DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0101-06

铝合金格栅夹层结构水下抗冲击特性的实验研究*

任 鹏[1,2],张 伟[2],刘建华[1]

(1.江苏科技大学船舶与海洋工程学院,江苏 镇江 212000;
2.哈尔滨工业大学高速撞击研究中心,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:基于非药式水下爆炸冲击波加载技术,对格栅型夹层结构的动态响应及抗冲击防护性能,进行了实验研究。利用高速相机,对夹层板的动态变形情况进行了实时观测,获得了格栅夹层板气背面在水下冲击波作用下的动态响应历程,并结合相同面密度单层板在水下冲击波作用下的抗冲击变形结果,对比分析了铝合金格栅夹层板的抗冲击防护性能,获得了格栅型夹层板的气背面板最大变形量与水下冲击波量纲一冲量间的定量关系。

关键词:固体力学;抗冲击性能;水下冲击波;格栅夹层板;动态响应

中图分类号:O347.3 **国标学科代码**:1301540 **文献标志码**:A

水下冲击波防护是现代海军舰艇及民用船只设计建造过程中的一个重要因素,几十年来一直是研究重点。早期的相关研究主要集中在,加筋板和特种钢板等传统防护结构上[1-2]。但随着水下武器的发展,传统结构的防护性能已无法满足现代舰艇的生存需要。因此,V. S. Deshpande 等[3]、Z. Wei 等[4]开始对夹层结构的水下抗冲击性能进行研究。其中,V. S. Deshpande 等[3]、D. D. Radford 等[5]分别对具有不同面密度的金字塔型芯层和泡沫铝芯层等类型的夹层结构板,进行了水下爆炸冲击波加载实验,总结了夹层结构板受冲击载荷作用时考虑不同夹层结构的变形特点;Z. Y. Xue 等[6]对相同质量的蜂窝夹层板和单层板,进行了水下爆炸冲击波加载实验,在不考虑断裂问题的前提下,研究了面板及芯层厚度、相对密度及芯层曲率对夹层板结构抗冲击能力的影响;D. Karagiozova 等[7]对爆炸冲击波载荷作用下,芯层材料分别为铝蜂窝及聚苯乙烯的夹层结构板的动态变形损伤过程,进行了实验研究,对比分析了两种夹层结构板的变形损伤特点及抗冲击防护性能,并总结了相同面密度条件下夹芯厚度对后面板永久变形的影响。在我国,由于水下冲击波加载对实验条件的限制较大,对夹层结构的水下冲击波防护问题研究,主要还是集中于理论和数值模拟方法,如黄超等[8]、汪玉等[9]。张旭红等[10]对夹层结构抗爆防护性能进行了一系列的实验研究,但主要仍集中在空气爆炸作用条件下。可以看出,当前对于夹层结构的抗冲击性能研究主要针对于蜂窝芯层、金字塔型芯层及复合材料芯层,没有更接近舰艇结构中加筋板的格栅型夹层的抗爆抗冲击性能研究。因此,对格栅型夹层板的水下抗冲击特性实验研究,对于我国舰艇抗爆结构的发展是十分必要的。

本文中,利用非药式水下冲击波加载装置、结合高速相机,对气背固支格栅夹层板在水下冲击波作用下的动态响应特点及抗冲击防护性能,进行实验研究,拟为现代化舰艇的防护结构设计提供参考。

1 实验方法

1.1 非药式水下冲击波加载

为了能在实验室范围内进行水下爆炸冲击波加载实验,设计了非药式水下爆炸冲击波加载实验装置,如图 1 所示。通过一级轻气炮发射飞片正撞击钢制水舱端部活塞,对该装置进行驱动,根据声学近

* **收稿日期**:2014-06-09;**修回日期**:2014-10-20
基金项目:国家自然科学基金项目(51509115,11372088);江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB580005);江苏科技大学学科立项建设项目
第一作者:任 鹏(1984—),男,博士,讲师,r_peng@126.com。

似原理，在水舱中 $x=0$ 处产生呈指数型衰减的水下冲击波。该冲击波在水舱中沿 x 方向传播，实现对目标靶板的加载[11]。其中主加载水舱的长度为 500 mm，加载水舱内径为 66 mm，壁厚为 12 mm。压力传感器分别安装于主加载水舱的中点处、距离主水舱和水背副舱端面 20 mm 处。测试靶板通过 6 个 M10 螺栓与加载水舱连接。为了防止冲击过程中螺栓孔径向出现过大的拉伸变形而导致的靶板面内位移，在靶板外侧增加了一个 7 mm 厚的高强度环形夹具，该夹具能够有效防止靶板因面内位移而出现的变形异常[11]。

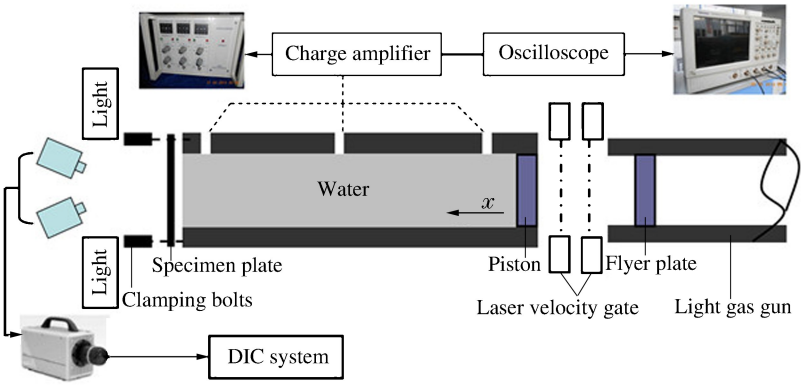


图 1 非药式水下爆炸冲击波加载实验装置

Fig. 1 Experimental set-up of non-explosive underwater shock simulation

飞片及活塞材料均为 45 钢，当飞片厚度为 10 mm、活塞厚度为 23 mm 时，标定得到加载到靶板上的水下冲击波强度与飞片的速度关系为：$p=k\rho_w c_w v$，常数 $k=0.44$，ρ_w 为水的密度，c_w 为水中声速，v 为飞片的撞击速度。通过调整飞片的撞击速度，可改变着靶冲击波强度，进而调节作用在靶板上的冲量[11]。对应的冲击波衰减时间常数只与飞片及活塞的厚度有关，本文中冲击波衰减时间常数 $\theta\approx 45\ \mu s$。

格栅夹层结构的动态响应变形情况，利用 Photron-Fastcam-SA5 高速相机进行观测。该相机最高拍摄速率为 $10^6\ s^{-1}$，本实验中选用 $4\times10^4\ s^{-1}$，光源系统为 4 个 1 000 W 的摄影灯。

1.2 试 件

格栅型夹层结构板的基体材料为 5A06 铝合金，其中夹层板的前、后面板均厚 0.5 mm，芯层的厚度 $h_c=15$ mm。夹层板芯层的格栅壁厚为 $t_c=0.5$ mm，格栅芯层的拓扑形状为正四边形，其边长为 20 mm。夹层板的前、后面板分别利用环氧树脂与芯层胶合，组合后的蜂窝夹层板总厚度为 16.1 mm，其平均面密度约为 4.42 kg/m^2，具体类型及相关尺寸如图 2 所示。

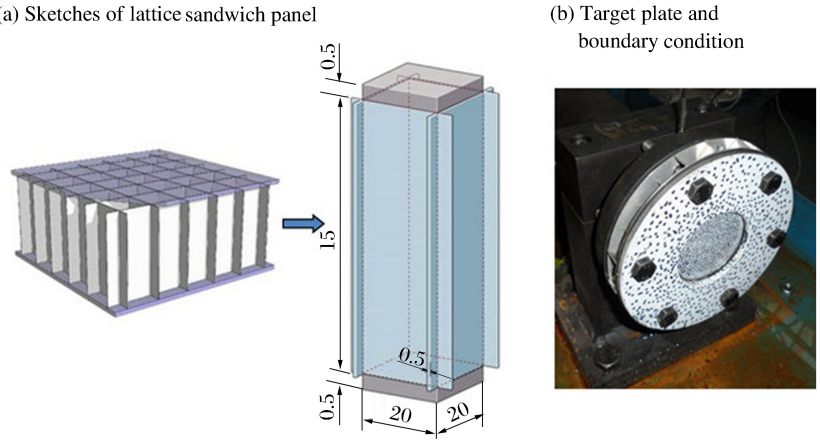


图 2 格栅夹层板尺寸及边界条件

Fig. 2 Sketches of lattice sandwich panel and clamped boundary condition

2 结果与分析

2.1 格栅夹层板

表 1 给出了各实验对应的实验参数，其中 $\hat{I}=I_0/(H\sqrt{\rho_t\sigma_y})$，为量纲一冲量，$H$ 为靶板的初始厚度，ρ_t 为靶板的密度，σ_y 为靶板的屈服应力。由表 1 可见，靶板塑性变形后的最大量纲一挠度随着飞片撞击速度的增加而增加，在实验范围内格栅型夹层板出现了面板破裂现象。

图 3 为飞片撞击速度为 118.82 m/s 时，格栅型夹层结构在水下冲击波作用下的典型变形历程。为防止靶板在变形过程中出现反光现象，在夹层板的气背面板上喷涂了一层灰色漆。由图可见，由于水下冲击波的作用，夹层板的后面板出现了类球冠型突起，但与单层板在该类载荷作用下的动态变形历程不

同[11]。格栅型夹层板的后面板并未出现明显的塑性铰和变形平台，而是气背面板直接出现类球冠突起，该突起随着冲击波的作用逐渐变大，并伴随出现明显的芯层印痕。这主要是由于格栅夹层板的前面板受压变形后对格栅芯层进行挤压，而壁厚为 0.5 mm 的格栅芯层压缩不均匀，靠近气背面板的部分变形很小造成的。

图 4 为格栅型夹层板在水下冲击波作用下的典型变形损伤模式。由图可以明显看到，当冲击波冲量较小时，靶板的前后面板均未出现明显的塑性大变形，而只是出现了清晰的芯层印痕；而当冲击波强度增大，量纲一冲量为 2.44 时，在冲击波载荷作用下靶板的气背面板除了出现明显的塑性大变形和芯层印痕，还出现了贯穿型穿孔，且后面板在穿孔处均出现了撕裂现象。这是由于固支边界处的芯层格栅在剪切作用下出现了大变形甚至断裂，从而导致后面板在该位置出现了应力集中，在流固耦合的作用下造成了面板的撕裂。但由于格栅型夹层板的芯层在高强度水下冲击波作用下的变形并不完全均匀，所以导致穿孔变形没有完全对称出现，具体如图 5(b)所示。

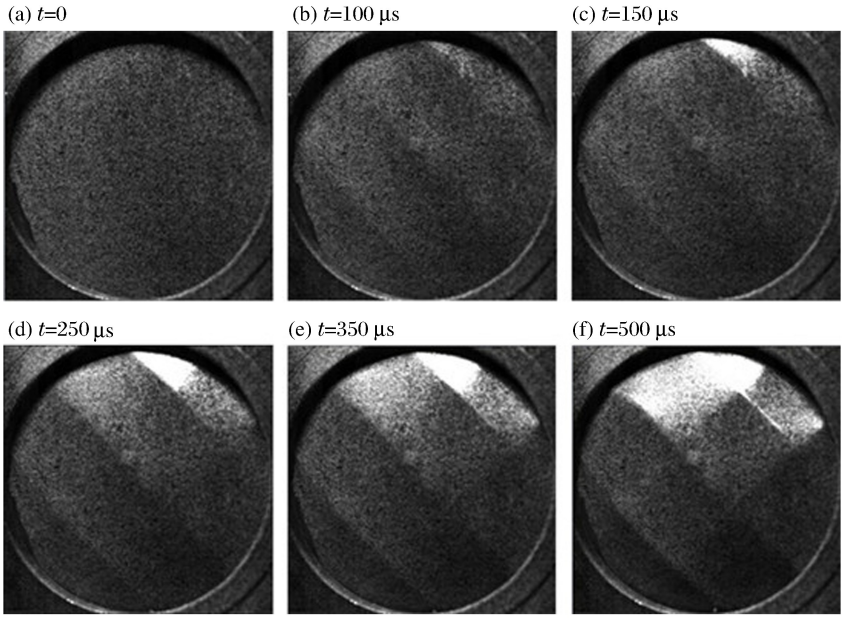


图 3　水下冲击波作用下格栅型夹层结构的动态变形过程

Fig. 3　Dynamic deformation process of lattice sandwich panel under underwater shock loading

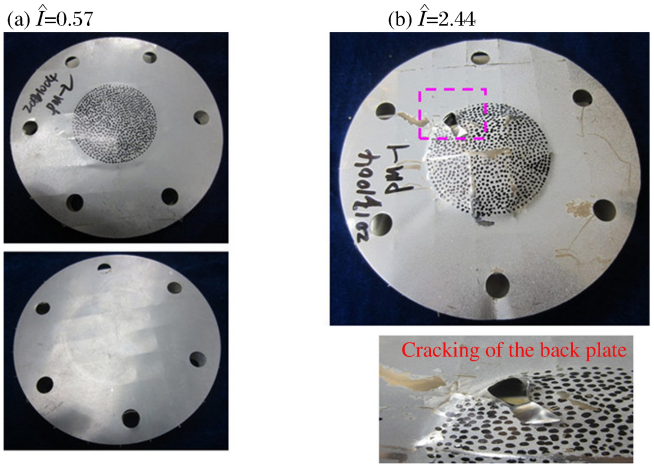


图 4　水下冲击波加载后格栅型夹层板形貌

Fig. 4　Lattice sandwich panel after blast loading

表 1　格栅夹层板实验参数

Table 1　Parameters of lattice sandwich panels

实验	v/(m·s^{-1})	m_a/(kg·m^{-2})	p_0/MPa	$\hat{I}$	δ_{max}/R	面板损伤
1	37.24	4.43	28.36	0.57	0.067	印痕
2	118.82	4.42	77.11	1.54	0.175	印痕
3	136.54	4.45	104.01	2.07	0.229	印痕
4	143.97	4.42	109.85	2.19	0.252	印痕
5	164.04	4.40	132.15	2.44	0.258	裂纹
6	219.49	4.40	167.63	3.36	0.351	裂纹

2.2 单层板

为了比较 5A06 铝合金夹层板的抗冲击性能，对 5A06 铝合金单层板也进行了不同条件下的水下冲击波加载实验。为了保证两种结构板的可比性，实验选用的单层铝合金厚度为 2 mm，其平均面密度为 4.90 kg/m^2。实验其他参数设置与格栅夹层板的冲击波加载实验设置相同，具体见表 2。

表 2 单层板实验参数

Table 2 Parameters of single-layered panels

实验	v/(m·s^{-1})	m_a/(kg·m^{-2})	p_0/MPa	$\hat{I}$	δ_{max}/R	断裂
1	41.74	4.91	34.35	0.71	0.112	无
2	80.87	4.90	61.83	1.27	0.217	无
3	129.54	4.89	93.64	1.92	0.304	无
4	135.97	4.91	105.57	2.17	0.367	无

2.3 分析和讨论

图 5 为格栅型夹层结构板在不同强度水下冲击波作用下的剖面形貌。当冲击波的量纲一冲量为 1.54 时，夹层板的格栅芯层除在固支边界处出现了明显的压溃扭曲，其他部分仅出现了微小的扭曲，同时前后面板均出现了明显的类球冠型突起；当冲击波量纲一冲量增加到 2.44 时，格栅芯层的压溃程度明显增强，且该压溃现象不仅局限于固支边界处，同样也出现在靶板的中心区域，但边界处的芯层压溃现象更严重，这主要是由于边界处的剪切失效模式造成的[1]。同时，夹层结构的前、后面板的变形量也因芯层压溃量的增加而增大，这说明固支条件下的格栅型夹层结构板对于边界效应较敏感。

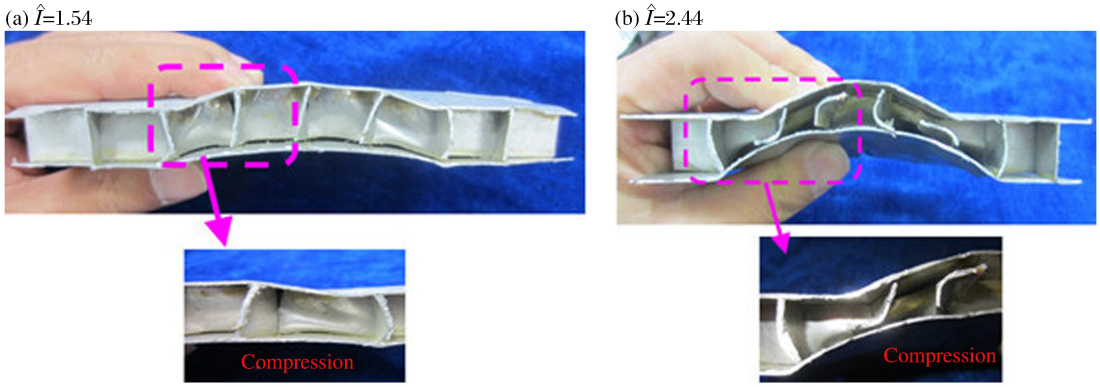


图 5 水下冲击波加载后格栅板切面形貌

Fig. 5 Cross-section of lattice sandwich panels after underwater shock loading

图 6 为格栅型夹层结构板在不同强度水下冲击波作用下，后面板沿半径各位置的最终变形量，其中 H=16 mm 为夹层板的总厚度。飞片的撞击速度分别为 164.04 和 219.49 m/s 时，夹层板的前、后面板在固支边界处均出现了贯穿型的破坏。由图可见，夹层结构气背面板各位置处的变形量随着飞片撞击速度的增大而增大，但整体的变形形式保持良好，均为类球冠形。当飞片撞击速度较大时，后面的中心区域出现了类似平台状的塑性变形，这是由于格栅芯层对后面板挤压形成了较深的印痕、而格栅间隙处没有得到充分的冲击波作用导致的。

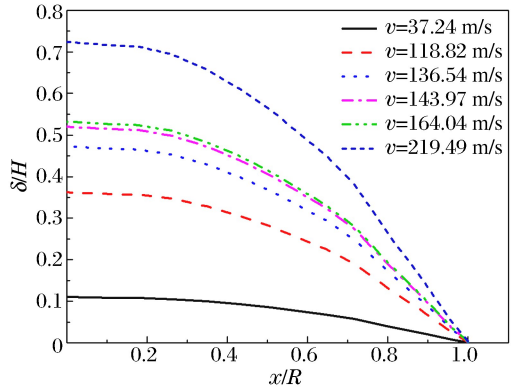


图 6 格栅板后面板各位置最终变形

Fig. 6 Final deflection of lattice sandwich structure

水下冲击波载荷作用下格栅型夹层结构板的前、后面板中心最大变形与冲击波量纲一冲量间的关系，如图 7 所示。由图可见，靶板前、后面板变形的最大挠度均随着冲击波量纲一冲量的增加而增加，且均呈线性关系。在冲击波冲量较小时，格栅型夹层板前后面板的变形量基本相同，但随着冲击波冲量的增大，前、后面板中心点的挠度差值明显增大，这是由于格栅型夹层板芯层的压溃失效特点决定的。在冲击波冲量较小时，靶板中心位置的格栅变形量很小，基本不会出现压溃扭曲现象，当冲击波强度加大后，芯层的变形也会相应加大，如图 5 所示。图 8 为相同面密度条件下，单层 5A06 铝合金板及铝合金格栅型夹层结构板气背面中心处的最大塑性变形，与冲击波量纲一冲量间的关系曲线。由图可见，两种结构板后面板中心点变形量随冲击波冲量的变化趋势基本相同。但在相同水下冲击波冲量的作用下，单层板的最终变形量大于格栅型夹层板。这说明，对于以 5A06 铝合金为基体材料的单层板和铝合金格栅夹层板，在面密度相同的条件下，格栅型夹层板的抗冲击作用明显强于单层板。

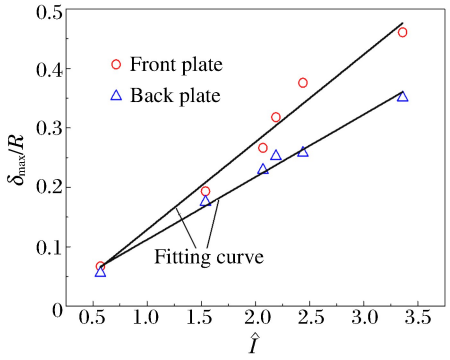


图 7　格栅板前后面板的最大变形

Fig. 7　Maximum deflection of lattice sandwich panels

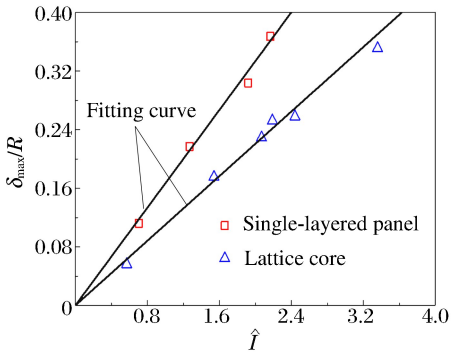


图 8　不同类型靶板气背面中心最大变形

Fig. 8　Maximum deflection at central point on air-back plate of different kinds of panels

由上述分析可知，在本文范围内，单层板及格栅夹层结构板气背面中心点变形量均与冲击波的量纲一冲量呈线性关系：$\delta_{max}/R=\gamma\hat{I}+\eta$。而由图 8 所示可知，两种类型靶板的 η 均为零。可以分别拟合得出对应的 γ，其中格栅型靶板为 0.11，单层板为 0.17，γ 越大的靶板其抗冲击能力越弱。由此可计算，夹层结构板相对于相同面密度的单层靶板所能提高的抗冲击性能，5A06 铝合金格栅夹层的抗冲击性能相比较单层板增加了 33.87%。

3　结　论

利用自行设计的非药式水下冲击波加载装置结合高速相机，对水下冲击波作用下具有相同面密度的 5A06 铝合金格栅夹层结构板及单层板的抗冲击防护能力，进行了实验研究，获得了格栅夹层结构板在水下冲击波作用下气背面板的动态响应过程。

实验结果表明：格栅型夹层板在水下冲击波作用下芯层的压缩存在明显的边界效应，固支边界处芯层受压后的剪切作用使该位置处的压缩变形程度大于其他受冲击位置处；当冲击波的量纲一冲量小于 4.5 时，夹层结构的气背面板最大扰度与冲击波量纲一冲量成线性关系；在水下冲击波作用下，相同面密度的格栅夹层结构板的抗冲击性能比单层板提高了 33.87%。

参考文献：

[1]　Nurick G N, Martin J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review. Part Ⅰ: Theoretical considerations[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989,8(2):159-170.

[2]　Nurick G N, Martin J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review. Part Ⅱ: Experimental considerations[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989,8(2):171-186.

[3]　Deshpande V S, Fleck N A. One-dimensional response of sandwich plates to underwater shock loading[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53(11):2347-2383.

[4] Wei Z, Dharmasena K P, Wadley H N G, et al. Analysis and interpretation of a test for characterizing the response of sandwich panels to water blast[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(10):1602-1618.

[5] Radford D D, McShane G J, Deshpande V S, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006,43(12):2243-2259.

[6] Xue Z Y, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(10):1283-1305.

[7] Karagiozova D, Nurick G N, Langdon G S, et al. Response of flexible sandwich-type panels to blast loading[J]. Composites Science and Technology, 2009,69(6):754-763.

[8] 黄超,姚熊亮,张阿漫.钢夹层板近场水下爆炸抗爆分析及其在舰船抗爆防护中的应用[J].振动与冲击,2010,29(9):73-76.
Huang Chao, Yao Xiongliang, Zhang Aman. Analysis on blast-resistance of steel sandwich plate under proxinity underwater explosion loading and its application in ship protection[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(9): 73-76.

[9] 汪玉,张玮,华宏星,等.泡沫夹芯夹层结构水下爆炸冲击特性研究[J].振动与冲击,2010,29(14): 64-68.
Wang Yu, Zhang Wei, Hua Hongxing, et al. Dynamic response of a submarine foam sandwich structure subjected to underwater explosion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(14):64-68.

[10] 张旭红,王志华,赵隆茂.爆炸载荷作用下铝蜂窝夹芯板的动力响应[J].爆炸与冲击,2009,29(4):356-360.
Zhang Xuhong, Wang Zhihua, Zhao Longmao. Dynamic response of sandwich plates with aluminum boneycomb cores subjected to blast loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(4):356-360.

[11] 任鹏,张伟,黄威,等.水下爆炸冲击波载荷作用下气背固支圆板的变形及应变场分析[J].船舶力学, 2013,17(11):1339-1344.
Ren Peng, Zhang Wei, Huang Wei, et al. Deformation mode and strain field analysis of clamped air-back circular plate subjected to underwater explosive loading[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013,17(11):1339-1344.

Experimental research on shock resistant properties of aluminum alloy lattice core sandwich panels under underwater shock loading

Ren Peng[1,2], Zhang Wei[2], Liu Jianhua[1]

(1. *School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang* 212000, *Jiangsu, China*;
2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In the present study, the dynamic response and shock-resisting properties of aluminum alloy lattice core sandwich panels under underwater shock loading were investigated using the non-explosive underwater shock loading device. The dynamic response of the sandwich plates was observed using a high-speed camera in collecting more information about the dynamic deformation history of the lattice sandwich plates. Based on the comparison of the experimental results of single-layered panels with the corresponding area mass, the effects of the lattice sandwich panel on the shock-resisting performance were studied. The results show that there is a quantitative relationship between the maximum deformation of the air-back plate of the lattice sandwich panels and the non-dimensional impulse of the underwater shock.

Key words: solid mechanics; shock-resisting properties; underwater shock wave loading; sandwich plate with lattice; dynamic response

(责任编辑 丁 峰)