

文章编号: 1001-1455(2004)01-0080-05

船用加筋板架爆炸载荷下动态响应数值分析*

梅志远, 朱 锡, 刘润泉

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 武汉 湖北 430033)

摘要: 针对船用加筋板架复杂结构在爆炸冲击波作用下的动态响应, 采用商用高动态非线性有限元程序 MSC/Dytran, 讨论了大尺寸加强结构板架迎爆承载问题, 提出了复杂板架结构爆炸冲击波作用下动态响应的有限元计算方法, 并进行了模型试验。试验结果与计算结果吻合较好, 验证了应用程序及计算模型参数的稳定性和可靠性。对加筋板架两种承载形式(大尺寸加强构件迎爆或背爆设置)在爆炸冲击波作用下的动态响应(板架中心挠度和塑性分布)差异的分析研究表明, 大尺寸骨架(纵骨和肋骨)背向爆炸冲击波设置将分散爆炸冲击波的冲击作用、减小板架变形、增强其抵抗爆炸冲击波冲击的能力, 使结构偏于安全。

关键词: 固体力学; 结构抗爆; 塑性动态响应; 加筋板架; 数值计算

中图分类号: O344.3 国标学科代码: 130°1515 文献标志码: A

1 引 言

舰船结构在爆炸冲击波作用下的毁伤分析, 实际上是结构在爆炸冲击下的塑性动力响应问题。爆炸载荷属动载荷, 舰船结构受到爆炸载荷作用时, 将产生大面积塑性区。早期的研究多限于试验研究工作。20 世纪 50 年代以来, 塑性动力学理论的发展, 为揭示舰船结构在爆炸载荷环境下破坏机理的本质提供了重要的理论分析方法。对于梁、板等较简单的基本构件, 已能较精确地预估出最大残余变形^[1]。而对工程中较复杂的结构, 尤其是舰船结构中广泛采用的加筋板结构, 理论分析尚处于初步阶段^[3], 目前研究多采用有限元数值方法, 许多高瞬态非线性有限元分析程序, 如: ABAQUS、ADINA、DYTRAN 等得到了广泛使用。

本文中通过讨论大尺寸加强结构板架迎爆承载问题, 提出了加筋板架结构爆炸冲击波作用下动态响应的有限元计算方法, 计算结果与试验结果吻合较好。同时, 分析了加强材迎爆和背爆两种载荷工况作用下板架动态响应差异, 得出对工程有指导意义的结论。

2 加筋板材爆炸冲击波作用下的实验研究

2.1 试验模型

试验装置如图 1 所示, 试验工作在爆炸筒内进行, 板架结构尺寸见表 1, 集中装药为 2.8kg 胺梯炸药(2.38kg TNT 当量), 爆心距板材 0.5m。实验板架放置在强力钢质方形框架上, 边界仅在板架挠度方向存在约束。

表 1 板架几何参数

Table 1 The stiffened plate structure's geometrical parameters

T 型材/mm	板材尺寸/mm	球扁钢
$\frac{3 \times 65}{3 \times 125} \times 2$	3.5 × 1200 × 1200	r5 × 7



图 1 试验装置

Fig. 1 The experimental equipment

* 收稿日期: 2003-02-20; 修回日期: 2003-05-07
作者简介: 梅志远(1973—), 男, 博士研究生。

2.2 试验结果

试验结果如图 2 所示：在爆炸冲击波作用下，模型结构整体产生较大塑性变形；局部结构 T 型加强材严重破坏，一侧 T 型加强材出现严重翘曲变形，另一侧 T 型加强材由于与板材焊接强度较低，中段崩脱、断裂，严重扭曲；球扁钢主要表现出整体的大变形，没有出现明显的局部变形。可以认为，小尺寸构件（如球扁钢）主要参与板的协调承载变形，而大构件（如 T 型加强材）则承受了较强的冲击载荷。测量结果显示，板材中心最大挠度为 84mm，板材中心处出现沿纵骨方向的裂纹。



图 2 试验板架的残余变形
Fig.2 The experimental plate structure's residual deformation

3 数值分析

3.1 耦合算法 (General Coupling) 简介

计算中，对炸药及周围的空气介质采用有限体积方法（欧拉网格）进行描述，而对加筋板架的描述则采用拉氏单元结构，耦合算法综合拉氏求解和欧拉求解，两类网格相互独立，其相互作用通过耦合面实现。建立两种单元网格间耦合关系，首先在拉氏结构表面上定义一层耦合面，该面是欧拉网格与拉氏结构网格之间相互作用力的传递者，对于欧拉网格，该面充当流场边界^[4]，如图 3 所示。图 4 为耦合面上力传递作用示意图，图中阴影部分面积 A 为相互作用区域（耦合面），且满足关系

$$F_f = T_{ij}A \tag{1}$$

$$F_n = F_f/4 \tag{2}$$

在爆炸冲击波作用下，拉氏结构网格将产生变形失效及破裂，壳体的破裂将使流场的高度不连续。

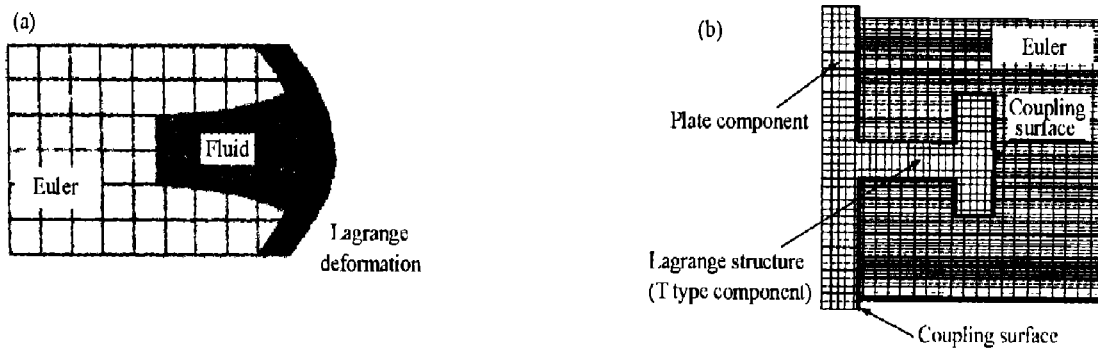


图 3 流固作用示意图
Fig.3 The schematic of fluid-structure interaction

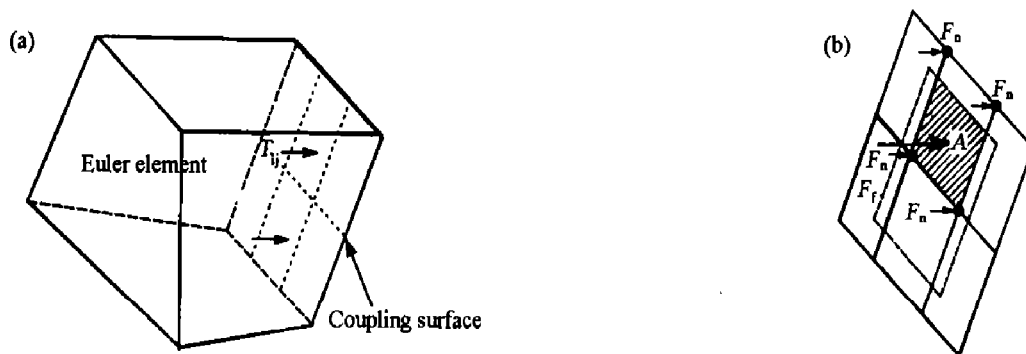


图 4 耦合面上作用力的传递示意图
Fig.4 The schematic of forces exerted on the coupling surface

针对该问题,采用 ROE (approximate Riemann solver)求解,基于 Philip ROE 理论^[5],该求解器在空间域及时间域的分析上都可以采用高阶的算法,能够避免低阶算法在某些情况下可能出现的问题(例如,流场在高度不连续的地方会出现本来没有的震荡现象),从而取得更为精确的结果。

3.2 有限元模型

根据试验结果,可以认为爆炸冲击波作用下加筋板架加强材的取向将导致两种承载形式的存在,即大尺寸结构的迎爆和背爆两种工况,如图 5 所示。同时,由于板架结构中球扁钢主要起协调变形作用,因此,球扁钢和工况 II 中的 T 型材作为梁单元考虑,不承受爆炸冲击载荷的直接作用。而对工况 I 结构中的 T 型材,采用 8 节点实体拉氏固体单元建模,耦合面的设置如图 3 (b)所示,板材采用 4 节点壳单元。同时,考虑到板架的整体位移以及应力波的传播特性,在板架背爆面构造了一个大质量的钢质框架,以保证计算模型与实验条件的相似性。

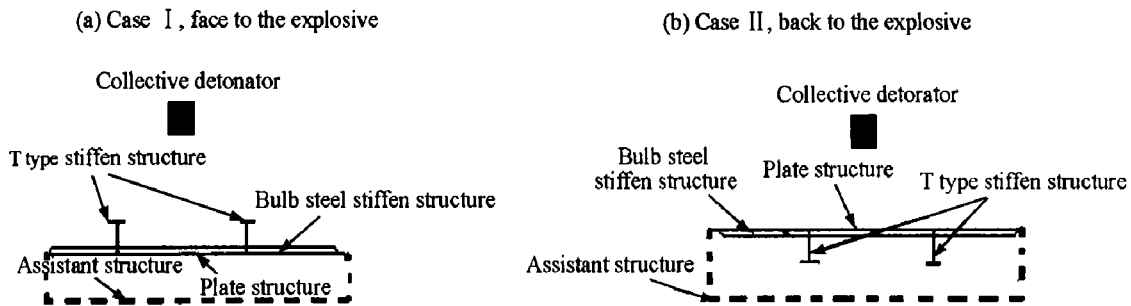


图 5 两种工况中计算模型示意图

Fig. 5 The computational model of stiffened plate structure in two cases

3.3 模型材料参数

采用 TNT 炸药,装药量为 2.38kg,密度为 $1.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,能量密度为 6.9 GJ/m^3 ^[6]。

模型板架材料的动态屈服条件,采用 Cowper-Symonds 模型进行拟合,满足以下关系

$$\sigma_d / \sigma_y = 1 + (\dot{\epsilon} / D)^{1/P} \quad (3)$$

式中: σ_d 为动态屈服应力; σ_y 为准静态屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为等效应变率; D 、 P 为常数。

板架材料计算参数见表 2,板架材料为 Q235 低碳船体钢,材料准静态参数由拉伸试验获得,延伸率为 0.35,本文将动态载荷作用下的断裂延伸率取为 0.3。

表 2 板架材料参数

Table 2 The material parameter of stiffened plate structure

材料	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	K / GPa	G / GPa	σ_y / MPa	D / s^{-1}	P	δ
碳钢	7.8×10^3	175	81.8	350	2200	50	0.3

3.4 计算结果及分析

3.4.1 数值计算与试验结果比较

变形结果比较:图 6 为工况 I 中板架在 3.6ms 时的变形模式(变形已基本稳定)。与图 2 试验变形结果比较:T 型材表现出极为相近的大变形模式,板架中心凹陷,由工况 I 板架 3.6ms 时刻位移云图(图 7)可以发现,板架最大位移出现在 T 型材的面板上,为 183mm;而板材最大位移出现在板材中心处,参考梁单元板架的位移曲线(图 8),可推测板中心剩余挠度约为 90mm,略大于试验结果;同时塑性变形分布结果(图 9(a))显示,板架的应力集中出现在 T 型材与板的连接处和板的中心位置(板与球扁钢的连接缝处),而试验中的板架失效(或准失效)点的位置正出现在板与 T 型材和球扁钢的连接缝处,误差产生的原因与板架连接强度有关。在以上分析和比较的基础上,可以认为,数值计算结果与试验结



图 6 加筋板残余变形的计算结果
Fig. 6 The computational result of plate structure's residual deformation

果非常接近。

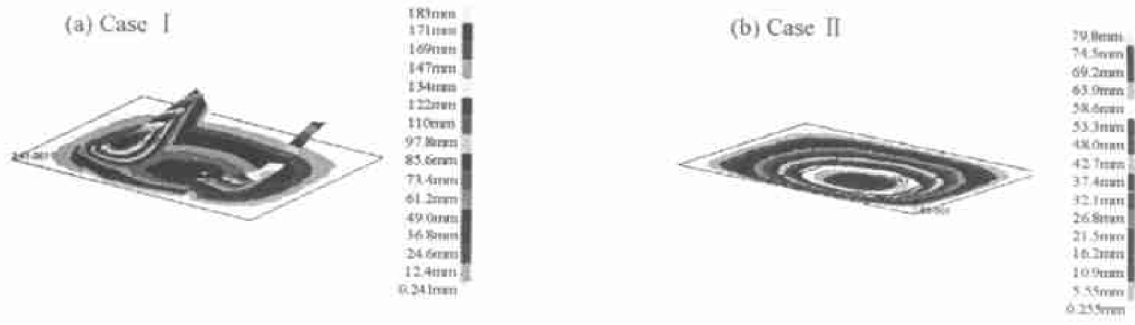


图 7 两种工况下板架位移云图

Fig.7 The distribution of displacement in two cases

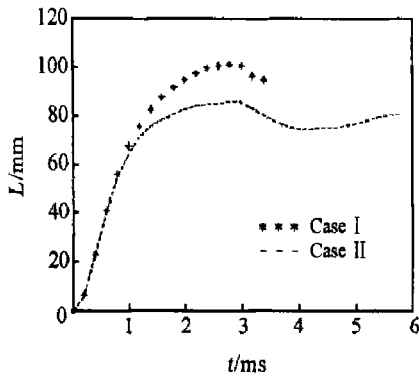


图 8 板架中心最大挠度时程曲线

Fig.8 The maximal deflection time history in the center of plate

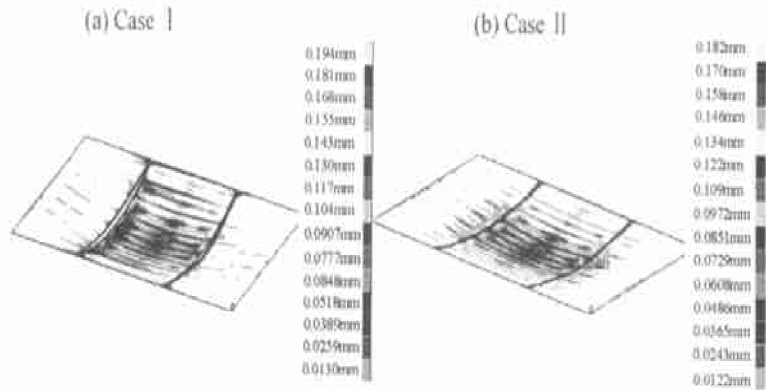


图 9 两种工况作用下板材塑性应变分布

Fig.9 The distribution of plastically strain in two cases

3.4.2 两种工况下板架剩余变形的比较

现象及分析：两种工况下板架总体变形模式基本一致，工况 I、II 在 3.6ms 时刻板材中心挠度分别为 97.8、79.8mm (图 7)；由两种工况中板架中心最大挠度时程曲线可以发现：两种工况中，板架的承载时间和承载历程较为相似，其加载变形阶段基本保持在 02ms 时间段内，然后，处于弹性往复振荡阶段。通过对振荡均值进行比较，工况 I 考虑 T 型材骨架承受爆炸冲击波冲击载荷后，板架的中心挠度将大于梁单元板架的中心挠度，约为 75mm，而工况 II 板架的最终中心最大挠度约为 90mm。载荷作用形式的差异应是引起这种变形差异的主要原因。由塑性变形分布云图 (图 9) 可知，两种不同载荷作用下，工况 I 中塑性变形在 T 型材之间集中分布，在 T 型材与板材结合处有较明显的塑性变形集中，而工况 II 中，塑性变形的分布更为分散；对于变形程度而言，工况 I 的塑性变形幅值高于工况 II。出现这种塑性变形差异的主要原因是：T 型材迎爆设置，板架所承受的冲击总能量增加，且分布更为集中。

4 结 论

(1) 试验中板架的变形与计算结果基本一致，板中心的最大剩余挠度介于工况 I 和工况 II 板架的变形之间，与试验结果吻合很好，其误差主要源于 T 型材与板的焊接强度 (点焊连接)。通过对比验证了应用程序及计算模型参数的稳定性和可靠性。

(2) 两种不同的结构承载形式对结构的变形有一定的影响，工况 I 中 T 型板架迎爆设置将使板架的塑性变形更集中地分布于两 T 型梁之间，从而导致板的中心挠度增大，应力集中；而将骨架 (纵骨和肋骨) 背向爆炸冲击波设置将分散爆炸冲击波的冲击作用，减小板架变形，增强其抵抗爆炸冲击波冲击的能力，使结构偏于安全。

参考文献：

[1] 刘土光, 朱科, 郑际嘉. 爆炸载荷下矩形板的塑性动力响应[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(2): 166—169.

- LIU Tu-guang, ZHU ke, ZHENG Ji-jia. Plastic dynamical response of rectangular plate under explosive load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1992, 12(2): 166—169.
- [2] 陈发良, 樊福如. 局部冲击作用下刚塑性平板的塑性动力响应和失效模式[J]. *爆炸与冲击*, 1993, 13(3): 233—242.
CHEN Fa-liang, FAN Fu-ru. The plastic dynamic response and failure mode of rigid plastic plate under local impact load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(3): 233—242.
- [3] 吴有生, 彭兴宁, 赵本立. 爆炸载荷作用下舰船板架的变形与破损[J]. *中国造船*, 1995, 131(4): 55—61.
WU You-sheng, PRNG Xin-ling, ZHAO Ben-li. The deformation and damage of warship's plate structure under explosive load[J]. *China Ship*, 1995, 131(4): 55—61.
- [4] Hirsch C H. Numerical computation of internal and external flows[A \] John Wiley & Sons. Computational Methods for Inviscid and Viscous Flows Volume 2[C]. Chichester, Britain, 1990, 22: 223—236.
- [5] Roe P L. Approximate riemann solvers, parameter vectors and difference schemes[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 43(5): 357—372.
- [6] 松全才, 杨崇惠, 金韶华. 炸药理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997: 6.

Dynamic response researches of ship's stiffened plate structure under explosive load

MEI Zhi-yuan^{*}, ZHU Xi, LIU Run-quan

(Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China)

Abstract: In order to study the dynamical plastic responses of ship's big-size-reinforced stiffened plate structure under explosive load, the commercial FEM code MSC/Dytran are used to discuss the problem, and a modified numerical method is brought forward to analyze its plastic responses in two different cases, i. e. the big-size-reinforced structure face or back to the explosive load relative to the stiffen plate. And at the same time, the model experiment has been done for case I, and the calculation results agreed well with the experimental results. The coincidence between calculations and experiments validates the calculational methods and parameters. According to above works, the discrepancies between two cases above have been discussed. From the comparative analysis, the big-size-reinforced structure placed back to explosive load (case II) will disperse more impact energy and minish the stiffen plate's deformation, and the whole structure will be more safety than that faced to explosive load.

Key words: solid mechanics; structural explode resistance; dynamical plastic responses; stiffened plate structure; numerical calculation

* Corresponding author; MEI Zhi-yuan; Telephone: 027-83623619