

DOI:10.16781/j.0258-879x.2016.10.1283

• 海洋军事医学 •

## 水下爆炸损伤生物效应研究现状及展望

张丹枫, 陈吉钢, 王春晖, 李振兴, 侯立军\*

第二军医大学长征医院神经外科, 上海 200003

**[摘要]** 各种水中武器的广泛的运用已成为现代海战的主要特点之一, 由此带来的水下爆炸损伤给水面舰船及水中作业人员造成严重的威胁。由于水下爆炸的致伤机制、致伤特点与陆上爆炸明显不同, 因而对水下爆炸损伤效应的研究逐渐成为世界军事医学关注的热点与难点。本文通过系统地回顾相关文献, 总结分析了水下爆炸损伤生物效应的研究现状, 并对其未来的发展方向进行展望, 旨在进一步加深对水下爆炸损伤生物效应的认识, 并促进其深入研究。

**[关键词]** 水中武器; 水下爆炸; 创伤和损伤; 舰艇冲击伤

**[中图分类号]** R 827 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2016)10-1283-04

### Biological effect of underwater explosion injury: research progress and prospective

ZHANG Dan-feng, CHEN Ji-gang, WANG Chun-hui, LI Zhen-xing, HOU Li-jun\*

Department of Neurosurgery, Changzheng Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200003, China

**[Abstract]** Underwater weapons have been widely used and their applications have become a main characteristic of modern naval battles. It imposes a severe threat to the combatants above or below water surface. The injury mechanism and characteristics of underwater explosion are quite different from those of the land explosion, which has become a research focus of military medicine around the world. In this paper we systematically reviewed the literatures and the current status of biological effect of underwater explosion injury and discussed its future development, hoping to improve our understanding and promote further in-depth studies.

**[Key words]** underwater weapons; underwater explosion; wounds and injuries; ship shock injury

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2016, 37(10): 1283-1286]

鱼雷、水雷、深水炸弹等是现代海战中必备的水中武器。这类武器在水下爆炸瞬间产生能量巨大的水下冲击波和气泡脉动等载荷, 通过接触或非接触方式对水中人员造成巨大损伤; 当水下冲击波到达舰艇时经船体传导变成固体冲击波, 对水面舰艇上的人员造成损伤<sup>[1]</sup>。因而, 对水下爆炸损伤生物效应的研究逐渐成为世界军事医学关注的热点和难点。

### 1 水下爆炸损伤的特点

水的密度为空气的 800 倍, 并具有相对的不可压缩性, 与空气冲击波相比, 水下冲击波具有传播速度快、传播距离远及无典型的压缩区和稀疏区等特点, 所以其致伤机制和损伤特点不同于空气冲击波。水下冲击波经舰体转变成为固体冲击波后, 其致伤方式、致伤特点及损伤程度也发生了明显的变化<sup>[2]</sup>。

因此, 在海战中, 人员所处的战位不同, 其损伤机制、损伤程度往往也不同。

舱室及甲板战位是海战中最常见的战位。在水下冲击波和气泡脉动等载荷的作用下, 舰船发生剧烈的冲击运动。当作用在舰艇艇员身上的力、加速度或位移等超过人体能够承受的最大限度时, 就会导致人体发生损伤, 这称为舰艇冲击伤; 舰艇冲击伤伤员轻者丧失战斗能力, 重者可死亡<sup>[2]</sup>。其次, 水下爆炸致水下战位的损伤多出现在岛礁登陆作战时, 主要是对水下蛙人、弃船落水人员的损伤。研究表明, 水下冲击波主要通过动压和超压对机体造成损伤, 负压也有一定的致伤作用, 如导致肺、肠道等含气器官的扩张、组织过度机械性拉伸等<sup>[3]</sup>。一般情况下, 冲击波由水进入空气后能量会大大衰减。因此, 冲击波对水中人员的损伤主要集中在水面以下的人体部位, 导致肠道、肺部的损伤<sup>[3]</sup>。

**[收稿日期]** 2016-05-13 **[接受日期]** 2016-06-21

**[作者简介]** 张丹枫, 博士生, E-mail: dfzhangsmmu@163.com

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

## 2 水下爆炸损伤的研究现状

2.1 舰艇冲击伤的研究现状 西方发达国家在第二次世界大战(二战)前后便开始着手研究舰艇冲击伤。美国韦恩州立大学于1939年进行水下爆炸损伤生物力学的研究,建立了从头到脚的各种人体环节模型,研究冲击力与各部位损伤的关系,发现腰椎是舰艇冲击中较易损伤的部位<sup>[4]</sup>。之后 Pitzen 等<sup>[5]</sup>建立了腰椎有限元模型来预测其压缩状态下的生物力学特性。虽然生物力学研究将冲击因素简化,但其对预测人体各部位的冲击响应仍具有十分重要的意义。美国于20世纪50年代最早开展了驱逐舰和扫雷舰遭受实弹实船水下爆炸冲击实验,在实验中安放了坐姿、立姿和改进的立姿模拟仿真开展冲击响应实验,并与与仿真真人并排放置的同姿态的真人冲击响应进行对比测试分析,结果表明真人与仿真人的冲击响应吻合程度较高<sup>[6]</sup>。此后该类仿真真人逐渐应用于舰艇抗冲击实验<sup>[7]</sup>,获得了大批珍贵数据。尽管仿真真人结构与真人差距较大,但其能在更加恶劣的环境下进行冲击实验,对真实的战场环境模拟更加具有代表性。在舰艇冲击运动真人实验中最有开创性意义的是1966年 Mahone<sup>[8]</sup>开展的志愿者模拟冲击实验。该实验利用舰艇冲击模拟器对26位志愿者进行了700次冲击实验,实验从较低的速度开始,随后依次增加,每次冲击后志愿者的主观反应都被记录下来。实验中通过高速摄像记录坐姿与立姿人员的整体响应信息,通过图像分析得到了人体各部位的速度曲线和位移,由此得到了人体的飞离速度并推导出了人体飞离甲板的相关经验公式。尽管志愿者实验冲击强度低,未造成人员损伤,但是所取得的实验结果极其珍贵,对各国的舰员抗冲击研究有着极为重要的指导意义。

我国的舰艇冲击伤研究起步较晚,但进展较快,研究成果丰富。乐秀鸿等<sup>[9]</sup>在20世纪80年代,利用新鲜尸体开展了动态冲击实验和静态压缩实验,获取人体下肢主要负重骨骼、脊椎骨及椎间盘、骨盆等在动、静态压缩条件下的极限强度、过载值、变形等,提出了冲击耐受极值,分析了损伤特点。王国喜<sup>[10]</sup>利用分离的跟骨标本开展了人体跟骨冲击压缩实验,分析得到跟骨的损伤特点和耐受载荷。一般而言,新鲜尸体是损伤生物力学研究的良好代用品。尸体具有与真人一致的解剖学结构,并且可以在尸体上安放正常人体不能安放的各种传感器。

但是尸体缺乏正常人体的肌肉响应,缺少冲击对机体造成的生理、心理和病理反应的信息。动物实验方面,柯文棋等<sup>[11]</sup>通过舰艇抗水雷爆炸实验开展了动物(犬与兔)损伤效应研究,通过检查动物内脏损伤和骨骼骨折情况,探讨了不同水平爆炸距离与动物损伤程度之间的关系。他们还利用冲击机开展了对兔、犬、猪等动物的冲击损伤实验,实验后检查实验动物的内脏损伤情况、病理组织以及骨骼X线片表现,并对损伤情况进行分级,研究结果表明实验动物损伤程度随着冲击强度的增大而加重,确定了损伤程度与爆炸强度之间的关系<sup>[12]</sup>。

2.2 水下冲击伤的研究现状 早在二战时期就发生了大量水下冲击损伤案例,人们开始注意到水中人员可因水下冲击致伤甚至死亡。1967年埃以消耗战争期间,一枚导弹在水中爆炸,有32名落水人员获救,其中有27例发生肺冲击伤,24例有腹部冲击伤,探查发现其中22例有肠道穿孔,19例同时有肺和胃肠损伤,死亡4例。尽管如此,真正有关水下冲击伤的研究在20世纪60年代末美军建立了水下实验场后才全面展开。美军研究人员探讨了不同动物对不同当量三硝基甲苯(TNT)、不同水深和不同距离的水下冲击损伤的特点和量效关系,并根据研究结果提出了水下冲击伤的标准和安全限值<sup>[13]</sup>。在防护研究方面,Cripps和Cooper<sup>[14]</sup>研究了不同密度复合材料对猪水下冲击伤的保护效果,发现复合材料对肺和小肠有较好的保护作用。由于涉及保密,有关水下冲击伤的研究尚未见详细报道。

近年来,第三军医大学野战外科研究所<sup>[15-16]</sup>和海军医学研究所<sup>[17-18]</sup>等单位分别对水下冲击伤及舰艇冲击伤进行了大量实验研究,总结水下爆炸物理参量变化与伤情的关系,分析水下冲击伤与舰艇冲击伤的伤情特点,探索致伤机制。研究发现肺是水下冲击伤中最容易损伤的器官,高强度冲击波直接作用于胸部造成严重损伤,损伤可能与血流动力学的变化、内爆效应、惯性作用、肺内液相和气相压力差等机制有关。而舰艇冲击伤则容易导致下肢、骨盆、脊椎等部位损伤,同时容易出现脾、肝破裂等隐蔽性损伤。同时各研究单位利用石膏、塑料制品、复合材料等开展了防护研究探索。

尽管学者对水下爆炸损伤生物效应方面的研究取得了长足的进步,然而随着研究的深入,更多问题展现在人们的面前,不断促使研究的深入和拓展。首先传统的研究方法已经不适应现在的新型高爆性武

器;其次舰艇冲击对人体的损伤机制需要进一步深入研究,目前人们对胸腹部、脊柱、四肢的冲击损伤机制已有一定的认识,但是对冲击引起的颅脑、神经血管损伤的机制有待进一步研究;当前还没有能够有效阻挡水下冲击波对人体冲击损伤的防护装备。

### 3 展 望

经过大量的动物实验及模拟仿真研究,对水下爆炸致不同战位人员损伤的损伤机制、致伤特点和防护措施等的研究均取得了一定成果<sup>[19]</sup>。但是随着武器类型的不断更新换代,新技术、新方法的不断引入,水下爆炸致不同战位人员损伤的研究内容和研究方法也应该逐步深入并完善。根据发展需要,未来在研究方法和研究内容方面有以下几个问题值得重视。

#### 3.1 研究方法

3.1.1 仿真数值模拟研究 水下爆炸环境复杂,仿真数值模拟研究实施极为困难,受海况影响极大,且费用高昂,但仿真数值模拟研究极为重要。我国开展的一些仿真数值模拟研究<sup>[20-21]</sup>与西方国家差距较大。未来应加强仿真人水下爆炸数据采集、有限元模型研究和大型水下爆炸数值模拟软件开发。

3.1.2 水下高速摄影 目前国内外对水下爆炸能量释放及传播规律的研究较为透彻<sup>[22-23]</sup>,但是对水下爆炸致生物损伤效应的研究相对较少。水下高速摄影是研究水下爆炸致伤规律的重要方法之一,通过比对分析水下爆炸时的照片,可以了解生物受伤后的即刻表现,明确不同迎爆部位的损伤特点等。国内在水下高速摄影方面仍有待完善。

3.1.3 建立室内爆炸研究平台,进行近场模拟动物实验 由于条件所限,不断进行室外爆炸实验相对困难。在室内建立爆炸水池,使用小动物进行模拟实验,排除水温、海况等的影响,可以大大提高实验效率,积累实验数据,为室外实验提供依据。

3.1.4 实弹实船水下爆炸实验 实弹实船水下爆炸实验是评价动物实验和仿真数值模拟研究可靠性的金标准。水下爆炸研究受炸药类型、药量大小、水下环境和舰船结构等因素的影响,致使任何模拟或缩比实验必然存在一定误差,因此进行实弹实船水下爆炸实验是最直接、有效的方式。

3.1.5 建立水中武器杀伤生物效应评估中心 建立水中武器致伤研究中心,利用水中武器定型实验等对其致生物损伤的效应进行评估,建立实验验证方法,为水中武器生物杀伤威力提供量化评估手段。

#### 3.2 研究内容

3.2.1 更加关注复合冲击伤、新型爆炸源致伤 随着各种水下新概念武器的出现以及新型爆炸性武器的研制,水下爆炸致伤类型不断增加,尤其是与核辐射、热辐射、机械力等同时或相继作用于人体会造成复合冲击伤,如放射复合伤、烧冲复合伤等。复合伤伤情异常复杂,救治十分困难,需要我们投入更多关注。

3.2.2 更加关注水下冲击致颅脑损伤 目前水下爆炸致伤研究主要集中在肺、肠道等含气器官,对颅脑损伤研究较少。陆上爆炸研究表明爆炸伤后会导致脑震荡、呼吸抑制,及时有效的气管插管能够帮助伤员恢复呼吸<sup>[24-27]</sup>。水下冲击波同样也会导致伤员出现脑震荡等短暂意识丧失,即使伤员其他脏器未受到明显损伤,也极可能因溺水死亡。这些人员如果得到及时、适当的救治,如吸氧、清醒剂、刺激剂,使之恢复意识,可挽救生命。

3.2.3 人体响应数据研究 加强头部、关节等重要部位响应数据的测试与研究,对身体各部位的冲击耐受限值进行量化,制定损伤评定标准。

3.2.4 损伤机制研究 对损伤机制的全面了解是正确救治的前提。通过仿真数值模拟研究水下爆炸损伤时作用于机体上的加速度、力、力矩、位移等与持续时间之间的函数关系<sup>[28]</sup>。通过动物实验研究水下爆炸损伤时机体神经行为学变化、炎症免疫变化机制等。

3.2.5 防护系统研究 防护是减少损伤的重要措施,因此要重视水下爆炸损伤的防护研究。不仅限于缓冲爆炸冲击波的复合材料等防护装备研究,还应该包括对激素、抗感染、高压氧等药物及康复治疗的研究。

### 4 结 语

目前,各国在水下爆炸致舰船结构破坏研究方面取得了长足的进步,积累了一定的舰船抗爆数据,但是由于水下爆炸环境复杂、模拟困难,有关水下爆炸对人员损伤效应方面的研究相对滞后。动物实验中,由于动物体型、组织生物力学特征等与人体差别较大,得到的数据与人体差异较大;尸体实验、仿真数值模拟研究缺乏活体组织、肌肉的响应。因此,需要综合运用多种方法开展相关研究。未来需要对实验方法、实验环境、实验模型、实验场地进行深入并完善的研究,建立水下爆炸杀伤生物效应评估中心,为各种

类型的水中武器设计与改型、战伤救治等提供相应的科学技术支撑,为海上卫勤保障体系提供依据。

## [参考文献]

- [1] 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.
- [2] ZONG Z, HUNG K C, LAM K Y. Modeling and simulation of human body response to ship shock motion [C]//Proceedings of the 71<sup>st</sup> Shock and Vibration Symposium November 6-9, 2000, Arlington, VA, USA. Washington DC: SAVIAC, 2000.
- [3] 杨志焕,朱佩芳,蒋建新,王正国,尹志勇,周继红,等. 水下冲击损伤特点的初步探讨[J]. 中华创伤杂志,2003,19:111-114.
- [4] GONG S W, LAM K Y, HUNG K C. Shock response attenuation of human on shipboard to underwater explosion [C]//Proceedings of the 71<sup>st</sup> Shock and Vibration Symposium November 6-9, 2000, Arlington, VA, USA. Washington DC: SAVIAC, 2000.
- [5] PITZEN T, CEISLER F, MATTHIS D, MÜLLER-STORZ H, BARBIER D, STEUDEL W I, et al. A finite element model for predicting the biomechanical behaviour of the human lumbar spine[J]. Control Eng Prac, 2002, 10: 83-90.
- [6] HIRSCH A E. A comparison of the responses of men and dummies to ship shock motions [C]//Impact acceleration stress. A symposium held at Brooks Air force Base. November, 27-29, 1961. Washington DC: NASA, 1962.
- [7] OGLESBY D B, SHIN Y S. Human male and female biodynamic response to underwater explosion events [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1998.
- [8] MAHONE R M. Man's response to ship shock motions[R]. AD628891, 1966.
- [9] 乐秀鸿,柯文棋,杨 军,吴英群. 垂直受压下人体下肢骨骼损伤特点的研究[J]. 中国运动医学杂志,1987,6:4-6.
- [10] 王国喜. 人体跟骨冲击损伤的生物力学研究[J]. 医用生物力学,2004,19:240-244.
- [11] 柯文棋,杨 军,乐秀鸿,吴英群,许露生. 水下爆炸对舰船上动物冲击损伤效应的观察与分析[J]. 振动与冲击,1989(1):9-15.
- [12] 柯文棋,杨 军,乐秀鸿,吴英群,魏 晶,顾兆祥. 模拟舰艇冲击运动对动物损伤作用的实验研究[J]. 振动与冲击,1984(2):42-49.
- [13] LANCE R M, BASS C R. Underwater blast injury: a review of standards[J]. Journal of the South Pacific Underwater Medicine Society, 2015, 45: 190-199.
- [14] CRIPPS N P, COOPER G J. The influence of personal blast protection on the distribution and severity of primary blast gut injury[J]. J trauma, 1996, 40 (3 Suppl): S206-S211.
- [15] 严 军,蒋建新,周继红,杨志焕,王正国,李晓炎,等. 犬水下冲击伤后血糖变化与肺损伤的关联分析[J]. 创伤外科杂志,2010,12:259-261.
- [16] 刘大维,杨志焕,周继红,张 波,蒋建新,黄 宏,等. 水下冲击伤后犬主要脏器的病理学改变[J]. 西北国防医学杂志,2009,30:1-4.
- [17] 黄建松,汪 玉,李政年. 水下爆炸对舰员冲击作用安全阈值研究概述[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2012,19:317-320.
- [18] 黄建松,李政年. 人体胸腰椎体几何学测量及生物力学特性实验研究[J]. 中国生物医学工程学报,2015,34:629-633.
- [19] 黄建松,李政年,柯文棋,乐秀鸿,周宏元. 水下爆炸冲击舰船致动物损伤效应的试验研究[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2015,22:15-18.
- [20] 陈高杰,周庆飞,王树乐,程素秋. 小型浮动冲击平台水下爆炸数值仿真与验证[J]. 电子测量技术,2016,39:42-44.
- [21] 徐功慧,李家波,赵红光,邵建军. 水中兵器毁伤效能评估现状及发展[J]. 工程爆破,2016,22:38-42.
- [22] 朱 宽,钟冬望,何 理,司剑峰,殷秀红,刘建程. 基于高速摄影技术模拟深水爆破环境下气泡脉动规律研究[J]. 工程爆破,2015,21:5-9.
- [23] 林加剑,贾 虎. 低能量导爆索水下爆炸的气泡脉动特性(英文)[J]. 含能材料,2015,23:372-375.
- [24] 侯立军,张光霁,朱 诚,卢亦成,吴国萍,刘荫秋,等. 犬颅脑爆炸伤后早期脑组织病理改变[J]. 第二军医大学学报,2001,22:1105-1107.  
HOU L J, ZHANG G J, ZHU C, LU Y C, WU G P, LIU Y Q, et al. Pathological changes in brain tissue at early stage of explosive injury in dogs[J]. Acad J Sec Mil Med Univ, 2001, 22: 1105-1107.
- [25] 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.
- [26] 段朝霞,张洁元,陈魁君,李冠桦,李兵仓. 爆炸冲击波所致轻度颅脑损伤的诊断与处理[J/CD]. 中华诊断学电子杂志,2016,4:26-29.
- [27] 高 洁,王永堂,刘 媛,王 莉,伍亚民,赖西南,等. 爆炸冲击致失能性脑损伤的诊治原则与思考[J/CD]. 中华诊断学电子杂志,2016,4:13-18.
- [28] 黄建松,汪 玉,杜俭业,李政年. 水下爆炸引致舰员冲击损伤的生物力学研究方法进展[J]. 北京生物医学工程,2012,31:320-324.