

文章编号: 1001-1455(2004)03-0201-06

# 水中爆炸冲击波载荷作用下 舰船结构动态响应的数值模拟\*

陈永念<sup>1</sup>, 尹 群<sup>1</sup>, 胡海岩<sup>2</sup>

(1. 华东船舶工业学院船舶与海洋工程系, 江苏 镇江 212003;

2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 采用大型通用有限元软件 MSC.DYTRAN, 对某型水面舰船全船结构在水下爆炸冲击波载荷作用下的动态响应进行了数值模拟。分别从结构的变形损伤形式、能量吸收和冲击环境等几个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。

关键词: 爆炸力学; 动态响应; 数值模拟; 水中爆炸; 冲击波

中图分类号: O383.3; U661.4

国标学科代码: 130°35

文献标志码: A

## 1 引言

舰船在服役期间极有可能遭受水雷、炸弹等非接触式水下爆炸武器的袭击, 为了保证舰船的安全和正常使用, 提高舰船的生命力, 舰船结构必须具有一定抗水下爆炸载荷的承载能力。舰船承受水下爆炸载荷是舰船结构在很短的时间内, 在巨大冲击载荷作用下的一种复杂的非线性动态响应过程, 属大变形、强非线性问题。同时还涉及到水下爆炸载荷和舰船结构的相互耦合作用。由于水下爆炸的复杂性, 对其进行详细的理论研究, 并企图通过建立一个精确的数学模型, 使水下爆炸问题得到完全的解析是十分困难的。而爆炸实验属于破坏性实验, 实验经费昂贵、实验设备复杂, 不能从根本上解决这一问题。

近几年随着计算机硬件和相关软件的飞速发展, 使得舰船在水下爆炸载荷作用下的数值模拟成为可能。本文中针对某型水面舰船采用大型通用有限元程序 MSC.DYTRAN 对整船结构在水中爆炸冲击波载荷作用下的动态响应进行了数值模拟和分析。

## 2 有限元计算模型

对处于无限水域中的某型水面舰船在爆炸载荷作用下的动态响应进行了研究。综合考虑计算精度和计算成本, 选取船体周围  $120\text{m} \times 40\text{m} \times 15.7\text{m}$  的矩形水域建模计算。并按照无限水域情况对流场边界条件进行适当的处理, 以消除有限计算水域带来的边界影响。在有限元计算中炸药采用 200kg 球形 TNT 药包, 炸药位于船体中剖面正下方, 距离主甲板 20m 处。具体模型如图 1 所示。

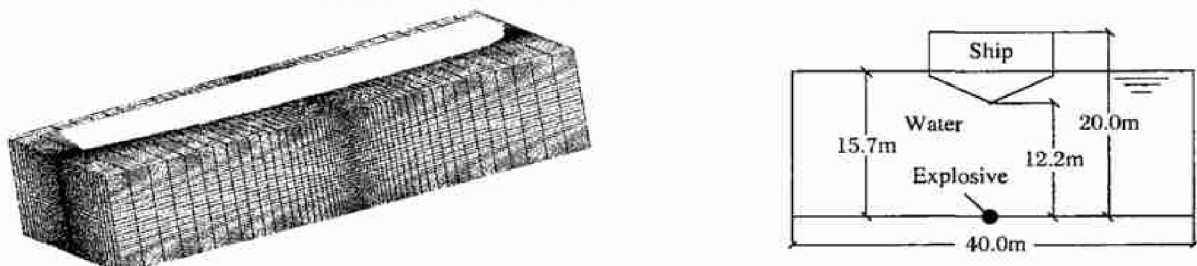


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite elements model

\* 收稿日期: 2003-06-18; 修回日期: 2003-09-16

作者简介: 陈永念(1978—), 男, 硕士研究生。

## 2.1 材料状态方程

DYTRAN 通过欧拉型的有限体积法求解流体动量方程、能量方程、连续性方程和状态方程。对于不同的流体介质(炸药、水和空气)前三种方程相同,但状态方程不同,所以对状态方程要分别予以考虑。

炸药的引爆过程根据 Chapman-Jouget 条件和 Rankine-Hugoniot 关系来模拟。通过起爆卡定义炸药起爆的时间和起爆点,炸药某一单元的起爆时间则根据该单元距离起爆点的距离和爆速确定。炸药全部引爆以后,其爆轰产物的压力根据标准 Jones-Wilkins-Lee (JWL)方程<sup>[1]</sup>

$$p = A \left[ 1 - \omega/R_1 \right] e^{-R_1/\eta} + B \left[ 1 - \omega/R_2 \right] e^{-R_2/\eta} + \omega\eta\rho_0 e$$

式中: $e$  为单位质量内能; $\rho_0$  为材料参考密度, $\rho$  为总体材料密度, $\eta = \rho/\rho_0$ 。计算中炸药状态方程的参数分别为<sup>[1]</sup>: 炸药密度  $\rho_0 = 1717\text{kg/m}^3$ , 炸药化学能  $q_0 = 4.95\text{MJ/kg}$ , 爆轰波传播速度  $D = 7980\text{m/s}$ , JWL 方程参数  $A = 5.24229 \times 10^{11}$ ,  $B = 0.07678 \times 10^{11}$ ,  $R_1 = 4.2$ ,  $R_2 = 1.1$ ,  $\omega = 0.34$ 。

空气和水采用多项式状态方程描述<sup>[1]</sup>

$$p = \begin{cases} a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2)\rho_0 E & \mu > 0 \\ a_1\mu + (b_0 + b_1\mu)\rho_0 E & \mu \leq 0 \end{cases}$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ;  $E$  为单位质量的内能;系数  $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$  可以由实验数据拟合得到。经过大量比较分析计算可知,水的状态方程采用线性多项式状态方程描述即可满足计算要求。当使用线性多项式状态方程描述空气时,要遵循气体  $\gamma$  定律,即  $b_0 = b_1 = 0.4$ , 其它参数为零<sup>[1~2]</sup>。

模型中船体结构全部采用 Key-Hoff 模式二维四边形壳单元 (CQUAD4) 描述。建模时对于加强筋和球扁钢等小骨材,采用刚度等效法,将其等效到所属的板上。板壳单元的材料采用考虑应变速率影响的弹塑性材料描述。应变速率的影响采用<sup>[1]</sup>

$$\sigma_{dy} = \sigma_y \left[ 1 + |\dot{\epsilon}/D| \right]^{1/P}$$

式中: $\sigma_y$  为材料的静态屈服极限, $D$  和  $P$  根据材料而定。算例中  $D = 40$ ,  $P = 5$ <sup>[3]</sup>。

## 2.2 爆炸载荷

TNT 球形药包在水中爆炸后,炸药周围的水介质直接受到炸药爆轰生成的高温、高压气体产物作用。炸药爆轰结束时,周围水的压力、密度、温度都低于爆炸气体的压力和密度。爆炸产物以极大的速度向外扩散,并强烈压缩周围的水介质,使水的压力呈现突跃式的升高,这就形成了初始冲击波,随后冲击波以极快的速度在水中向外传播。图 2 显示了流场中冲击波的传播过程。在无限水深自由流场中,TNT 球形药包爆轰生成的冲击波在水中传播时,波阵面上的压力峰值  $p_m$  的经验公式为<sup>[4]</sup>

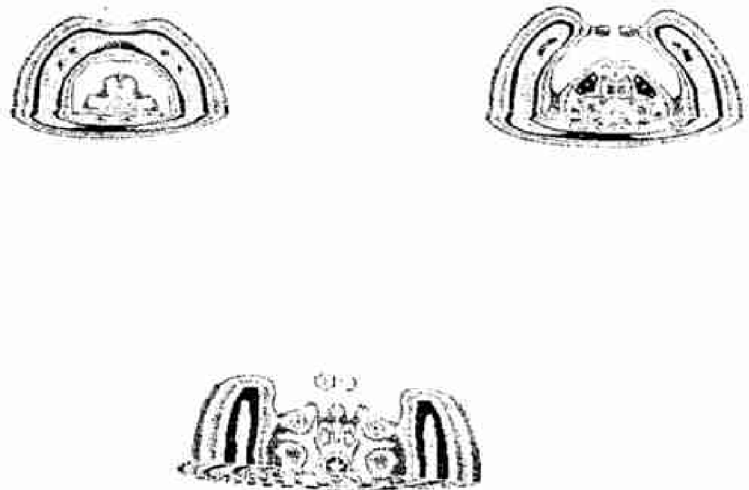


图 2 冲击波扩散时序图

Fig.2 Shock wave pervasion sequence of numerical simulation

$$p_m = 53.3 \left[ W^{1/3}/R \right]^{1.13}$$

图 3(a) 为根据经验公式计算得到的自由场中一测点处冲击波的压力衰减示意图。冲击波随时间的衰减规律的经验公式为<sup>[5]</sup>

$$P_t = \begin{cases} p_m e^{-t/\theta} & 0 < t < \theta \\ 0.368 p_m \theta / t & \theta \leq t < (100 \sim 150)\theta \end{cases}$$

式中： $\theta$ 为指数衰减的时间常数，即压力从峰值 $p_m$ 衰减到 $p_m/e$ 所需的时间。对于TNT炸药而言，指数衰减的时间常数 $\theta$ 与装药量 $W$ 及距离爆炸中心距离 $R$ 的关系为

$$\theta = [W^{1/3}/R]^{-0.24} W^{1/3} \times 10^{-4}$$

上述经验式中， $p_m$ 的单位是MPa， $W$ 的单位是kg， $R$ 的单位是m， $\theta$ 的单位是s。

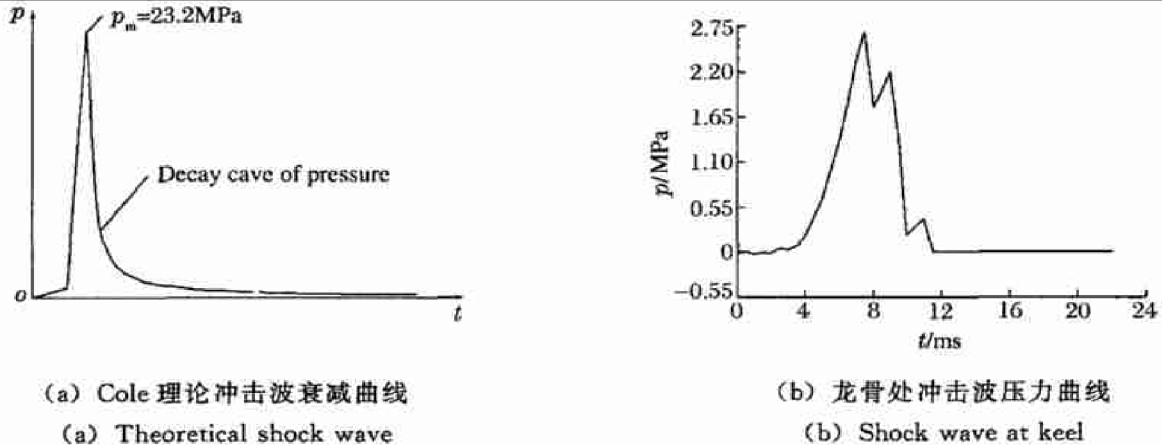


图3 冲击波压力图

Fig. 3 Pressure of shock wave

图3(b)为有限元计算中，炸药正上方船体龙骨处的冲击波压力曲线。从图中可以看出4ms时冲击波传播到船体处，8ms左右达到峰值，压力为26.2MPa。由于舰船和流体的相互耦合作用，冲击波的衰减规律与在自由流场中相比存在较大差别，出现了多次卸载和加载过程。这是因为当冲击波作用到船体时，船体外板以极快的速度向内凹陷。此时周围的流体没能及时补充进来，在船体和流场之间形成了暂时性的真空。压力出现第一次卸载。此后流体在冲击波巨大的压力作用下迅速补充进来，导致压力再次回升。并如此出现多次反复，直到冲击波衰减到足够小。当冲击波传出以后爆炸产物在水中继续以气泡的形式存在，此时气泡内的压力仍然大于外界压力，气泡将推动水介质作径向扩散运动，气泡体积继续膨胀。当气泡体积膨胀到一定程度，气泡内压力下降到与外界静水压力相等。此时由于水的惯性作用，气泡作“过度膨胀”。最终气泡达到最大半径，此时气泡内压力低于周围水介质的压力，气泡在水介质作用下向中心收缩。同样由于水的惯性作用，当气泡内压力达到与周围水压力平衡时，气泡的收缩运动并不能停止，而是再次被“过度压缩”。气泡内的压力再次高于周围水介质的压力。在水的惯性和弹性与气体的可压缩性共同作用下，爆轰生成的气体作膨胀和压缩的往复循环运动。这一过程称为“气泡脉动”，并产生周期性的“脉动压力”。通常气泡产生的脉动压力场值很小，对结构本身不会造成太大损伤，仅仅对内部设备产生一定的影响。所以通常从单纯的研究结构损伤的角度而言，较多的关注的是冲击波的影响。

在此需要说明的是，如果船体与药包的距离足够近，气泡第一次膨胀还未达到最大半径就与主船体接触并溃灭，那么随后的气泡脉动和脉动压力就不会产生。但是，由于气泡溃灭时气泡携带了巨大的能量，此时产生的溃灭压力将对主船体造成巨大威胁。而且其载荷的作用时间也远大于冲击波载荷的作用时间，所以其冲量很大，此时就必须考虑气泡对结构的损伤作用。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 结构变形损伤模式

由于水下爆炸冲击波载荷是衰减很快的球面波，不会像平面波那样对整个船体迎爆面结构造成影响。舰船在水下爆炸冲击波载荷作用下的动态响应具有一定的局部性。水下爆炸结构响应的局部性并不如船舶碰撞问题那样明显。船舶碰撞的响应仅仅集中于被撞区域附近<sup>[6]</sup>。而水下爆炸的响应区域将

波及到一个较大的范围。图 4 为爆炸冲击波扫过以后船体结构的变形损伤图。由图中可以发现，破坏区域主要集中在船体中部迎爆面处。首尾结构由于远离爆炸源，冲击波传到该处时已衰减。因而对首尾结构的损伤很小。而甲板因为不是直接受爆结构，冲击波随时间衰减很快，作用时间极短，所以其变形也不大。图 5 为船体局部结构在冲击波作用下的变形损伤图。从图中可以发现结构的变形破坏主要有以下三种模式：(1)迎爆面的板壳结构，如船体外板，主要表现为面内拉伸变形，出现撕裂破坏；(2)支撑结构，如肋板、各层甲板边缘、内底板边缘、横舱壁边缘、横舱壁边缘，主要承受外板传递的面内压力，屈曲后出现褶皱变形；(3)相交支撑结构，如船底纵桁和肋板相交结构，它们也主要承受面内压力，但是由于结构刚度较大，所以表现为压溃变形模式。

### 3.2 能量吸收

图 6 为爆炸过程中舰船各构件塑性变形能吸收曲线，它反映了这艘舰船在遭受水下爆炸冲击波作用时的能量吸收性能。从图中可以看出，船体外板、横舱壁和内底板是主要吸能构件。各构件在变形初期，能量吸收较快，随着结构变形趋向平缓，能量曲线也变得平缓。当气泡接触船体时，由于结构的破损，能量曲线出现了跃变。

表 1 列出了冲击波过后和外板破裂前两个时刻各构件的能量吸收情况，反映了各构件对能量吸收的参与程度。从表中可以看出，外板为主要吸能构件，它吸收了 50%左右的变形能。由于本

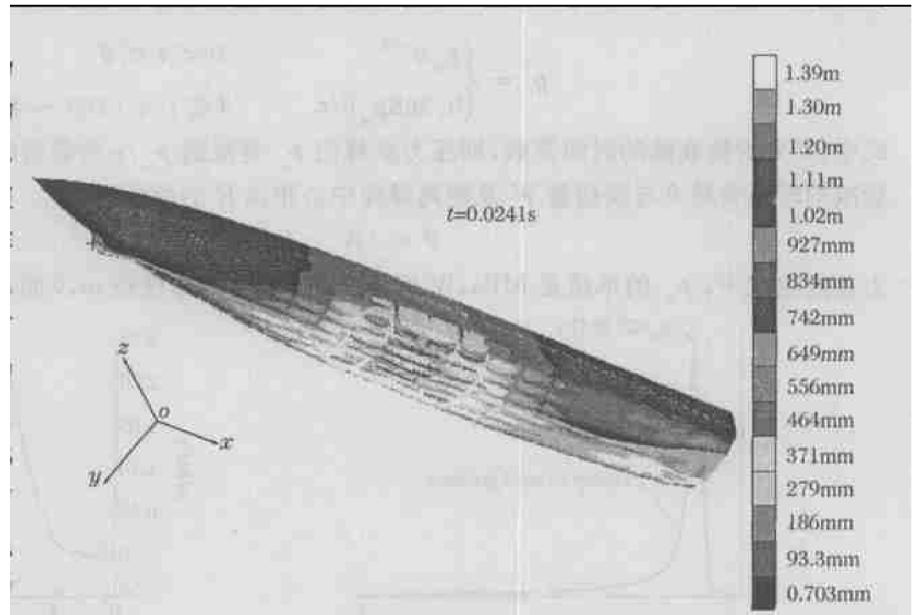


图 4 船体变形云图

Fig.4 Ship structural deformation

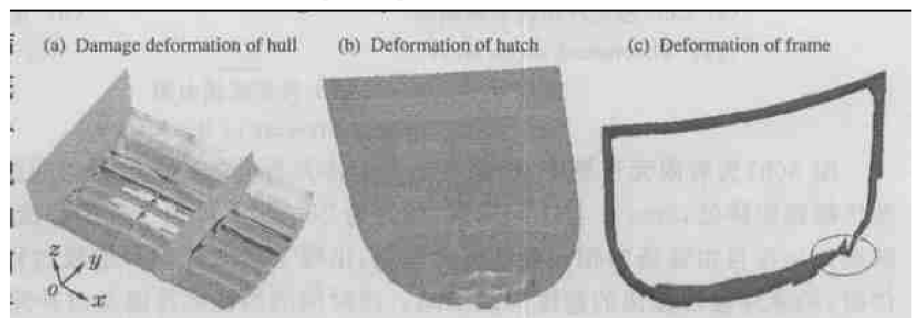


图 5 局部结构变形模式

Fig.5 Damage deformation of local structure

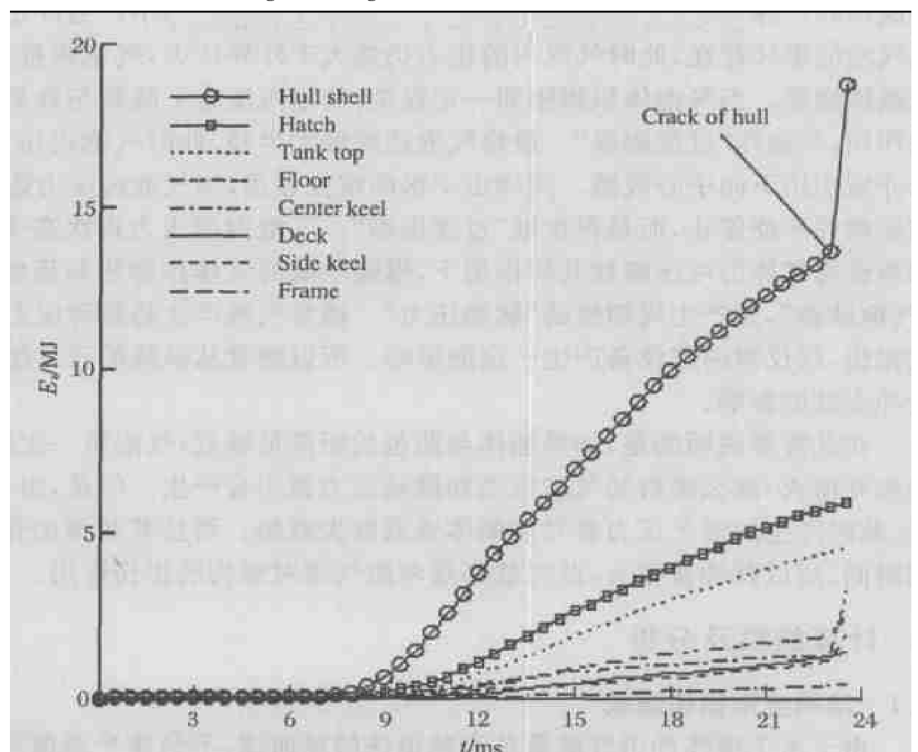


图 6 舰船能量吸收

Fig.6 Energy absorption curves of ship

次爆炸中炸药位于 115<sup>#</sup>和 94<sup>#</sup>横舱壁之间的正下方，所以在能量吸收中，横舱壁贡献了较大的力量。通过对比外板破裂前后各构件的能量吸收情况，发现除了外板的能量吸收有显著增加外，龙骨和肋板吸收的能量也有显著增加，即龙骨和肋板有效阻止了外板裂口的继续扩大。这点从图 3(a)中也可以得到证实。

表 1 构件吸能统计

Table 1 Energy absorption capacity of the ship's components

构件名称	冲击波过后气泡溃灭前		气泡溃灭外板破裂时	
	能量吸收 $E_a$ /MJ	百分比 $p_k$ /%	能量吸收 $E$ /MJ	百分比 $p_k$ /%
船体外板	13.10	45.9	43.0	54.2
横舱壁	5.59	19.6	6.21	7.8
内底板	4.24	15.5	4.99	6.3
肋板	1.81	6.3	3.64	4.6
中内龙骨	1.26	4.4	9.33	11.8
旁龙骨	1.02	3.6	10.2	12.9
甲板	1.15	4.03	1.44	1.8
强肋骨	0.359	1.26	0.454	0.6
总能量	28.53	100	79.26	100

### 3.3 冲击环境

图 7(a)为甲板和龙骨上测点的加速度响应曲线，图 7(b)为内底板靠近首尾两点和中部爆炸源正上方一点的加速度曲线。从图中可以发现，虽然远离爆炸源的船体结构，如上层甲板和首尾结构，并没有遭受太大的变形影响，但是加速度响应却非常大，达到  $1 \sim 4\text{km/s}^2$ 。在如此大的加速度作用下，将造成舰船内部精密仪器失灵、设备基座破坏和各种密封管涵接头松动。因此对舰船的战斗力和生命力将造成极大的威胁。

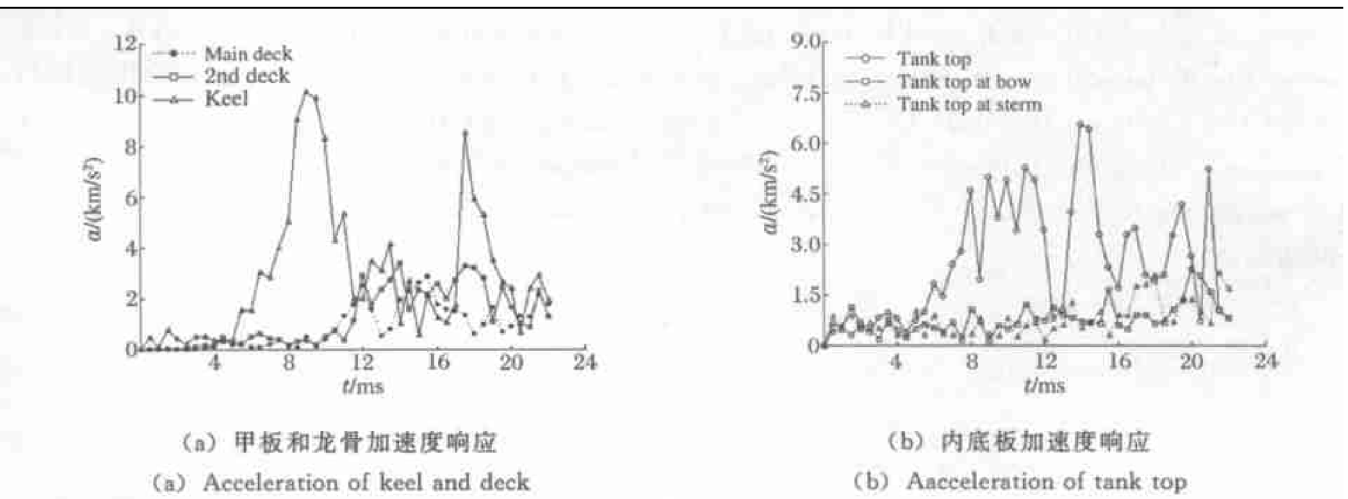


图 7 加速度响应图

Fig. 7 Acceleration dynamic response

## 4 小 结

通过计算和结果分析，得到以下结论：

(1) 水下爆炸载荷作用下舰船结构响应具有局部性，爆炸载荷仅仅对舰船迎爆面局部结构造成较大损伤。

(2) 对于水面舰船非接触爆炸而言，造成船体结构损伤的主要原因是爆炸产生的冲击波作用。气泡和气泡脉动对舰体结构的损伤影响很小。但是，如果船体与爆炸源的距离足够近，爆炸产生的气泡将扩散到与主船体表面接触并溃灭。此时产生的溃灭压力将对舰船结构造成巨大威胁。

(3) 在爆炸响应中船体外板、横舱壁和内底板是主要的吸能构件。在船体外板破裂时,龙骨和肋板吸收的变形能有显著增加,有效的阻止了外板裂口的继续扩大。

(4) 水下非接触爆炸中,巨大的加速度响应造成舰船内部设备仪器的破坏,也是导致舰船战斗力和生命力的下降的一个重要因素。

#### 参考文献:

- [1] MSC.DYTRAN User manual[Z]. MSC, 1997.
- [2] 姚熊亮. 圆筒结构水下爆炸数值实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 23(1):5-8.  
YAO Xiong-liang. Numerical experiment on underwater explosion of cylinder[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 5-8.
- [3] 王自力. 船舶碰撞损伤机理与结构耐撞性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2000.
- [4] Cole P. 水下爆炸[M]. 北京:国防工业出版社, 1960.
- [5] 张挺. 爆炸冲击波测量技术(电测法)[M]. 北京:国防工业出版社, 1984.
- [6] 王中黔. 水下爆破冲击波[A]. 水下爆破文集[C]. 北京:人民交通出版社, 1980.

## The dynamical response of a ship structure subjected to underwater explosion shock waves

CHEN Yong-nian<sup>1\*</sup>, YIN Qun<sup>1</sup>, HU Hai-yan<sup>2</sup>

(1. East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** The dynamical response of ship structures subjected to underwater explosion shock waves is a mechanical problem which must be taken into account in engineering design of anti-shock ship structures. The dynamical response of a surface war ship has been simulated with the code MSC.DYTRAN. The dynamical response characteristics of the ship is studied through the structural damage deformation, energy absorption by ship components and the shock environments factors.

**Key words:** mechanics of explosion; dynamical response; numerical simulation; underwater explosion; shock wave

---

\* Corresponding author: CHEN Yong-nian  
E-mail address: chenzi78@263.net  
Telephone: 0511-4448827