

舰船设备与总体安全性损伤等级的对比研究

张阿漫, 姚熊亮, 李克杰, 李 佳

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 应用数值方法对水面舰船及舰上设备进行水下非接触爆炸的数值试验, 通过设置大量的工况计算可得舰船总体与设备的损伤半径, 对比各损伤半径可得总体和设备的损坏顺序对舰船生命力的影响, 由此可以判断在不同爆距范围内对舰船结构及设备的破坏程度及破坏部位, 对工程应用有一定的指导意义, 可为舰船生命力的评估提供参考。

关键词: 船舶; 水面舰船; 数值试验; 总体与设备; 损伤半径

中图分类号: U674.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2008) 01-0069-05

Research on the comparison between warship equipment and the damage grade of total security

ZHANG A-Man, YAO Xiong-liang, LI Ke-jie, LI Jia

(School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Numerical experimentations on surface warships and equipment subjected to non-contact underwater explosion are conducted in numerical methods. Damage radius of the warships and equipment are obtained by setting a number of work conditions and the effect of damage sequence of collectivity and equipment on the vitality of warships can be reached by comparing each damage radius. Therefore, it is able to judge the damage degrade and damage parts in different detonation ranges. It is instructive for the engineering application and referable for the estimate of the vitality of warships.

Key words: ship; surface warship; numerical experimentation; collectivity and equipment; damage radius

0 引言

由于舰船设备与总体的损伤机理不同, 且损伤情况还与装药爆炸时的药量、位置等参数有关。因此, 很难寻找一种合理、全面的方法对设备和总体的安全性进行统一评估, 文献[1]规定了在遭受水下爆炸时水面舰船安全半径的计算方法, 该方法是针对舰船总体而言的, 而没有考虑设备对舰船损伤半径的影响。事实上, 在多数情况下, 总体和设备的损伤半径是不同的, 这就涉及到某一爆炸工况下舰船设备和总体哪一项先损坏的问题, 无论是总体先损坏还是设备先损坏, 这都直接影响到舰船的正常工作的, 进而影响到舰船的生命力。本文应用数值试验的方法从某舰船上选取三套设备(尾辅推螺旋桨、尾辅推导轨、首部声纳围井)对其进行安全性校核, 得出其损伤半径, 并与总体的

损伤半径进行对比, 以对舰船设备和总体的损伤程度进行考核。

1 数值计算方法

对于一些几何形状规则的简单结构在遭受水下爆炸载荷时的响应从理论上是可以解决的, 但是对于象舰船等几何形状复杂的大型结构进行理论上的求解则比较困难, 目前的解决方法主要还是借助计算机应用有限元理论进行数值试验求解, Young S. Shin^[2]介绍了美海军应用数值试验计算水面舰船遭受非接触水下爆炸载荷作用时的一般方法, S.W.Gong、K.Y.Lam^[3,4]应用相同的方法分别计算了船体舱段和复合材料的圆筒结构遭受爆炸载荷的数值求解。该方法采用DAA^[5,6]法计算流场与结构的相互作用, 采用LS-DYNA和

收稿日期: 2007-05-28; 修回日期: 2007-07-27

基金项目: 船舶工业国防科技预研基金(批准号: 07J1.5.3)资助课题

作者简介: 张阿漫(1981-), 男, 博士后, 副教授。主要研究方向: 舰船结构冲击动力学, 水下气泡动力学。

USA相结合的方法进行有限元和边界元的模拟. 张振华^[7]等采用DYTRAN程序模拟了球形药包在无限水域中爆炸产生的冲击波, 讨论了不同流体网格密度对爆炸压力传播的影响, 汪俊, 刘建湖等^[8]应用ABAQUS对加筋圆柱壳进行了水下爆炸动响应的数值模拟, 得出了一些复杂圆柱壳结构在水下爆炸作用下的动响应和冲击环境规律.

国外水下爆炸计算分析最常用的数值方法是DYNA程序和USA (Underwater shock Analysis) 程序相结合, 但由于种种原因, 该程序未能在我国使用, 目前国内最常用的结构水下爆炸分析工具是DYNA、MSC-DYTRAN和ABAQUS程序. 本文基于ABAQUS软件模拟水下爆炸, 图1为数值计算的舰船整体模型及其周围的流场, 图2、3、4为舰船设备的局部放大图, 舰船结构采用一阶四节点和一阶三节点减缩积分的壳单元, 设备处增加了八节点减缩积分的体单元. 考虑到计算速度和计算精度之间不可协调的关系, 取舰船总体结构的网格大小为纵骨间距, 设备处的体网格大小为 $(1/6 \sim 1/8) \times l$ (l 为纵骨间距), 此时既能保证计算精度又能满足计算速度的要求, 流体和结构的相互作用是水下爆炸问题中的关键, ABAQUS应用线性动量守恒将结构的位移场和流体的压力场耦合起来. 在结构和流体的界面处不需要网格一一对应, 可以采用不同的网格密度, 而周围的流体则采用一阶四面体实体单元, 本文应用Geers and Hunter (2002)^[9]估算公式对舰船施加爆炸载荷. 舰船在静水中要受到静水压力的作用, 因此, 应先对水面舰船施加静水载荷的作用, 具体方法是先计算舰船各站所受的静水压力^[10], 换算成节点力的形式, 根据空间刚体的平衡理论^[11]对所加的节点力进行微调, 使舰船处于空间刚体的平衡状态.

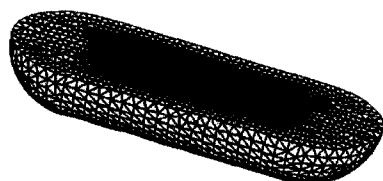


图1 舰船结构及其周围的流场

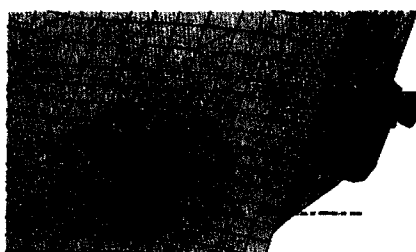


图2 螺旋桨局部放大



图3 尾辅导轨局部放大

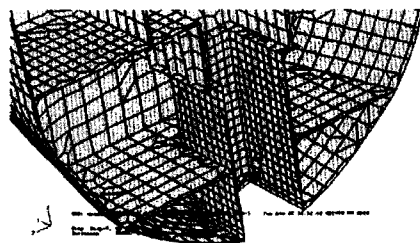


图4 声纳围井局部放大

2 工况的布置

按有关规定, 本文所选取的装药量为 1,000 kg TNT, 按装药的起爆位置分为艏部爆炸、舭部爆炸和艉部爆炸, 爆距从 1 m 到 106 m 每间隔 15 m 布置装药, 爆炸倾角 $\alpha=30^\circ$, 见图5, 工况总数为 $8 \times 3=24$ 个.

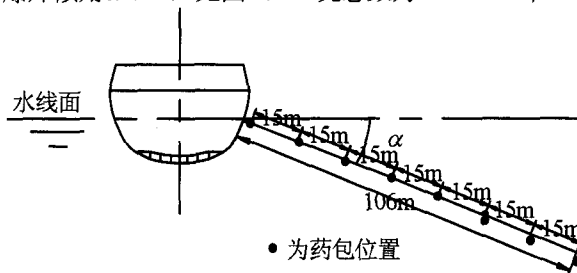


图5 工况布置示意简图

3 螺旋桨与舰船总体的损伤半径

3.1 损伤半径的定义

根据文献[1,12,13]中对于结构损伤等级的描述, 结构损伤半径可定义为:

破坏半径: 当结构的塑性应变达到 0.3 时, 则认为此材料已经失去承载能力, 即结构出现破口, 此时对应的爆距即为破坏半径.

安全半径: 使结构不产生塑性变形的爆距定义为结构的安全半径.

3.2 螺旋桨与舰船总体结构损伤半径的计算

通过对螺旋桨的数值试验, 发现桨叶是螺旋桨的薄弱环节, 且最大应力出现在桨叶的根部, 表1为不同工况下螺旋桨桨叶上的最大 Mises 应力, 由于上述标准对于螺旋桨损伤半径的定义均为材料的塑性应变, 因此, 有必要将上述应力转化成塑性应变.

表1 不同工况下螺旋桨处的最大应力 (MPa)

爆炸位置 爆距 d/m	艏部 爆炸	舯部 爆炸	艉部 爆炸
1	1274.7	1487.7	1705.1
16	843.7	995.4	1170.0
31	556.5	661.0	774.1
46	371.6	443.3	500.0
61	295.2	341.5	364.8
76	262.8	295.8	313.4
91	242.0	256.5	270.8
106	210.7	224.0	229.5

本文假定螺旋桨处的材料为线性强化弹塑性材料, 图6为不同应变率下的线性强化弹塑性材料的应力—应变关系, 图6中, E 为弹性模量, E' 为塑性模量, 由图6中可见, 虽然在不同的应变率下材料的屈服极限不同, 但 β 角保持不变. 由此, 在某一工况下, 塑性应变和应力有如下关系:

$$\frac{\sigma_p - N \times \sigma_s}{\varepsilon_p} = \tan \beta \quad (1)$$

式中, ε_p 为塑性应变; σ_p 为该塑性应变下所对应的应力; N 为动态屈服极限提高系数, N 的定义见公式(2); σ_s 为舰艇材料的静态屈服极限.

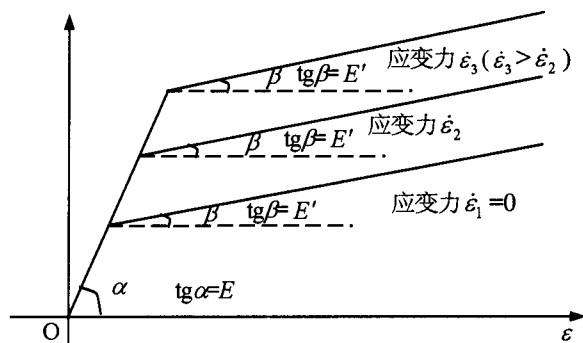


图6 不同应变率下的线性强化弹塑性材料应力—应变关系

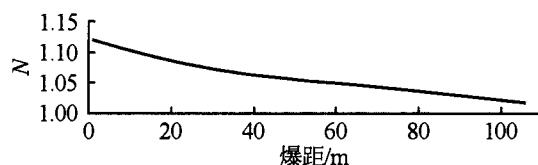
由应力向应变的转化采用公式(1), σ_p 即为表1中的数值, σ_s 和 $\tan \beta$ 由设计部门给定, 由此可见, 只要确定 N 的值, 便可求得 ε_p 的值, 以下具体介绍 N 的计算方法.

本舰船螺旋桨处的材料强化用 Cowper-Symonds 应变率强化模型.

$$N = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

式中, σ_s 为静态屈服应力; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率, $p=3.45$; $D=22,026/s$. 选取螺旋桨上的单元输出其应变时历曲线, 对其进行简单的数学处理可得动态屈服极

限提高系数 N 随爆距变化关系如图7.

图7 动态屈服极限提高系数 N 随爆距的变化

对图7中的曲线进行插值可得本文中特定爆距下的动态屈服极限提高系数 N , 见表2.

表2 特定爆距下动态屈服极限提高系数 N

爆距 d/m	动态屈服极限提高系数 N
1	1.121
16	1.091
31	1.072
46	1.059
61	1.049
76	1.039
91	1.028
106	1.018

将相关参数代入公式(1)中便可得转化后的塑性应变值, 见表3. 从表3可见, 在60m以后工况塑性应变为负值, 这说明在60m以后工况螺旋桨上没有塑性应变, 且塑性应变超过0.3时说明在该工况下螺旋桨已经损坏, 即表3中的数据均为数学概念上的计算结果, 但为了以后求损伤半径插值的需要, 仍保留塑性应变超过0.3和塑性应变为负的值.

表3 不同工况下螺旋桨处的最大塑性应变

爆炸位置 爆距 d/m	艏部 爆炸	舯部 爆炸	艉部 爆炸
1	0.670	0.830	0.993
16	0.355	0.468	0.599
31	0.143	0.221	0.306
46	0.009	0.062	0.105
61	-0.047	-0.012	0.005
76	-0.068	-0.043	-0.030
91	-0.081	-0.070	-0.059
106	-0.101	-0.091	-0.087

根据表3可得图8中不同爆炸位置下塑性应变随爆距的变化关系, 图中塑性应变为0.3时的爆距为该爆炸位置下的破坏半径, 塑性应变为0时的爆距为该爆炸位置下的安全半径.

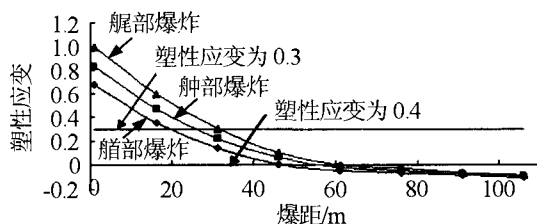


图8 艏、舢、艮爆炸的塑性应变随爆距的变化关系

从图8可见，艮部爆炸对螺旋桨造成的损伤较为严重，舢部爆炸次之，舢部爆炸最小，且随着爆距的增加，三条曲线之间的间距变小，说明随着爆距的增大，爆炸位置的对螺旋桨造成损伤将趋于一致。根据表3中的数据插值可得出螺旋桨的破坏半径和安全半径。应用相同的方法可以得出舰船总体的破坏半径和安全半径，舰船总体的破坏半径和安全半径的定义与螺旋桨的类似，不同之处是在计算舰船总体安全半径时以船体外板的塑性应变作为考核对象。表4为螺旋桨和舰船总体结构的损伤半径。

由表4可见，对于近场爆炸，舰船总体结构的破坏半径舢部最小，舢部较大，这是因为近场爆炸时，局部响应为主，舰船舢、艮在结构上有较大过度，容易产生应力集中。对于远场工况，舰船总体结构的安全半径舢部较大，这是因为对于远场爆炸，总体响应占优，显然舢部爆炸较舢、艮工况的总体相应要明显，

艮部爆炸对螺旋桨造成的破坏作用最大，舢部爆炸次之，舢部爆炸最小。

表4 不同工况下螺旋桨和舰船总体结构的损伤半径

损伤半径	破坏半径/m		安全半径/m	
	螺旋桨	舰船总体	螺旋桨	舰船总体
舢部爆炸	19.31	13.36	47.59	48.79
舢部爆炸	25.49	12.00	57.62	60.25
艮部爆炸	31.37	15.17	62.43	59.25

4 尾辅推导轨、舢部声纳围井安全半径的计算

尾辅推导轨是用于升降螺旋桨的装置，如果导轨的相对塑性变形超过其临界值，升降机构将会卡住而影响螺旋桨的正常工作。同样，舢部声纳围井角点是用于升降声纳结构的装置，如果角点的相对塑性变形过大，声纳装置将无法完成升降功能而影响其正常工作。上述工况下对两者的塑性变形进行考核，取临界值为参考值，将各工况下的塑性变形除以参考值，可得各工况下的塑性变形相对值，则根据上面的定义，相对塑性变形超过1的工况说明该装置已无法正常工作。

表5为不同工况下尾辅推导轨与声纳围井角点的相对塑性变形，表中相对塑性变形超过1的值表明该工况下设备已损坏。图9、10为舢、舢、艮爆炸尾辅推导轨和声纳围井角点相对塑性变形随爆距变化关系。

表5 不同工况下尾辅推导轨和声纳围井的相对塑性变形

爆距 d/m	尾辅推导轨相对塑性变形			声纳围井角点相对塑性变形		
	舢部爆炸	舢部爆炸	艮部爆炸	舢部爆炸	舢部爆炸	艮部爆炸
1	13.85	16.31	19.16	19.92	17.63	15.32
16	10.16	11.64	13.51	14.21	12.13	10.05
31	7.08	8.05	9.06	9.02	7.43	6.12
46	4.09	4.64	5.49	5.4	4.53	3.61
61	2.23	2.47	2.91	2.64	2.13	1.7
76	1.39	1.57	1.83	1.34	1.03	0.85
91	0.89	0.93	1.20	0.85	0.76	0.59
106	0.69	0.69	0.71	0.63	0.53	0.41

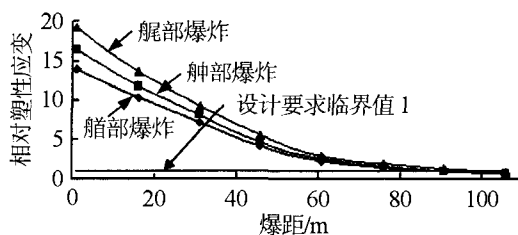


图9 舢、舢、艮爆炸尾辅推导轨相对塑性变形随爆距的变化关系

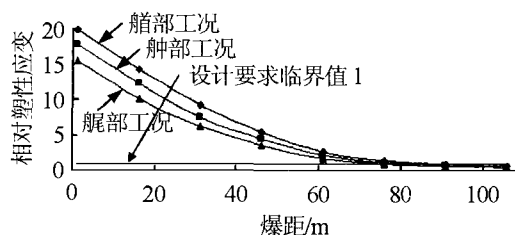


图10 舢、舢、艮爆炸声纳围井点相对塑性变形随爆距的变化关系

由上图 9 可见,对于尾辅推导轨,同种工况下,艏部爆炸最危险,舦部爆炸次之,舩部爆炸最安全,对于声纳围井,舩部爆炸最危险,舦部爆炸次之,艏部爆炸最安全,还可以看出,随着爆距的增加,装药对两者的破坏作用趋于一致.对表 5 进行插值可得尾辅推导轨和声纳围井的安全半径,见表 6.

表 6 不同工况下尾辅推导轨和声纳围井的安全半径

爆炸位置 \ 安全半径/m	尾辅推导轨	声纳围井
舩部爆炸	86.5	85.1
舦部爆炸	88.6	76.9
艏部爆炸	96.7	72.4

由表 6 可见,对于舩部爆炸,尾辅推导轨和声纳

围井的安全半径大体一致,对于舦部爆炸和艏部爆炸,尾辅推导轨的安全半径要比声纳围井的大,这说明在同种工况下,尾辅推导轨先于声纳围井结构损坏.

5 舰船设备与总体损伤半径的对比

表 7 为舰船各设备的损伤半径与舰船总体损伤半径的汇总,由表 7 可见,声纳围井和尾辅推的安全半径比舰船总体的安全半径要大,这说明在某一工况下,虽然舰船总体没有发生损坏,但声纳和尾辅推很可能已经损坏.螺旋桨的破坏半径比舰船总体结构的破坏半径要大一倍作用,但安全半径两者相差不大,这说明对于近场爆炸时,螺旋桨要比舰船总体结构先损坏,而对于远场爆炸,螺旋桨和舰船总体几乎同时损坏.

表 7 舰船各设备与总体损伤半径

爆炸位置	舰船总体破坏半径/m	螺旋桨破坏半径/m	舰船总体安全半径/m	螺旋桨安全半径/m	声纳围井安全半径/m	尾辅推安全半径/m
舩部爆炸	13.36	19.31	48.79	47.59	85.1	86.5
舦部爆炸	12.00	25.49	60.25	57.62	76.9	88.6
艏部爆炸	15.17	31.37	59.25	62.43	72.4	96.7

6 结论

本文对水面舰船设备及总体进行了非接触水下爆炸的数值求解,从舰船上选取了三套设备,举例说明了设备与总体安全性对水面舰船生命力的影响,主要得出以下结论:

1) 对于近场爆炸,舩、舦工况对舰船总体造成的损伤较为严重,远场爆炸时,舦部爆炸对舰船总体造成的损伤较为严重;

2) 随着爆距的增加,舩、舦、舦工况时装药对设备及总体的损伤趋于一致;

3) 根据材料应力—应变的转换关系可得设备和舰船总体的损伤半径;

4) 根据舰船总体和设备的损伤半径,可得舩、舦、舦爆炸不同爆距范围时总体和设备的损伤情况.

参考文献:

- [1] GJB4000-2000. 舰船通用规范[S]. 北京:国防科工委军标出版社发行部, 2000.
- [2] Young S. Shin. Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion[J]. Computers and Structures. 2004, 82: 2211-2219.
- [3] S.W.Gong, K.Y.Lam. Transient response of floating composite ship section subjected to underwater shock[J]. Composite Structures. 1999, 46: 65-71.

- [4] S.W.Gong, K.Y.Lam. Transient response of stiffened composite submerble hull subjected to underwater explosive shock[J]. Composite Structures, 1998, 41: 27-37.
- [5] Geers TL. Doubly asymptotic approximations for transient motions of submerged structures[J]. J Acoust Soc Am. 1978, 64(5): 1500-1510.
- [6] Geers TL. Residual potential and approximate methods for three-dimensional fluid-structure interaction problems [J]. J Acoust Soc Am. 1971, 49: 1505-1510.
- [7] 张振华, 朱锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 24(2): 182-188.
- [8] 汪俊. 加筋圆柱壳在水下爆炸和静水压力联合作用下的动响应研究[D]. CSSRC 硕士论文, 2005.
- [9] Geers, TL., and K.S.Hunter. An Integrated Wave-Effects Model for an Underwater Explosion Bubble [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1584-1601.
- [10] 朱锡、吴梵. 舰艇强度[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [11] 哈尔滨工业大学理论力学教研组. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [12] 朱锡, 张振华等. 潜艇典型结构在爆炸冲击载荷作用下开裂判据的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 541-545.
- [13] 张振华. 舰船结构水下抗爆能力研究[D]. 海军工程大学博士论文, 2004.