

DOI:10.16781/j.0258-879x.2019.05.0573

• 海洋军事医学 •

## 水下爆炸致水面舰艇人员损伤的特点及研究现状

张晏铭<sup>1</sup>, 张丹枫<sup>2</sup>, 陈吉钢<sup>2\*</sup>

1. 海军军医大学(第二军医大学)基础医学院学员四队, 上海 200433

2. 海军军医大学(第二军医大学)长征医院神经外科, 上海 200003

**[摘要]** 海战中水面舰艇在遭受水下爆炸攻击后会产生急剧的加速运动, 造成舰艇上人员损伤, 被称为舰艇冲击伤。舰艇冲击伤是造成舰艇上人员丧失战斗力的主要因素, 国内外已经对其开展了大量研究。本文就舰艇冲击伤的历史、研究方法、损伤机制与特点、防护及救治等方面进行总结分析, 提出当前研究的不足, 并展望未来的发展方向, 以便加深广大军医对舰艇冲击伤的了解, 为该类损伤的防治提供参考。

**[关键词]** 海战; 舰艇冲击伤; 损伤特点; 防护; 治疗

**[中图分类号]** R 826.53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)05-0573-04

### Characteristics and research status of injuries on surface vessels induced by underwater explosion

ZHANG Yan-ming<sup>1</sup>, ZHANG Dan-feng<sup>2</sup>, CHEN Ji-gang<sup>2\*</sup>

1. The Fourth Student Team, College of Basic Medical Sciences, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

2. Department of Neurosurgery, Changzheng Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200003, China

**[Abstract]** Warships undergo accelerated motion when attacked by underwater explosion in the naval battles, resulting in severe damage of the warship personnel, which is termed as ship shock injury. The ship shock injury is the main factor that causes the loss of fighting capacity of personnel on warships. A great number of studies on ship shock injury have been made at home and abroad. In this paper, we reviewed and analyzed the history, research methods, injury mechanisms and characteristics, and protection and treatment measures of ship shock injury, pointing out the shortcomings of current research and proposing research direction in future. We hoped this paper can help to deepen the understanding of naval surgeons on ship shock injury and provide a reference for the prevention and treatment of ship shock injury.

**[Key words]** naval battle; ship shock injuries; injury characteristics; protection; therapy

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(5): 573-576]

海战时水下爆炸是导致水面舰艇破坏甚至丧失战斗力的重要因素, 随着现代海战中各种水下高爆性武器的广泛应用, 其对水面舰艇及舰艇人员的损伤成为世界关注的重点<sup>[1]</sup>。由水下高爆性武器导致的水面舰艇结构、舰上设备与武器、作战人员损伤被称为舰艇冲击伤。当水下爆炸威力过大时, 舰艇因急剧振动作用在人体上的力、加速度和位移会超过损伤阈值, 导致舰上人员不同程度的损伤, 轻则丧失战斗力, 重则死亡, 给整个舰艇造成巨大伤害。当前舰艇冲击仍是造成舰艇人员损伤甚至死亡的主要因素, 本文就舰艇冲击伤的历史、研究方

法、损伤机制与特点、防护及救治等进行回顾, 以期提高广大军医对此类损伤的认识。

### 1 舰艇冲击伤的历史

舰艇冲击伤最早于二战期间由英国人 Keating 描述, 他注意到当小型舰艇遭受水雷攻击后, 甲板会突然上升, 使水雷的破坏力通过人体骨骼系统向上传导, 导致舰上人员发生多发性下肢骨折、胸腰椎压缩性骨折等损伤<sup>[2]</sup>。随后 Barr 等<sup>[3]</sup>通过分析诺曼底登陆中受水下爆炸攻击后的 50 例舰艇人员的损伤特点, 进一步证实这类损伤的独特性, 发现大部分伤员有相

**[收稿日期]** 2018-10-03 **[接受日期]** 2018-12-14

**[作者简介]** 张晏铭, 海军军医大学(第二军医大学)临床医学专业 2014 级五年制本科学员. E-mail: karenwmj\_@outlook.com

\*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81885671, E-mail: chenjigang2015@126.com

似的明显下肢骨折。在随后的几十年内未见水下爆炸舰艇冲击致人员损伤的相关报道。2000年美国科尔号驱逐舰在停靠港口时遭受恐怖爆炸袭击,共造成17名舰艇人员死亡、35名受伤。在死亡舰艇人员中,14名舰艇人员的死因为舰艇直接冲击,通过尸体解剖发现大部分死者均在爆炸后当场或数分钟内死亡。死者除有明显的多处骨折外,还多伴有内脏损伤,如肝脾撕裂伤、肺挫伤、肾出血等。另外3名死亡舰艇人员的死因主要是舰艇冲击后飞离甲板坠海而致溺死。舰艇冲击也是导致另外35名存活舰艇人员受伤的主要原因,其损伤型伤类与死亡舰艇人员相似<sup>[4]</sup>。

## 2 舰艇冲击伤的研究方法

西方各海军强国开展舰艇冲击伤的研究始于二战后,我国也于20世纪70—80年代逐步开展了针对舰艇冲击伤的理论与实验研究。由于开展实弹、实船水下爆炸研究耗费巨大、实施难度高,且对舰艇本身及周围环境有着明显的威胁,因此对舰艇冲击伤的研究主要采用模拟实验和仿真模型的方法。

**2.1 模拟实验研究** 模拟实验研究是舰艇冲击伤研究中最重要的一部分,指通过爆炸、冲击机等对真人、假人、动物等实验对象进行冲击致伤,获取力学响应并分析其损伤效应。

1966年美国学者Mahone<sup>[5]</sup>通过冲击机对26名志愿者进行了700余次的模拟舰艇冲击实验,实验过程中记录了被试的主观感受,同时应用高速摄影记录了人员的运动轨迹,建立了不同情况下人员飞离甲板的经验公式,为后续舰艇抗冲击研究提供了重要参考。国内学者刘新祥等<sup>[6]</sup>也曾对6名战士开展坐姿条件下的冲击响应实验,并通过获取的数据对课题组建立的人体集中参数模型进行了验证。由于真人实验可能对受试者造成安全隐患,因而国内外开展较少,更多的是采用实验动物或假人、人体尸体。

柯文棋等<sup>[7]</sup>利用犬、兔等动物开展了一系列水雷爆炸舰艇冲击实验,并对动物的损伤特点进行总结分析,发现损伤主要集中在胸腹腔内脏器官,以肺、肝、脾出血为主,常为闭合性损伤,表现为“外轻内重”的特点;而实验动物骨折发生较少,可能和人体与动物的差异性有关。李娜等<sup>[8]</sup>用自制的冲击装置对舰艇冲击致兔眼损伤进行了深入研

究,发现损伤主要表现为可逆的功能性改变,冲击强度越大恢复时间越久。进一步地,李新岭等<sup>[9]</sup>对舰艇冲击致大鼠颅脑损伤进行了研究,发现该类冲击可导致大鼠脑水肿、神经元变性坏死等,使大鼠出现轻型创伤性脑损伤。

针对假人和尸体的冲击实验亦在国内外被大量开展。美国于20世纪50年代率先开展了驱逐舰和扫雷舰遭受水下爆炸冲击的假人响应实验,利用安放在假人体内的传感器获取人体各部位的加速参数,并通过与损伤标准比较判定损伤状况<sup>[10]</sup>。国内柯文棋等<sup>[11]</sup>于20世纪80年代开始利用人体尸体进行冲击研究,针对舰艇冲击过程中骨骼易损伤的特点开展了静态压缩和动态冲击实验,获取了骨骼冲击耐受限值,为后续水面舰艇冲击对人体安全阈值的制定奠定了重要基础。

**2.2 仿真模型研究** 仿真模型研究是指通过建立人体仿真模型,利用不同算法获取真实参数下的人体力学响应。仿真模型研究相对方便易行、耗费少,是模拟实验研究的重要补充,也是当前研究的重要发展方向。目前常用的模型有集中参数模型、多刚体模型和有限元模型。

集中参数模型较简单。如前所述,刘新祥等<sup>[6]</sup>最早分析了坐姿人体四自由度的线性模型对舰艇冲击的响应,随后研究将模型扩展到人体七自由度的坐姿<sup>[12]</sup>。利用该模型可以计算特定条件下舰艇人员对冲击的响应,通过与人体损伤标准比较预测损伤可能性及损伤程度。

国外多刚体模型中研究较为成熟的是关节整体人体模型,该模型根据人体解剖特点将人体划分为互相连接的17个刚体节段,其较集中参数模型更复杂,能更细致地反映人体各部位对舰艇冲击的响应<sup>[13]</sup>。

有限元模型是最接近人体真实结构的模型,可以根据需要对人体结构进行尽可能细致地划分,以达到模拟真实人体的目的。尽管当前已有许多利用有限元模型进行水下爆炸后舰艇本身损伤的研究<sup>[14-15]</sup>,而且人体部位对直接冲击的响应也有报道<sup>[16]</sup>,但尚无利用有限元模型研究舰艇冲击伤的公开报道,这可能与人体结构相对复杂、舰艇冲击对人体的作用难以预测有关。

## 3 舰艇冲击伤的机制与特点

水下爆炸使舰艇产生剧烈的加速运动,因此造

舰艇冲击伤的主要因素为冲击加速度。冲击产生的破坏力沿下肢、骨盆、脊柱向上传导, 可以造成骨骼系统的严重损伤。在冲击加速过程中, 人体组织器官产生的相对位移大于其承受能力时, 会出现变形、撕裂等损伤。另外冲击加速后人体飞离甲板, 可能与舱室天花板、周围设备等碰撞, 这也会造成脑外伤、骨折、淹溺等二次损伤。

结合实战中人员损伤情况及实验研究结果, 舰艇冲击伤具有如下特点<sup>[17]</sup>: (1) 骨骼系统损伤明显, 主要表现为承重骨的损伤, 如下肢、骨盆、脊柱等; (2) 损伤与冲击时人员姿势有关, 站姿易致下肢骨折, 坐姿易致骨盆骨折; (3) 内脏器官损伤严重且以实质性器官为主, 表现为肝脾撕裂伤、肺挫伤、肾出血等, 常为闭合性损伤, 通常“外轻内重”, 容易漏诊; (4) 飞离甲板后产生的碰撞、淹溺等二次损伤多见。

#### 4 舰艇冲击伤的防护

对舰艇冲击伤的防护需从多方面开展, 包括冲击损伤可能性研究、耐受曲线和安全标准制定、舰艇及舰艇人员抗冲击装备研制等, 国内外对此进行了相关研究。

黄建松等<sup>[18]</sup>采用计算机模拟方法, 计算 1 000 kg TNT 当量炸药水下爆炸时对舰艇人员的冲击作用, 结果提示舰艇人员会被抛离甲板并发生下肢骨折, 应采取防护措施。在他们的另一项研究中, 根据人体不同部位(颅脑、脊柱和椎间盘、胸腹腔脏器、骨盆、下肢)耐受阈值的计算方法, 给出了各部位对舰艇冲击的耐受程度和阈值, 为损伤评估、预测及防护提供了重要参考依据<sup>[19]</sup>。张玮<sup>[20]</sup>研究了水下爆炸时不同结构参数对立姿、坐姿、行走状态条件下水面舰艇人员冲击响应的影响, 发现通过在甲板上加装抗冲击材料, 增大甲板与座椅之间的阻尼比和加大甲板的阻尼系数可以减轻对舰艇人员损伤。运太来等<sup>[21]</sup>根据水面舰艇主要舱室部位的冲击环境参数, 对近、中、远 3 种不同爆炸冲击条件下舰艇人员的安全性进行了评估, 发现 3 种冲击条件均可对舰艇人员造成损伤, 应采取防护措施。

1996 年, 我国制定了首个舰艇冲击致人员损伤安全标准《GJB2689-96, 水面舰艇冲击对人体作用安全限值》, 该标准适用于水下爆炸所致的舰艇垂向冲击对舰艇人员的作用, 为人员安全评估、

舰艇抗冲击设计提供了重要参考<sup>[22]</sup>。

就抗冲击装备而言, 提高舰艇本身的抗冲击性能可以对舰艇人员提供更好的保护。传统的冲击防护设备会使舰艇的质量大幅度增加, 影响总体性能。为此有学者就舰艇结构进行优化, 在质量不变的前提下增加舰艇抗冲击性能<sup>[23]</sup>。材料学的发展也为舰艇冲击防护提供了新途径, 新型的舰艇夹层板具有优良的变形和吸能性能, 已成为近年国内外研究的热点<sup>[24-25]</sup>。就单兵防护而言, 我国研制的抗冲击鞋<sup>[26]</sup>、防冲击头盔<sup>[27]</sup>等通过了测试, 显示出良好的冲击防护性能, 可有效减少舰艇冲击伤的发生。

#### 5 舰艇冲击伤的救治

舰艇冲击伤与普通外伤有较多的共性, 但更有其特殊性, 因此治疗上除了维持生命体征平稳、止血、固定、清创等常规的医疗手段外, 还需要针对其特殊性进行处理。首先, 舰艇冲击伤属于海战伤的一部分, 常伴有烧冲复合伤、淹溺伤, 需要综合全面考虑; 其次, 舰艇冲击伤因发生于海上作战, 远离岸基, 伤员后送困难。因此对现场及舰船的一线救治能力要求高, 伤员后送十分重要, 需要高效的卫勤保障体系。

随着我国海军战略由近海防御向远海防卫的拓展, 打造覆盖远海的卫勤保障体系势在必行。美国依靠其强大的海军维持着对全球各重要区域的军事威慑力, 并于 20 世纪 90 年代逐步对其卫勤保障模式进行现代化改造, 这一模式对我国海军具有十分重要的参考价值。美国海军的战场医疗救治分为 5 级<sup>[28]</sup>: 第一级为现场紧急救治, 由前线卫生员或休克外伤治疗团队开展。第二级为前线医疗手术队, 可以开展简单的损伤控制性手术等。经过前二级救治不能恢复的伤员则被转送至第三级医疗机构, 美国海军的第三级救治机构为移动医疗船, 作为创伤救治中心, 医疗船能够对伤员进行细致的紧急救护、伤情评估及手术治疗等。前三级救治机构均位于前方战场, 第四、五级救治机构则分别为基地医院和本土医疗机构。各级救治机构分工明确, 救治全程实施监护, 可以保证伤员得到及时有效的治疗, 大大提高伤员救治质量及后送效率, 降低死亡率<sup>[28]</sup>。

## 6 舰艇冲击伤研究的不足与展望

舰艇冲击伤的研究已取得了长足的进步,然而随着研究的深入,更多问题呈现在眼前。首先,传统的舰艇冲击伤研究方法已经不适应目前高速发展的新型高爆性水下兵器和舰艇。例如目前已有的爆炸载荷经验公式已经越来越不适用于不断发展的新型高能炸药,新船型与新材料的发展也对传统模型有更高要求。其次,人们目前对舰艇冲击引起的胸腹部、脊柱、四肢损伤机制已有一定的认识,但对颅脑、神经血管损伤机制有待进一步研究。最后当前的防护技术并不能完全满足舰艇人员的需求。例如已有的舰艇人员防护设备,包括抗冲击鞋和防冲击头盔可以降低舰艇冲击对舰艇人员造成的损伤,但此类防护设备的集成性、便利性及舒适性有待进一步完善。

舰艇冲击伤未来发展方向应主要集中在以下几方面:(1)改进研究方法,如以有限元分析为基础,结合多刚体建模技术建立人体动力学模型,或结合虚拟现实技术和多媒体技术研制应用于舰艇冲击环境中人的响应分析的计算机软件;(2)进一步明确颅脑损伤、血管神经损伤等的机制;(3)在加强舰艇本身抗冲击性能研究的同时,还需要加强单兵抗冲击防护研究,防护技术的重点在于下肢和胸腹部的防护。

### 【参考文献】

- [1] 张丹枫,陈吉钢,王春晖,李振兴,侯立军. 水下爆炸损伤生物效应研究现状及展望[J]. 第二军医大学学报, 2016,37:1283-1286.  
ZHANG D F, CHEN J G, WANG C H, LI Z X, HOU L J. Biological effect of underwater explosion injury: research progress and prospective[J]. Acad J Sec Mil Med Univ, 2016, 37: 1283-1286.
- [2] BULL A M J, CLASPER J, MAHONEY P F. Blast injury science and engineering: a guide for clinicians and researchers[M]. Switzerland: Springer, 2016: 101-104.
- [3] BARR J S, DRAEGER R H, SAGER W W. Solid blast personnel injury: a clinical study[J]. Mil Surg, 1946, 98: 1-12.
- [4] DAVIS T P, ALEXANDER B A, LAMBERT E W, SIMPSON R B, UNGER D V, LEE J, et al. Distribution and care of shipboard blast injuries (USS Cole DDG-67)[J]. J Trauma, 2003, 55: 1022-1028.
- [5] MAHONE R M. Man's response to ship shock motions [R/OL]. AD628891, 1966. [https://www.researchgate.net/publication/235051822\\_MAN'S\\_RESPONSE\\_TO\\_SHIP\\_SHOCK\\_MOTIONS](https://www.researchgate.net/publication/235051822_MAN'S_RESPONSE_TO_SHIP_SHOCK_MOTIONS).
- [6] 刘新祥,赵本立,李国华. 水下爆炸对坐姿舰员时域动响应与损伤的影响[J]. 医用生物力学,1993,8:170-177.
- [7] 柯文棋,乐秀鸿,杨军,王恩中,陈奉昌,李宗盈,等. 水雷爆炸对舰船上动物冲击损伤的试验观察与评价[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2001,8:136-140.
- [8] 李娜,彭秀军,胡运韬. 模拟舰船冲击运动对兔眼损伤的实验观察[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2010,17:19-21.
- [9] 李新岭,沈岳,赖西南,马彦波,刘海,王丽丽,等. 水下爆炸固体冲击波致大鼠脑损伤研究[J]. 解放军医学杂志, 2016,41:689-693.
- [10] LANCE R M, BASS C R. Underwater blast injury: a review of standards[J]. Diving Hyperb Med, 2015, 45: 190-199.
- [11] 柯文棋,乐秀鸿,杨军,吴英群. 垂直受压下人体下肢骨骼的抗压性能[J]. 中国生物医学工程学报,1996,5:203-208.
- [12] 刘新祥. 一个表征坐姿舰员的无约束人体非线性模型[J]. 医用生物力学,1994,9:34-40.
- [13] ZONG Z, LAM K Y. Biodynamic response of shipboard sitting subject to ship shock motion[J]. J Biomech, 2002, 35: 35-43.
- [14] 于福临,郭君,姚熊亮,任少飞. 水下爆炸船体结构响应间断伽辽金法数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016,48:139-143.
- [15] 李琛,宗智,王文冠. 水下爆炸双体船隔振性能数值仿真与试验研究水域[J]. 兵器装备工程学报,2016,37:31-34.
- [16] 牛文鑫,冯铁男,姜成华. 颅脑钝性冲击损伤力学中有限元法的研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2014,27:217-222.
- [17] 夏荣田,张树军,夏守文,李永丰. 舰艇冲击伤的一线救治[J]. 海军医学杂志,2001,22:12-13.
- [18] 黄建松,柯文棋,乐秀鸿,李政年,周宏元. 模拟非接触水下爆炸时舰船人员冲击损伤的安全性评估及防护措施[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2005,12:133-135.
- [19] 黄建松,华宏星,周建鹏. 舰船人员冲击损伤标准及耐受性研究[J]. 北京生物医学工程, 2008,27:300-304.
- [20] 张玮. 水面舰艇舰员水下爆炸冲击防护研究[J]. 医用生物力学,2011,26:39-42.
- [21] 运太来,李政年,柯文棋,乐秀鸿,周宏元,黄建松. 水下非接触爆炸对船员冲击安全性的评估[J]. 海军医学杂志, 2013,34:219-221.
- [22] 国防科学技术工业委员会. GJB2689-96,水面舰艇冲击对人体作用安全限值[S/OL]. (1996-06-04)[2018-8-30]. <http://www.doc88.com/p-5149105962311.html>.
- [23] 张发厅. 小型船舶的舷侧抗冲击结构研究[J]. 舰船科学技术,2018,2:13-15.
- [24] 邱飒蔚. 闭孔泡沫铝夹层板局部压缩性能研究[D]. 昆明理工大学,2016.
- [25] 陈攀. 填充超弹性材料夹层板的抗爆性能研究[J]. 舰船科学技术,2016,38:24-30.
- [26] 黄建松,汪玉,李政年,谌勇,许述财. 舰员抗冲击鞋性能试验及评估方法研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2012,31:466-470.
- [27] 李政年,张磊,黄建松,周宏元,吴静波,柯文棋,等. 防冲击头盔:CN201571540U[P]. 2010-09-08.
- [28] BLUMAN E M, FICKE J R, COVEY D C. War wounds of the foot and ankle: causes, characteristics, and initial management[J]. Foot Ankle Clin, 2010, 15: 1-21.