

不同加强筋结构平板在爆炸载荷作用下的动态响应仿真

李帅¹, 李向荣¹, 王国辉¹, 宋林峰²

1. 陆军装甲兵学院兵器工程系, 北京 100072

2. 中国人民解放军步兵学院(石家庄校区), 石家庄 050085

摘要 针对爆炸载荷作用下外层结构防护能力加强问题,对四边固定的具有不同加强筋类型的平板在爆炸冲击载荷作用下的动态响应问题进行了数值仿真研究。利用 ABAQUS 软件建立了 4 种平板的有限元模型,仿真计算了平板在爆炸载荷作用下的响应,比较分析了平板的能量分布、平板中心点处的最大挠度值及应力分布等特性。结果表明,单纯地在平板背面添加加强筋数量对于抗爆性能的提高意义不大;所设计的 4 类平板中,由加强筋耦合成三角形的平板抗爆性能最佳。

关键词 爆炸载荷;加强筋平板;动态响应;弯曲挠度

军事或民用上经常使用薄板结构,如飞机、汽车、舰船的壳体及隔板等,薄板既对结构起到支撑作用,也对整体起到防护作用。薄板在爆炸冲击波作用下表现出大的变形、折弯甚至断裂,其动态响应是典型的爆炸力学问题^[1]。很多研究人员对相关问题进行了研究。Jones 等^[2]通过理论分析,给出了四角固支的矩形平板在冲击波载荷下变形量的表达式,并给出了解析解;王芳等^[3]对爆炸冲击波作用下四边约束的平板塑性大变形问题进行了理论分析和实验研究,得到了平板挠度与尺寸及爆炸冲击波参数相关的半经验公式;Jacinto 等^[4]通过试验和数值模拟,分析了在爆炸荷载作用下钢板、钢筋混凝土板、纤维加固钢筋混凝土板和组合楼板的动力响应特性以及破坏形态。综合考虑防护性能、质量等因素,采用

加强筋结构的平板被应用于各种装备,然而不同结构加强筋与其挠度的影响关系,很难通过理论分析建立计算模型。本研究利用数值仿真方法,通过爆炸冲击载荷作用下不同类型加强筋平板动态响应对比分析,确定加强筋优化结构,以便为增强结构抗爆性能提供依据。

1 模型尺寸及相关参数

本研究应用的平板结构类型有 4 种(图 1)。4 种结构底平板的长×宽×厚都是 2 m×2 m×0.025 m,不同之处有以下几点。1) 平板 1:仅平板结构,没有加强筋;2) 平板 2:具有 3 条加强筋且等距分布;3) 平板 3:具有 6 条加强筋且等距分布;4) 平板 4:具有 6 条加强筋,两两相互耦合成等腰三角形(三

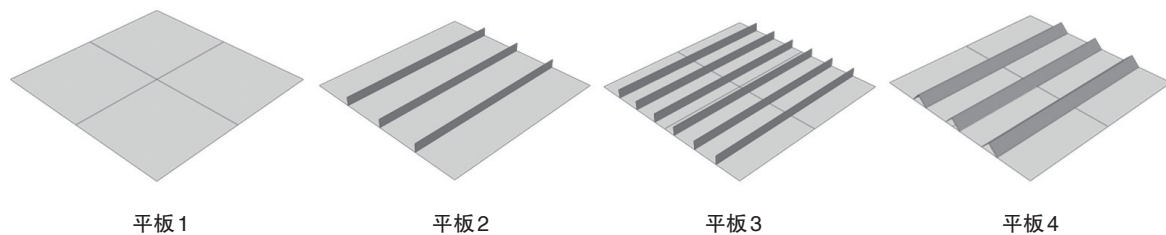


图 1 普通平板与 3 种加强筋平板结构示意图

Fig. 1 Sketch map of the ordinary plate and three stiffener plates

收稿日期:2017-07-14;修回日期:2017-09-04

资助项目:国家自然科学基金项目(11502302)

作者简介:李帅,硕士研究生,研究方向为毁伤与防护,电子信箱:18734138022@163.com;李向荣(通信作者),教授,研究方向为弹药终点毁伤效应及装备易损性分析与评估,电子信箱:lxr118@163.com

引用格式:李帅,李向荣,王国辉,等. 不同加强筋结构平板在爆炸载荷作用下的动态响应仿真[J]. 科技导报, 2017, 35(24): 71-75; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.24.009

角形高为0.1 m)。4种结构中,所有加强筋的高度均为0.1 m,加强筋的厚度为0.0125 m,两者均为壳单元。平板4中加强筋的线条如图2所示。

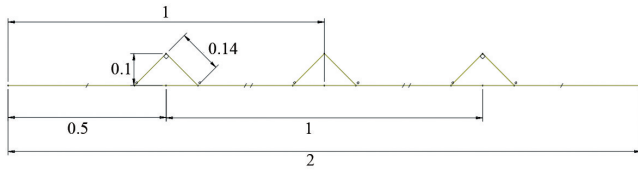


图2 平板4侧向剖视图(单位:m)
Fig. 2 Sectional view of No. 4 plate

2 有限元建模

文献[5]计算爆炸冲击载荷下加筋板塑性动力响应时,将爆炸载荷简化为三角形载荷、半正弦波形式载荷和矩形脉冲形式载荷。文献[8]计算爆炸载荷作用下钢筋混凝土板的动力响应时,将爆炸载荷简化为短时矩形脉冲形式。本研究分析所采用的爆炸载荷曲线由显示有限元分析程序AUTODYN计算所得,更加接近实际的爆炸载荷工况。利用ABAQUS进行加强筋结构平板动态响应仿真计算过程中,将载荷以外力的形式直接加载到加强筋平板上。1 kg TNT在0.5 m处压力时程曲线如图3所示。

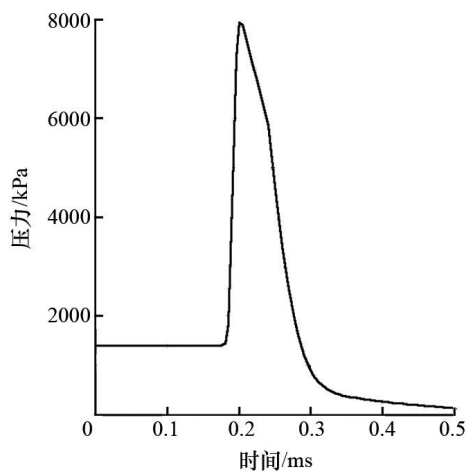


图3 爆炸冲击波时域曲线
Fig. 3 Time domain curve of blast shock wave

炸药的状态方程为JWL^[6]状态方程,用来描述高能炸药爆轰产物迅速膨胀:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\mu}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\mu}} + \omega \rho e \quad (1)$$

式中, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为经验导出常数, ρ 为密度, ρ_0 为参考密度, η 为 ρ/ρ_0 , e 为内能。

空气的状态方程为 Ideal Gas 状态方程:

$$P = (\gamma - 1)\rho e + P_{shij} \quad (2)$$

式中, γ 为理想气体常数, P_{shij} 为初始压强。

根据模型尺寸及相关参数在ABAQUS中建立平板的有限元模型,并赋予其相应的材料属性和单元属性。平板材料为钢,其密度为7800 kg/m³,杨氏模量为210 GPa,泊松比为0.3,并定义其初始屈服应力为300 MPa,在达到35%的塑性应变时屈服应力增至400 MPa,塑性属性^[7]见表1,应力-应变曲线如图4所示。平板单元采用Explicit单元库中的S4R8(四结点曲面薄壳减缩积分)单元,网格单元尺寸为0.1 m×0.1 m,平板4的有限元网格模型如图5所示。计算过程中,对模型进行沙漏控制并提供有限膜应变,分析步定义为动力-显式,计算时间0.05 s,线性体积黏性参数与二次体积黏性参数分别为0.06和1.2。此外,边界条件采用四周固定($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$)。

表1 材料塑性属性

Table 1 Plastic property of Steel material

屈服应力/MPa	塑性应变
300	0.000
349	0.001
350	0.025
375	0.1
394	0.2
400	0.35

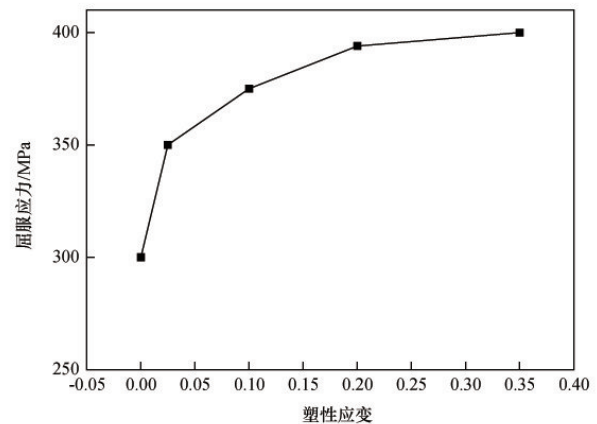


图4 钢材塑性应力与塑性应变的关系
Fig. 4 Stress vs strain of steel

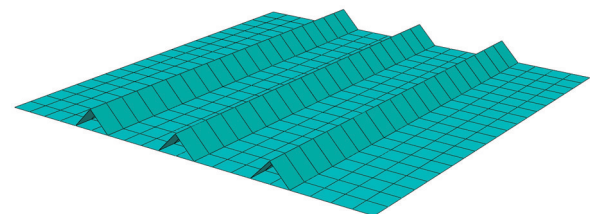


图5 平板4的有限元网格模型
Fig. 5 Finite element grids model of No. 4 plate

3 爆炸载荷作用下平板动力响应特性分析

3.1 不同加强筋结构平板能量变化

爆炸载荷下不同加强筋结构平板的能量曲线如图6所示。由结果可知,爆炸荷载产生的能量最终大部分转化成平板的内能^[8],在平板自由振动时,随着应变能的增加动能会随之减少。当平板处于最大挠度时,它具有最大应变能,同时平板几乎不动,此时动能为最小值。模型能量输出变量列于表2。其中,输出伪应变能是为了判定沙漏是否会在分析中

成为问题,图6中伪应变能值是几乎为0的曲线,通过与总内能 ALLIE 的比较发现,伪应变大约为其1%,结果表明沙漏不是问题,即网格划分能够满足计算精度。

从图6所示的能量曲线可以看出,平板的塑性应变能在平板处于最大应变能时上升到一个峰值,但是随着载荷的卸载,在自由振动阶段塑性应变能又再次上升,从动能曲线可以看出,塑性应变能总是在动能增加阶段上升,所以可以判定为在爆炸载荷后由于回弹可以引起塑性变形。

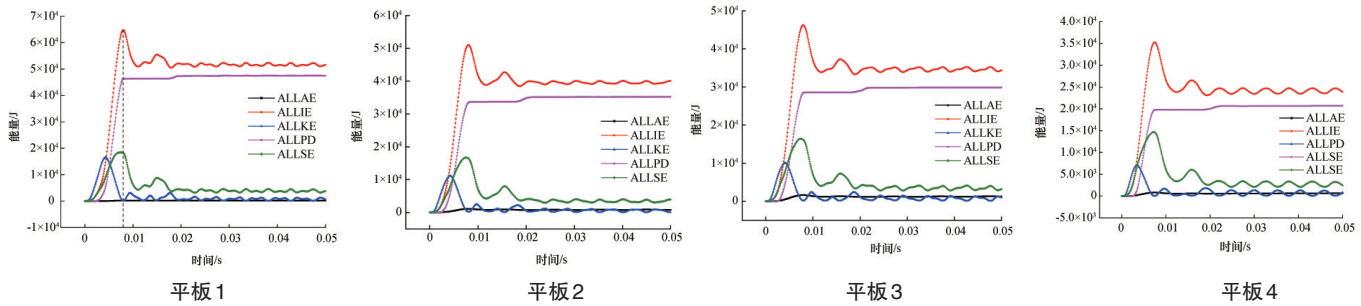


图6 能量曲线

Fig. 6 Energy of different plates

表2 模型能量输出变量

Table 2 Meaning of the output energy variables

变量名	能量值
ALLAE	伪应变能 E_{λ}
ALLIE	总内能 E_I : ALLIE=ALLSE+ALLPD+ALLCD+ALLAE
ALLKE	动能 E_{KE}
ALLPD	塑性应变能 E_p
ALLSE	存储的应变能 E_e

4种平板结构的动能角曲线如图7所示。由图7曲线可以发现,平板1到4的动能最大值依次减小,表明平板4对爆炸载荷的响应最小,抗爆炸冲击能力最强。平板在8ms左右动能同时达到最小值,由图4可知,此时存储的应变能为最大值,结果符合预期。

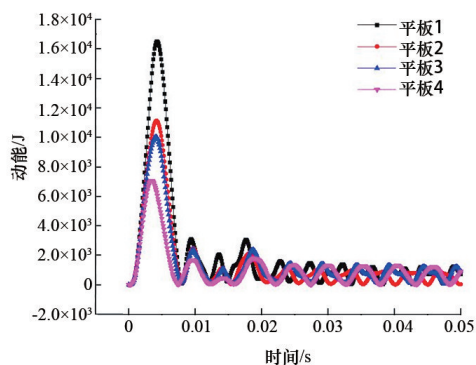


图7 不同加强筋结构平板受爆炸冲击后的动能曲线

Fig. 7 Kinetic energy of different stiffener plates

3.2 不同加强筋结构平板的位移响应

在进行结果分析前首先对计算结果的可靠性进行校核,无孔平板中心点挠度的半经验公式(3)为

$$D_0 = 0.0756 \left(\frac{W_c}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{r_c 32 a i_+}{\pi^3 h \sqrt{2 \sigma_s \rho_i}} \quad (3)$$

式中, D_0 为中心点挠度, W_c 为装药质量, ρ 为装药密度, r_c 为反射系数, a 为方平板一半边长, h 为平板厚度, σ_s 为平板屈服强度, ρ_i 为平板密度。

$$r_c = \begin{cases} 2 + 6\Delta p_1 / (\Delta p_1 + 7p_0) & \Delta p_1 \leq 0.8 \text{ MPa} \\ 5 & 0.8 \text{ MPa} < \Delta p_1 \leq 5 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4)$$

式中, Δp_1 为入射冲击波超压值, p_0 为标准大气压。

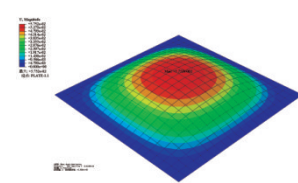
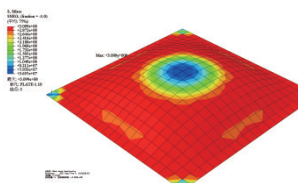
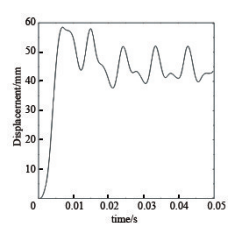
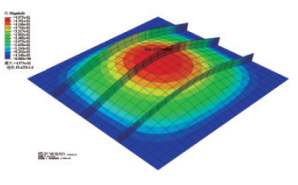
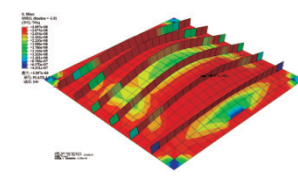
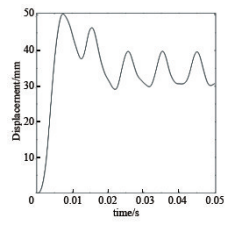
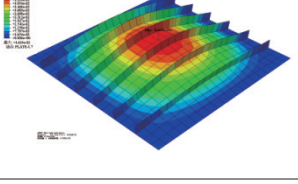
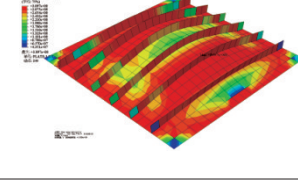
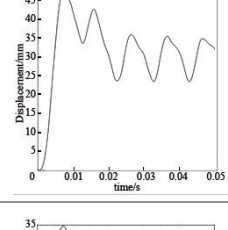
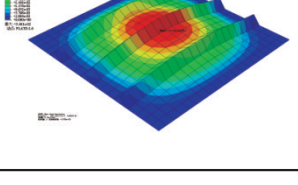
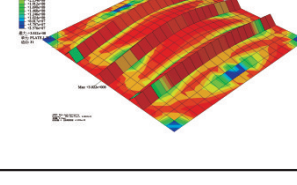
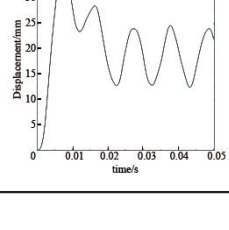
冲量值据式(5)计算:

$$I_+ = \int_0^{\tau_+} P(t) dt = 40 \frac{\omega}{r} \quad (5)$$

文献[1]采用1 kg TNT对1 m处边长为40 mm的Q235材质平板作用,试验得到的中心挠度值为72.1 mm,本研究中计算的无加强筋平板中心的稳态挠度值为57.52 mm,两者比值为1.25。而通过对式(3)的计算,两者中心挠度的理论比值为1.11,可见本研究所采用的计算模型是合理的,计算精度较好。

由于在中心节点处发生了最大位移,所以对中心处的位移模式进行分析。中心节点的位移历程、应力云图及平板的位移响应曲线见表3。平板在8ms时位移达到最大值,可以看出一旦卸载了爆炸冲击载荷,平板开始自由振动,动能随着应变能的减少而增加。当板处于最大挠度时,它具有最大的应变能,板几乎处于完全静止状态,导致动能达到最小值。

表3 冲击载荷下平板计算结果
Table 3 Simulation results of the ordinary plate loaded by shock

平板类型	最大位移图	应力云图	中心点位移随时间变化曲线
平板1			
平板2			
平板3			
平板4			

由平板位移响应曲线可知,4种类型的平板在受到瞬时冲击载荷下,中心挠度先达到最大值,之后由于其自身的摩擦及阻尼影响最终振动幅值趋于稳定。整体上从中心点挠度值来分析可以看到,4类平板的值依次减小,具体结果见表4。由平板中心点挠度经验公式可知,平板中心点的挠度就其自身性质而言,与平板厚度、屈服强度和密度成反比。有加强筋结构的平板中心点挠度值都要小于无加强筋的纯平板,分析认为主要是由于平板背面增添加强筋相当于增强了平板的厚度。

表4 平板挠度值提取结果
Table 4 Values of the plates deflection

平板类型	最大中心挠度值/mm	稳定挠度值/mm	最大应变能/J
平板1	57.52	43.59	3.099×10^8
平板2	49.75	30.78	3.166×10^8
平板3	46.24	34.52	3.097×10^8
平板4	34.61	22.02	3.022×10^8

4种平板结构的中心点最大挠度和稳态挠度值对比如图9所示。挠度值分析表明,无论是中心挠度还是稳态响应幅值,无加强筋的平板都是4种平板结构中的最大值,说明加强筋确实能起到较好的减振防护作用。比较平板2和平板3,虽

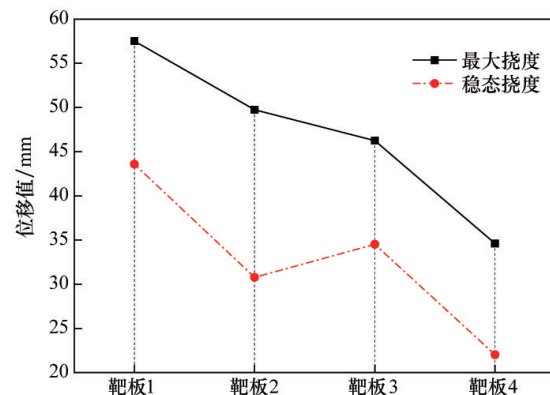


图8 不同平板对应的挠度值
Fig. 8 Deflection of different plates

然平板3的中心挠度值和稳态挠度值都比平板2的要小,但相差不大,说明结构不变、只是从数量上增加加强筋,对抗爆性能提高的意义不是很大,综合比较加工难度、经济性、适用性,平板2比平板3更具有优势。4种类型平板中,平板4的抗爆性能最佳,其中心点挠度值仅为34.61 mm,比平板1减少39.82%;与平板2相比,两者虽同为3条加强筋,最大挠度值比平板2降低了30.43%。

分析表3中的应力云图发现,对于最大应力值位置,除无加强筋的平板在一条固定边以外,其余3种均在加强筋与平板交界处,这可能是由应力集中导致的结果。不过,达到最大挠度值时,除平板4以外,其余3种平板中心处的应力值反而比周边区域的小,其机理还需进一步深入研究。

4 结论

通过数值仿真手段,分析了不同加强筋结构平板在爆炸载荷作用下的能量变化以及位移响应、最大挠度和稳态挠度等动态响应参量,得到以下结论:

1) 在爆炸载荷作用下,4种类型加强筋平板的振动响应比较类似,都是先达到挠度最大值,然后进入自由振动模式。

2) 4种平板结构中,耦合成三角形加强筋使平板的抗爆性能最佳,根据本研究仿真计算结果,与无加强筋相比,中心点挠度值减少近40%;与加强筋数量相同的普通方形结构平板相比,中心点挠度值降低约30%。

3) 加强筋越多、结构刚度越大,加筋板抗冲击的能力就越强,但抗爆能力并非非线性增长。如果采用普通方形加强筋结构,单纯依靠增加加强筋数量,对平板提高防爆性能的意义不大,对于最佳数量的确定需进一步深入研究。

参考文献(References)

[1] 侯俊亮, 蒋建伟, 门建兵. 预制孔靶板在爆炸冲击波载荷作用下的动

态响应[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 662-666.

Hou Junliang, Jiang Jianwei, Men Jianbing, et al. Dynamic response of thin plate with holes under blast loading[J]. Explosion and Shock, 2013, 33(6): 662-666.

[2] Jones N, Uran T O, Tekin S A. The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates[J]. International Journal of Solids Structures, 1970, 6(12): 1499-1512.

[3] 王芳, 冯顺山, 俞为民. 爆炸冲击波作用下平板的塑性大变形响应研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(3): 59-61.

Wang Fang, Feng Shunshan, Yu Weimin. Study on large plastic deformation response of target plate under explosive blast wave[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(3): 59-61.

[4] Jacinio A C, Ambrosini R D. Experimental and computational analysis of plates under air blast loadings[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001(25): 927-947.

[5] 祝伟, 刘敬喜. 爆炸冲击载荷下加筋板塑性动力响应分析[J]. 船海工程, 2011, 40(6): 28-30.

Zhu Wei, Liu Jingxi. Dynamic plastic response analysis of stiffened plates subjected to explosive impact loading[J]. Ship & Ocean Engineering, 2011, 40(6): 28-30.

[6] 段雷琳, 高轩能, 江媛. 内爆炸下球面网壳结构的冲击波超压计算分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 557-562.

Duan Leilin, Gao Xuanneng, Jiang Yuan. Shock wave overpressure calculation and analysis of spherical meshy shell loaded inner explosion [J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science Edition), 2013, 34(5): 557-562.

[7] 庄茁, 由小川, 廖剑晖. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

Zhuang Zhuo, You Xiaochuan, Liao Jianhui. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

[8] 谭继可, 潘金玉, 杨慧. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的动力响应分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(13): 114-117.

Tan Jike, Pan Jinyu, Yang Hui. Dynamic response analysis of reinforced concrete slab subjected to blast loading[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2013, 10(13): 114-117.

Simulation research on dynamic response of plates with different stiffeners under explosion loading

LI Shuai¹, LI Xiangrong¹, WANG Guohui¹, SONG Linfeng²

1. Department of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

2. Shijiazhuang Division of PLAA Infantry Academy, Shijiazhuang 050085, China

Abstract For enhancing the explosion resisting performance of the outer structure, the dynamic response of plates with different stiffeners under the explosion loading is numerically simulated. The plates are with their four sides fixed. Finite element models for four kinds of plates are built using the ABAQUS software, to simulate the dynamic response. The energy distribution, the maximum deflection at the plate center and the stress distribution are analyzed and compared. To resist the explosion loading, the increased number of stiffeners does not mean a better performance. Among the four plates with different stiffeners, the triangle stiffener coupled plates are the best one for the anti-explosion performance.

Keywords explosion loading; stiffener plates; dynamic response; bending deflection

(责任编辑 陈广仁)