BEM and structural FEM codes. *Journal of Fluids and Structures*, 1995, 9: 861-883.
- [36] Pozrikidis C. Three-dimensional oscillations of rising bubbles. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 2004, 28: 315-323.
- [37] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [38] 美国海军舰船试验总纲[S]. 1989.

第2章 武器对舰船的破坏

2.1 概述

海洋与人类息息相关。当历史的航船驶向 21 世纪的时候,也伴随着海洋世纪的到来,围绕着海洋资源和海洋国土的军事斗争日趋激烈,不论是超级大国、传统的海上强国,还是处在临海位置的发展中国家,都密切关注着本国未来海军的发展。舰船是海军装备的主要力量,科学技术的进步是促使舰船不断发展创新的永恒动力。要想在未来的海上战争中占据优势,必须提升舰船自身的防护能力。舰船结构毁伤和生命力是舰船自身防护能力的体现。但是舰船结构毁伤与生命力,直接与武器和技术装备的发展紧密相连。因此研究舰船结构毁伤和生命力,应该首先了解各种武器的特点及其对舰船的攻击方式和破坏作用。

现在人类已经步入了信息社会,战争的形态也由机械化转向信息化,海军装备的整体面貌发生了翻天覆地的变化。现代军舰上的武器种类很多,如图 2.1.1 所示,常见的有舰炮、水雷、鱼雷、航空导弹以及反舰导弹等。随着科技水平的不断提高和各次战争的推动

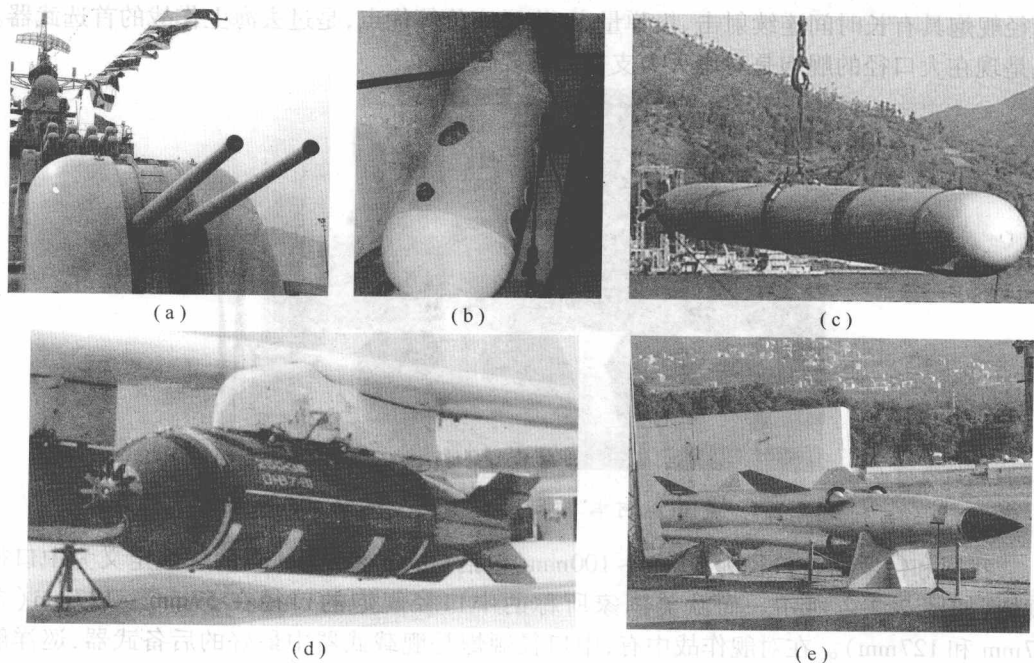


图 2.1.1 各种舰载武器

(a) 舰炮; (b) 水雷; (c) 鱼雷; (d) 航空炸弹; (e) 反舰导弹。

作用,这些武器的性能也不断地发展完善。武器的种类千差万别,攻击方式也不尽相同。因此研究舰船结构毁伤和生命力,应该首先了解各种典型武器的攻击特征,才能对舰船的设计制造有更好的指导作用。

2.2 典型武器攻击特征

水面舰艇由于目标较大,在双方的交战中,将会不可避免地遭到各种水上和水下武器的打击损伤。水面舰船遭遇武器打击的生存能力越来越受各国海军的关注。它不仅关系到所载武器的使用问题、舰员的生存问题,而且制约着联合作战编队的整体作战能力,甚至影响到三军联合作战的进程。因此研究舰艇遭受武器攻击后的承载能力是提高舰艇生命力及战斗力的一个重要研究课题。舰船的损伤程度与武器类型有密切关系,因此在对舰船结构毁伤和生命力进行分析时,需要考虑其结构在各种典型武器攻击情况下的抗冲击能力。水面舰船的主要威胁武器有舰炮、水雷、鱼雷、航空炸弹、反舰导弹等典型武器。下面将对这些典型武器的具体特点进行分析。

2.2.1 舰炮的攻击特征

在现代海战中,舰炮是不可缺少的武器。根据其负担的任务不同可以分为主炮和副炮,主炮用来完成军舰的主要作战任务,副炮用来完成军舰的辅助战斗任务;按照舰炮的口径分类,分为大、中、小型三种舰炮。

欧美国家规定口径在 130mm 及 130mm 以上的为大口径舰炮,如图 2.2.1 所示。大口径舰炮具有长时间连续射击、投弹量大、炮弹廉价等优点,是过去海上作战的首选武器。但是现在大口径的舰炮是对岸火力支援的首要选择。

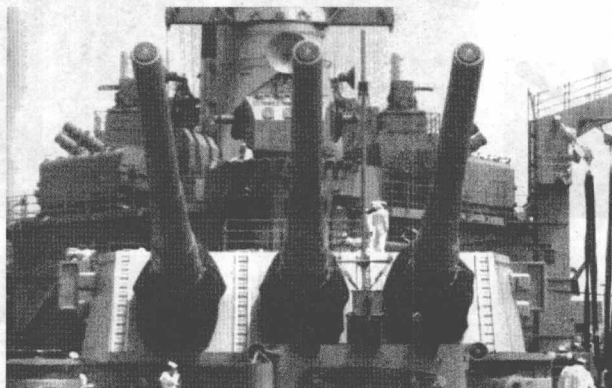


图 2.2.1 美国“依阿华”级战列舰“新泽西”号的 406mm 舰炮

我国和俄罗斯将口径为 60mm ~ 100mm(包括 60mm 和 100mm)的舰炮定义为中口径舰炮,如图 2.2.2 所示。而欧美国家所称的中口径舰炮的口径在 57mm ~ 127mm(含 57mm 和 127mm)。在对舰作战中有,中口径舰炮是舰载武器中最好的后备武器,巡洋舰护卫舰等大中型作战舰船上都装有中口径舰炮。中国将 20mm ~ 60mm 的舰炮定义为小口径舰炮,而欧美将 20mm ~ 40mm 口径的舰炮定义为小口径舰炮,如图 2.2.3 所示。



图 2.2.2 某舰的 100mm 舰炮

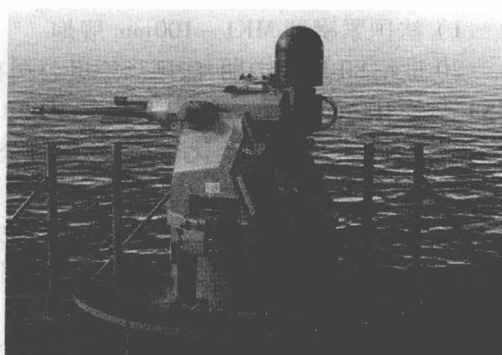


图 2.2.3 “基德”号的 25mm 舰炮

舰炮虽然分类多种多样,但是衡量其性能的指标都包括初速、射程、发射率、反应时间、持续性和破坏性几种。

(1) 初速是指炮弹离开炮口时的速度。中口径的舰炮初速一般是 $800\text{m/s} \sim 1000\text{m/s}$,初速度的大小直接影响炮弹射程和命中目标以后弹片对目标破坏性的大小。

(2) 射程分为最大射程和有效射程,最大射程是指炮弹能够飞行的最远距离,有效射程是指在射击时命中目标概率较大的射程。

(3) 发射率又名射速,是指每门炮 1min 内发射的炮弹数量,主要取决于舰炮的性能和供弹系统的自动化程度。中口径的舰炮由于炮弹的重量和体积较大,发射率较小,为 $20\text{rds/min} \sim 100\text{rds/min}$ 。

(4) 反应时间是指舰炮武器自发现目标到开火所需要的时间。中口径的舰炮反应时间一般为 20s(对海)。

(5) 持续性是指舰炮持续发射弹药的能力,主要取决于弹药的储备情况。一般来说,中口径的舰炮弹药储备量每门炮为 200 发 $\sim$ 300 发。

(6) 破坏性是指舰炮命中目标后引起的破坏程度,主要取决于弹径和弹种。一般来说弹片杀伤人命的有效半径为口径的 300 倍 $\sim$ 500 倍,普通穿甲弹所能穿透的钢甲厚度为口径的 0.5 倍 $\sim$ 1.5 倍,硬芯穿甲弹则可以达到 2 倍以上。

以上是中口径舰炮的一般指标,以下介绍国外典型的中口径舰炮的攻击特征:

国外中口径舰炮的研制经过几十年的努力,取得了长足的发展,较为著名的有法国紧凑型 MK1-100mm 舰炮、美国的 MK45-127mm 舰炮以及俄罗斯的 AK-176M76.2mm 舰炮。典型中口径舰炮性能指标如表 2.2.1 所列。

表 2.2.1 国外典型中口径舰炮性能指标

	法国 MK2100mm 舰炮	美国 MK45 型 127mm 舰炮	俄罗斯 76.2mm 舰炮
口径/mm/炮管长/mm	100/5500	127/5400	76.2/5900
炮管数	1	1	1
射速/(rds/min)	90	20	120
最大射程/km	17	23.6	15.5
初速/(m/s)	870	808	980
系统质量/t	17.3	28	16.5

1) 法国紧凑型 MK1 - 100mm 舰炮

20 世纪 80 年代中期,法国汤姆逊公司在 68 型单 100mm 舰炮的基础上研制出全自动 MK1 型单 100mm 舰炮。舰炮系统质量 20t,最大射程对舰 17km,对空 6km,操作人员 2 名,但炮塔内无人。90 年代初期,汤姆逊公司和吉亚特公司合并,成立了吉亚特集团公司,紧凑型单 100mm 舰炮也由 MK1 型发展为更加完善的 MK2 型。MK2 的炮架和密封炮塔都使用轻质合金,质量仅有 17.3t,性能也有了很大的提高。MK2 的射速、射击精度、初速、反应时间及快速性等战术技术指标都同 MK1 型一样。

2) 美国 MK45 型 127mm 舰炮

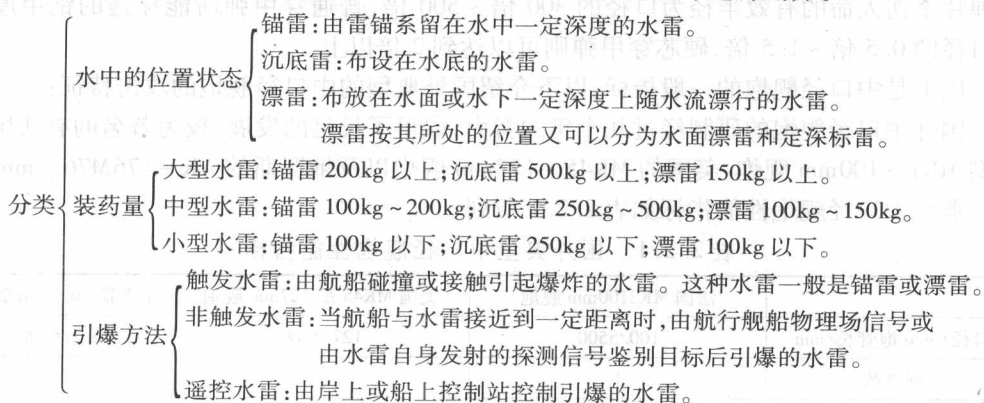
MK45 型 127mm 舰炮是美国海军现役唯一既能实施对岸火力支援、又能对舰作战并具有一定防空能力的多用途舰炮系统。炮架质量只有 25t,操作人员 6 名,射速为 20rds/min,炮弹质量为 47.5kg。为出口,FMC 公司专门对其进行了改进,推出了 MK45 先进型 127mm 舰炮。该舰炮主要是将发射率提高到 40 rds/min,瞄准速度也有所提高。此外,对炮塔进行改进,采用新型玻璃纤维材料,既减轻了炮塔质量,又降低了雷达波反射面积,增强了舰炮的隐身能力。

3) 俄罗斯 AK - 176M 型 76.2mm 舰炮

AK - 176M 76.2mm 舰炮系统在俄罗斯海军中广泛使用。舰炮带有水冷装置,净质量为 16.5t,通常使用全自动方式工作,但也备有手动工作方式。AK - 176M 76.2mm 舰炮采用单层炮管,炮弹种类有爆破弹、对空弹、训练弹和教练弹。舰炮的瞄准和火控可有多种方式。舰炮使用无夹双排摆弹器连续向火炮摆动部分供弹,在同类口径舰炮中发射率最高,可达 120rds/min。

2.2.2 水雷的攻击特征

水雷(如图 2.2.4 所示)是海战中重要的兵器之一,是布设在水中的一种爆炸性武器,它可由舰船碰撞或进入其作用范围而起爆,用于毁伤敌方舰船或阻碍其活动。水雷有很多分类方法,通常按水雷在水中的状态、引爆方法、装药量等进行划分。



水雷最能发挥威力的地方是海峡、海湾、浅水区、江河口、港湾以及其他海上交通要道。水雷的主要作用是牵制敌人兵力,争取时间,给己方兵力的出击提供有力条件。水雷主要有以下攻击特征:

(1) 水雷具有强大的破坏力。水雷装有大量的烈性炸药,而且它的爆炸往往发生在



图 2.2.4 锚雷

舰船最重要也是最薄弱的水下部分。水下爆炸的破坏力和破坏效果远比空中爆炸要大。

(2) 水雷位置隐蔽便于突然袭击。水雷可以由飞机迅速低空投放或者由潜艇隐蔽布放,以海水作为掩护屏障,隐蔽性好。用眼睛进行观察只能发现浅布的锚雷,声纳发现水雷的距离不超过 10 链(1 链 = 20.1168m),而磁探仪和光探水下电视的探测距离只有 10m 左右。

(3) 长期对敌威胁、易布难扫。在水雷布设以后,在相当长的时间内处于随时可以爆炸的状态。甚至在几十年后仍有爆炸的可能。

(4) 使用简单、效费比高。水雷的布设十分简便,并且水雷的造价低廉,被称为“穷国的武器”,而且耐淘汰。同时,水雷结构简单,操作与维护方便。

以上是水雷的一般攻击特征,以下介绍一下国外典型的水雷攻击特征及相关参数:

1) 定向攻击水雷 MSHM

MSHM 是前苏联海军在 80 年代装备的新型定向攻击水雷,属于火箭上浮锚雷,如图 2.2.5 所示。它可由水面舰艇、潜艇和飞机布放,主要用于打击大陆架水深范围内的水面舰艇和潜艇。水雷全长 4m,直径 533mm,总质量为 820kg。水雷一经布放到位,便位于雷索顶端处垂直向上。当目标探测装置探测到目标时,水雷就自动启动其主动声引信,并计算出火箭战斗部的弹道和相应的火箭后翼的舵角,然后筒体开盖,战斗部脱壳而出,按照预定的弹道飞向目标。水雷内装有 350kg 炸药,火箭工作时间为 25s,有足够的时间上浮和导向,因此该水雷命中概率较高。MSHM 水雷的布放海深为 60m ~ 300m,水下服役期

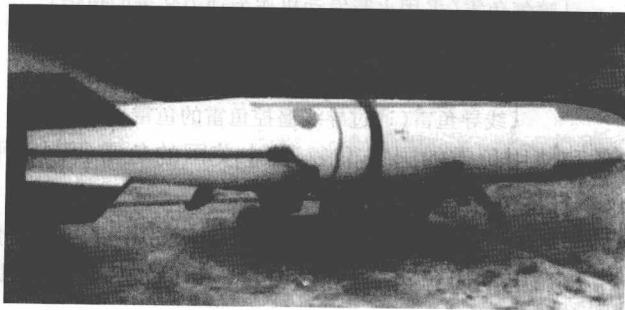


图 2.2.5 EM52 型火箭助推水雷

为 1 年。

2) 多传感器“石鱼”水雷

“石鱼”水雷(如图 2.2.6 所示)是由英国马可尼水下系统公司研制的,是典型的具有预编程序、微机控制、多路传感器的现代沉底雷。这种水雷可由飞机、水面舰船和潜艇布放,主要用来打击水面舰艇和潜艇。“石鱼”水雷为圆柱体,总长 2.4m,直径 533mm,总质量为 990kg,内装有的 600kg 的炸药。采用声、磁和压力传感器进行联合操作。此外,还可利用有线遥控、声遥控和计算机软件程序来控制水雷的一切功能,包括选择目标、估计最近的目标接近点和引爆。“石鱼”的储存寿命为 20 年,水下服役期为 2 年,最大使用海深为 200m。

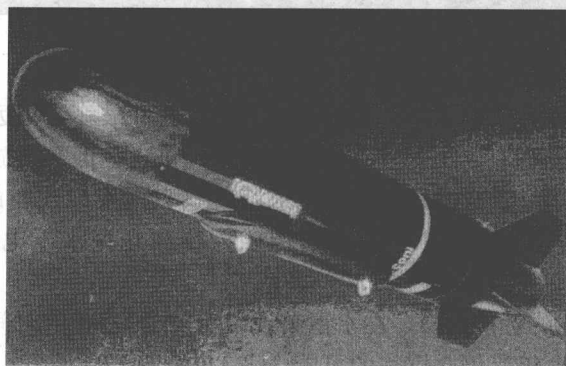


图 2.2.6 英国“石鱼”水雷

2.2.3 鱼雷的攻击特征

鱼雷是一种在水中航行,自动导向攻击目标的水中兵器。可装在飞机(反潜飞机、反潜直升机)、水面舰艇上,亦可安装在港湾、要塞和岛屿的固定阵地上。它的攻击目标主要是战舰和潜水艇。鱼雷有很多分类方法,通常按直径、动力和制导方式等进行划分。

鱼雷	按直径分	大型鱼雷:直径大于 533mm。
		中型鱼雷:直径在 400mm ~ 482mm。
		小型鱼雷:直径小于 400mm。
	按动力分	热动力鱼雷(采用活塞式、涡轮式发动机作为动力装置鱼雷)
		电力鱼雷(采用电机作为动力装置鱼雷)
		喷气鱼雷(采用火箭发动机作为动力装置鱼雷)
	按制导方式分	自控鱼雷(可直航或程序控制的鱼雷)
		自导鱼雷(能自动追寻目标的鱼雷)
		线导鱼雷(通过导线遥控鱼雷的鱼雷)

目前,世界上装备和使用鱼雷的国家很多,其中美国的鱼雷研制水平一直居世界领先地位。鱼雷的主要技术性能如下:

(1) 航速:不同动力装置鱼雷有不同的航速,目前,热动力鱼雷的航速在 50nk 左右,个别型号达 70nk 以上;电力鱼雷航速在 20nk ~ 40nk 之间;火箭助推鱼雷在空中和水中的平均速度达 300nk 上下。

(2) 航程:平均在 10km 左右,个别达 40km 以上。

(3) 航行深度:打击水面舰艇的鱼雷航行深度在 15m 以内,打击潜艇的鱼雷航行深度在 100m ~ 300m,最深可达近千米。

(4) 装药量:攻击水面舰船的大型鱼雷装药量在 300kg ~ 500kg 之间,反潜小型鱼雷装药 40kg 左右。

第二次世界大战结束的半个多世纪中,鱼雷技术经历着深刻的变化。下面介绍几种具有典型代表意义的现代鱼雷。典型鱼雷战术指标如表 2.2.2 所列。

表 2.2.2 国外典型鱼雷战术指标

型 号	MK48 - ADCAP	暴风	矛 鱼 鱼 雷	黑 鲨
直径/mm	533.4	533	533	533
长度/m	5.85	8.2	5.94	6.3
质量/kg	1582	2600	1850	1315
航速/kn	60	200	70.5	50
航程/km	46	10 ~ 15	40/54	90
潜深/m	1000 ~ 1200	4 ~ 400	700	
装药/kg	300 ~ 350(PBXN102)	250	249	250
引信	近炸 + 触发	触发	触发	近炸 + 触发
制导方式	线导 + 主被动声自导	无	线导 + 主/被动自导	线导 + 主被动声自导
动力	奥托燃料 + HAP 斜盘机	固体火箭发动机 + 喷水式发动机	热动力	电力

1) MK48 - 5 型鱼雷

MK48 - 5(ADCAP)型鱼雷是美国海军新装备的重型潜用鱼雷,是 MK48 鱼雷的彻底改进型,主要装备在核潜艇,用以攻击潜艇和大中型水面舰艇。是美国海军 20 世纪 90 年代的主力鱼雷。如图 2.2.7 所示,它可以在高速航行的时候识别目标。MK48 - 5 鱼雷长 5.85m,直径 533mm,质量 1582kg,航速 55kn,航程 46000m,最大航深 1200m。其动力系统为热动力斜盘机,采用奥托 2 型燃料,系统功率 500 马力(1 马力 = 735.5W),具有高能量密度、低噪声、无尾迹等特点。鱼雷战斗部为装药 100kg ~ 150kg 的爆破战斗部,单雷命中即可击沉一艘大型潜艇或中型水面舰艇。

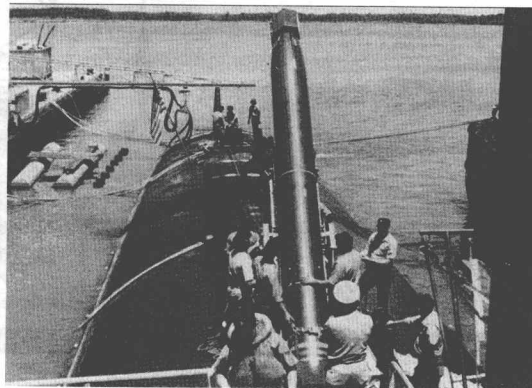


图 2.2.7 MK48 - 5 型鱼雷

2) 俄罗斯“暴风”高速鱼雷

“暴风”鱼雷由潜艇发射,采用了超空泡原理,鱼雷航行在阻力很小的气泡流场中,因此速度达到 200kn,相当于 100m/s,如图 2.2.8 所示。该雷装一台固体火箭发动机和一台利用铝镁和海水混合反应作为燃料的涡轮发动机。它没有制导装置,以直航弹道攻击目标,靠速度取胜,而且因为没有电子装置,所以也不受电子干扰。主要用于打击航母等大型水面舰船和潜艇及岸上基础设施。该鱼雷长 8.2m,直径 533mm,质量为 2.6t,最大航深 400m,航程 10km ~ 15km,战斗部装药 250kg。

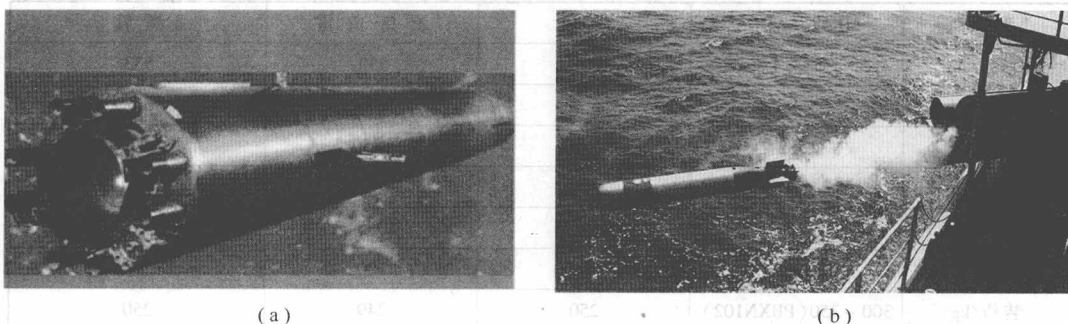


图 2.2.8 俄罗斯“暴风”鱼雷

(a) 暴风鱼雷; (b) 暴风鱼雷发射。

3) 矛鱼鱼雷

矛鱼鱼雷(也称“旗鱼”鱼雷)是英国在研的重型鱼雷,如图 2.2.9 所示。该鱼雷是目前世界上采用混合燃料的最成功的一种智能化鱼雷。1981 年 4 月在英国苏格兰靶场进行试验时,它以 70.5kn 的航速轰动了世界。为了对付具有大间隔距离的双层壳体潜艇,矛鱼鱼雷的战斗部采用了聚能爆炸技术。战斗部前端是一个密度很高的金属丸,占战斗部总质量的 20%,后面是主装药和引信,当鱼雷碰到目标的时候,引信动作,引爆主装药。主装药爆炸时,能使前部的金属丸产生足够的动能,像炮弹一样射向目标,能一举击穿耐压壳体厚度超过 5cm、双层壳体间距为 4m 的潜艇。而且鱼雷的制导系统还能使鱼雷选择攻击潜艇最薄弱的部位。所以,“旗鱼”被英国人称为“会思考的鱼雷”。

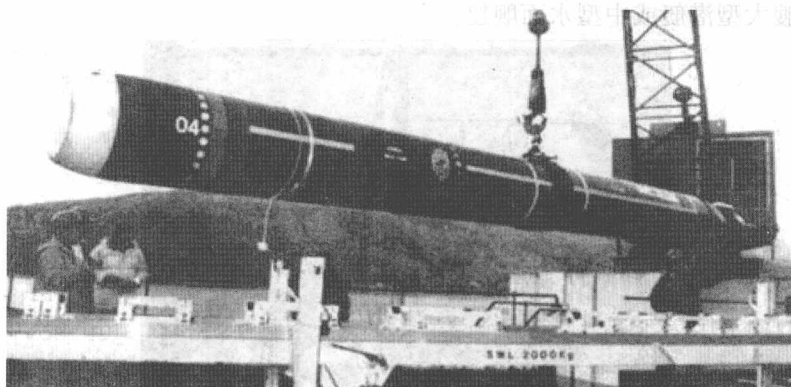


图 2.2.9 英国的矛鱼鱼雷