

[船舶舾装/特种装置]

## 护舷碰撞过程有限元数值模拟\*

林红吉 孟宪林 严建平 张海永

(海军装备技术研究所 北京 100072)

[关键词]有限元;碰撞;护舷

[摘 要]本文基于 ANSYS-LSDYNA,采用有限元方法模拟了钢板撞击橡胶泡沫型护舷的全过程,分析了钢板在撞击过程中速度改变量、不同时刻护舷的应变量以及护舷等效应力,结果表明有限元是一种有效的研究护舷碰撞过程的方法。

[中图分类号]U664.6+9 [文献标识码]A [文章编号]1001-9855(2004)05-0047-03

### Finite-element numerical simulation of fender collision procession

Lin Hongji Meng Xianlin Yan Jianping Zhang Haiyong

**Keywords:** finite-element analysis; collision; fender

**Abstract:** Based on ANSYS-LSDYNA, this paper uses finite-element method to simulate the whole procession of steel plate crashing with rubber foam fender, and analyzes the velocity change, the fender strain change and fender equivalent strain inside the steel plate crashing procession. The result shows that the finite-element method is an effective method to study fender collision procession.

## 1 引 言

护舷是为了防止船在靠岸时的撞击损伤而采用的一种缓冲保护装置,其种类有很多,按照材料结构来分,可以分为橡胶气囊型、内部充泡沫外覆橡胶型、聚氨脂整体发泡型等。护舷的主要性能指标是其吸能量大小,通常的测试方法是通过压机缓慢匀速加压,根据压力以及变形量来计算的,这是一种形变均匀加载方式,同实际的动态撞击加载方式相比有很大区别。为了真实地反映护舷缓冲能力,必须测试其动态撞击性能,但是当前实现这类测试还有一定困难,一种解决办法是采用数值模拟的办法,建立在离散冲击力学守恒方程基础上的数值模拟能够很好

地描述整个碰撞过程,其中尤以有限元方法使用最为广泛。有限元的基本思想是将问题的求解域划分为一系列单元,单元之间靠节点连接。单元内部点的待求物理量可由单元节点物理量通过选定的函数(形函数)关系插值求得。由于单元形状简单,易于由平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式,然后由单元方程再形成总体代数方程组,加入边界条件后即可对方程组求解。随着有限元方法的应用,出现了许多专门的有限元程序,ANSYS/LS-DYNA就是其中一款优秀的显式非线性有限元程序,可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题,具有多种单元模式和几十种材料模型,可以模拟大范围材料行为<sup>[1,2]</sup>,已经有很多文献在此基础上开展了非线性动力学研究<sup>[3,4,6]</sup>。

\* [收稿日期]2003-12-5

[作者简介]林红吉(1973.7-),男,汉族,硕士,工程师,主要从事舰艇特种材料研究。

孟宪林(1965-),男,汉族,高级工程师,天津工业大学材料科学工程专业在读硕士。

严建平(1963-),男,汉族,高级工程师,华南理工大学海洋防腐工程专业在读博士。

张海永(1976-),男,汉族,工程师,哈尔滨工程大学应用化学专业在读硕士。

本文在这里使用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序对护舷碰撞过程进行数值模拟,对护舷应用不可压缩高弹材料模型和粘弹泡沫材料模型,以 3-D 单元动态模拟了护舷受到重物碰撞的整个过程,分析了护舷的受力情况。

## 2 护舷体系结构

本文用于计算的例子是内部充泡沫外覆橡胶型护舷,内部的泡沫作为主要吸能缓冲件,要求具有一定力学强度的同时,还要有很好的粘弹性;外部的橡胶层则必须具有良好的力学强度以及耐磨、耐候性,才能保证冲击力能够比较均匀地传递到内部缓冲材料上,从而获得良好的缓冲能力。

## 3 材料本构方程

对于外层橡胶材料采用不可压缩 Mooney-Rivlin 模型,  $W$  是材料的应变能函数。

$$W(I_1, I_2, I_3) = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + C(1/I_3^2 - 1) + D(I_3 - 1)^2$$

$$C = 0.5A + B$$

$$D = \frac{A(5\nu - 2) + B(11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)}$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

$\nu$ : 泊松比

$G = 2(A + B)$ : 剪模量

$I_2, I_3$ : 应变不变项

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ : 轴向应变

$W$  是材料的应变能函数。

内部缓冲材料采用粘弹泡沫模型,这个模型包含非线性弹性和粘性行为,可以采用如图 1 所示的结构简图表示该类材料。

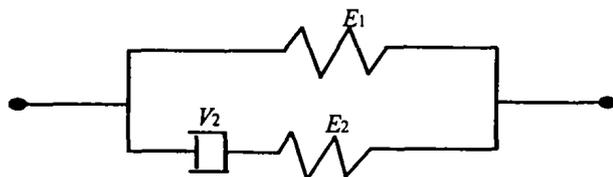


图 1

表 1 材料模型参数

参数项	粘 弹 泡 沫 模 型				Mooney-Rivlin 模型				
	$E_1/Pa$	$n_1$	$V_2/N \cdot s \cdot m^{-2}$	$E_2/Pa$	$n_2$	$P/kg \cdot m^{-3}$	$\nu$	$A/Pa$	$B/Pa$
参数值	3 600	4	1 500	100e6	0.2	1 180	0.49	5.5E+8	1.4E+8

从而得到表示材料的应力应变关系的方程:

$$\frac{K(E_1 + E_2)}{E_2} \epsilon + E_1 \epsilon = \sigma + \frac{K}{E_2} \dot{\sigma}$$

材料的非线性行为由下式表示:

$$E_1' = E_1 V^{-n_1}$$

$$K' = K_1 |1 - V|^{n_2}$$

其中  $E_1$  是初始弹性模量;  $E_2$  是为了防止计算发散加入的调整模量;  $K$  是粘度系数;  $K_1$  是初始粘度系数;  $V$  是体积应变;  $n_1, n_2$  是弹性模量、粘度系数指数<sup>[1,5]</sup>。

## 4 几何及有限元模型

计算所用的撞击体(钢板)几何尺寸为  $1 \times 1 \times 0.1$  m,使用较粗 8 节点六面体单元网格以及点质量单元建模。由于我们关心的是护舷的撞击响应,所以这里将钢板处理成刚体,钢板的动能由点质量以及计算中设定的速度决定。护舷外型为近似椭圆球形,外层橡胶材料采用精细 8 节点六面体单元网格建模,内部泡沫采用较粗的 8 节点六面体单元建模。钢板与护舷外层之间采用 Automatic Node-Surface 接触,护舷外层材料与内部泡沫材料之间采用 General Surface-Surface 接触<sup>[2]</sup>。由于对称性,为了节约计算资源,我们只建立了 1/2 模型,划分了 3 757 个单元。整体模型的结果可以通过对称映射得到。

## 5 计算分析

计算所用的钢板重量为 800 kg,初速度为 5 m/s,所采用的材料模型参数如表 1<sup>[1]</sup>,计算结果如表 1 所示。

图 2 给出了护舷在撞击过程中四个时刻的变形情况,从给出的变形网格可以看出,护舷的冲击响应时间很短,0.02 s 以后护舷端头区域的应力集中导致护舷端部区域网格出现大的变形,表现为内部泡沫与外部橡胶层出现分离,0.04 s 时护舷回弹导致钢板护舷分开。为了研究回弹出现的精确时间,我们绘制了钢板不同时刻的速度曲线,如图 3 所示。

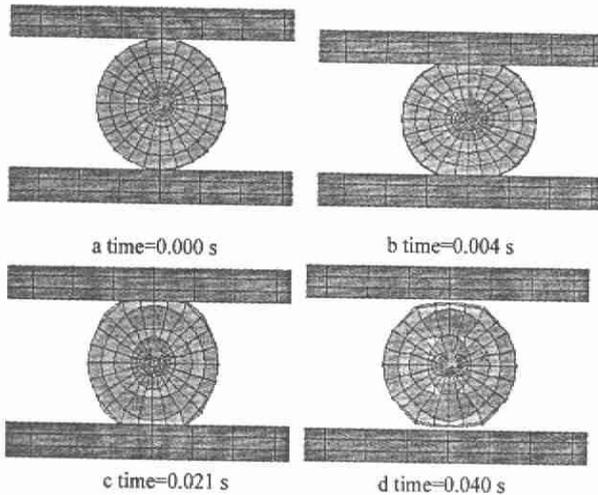


图2 护舷受钢板撞击过程

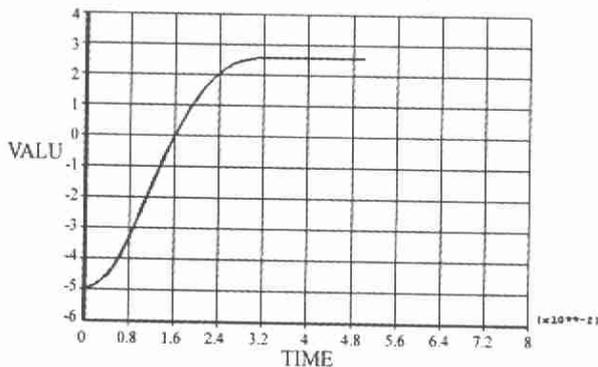


图3 撞击过程中钢板运动速度时间历程

从图3速度历程曲线给出的钢板不同时刻的速度值可以看到,在0.016 s处,护舷开始回弹,此时,钢板速度为0。

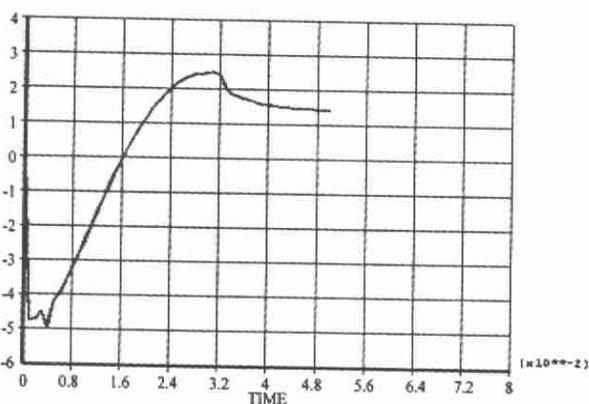


图4 护舷1328节点速度时间历程

图4则给出了护舷表面与钢板接触的一点的速度曲线,由于撞击速度以及材料的粘弹性的缘故,形变延迟,导致护舷响应滞后,表现为护舷节点相对于钢板速度滞后。

图5是钢板位移曲线,该曲线给出了护舷的最大压缩量及对应时刻:Y-方向4.6 cm,0.016 s。

图6展示了撞击过程中0.006 s时刻护舷的等效应力分布。从等效应力图可以看到,护舷两端头是应力比较集中的部位,在设计时应重点考虑。

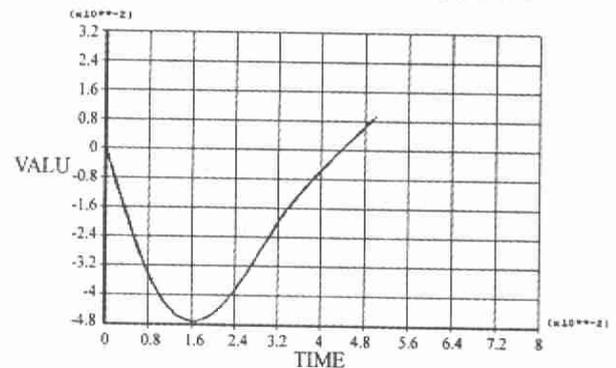


图5 钢板Y-方向位移时间历程

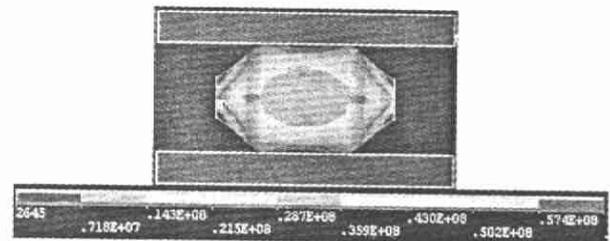


图6 碰撞过程0.005 s时刻护舷等效应力

## 6 结论

从计算结果来看,采用有限元数值模拟的方法可以给出撞击过程中每一时刻护舷的变形量、变形速度、应力分布,这些数值有助于设计人员改进护舷,以获得更好的缓冲以及使用性能。☺

### [参考文献]

- [1] John. O. Hallquist. LS-DYNA Theoretical Manual [M]. Livermore Software Technology Corporation. 1998. 5
- [2] LS-DYNA user's manual [M]. version 960. Livermore Software Technology Corporation. 2001. 3
- [3] T. Borvik, M. Langseth, etc. Ballistic penetration of steel plates [J]. International Journal of Impact Engineering. 1999. 22:855~886
- [4] Damodar R. Ambur, Navin Jaunky, etc. Numerical simulations for high-energy impact of thin plates [J]. International journal of Impact Engineering. 2001, 25: 683~702
- [5] A. P. 尔然尼采著, 赵超燮、叶于政、沈参璞译. 考虑材料塑性的结构计算 [M]. 建筑工程出版社, 1957
- [6] 王爱峻等. 层合透明材料抗冲击有限元数值模拟 [J]. 工程力学, Vol. 16. No. 5. 1999. 10