

1-3-2019

Numerical Study on Energy Absorption Mechanism of Sandwich Plates Under Blast Loading

Jinlei Mu

College of Naval Architecture and ocean Engineering , Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China;

Shaosong Min

College of Naval Architecture and ocean Engineering , Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China;

Peng Fei

College of Naval Architecture and ocean Engineering , Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Study on Energy Absorption Mechanism of Sandwich Plates Under Blast Loading

Abstract

Abstract: In order to study the anti-explosion ability and energy absorption mechanism of the sandwich plates under blast loading, the FEM software Abaqus/Explicit is used to simulate the response process of the solid plate and the sandwich plate. The solid plate is modeled with shell elements and continuum elements respectively. *The results show the elements type has little effect on the results. During the same condition the deformation of the front plate is bigger than the solid plate, while the deformation of the back plate is smaller than the solid plate. The external force work mainly converses the kinetic energy and plastic deformation energy, and the latter is the main. The plastic energy absorption ability of the sandwich plate is bigger than the solid one obviously. In a certain range of the load, the advantage is more obvious.* The research results show that the numerical simulation method is suitable for the researching the sandwich anti-explosion structure, and the results have good agreement with the experiments. The energy absorption of sandwich structure is mainly the plastic deformation energy.

Keywords

sandwich plates, explosive shocking, energy absorption mechanism, simulation research

Recommended Citation

Mu Jinlei, Min Shaosong, Peng Fei. Numerical Study on Energy Absorption Mechanism of Sandwich Plates Under Blast Loading[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1826-1831.

爆炸载荷作用下夹芯防护结构变形吸能机理研究

牟金磊, 闵少松, 鹏飞

(海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为研究爆炸载荷作用下防护结构的抗爆能力和吸能机理, 利用有限元软件Abaqus/Explicit分别对面密度相等的实心板和夹芯板进行了仿真计算。仿真结果显示单元类型对结果影响不大; 相同工况下夹芯板结构前面板变形大于实心板, 后面板变形小于实心板; 外载荷对夹芯板所做的功主要转变为动能和塑性变形能, 以塑性变形能为主, 夹芯板塑性吸能能力明显大于实心板, 在一定范围内随着爆炸载荷增大, 优势更为明显。研究结果表明仿真方法能够较好地反映夹芯防护结构缓冲吸能过程和结果, 与试验具有较好的一致性; 夹芯防护结构主要依靠塑性变形来吸能。

关键词: 夹芯板结构; 爆炸冲击; 吸能机理; 仿真研究

中图分类号: O346; U661.43 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 05-1826-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805026

Numerical Study on Energy Absorption Mechanism of Sandwich Plates Under Blast Loading

Mu Jinlei, Min Shaosong, Peng Fei

(College of Naval Architecture and ocean Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the anti-explosion ability and energy absorption mechanism of the sandwich plates under blast loading, the FEM software Abaqus/Explicit is used to simulate the response process of the solid plate and the sandwich plate. The solid plate is modeled with shell elements and continuum elements respectively. *The results show the elements type has little effect on the results. During the same condition the deformation of the front plate is bigger than the solid plate, while the deformation of the back plate is smaller than the solid plate. The external force work mainly converses the kinetic energy and plastic deformation energy, and the latter is the main. The plastic energy absorption ability of the sandwich plate is bigger than the solid one obviously. In a certain range of the load, the advantage is more obvious.* The research results show that the numerical simulation method is suitable for the researching the sandwich anti-explosion structure, and the results have good agreement with the experiments. The energy absorption of sandwich structure is mainly the plastic deformation energy.

Keywords: sandwich plates; explosive shocking; energy absorption mechanism; simulation research

引言

夹芯结构一般由芯材和面板组成, 是一种材料



收稿日期: 2016-06-07 修回日期: 2016-12-15;
基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51309231);
作者简介: 牟金磊(1980-), 男, 山东寿光, 博士, 讲师, 研究方向为船舶结构抗爆抗冲击; 闵少松(通讯作者 1978-), 男, 湖北孝感, 博士, 讲师, 研究方向为船舶与海洋结构物设计制造; 鹏飞(1975-), 男, 湖北武汉, 博士, 副教授, 研究方向为舰艇设计制造。

与结构一体化设计的产物, 芯材通常具有密度小、吸能缓冲能力强、吸声性能好等优点, 而面板一般强度较高。夹芯结构充分发挥二者功能和结构上的优势, 具有不同于传统结构材料的优异性能, 已广泛应用于航空航天、汽车制造和船舶等领域^[1]。由于夹芯结构具有轻质、比强度高、比刚度高的特点, 非常适合用于设计爆炸防护结构, 近年来受到了国内外研究人员的极大关注, 并对其在爆炸载荷作用

<http://www.china-simulation.com>

• 1826 •

下的响应进行了大量研究^[2-6], 研究方法主要有理论分析、数值仿真和试验研究三大类。爆炸作用下夹芯结构响应问题非常复杂, 理论研究需要进行一系列简化, 而试验研究受试验条件等限制难以大量开展, 计算机仿真技术的发展为解决该问题提供了一个很好的工具。而计算机仿真的可靠程度与模型、材料参数、边界条件和载荷设置等因素都有很大关系。

本文利用 ABAQUS\Explicit 中的爆炸动力学分析功能, 分别建立了实心板和夹芯板的有限元模型, 对比了爆炸载荷作用下实心板和夹芯板的变形过程, 探讨了夹芯结构抗爆吸能机理, 研究结果可为夹芯防护结构的设计提供参考。

1 有限元仿真基础

1.1 爆炸载荷仿真

爆炸载荷的数值仿真方法主要有 3 种: (1) 建立炸药、流体和结构的模型, 该方法需要模拟流固耦合过程, 计算所需时间较长; (2) 采用载荷-时间曲线直接加载, 该方法不容易考虑结构响应对载荷的影响; (3) CONWEP (Conventional Weapons Effects Program) 加载法, 该方法考虑了入射压力、反射压力及结构作用面上各作用点入射角度的影响, 不需要建立流体模型, 不需要建立爆炸场的计算网格, 不需要计算爆炸冲击波在流体中的传播过程, 可以大大节省复杂问题的建模时间和计算时间, 同时又可以一定程度上考虑了结构与载荷的相互影响, 对于简单结构抗爆分析具有较好的精度。在无遮挡作用面上, 结构表面载荷压力满足式(1)^[7]。

$$P_l = P_r \cos^2 \theta + P_i (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \quad (1)$$

式中: P_l 为施加到结构上的压力; P_i 为入射波压力; P_r 为反射波压力; θ 为入射角。

由于 CONWEP 加载方法没有考虑流体与结构之间的流固耦合作用, 对于流固耦合较弱的炸药在空气中爆炸作用下结构的仿真具有相当的精度, 不适合用于仿真流固耦合过程更强的水中爆炸作用

下结构响应的过程仿真。

1.2 能量平衡

整个模型在仿真过程中能量是平衡的。在外载荷作用下的模型, 其能量可以表示为

$$E_l + E_{KE} + E_V + E_{FD} - E_W = \text{const} \quad (2)$$

式中: E_W 为外力做的功; E_l 为内能; E_{KE} 为动能; E_V 为粘性耗散能; E_{FD} 为摩擦耗散能。

内能是可恢复的弹性能量 E_E 、非弹性过程的能量耗散(如塑性能量 E_P)、粘弹性能量耗散 E_{CD} 和伪应变能 E_A 的总和, 可以表示为

$$E_l = E_E + E_P + E_{CD} + E_A \quad (3)$$

伪应变能主要是由于网格不合理引起的, 因此它表征网格划分的质量, 相对高的伪应变能表明模型网格需要进行细化或者进行其他优化。

2 仿真模型

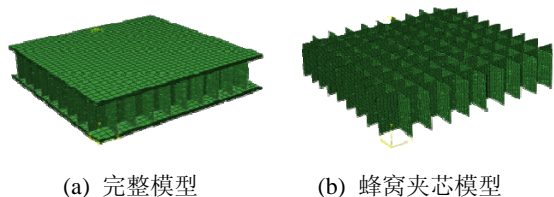
ABAQUS 是功能强大的非线性有限元软件, 可以分析复杂的固体力学结构力学系统, 特别是能够分析非常庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题, 适合解决夹芯结构在爆炸载荷作用下的响应问题。该问题涉及到结构塑性大变形、材料应变率效应、材料非线性和几何非线性等难题, 对该问题开展数值仿真研究过程中模型参数的设置对仿真结果影响很大。下面首先对本文建立的模型情况进行介绍。

2.1 几何模型

夹芯结构由芯材和面板组成, 芯材结构形式很多, 本研究选取矩形蜂窝结构作为研究对象。整个夹芯板结构的尺寸为 610 mm×610 mm×61 mm, 上面板和下面板厚度均为 5 mm, 矩形蜂窝板的厚度为 0.76 mm, 矩形蜂窝板之间的间距为 30.5 mm。

为降低计算成本, 载荷和结构模型都具有对称性, 根据对称性假设, 选取 1/4 结构建立模型, 模型中心在 X-Y 平面的原点, X=305 mm 和 Y=305 mm 边界条件为固定约束(约束所有自由度)。X 轴和 Y 轴分别定义对称边界条件 XSYMM 和 YSYMM。如图 1 所示, 图 1(a)为建立的仿真模型示意图, 图

1(b)为其中矩形蜂窝芯材的示意图。



(a) 完整模型 (b) 蜂窝夹芯模型

图 1 夹芯结构模型

Fig. 1 Sandwich structure model

为对比夹芯结构的抗爆吸能能力,建立实心板结构,实心板的单位面积的质量(面密度)与夹芯结构基本相当,尺寸同为 610 mm×610 mm×12.7 mm。

2.2 材料本构关系

夹芯结构面板、芯材以及实心板结构材料均为不锈钢,材料参数参考文献[8],密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 1.61×10⁵ MPa,泊松比 0.35,膨胀系数为 452 Nm/(kg·K)。

在爆炸分析中需要考虑材料的应变强化、应变率效应和温度效应的影响,在仿真中采用 Johnson-Cook(JC)本构模型来描述。JC 本构模型采用 Mises 屈服面,采用了不同的强化准则并考虑了应变率的影响,可以模拟大多数金属在爆炸冲击载荷作用下的变形。JC 本构模型为

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0)](1 - \hat{\theta}^m) \quad (3)$$

式中: σ 为材料等效应力; ϵ_p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_0$

为初始塑性应变率; ϵ_p 为等效塑性应变率; $\hat{\theta}$ 为无量纲温度; A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料参数,一般通过试验来确定,本文采用表 1 中数据。

表 1 JC 本构方程参数取值^[8]

参数	A/MPa	B/MPa	C	n	m	$\dot{\epsilon}_0/s^{-1}$
取值	400	1 500	0.074 5	0.4	1.2	0.001

2.3 网格划分

为研究不同单元类型对仿真结果的影响,首先对相对简单的实心板模型划分为壳单元网格和体单元网格,壳单元采用 S4R 单元,每个方向各划分为 31 个单元,厚度方向为 9 个积分点;体单元模型划分 31×31 个 C3D8R 单元,厚度方向分为 5 层。对于夹芯板结构面板采用体单元网格划分,芯层采用壳单元 S4R 划分,单元数量共 42 010 个。

2.4 爆炸载荷施加

仿真中爆炸载荷采用梯恩梯炸药在空气中爆炸的方式,将炸药爆心位置设计在夹芯板中心正上方距离上面板 100 mm 处,在板的上界面利用 CONWEP 算法施加爆炸载荷。在仿真研究中,炸药的药量分别采用 1 kg、2 kg 和 3 kg 三种情况。

根据爆炸载荷、模型类型及单元类型的不同,设计了 9 种仿真工况,详细情况如表 2 所示。

表 2 仿真工况表

Tab. 2 Simulation conditions table

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
药量/kg	1	2	3	1	2	3	1	2	3
模型	实心板	实心板	实心板	实心板	实心板	实心板	夹芯板	夹芯板	夹芯板
单元类型	壳单元	壳单元	壳单元	体单元	体单元	体单元	体单元 壳单元	体单元 壳单元	体单元 壳单元
单元数量	961	961	961	4 805	4 805	4 805	42 010	42 010	42 010

表 3 1.5 ms 时模型中心变形值

Tab. 3 Model center deformation value at 1.5 ms

药量/kg	实心板/mm			夹芯板/mm			
	壳单元	体单元	试验值 ^[8]	后面板	试验值 ^[8]	前面板	试验值 ^[8]
1	48.5	46.7	37.65	26.2	15.29	69.2	47.06
2	88.4	85.9	71.37	66.7	53.73	111.1	98.82
3	109.9	107.6	132.94	96.4	127.45	140.5	158.04

3 仿真结果

爆炸载荷作用到结构上, 炸药爆炸产生的能量传递到结构上, 结构发生变形, 不同工况的仿真变形云图如图 2 所示。爆炸能量一部分转化为结构的动能, 另一部分转化为结构的内能。由于边界条件约束, 动能最终耗散掉或者转变为结构的内能, 而

在爆炸载荷作用下结构发生大的塑性变形时, 结构的内能主要是塑性变形能。图 3 为 3 kg 梯恩梯工况下夹芯板结构的变形云图。从图中可以看出, 夹芯板中心变形最大, 上面板、芯层和下面板都发生了变形, 中间芯层发生屈曲破坏。下面从能量和变形两个方面对各个工况下的计算结果进行分析。

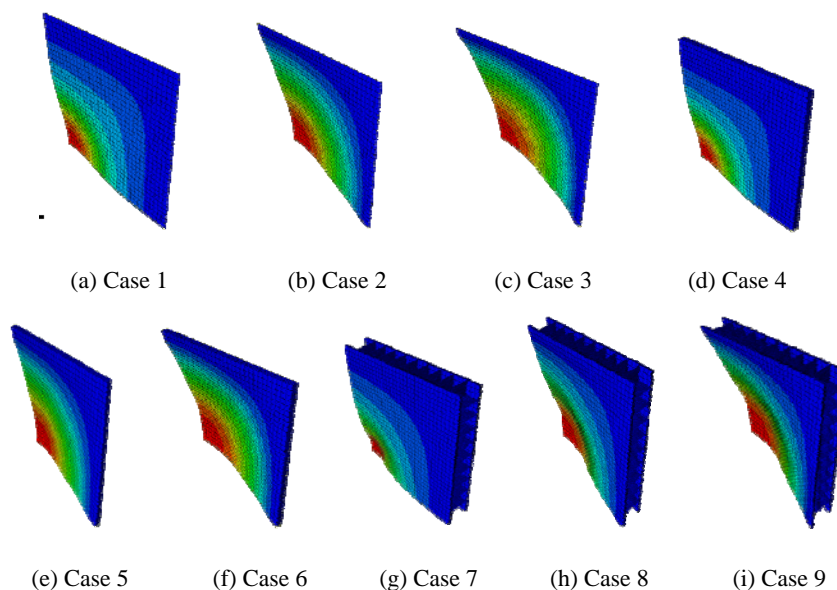


图 2 不同工况下模型变形云图

Fig. 2 Model deformed cloud chart under different conditions

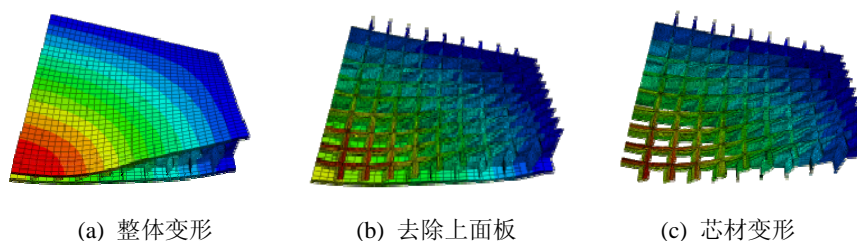


图 3 3 kg 梯恩梯工况下夹芯板结构变形仿真结果

Fig. 3 Simulation results of deformation of sandwich plate structure under the condition of 3 kg TNT

3.1 变形仿真结果

板最终变形是其抗爆能力的重要体现, 计算时刻为 1.5 ms 时各模型中心变形, 如表 3 所列, 同时为方便对比将参考文献[9]中相同工况下的试验结果列入表 3。从与试验结果的对比看, 大部分仿真结果与试验结果较为接近, 个别仿真结果与试验结果有一定误差。对于三种模型, 在 1 kg、2 kg

药量工况下, 仿真结果比试验结果大, 而在 3 kg 工况下仿真结果比试验结果小。仿真中边界是理想固支条件, 6 个自由度均受到约束, 而文献[9]中的试验利用工装夹住试验模型的方法模拟固支边界条件, 与理想固支约束存在一定的差异, 因此导致仿真与试验结果存在一定偏差。但是, 总体来看仿真结果与试验结果量级和趋势基本吻合, 可以证明

建立的有限元模型可以有效地反映结构在爆炸载荷作用下的响应。计算结果表明以夹芯板后面板作为防护位置, 载荷在一定范围内夹芯板后面板的变形小于实心板, 当载荷变大后两者之间的差距减小, 说明在载荷不能使夹芯结构压实情形下利用夹芯板作为防护结构更有优势, 随着载荷的变大, 夹芯板若被压实, 这种优势则会逐步消失。

不同工况的仿真变形云图如图2所示。从图中可以清晰地看出不同工况下不同结构的变形情况, 壳单元实心板模型和体单元实心板模型最终变形相差不大, 而夹芯板变形情况与之相比则有较大不同, 如图3所示, 前面板的变形明显大于后面板, 中间芯材出现失稳塑性变形。3种模型最大变形出现在模型中间, 中心位置的变形随时间变化的曲线如图4所示, 壳单元实心板模型和体单元实心板模型变化基本一致, 夹芯板前面板变形一直大于实心板, 后面板变形则一直低于实心板。

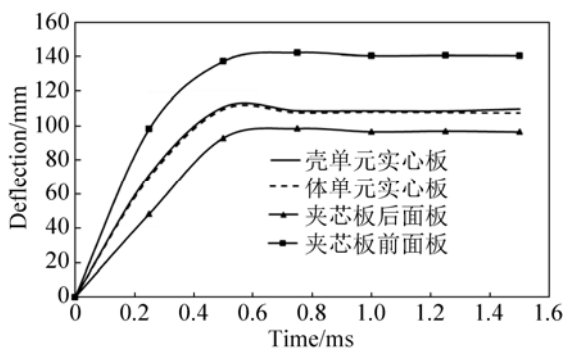


图4 3 kg 梯恩梯工况下各模型中心变形-时间曲线
Fig. 4 Displacement time curves of each model center under the condition of 3 kg TNT

3.2 能量仿真结果

从能量计算结果来看伪应变能、粘性耗散能、摩擦耗散能与动能和内能相比都很小。爆炸载荷对结构做的功, 大部分转变成结构的动能和塑性变形能。结构的塑性变形能越大, 说明结构缓冲吸能效果越好。

图5以3 kg 炸药工况为例, 分析不同模型外力功、动能、塑性变形能随时间变化关系。从图中

可以看出外力做的功, 主要转化为动能和塑性变形能, 而动能随即衰减, 而塑性变形能占据外力做功的大部分, 约占外力功的90%。因此可以认为, 外力对结构做的功主要转变为结构的塑性变形能。

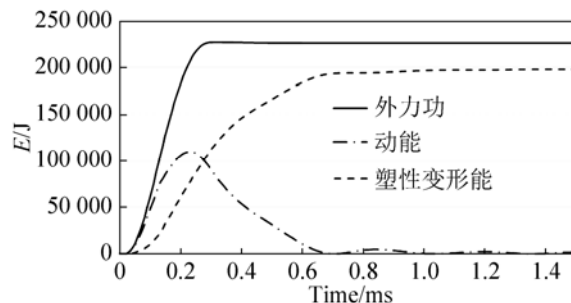


图5 3 kg 梯恩梯夹芯板模型能量-时间曲线
Fig. 5 3 kg TNT sandwich model of energy time curve

图6以3 kg 炸药工况为例给出不同模型塑性变形能随时间变化的曲线, 夹芯板的塑性变形能远超过实心板, 同样从能量角度证明夹芯板缓冲吸能能力更强。

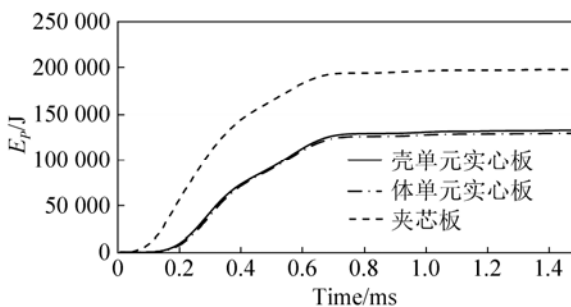


图6 3 kg 梯恩梯工况下不同模型塑性变形能-时间曲线
Fig. 6 Plastic deformation time curve of each model center under the condition of 3 kg TNT

图7给出不同模型塑性变形能随炸药药量变化的曲线, 药量越大夹芯板吸收的能量越多, 与实心板比优势就越明显。因为与实心板结构相比, 夹芯板除后后面板塑性变形吸收能量外, 还有芯材塑性变形吸收能量, 载荷越大芯材吸能作用体现的越明显, 直至芯材被压实, 这种优势才会消失。所以从吸能角度来看, 利用夹芯结构设计防护结构比实心板有优势。

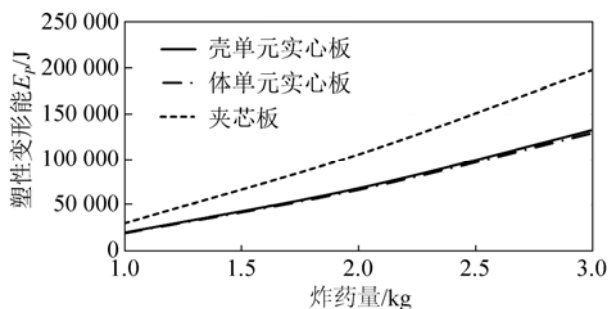


图7 模型塑性变形能与药量之间关系

Fig. 7 Relationship between the plastic deformation energy and the dosage of the model

4 结论

本文利用 Abaqus/Explicit 可以较好地仿真实心板结构和夹芯结构在爆炸冲击载荷作用下响应过程, 仿真结果与文献中的试验对比吻合较好, 从结构变形和能量分配两个角度分析, 可以得到初步结论如下。

(1) 实心板结构在爆炸冲击载荷作用下仿真过程中, 利用壳单元和体单元建模, 对变形计算过程和最终结果相差不大; 从夹芯结构与实心结构对比来看, 相同载荷下, 夹芯板前面板变形大于实心板, 后面板变形小于实心板, 结果表明若以夹芯板后面板作为防护对象, 夹芯板的防护效果要好于实心板。

(2) 从夹芯板结构在爆炸冲击载荷作用下仿真的能量计算结果看, 外力对结构做的功主要转变为结构的塑性变形能, 约占外力功的 90%, 这表明夹芯结构主要靠面板和芯材的塑性变形来吸收爆炸载荷的能量, 而夹芯结构塑性吸能能力大于实心板。

(3) 从变形和吸能两个角度来看, 夹芯结构均比实心结构适合作为防护结构。

参考文献:

[1] 杨益, 李晓军, 郭彦朋. 夹芯材料发展及防护结构应用综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 91-96.
YANG Yi, LI Xiaojun, GUO Yanpeng. Development of sandwich materials and their application overview in

protective structure[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(4): 91-96.

- [2] 陈杨科, 何书韬, 刘均, 等. 金属夹层结构的舰船应用研究综述[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(6): 6-13.
CHEN Yangke, HE Shutao, LIU Jun, et al. Application and Prospect of Steel Sandwich Panels in Warships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(6): 6-13.
- [3] 范俊奇, 辛凯, 宋红民, 等. 泡沫夹层在抗爆复合结构中作用的试验研究[J]. 试验力学, 2011, 26(3): 329-336.
FAN Junqi, XIN Kai, SONG Hongmin, et al. Experimental Study of the Mechanism of Foam Sandwich Material in an Anti-Blast Composite Structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 329-336.
- [4] 钱海峰, 张振华, 牟金磊, 等. 金字塔点阵夹芯板单元结构准静态压缩性能研究[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(5): 46-51.
QIAN Haifeng, ZHANG Zhenhua, MU Jinlei et al. Strength of sandwich structures with pyramidal lattice cores under quasi-static loadings[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(5): 46-51.
- [5] Mcshane G J, Deshpande V S, Fleck N A. Underwater blast response of free-standing sandwich plates with metallic lattice cores[J]. International Journal of Impact Engineering (S0734-743X), 2010, 37(11): 1138-1149.
- [6] Schiffer A, Tagarielli V L. One-dimensional response of sandwich plates to underwater blast: Fluid-structure interaction experiments and simulations[J]. International Journal of Impact Engineering (S0734-743X), 2014, 71: 34-49.
- [7] 张舵, 卢芳云. 混凝土板模爆方法数值模拟研究[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 34-38.
ZHANG Duo, LU Fangyun. A Numerical Study of Scaling Modeling Method of Concrete Slab Subjected to Blast Loading[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(2): 34-38.
- [8] Nahshon K M G, Pontin A G, Evans J W, et al. Dynamic Shear Rupture of Steel Plates[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures (S1559-3959), 2007, 2(10): 2049-2066.
- [9] Dharmasena K P, H N G Wadley, Z Xue, et al. Mechanical Response of Metallic Honeycomb Sandwich Panel Structures to High-Intensity Dynamic Loading[J]. Journal of Impact Engineering (S0734-743X), 2008, 35(9): 1063-1074.