

稿号: 2024-0274 (修改稿, 稿号请退修时补充)

本文亮点介绍:

- (1) 搭建了蜂窝夹芯板入水冲击实验平台, 三次重复性入水冲击实验获得入水冲击压力时间历程曲线、冲击压力峰值、面板变形轮廓及最终挠度值都吻合较好, 验证了蜂窝夹芯板入水冲击实验平台具有较高的可靠性。
- (2) 分析了蜂窝夹芯板的入水冲击载荷特性, 结果表明蜂窝夹芯板比等效铝板的入水冲击压力峰值更小, 压力持续时间更长, 在一定落体高度范围内, 入水冲击压力峰值与落体高度近似呈线性变化。
- (3) 探究了蜂窝夹芯板的变形模式和最终挠度等结构响应特征, 结果表明不同落体高度下蜂窝夹芯板的面板变形模式基本一致, 均为中间区域产生由四条塑性铰线组成的矩形变形区, 而四周为梯形变形区, 蜂窝夹芯板前面板和后面板中点处的最终挠度随落体高度呈二次抛物线增长。

铝蜂窝夹芯板入水冲击动态响应特性实验研究*

郭开岭^{1,2}, 廖永², 朱志奎², 刘栋³, 朱凌^{2,4*}

- (1. 高性能船舶技术教育部重点实验室 (武汉理工大学), 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学航海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;
3. 康明斯东亚研发有限公司, 湖北 武汉 430056
4. 武汉理工大学威海研究院, 山东 威海 264300)

摘要: 通过实验方法, 研究了铝蜂窝夹芯板在入水冲击载荷作用下的压力载荷特性和结构变形机理。首先, 搭建了蜂窝夹芯板入水冲击实验平台, 开展了不同落体高度下的蜂窝夹芯板入水冲击实验, 通过三维扫描仪得到了面板的变形结果, 并监测了不同测点的入水冲击压力时程, 同时验证了实验的可重复性。在此基础上, 研究了蜂窝夹芯板入水冲击过程中的压力载荷特性, 并与不同结构的入水冲击压力进行了对比。此外, 分析了蜂窝夹芯板的变形模式、最终挠度等特性, 给出了面板最终挠度和芯层压缩量的拟合公式。研究结果表明, 蜂窝夹芯板表面的入水冲击压力分布不均匀, 但在一定落体高度范围内, 其压力峰值均与落体高度近似呈线性变化。与刚性平板入水冲击相比, 蜂窝夹芯板的入水冲击压力峰值较小。相比同质量的等效铝板而言, 蜂窝夹芯板的入水冲击压力峰值更小, 压力持续时间更长。不同落体高度下, 蜂窝夹芯板的面板变形模式基本一致。随落体高度的增加, 蜂窝夹芯板前面板和后面板中点处的最终挠度近似呈斜率减小的二次抛物线增长。在入水冲击载荷作用下, 蜂窝夹芯板后面板变形明显小于等效铝板变形, 表明蜂窝夹芯板具有更好的抗冲击性能。

关键词: 蜂窝夹芯板; 入水冲击实验; 入水冲击载荷; 变形模式; 最终挠度

中图分类号: O353.4

国标学科代码: 13025

文献标识码: A

Experimental study on dynamic behaviors of aluminum honeycomb sandwich plates subjected to water impact

GUO Kailing^{1,2}, LIAO Yong², ZHU Zhikui², LIU Dong³, ZHU Ling^{2*}

*收稿日期: 2024-08-02; 修回日期: _____;

基金项目: 国家自然科学基金 (12202328, 12172265)

第一作者: 郭开岭 (1989-), 男, 博士, 副教授. E-mail: guokailing@whut.edu.cn;

通信作者: 朱凌 (1962-), 男, 博士, 教授. E-mail: lingzhu@whut.edu.cn.

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Technology,
Wuhan 430063, Hubei, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063,
Hubei, China;

3. Cummins East Asia Research and Development Company, Ltd, Wuhan 430056, Hubei, China;

4. Wuhan University of Technology Weihai Research Institute, Weihai 264300, Shandong, China)

Abstract: The pressure characteristics and structural deformation mechanism of AHSPs (aluminum honeycomb sandwich plates) under water entry impact were investigated through experimental method. The self-designed drop experimental platform in the water tank was established, and the water entry impact experiments of AHSPs at different drop heights were carried out. Meanwhile, deformation of the face sheets was measured by 3D Scanner, and the time history of water impact pressure at different measuring points was monitored. Furthermore, the repeatability of the experiment was verified. On this basis, the water impact load characteristics of AHSPs during the process of water entry were studied, and compared with those of other structures in published papers. In addition, the deformation modes and permanent deflection characteristics of AHSPs were analyzed, and the fitting formulas of the permanent deflection of the face sheets and the compression of the core were proposed. Results show that, the distribution of the water impact pressure on the front sheet of AHSPs is uneven. However, within a certain range of drop heights, the peak value of the water impact pressure is approximately linear with the drop height. Additionally, compared to the water entry of rigid plates, the peak value of the water impact pressure of AHSPs is smaller. Compared with the mass equivalent aluminum plates, the peak value of the water impact pressure of AHSPs is smaller, while the pressure duration of AHSPs is longer. The deformation modes of the face sheets of AHSPs at different drop heights are almost the same. Besides, with the increase of the drop height, the permanent deflections of front and back faces of AHSPs increase approximately in form of quadratic parabola with decreasing slope. Suffering from water entry impact loadings, the permanent deflections of the back sheet of AHSPs are obviously smaller than those of the equivalent aluminum plates, indicating that the AHSPs have better impact resistance compared with the equivalent aluminum plates.

Keywords: honeycomb sandwich plates; water entry impact experiments; water entry pressure; deformation modes; permanent deformation

结构入水冲击问题具有十分广泛的工程背景, 广泛存在于军事和民用领域, 是船舶与海洋工程与航空航天等领域中的重点、难点问题之一^[1-3]。例如, 船体结构入水冲击、无人潜航器投放、水上飞机降落、海上救生艇抛落、跨介质航行器入水等。对于船体结构而言, 船舶在恶劣海况中航行时, 将不可避免地 与波浪发生剧烈的相对冲击, 在短时间内产生巨大的冲击压力, 从而对局部结构造成塑性大变形甚至损伤破坏, 同时给整体结构的可靠性和安全性带来严重威胁。因此, 开展入水冲击载荷作用下船体结构的动态响应研究, 可为结构抗冲击防护设计、保证结构安全可靠, 提供有价值的指导, 具有重大工程意义。

船体结构的入水冲击主要发生在船体底部、舷侧外飘等位置。对于船底结构入水冲击而言, 可简化为几何形状简单的平底结构入水冲击, 大量学者对其入水冲击压力特性和结构响应机理进行了研究。Chuang^[4,5]自 1966 年便开始开展了系列刚性平板模型的自由落体冲击实验, 并根据实验结果, 提出了刚性平板模型入水冲击压力峰值预报公式。Shin 等^[6]通过平底结构的自由落体实验, 研究了入水冲击载荷对该结构的弹塑性响应的影响。Talioua 等^[7]通过改变封闭实验环境中的气压以改变气垫效应强弱程度, 以探究刚性平板在入水冲击过程中, 气垫效应强弱对其入水冲击压力的影响。Zhu 等^[8]通过实验方法研究了平板入水冲击的饱和冲量现象及结构响应特性。在给定的实验条件下, 饱和现象均存在, 且随着落体高度的增加, 平板的动态塑性响应更容易出现饱和现象。而对于舷侧外飘入水冲击而言, 一般可简化为楔形体结构入水冲击。为了研究其载荷特性和结构响应机理, 不少学者开展了楔形体结构的入水冲击研究。早在 1929 年, Von Karman^[9]便基于动量守恒定律建立了可求解的二维楔形体垂向

入水模型。然而, Von Karman 忽略了楔形体入水时的水面抬升效应。随后, Wagner^[10]基于势流理论并考虑水流与平板间的相对冲击速度,提高了求解入水冲击压力的计算精度。在此之后,陈小平等^[11]对不同刚度的楔形体板架模型进行了入水冲击实验研究和数值仿真模拟。王振明等^[12]以水陆两栖飞机的典型横截面为研究对象,通过进行不同落体高度和不同质量的楔形体入水冲击实验,测量了楔形体入水过程中的压力并记录自由液面变化情况,研究了不同实验条件下的自由液面变化、压力随时间变化及局部压力分布规律。Zhu 等^[13]和 Duan 等^[14]进行了系列楔形体的入水冲击实验研究,探究了冲击压力系数、持续时间、空间压力分布和幅值移动速度等压力特性。结果发现,对于斜升角为 0° 的平底入水冲击,冲击压力瞬时作用在结构上,没有移动现象,接近于均匀分布的脉冲载荷;当斜升角超过 0.2° 时,冲击压力产生移动现象;当斜升角在 4° 至 45° 时,冲击压力移动过程中压力时程形状几乎不变。Park 等^[15]分析了入水冲击现象的内部机理,将斜升角为 0° 、 3° 、 10° 和 20° 的不同刚度楔形体进行入水冲击实验。对系列入水冲击实验得到的冲击压力峰值、冲击压力持续时间、冲击压力系数和压力峰值移动速度进行了分析。骆寒冰等^[16]通过实验方法探究了铝制加筋板楔形体刚度的变化对入水冲击压力和水弹性效应的影响。

随着船舶朝着轻量化、高速化方向发展,夹芯结构作为一种轻质高强、弯曲刚度大、抗冲击性能好的新型结构形式,在船舶与海洋工程领域得到了广泛关注^[17,18],夹芯结构的入水冲击动态响应问题是当前的热点研究问题。针对夹芯板的入水冲击研究, Das 和 Batra 等^[19]采用任意拉格朗日-欧拉方法 (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE),对刚性和柔性船体底板的入水冲击过程进行了数值模拟,探究了复合材料夹芯板的分层现象。Xie 等^[20]通过数值仿真与入水冲击实验相结合的方法研究了复合材料夹芯结构的入水冲击响应,并分析了水弹性对结构入水冲击压力和应力响应的影响。Hassoon 等^[21]采用实验和数值仿真方法,从入水速度、入水角度、结构刚度等多方面,探究了复合材料夹芯板的入水冲击压力特性、动态变形和结构失效损伤问题。结果表明,当冲击速度增加时,结构变形和入水冲击压力也增加,射流现象变得非常明显。且随着速度的增加,刚性更强的面板具有更高的峰值力,且最大挠度的位置向面板中心外侧偏移。上述研究均针对复合材料夹芯结构,而对于金属夹芯结构的入水冲击问题相对较少。赵飞等^[22]采用 ALE 方法建立了金字塔点阵夹芯板的入水冲击数值仿真模型,分析了该结构在不同入水速度下的冲击压力和结构响应特性。研究结果表明,入水速度较高时,夹芯板上面板的最大变形要小于实体平板,同时芯层相对密度对夹芯板的入水冲击压力峰值和最终挠度有较大影响。He 等^[23]基于 CEL 方法建立了金属波纹夹芯板的入水冲击有限元模型,通过对水动力、变形和压力的监测,研究了金属波纹夹芯板在不同入水速度与斜升角下的载荷特性及结构损伤模式和失效机理。Wang 等^[24]研究了激光焊接金属波纹夹芯板在入水冲击作用下的动态响应,进行了不同速度下的入水冲击实验,分析了波纹夹芯板的入水冲击压力与加速度。结果表明,波纹夹芯板的入水冲击压力并不是均匀分布的。

综上所述,当前已有大量学者针对船舶与海洋工程结构的入水冲击动态响应特性开展了系列深入的研究,并获得了很有意义的结论。然而,当前研究对象主要集中在单板和加筋板等简单结构形式,以及复合材料夹芯结构等新型结构形式,以点阵、波纹为芯层的金属夹芯结构形式也开展了一定研究。而蜂窝夹芯板 (Aluminum Honeycomb Sandwich Plates, AHSPs) 作为一种典型的、轻质高强的金属夹芯结构,其在入水冲击载荷作用下的结构响应特性尚不明确,阻碍了蜂窝金属夹芯结构在船舶与海洋工程结构冲击防护领域中的应用。因此,开展蜂窝夹芯板入水冲击响应实验研究,探究入水冲击载荷特性及结构响应机理,对于促进蜂窝夹芯板在船体结构抗冲击方面的应用具有重要意义。

1 实验流程及装置

1.1 入水冲击装置介绍

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

入水冲击实验采用自行设计的入水冲击实验装置，该实验装置主体结构为铝合金桁架，装置位于水池中间区域。入水冲击实验水池长 35.2m，宽 3.8m，水深 1.0m，在入水冲击过程中可以避免池壁效应对入水冲击载荷的影响。

如图 1 所示，整套实验装置包括电磁铁、竖直导轨、配重块、角度调节螺栓、入水冲击箱体、弹簧缓冲器以及支撑架。实验时，电磁铁可将安装有蜂窝夹芯板的箱体提升至预设高度，4 根垂直光滑导轨可保证蜂窝夹芯板沿竖直方向下落。图 2 所示为实验所用箱体结构，该箱体共两个实验区域，两侧试样相同，为了测量入水冲击压力，左边试样安装压力传感器，首先在蜂窝夹芯板的前面板板上开孔，其次安装轻质的铝合金传感器基座，且传感器基座材料与蜂窝夹芯板面板材料相同，最后再通过螺纹拧紧的方式，将压力传感器固定在轻质传感器基座上。同时为避免压力传感器的开孔安装问题影响试样的结构响应，右边试样为完整板。

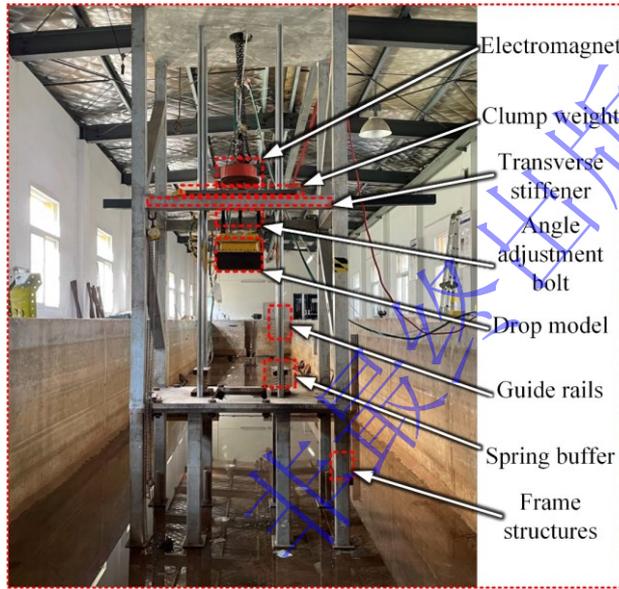


图 1 入水冲击实验装置
Fig.1 Water impact experimental devices

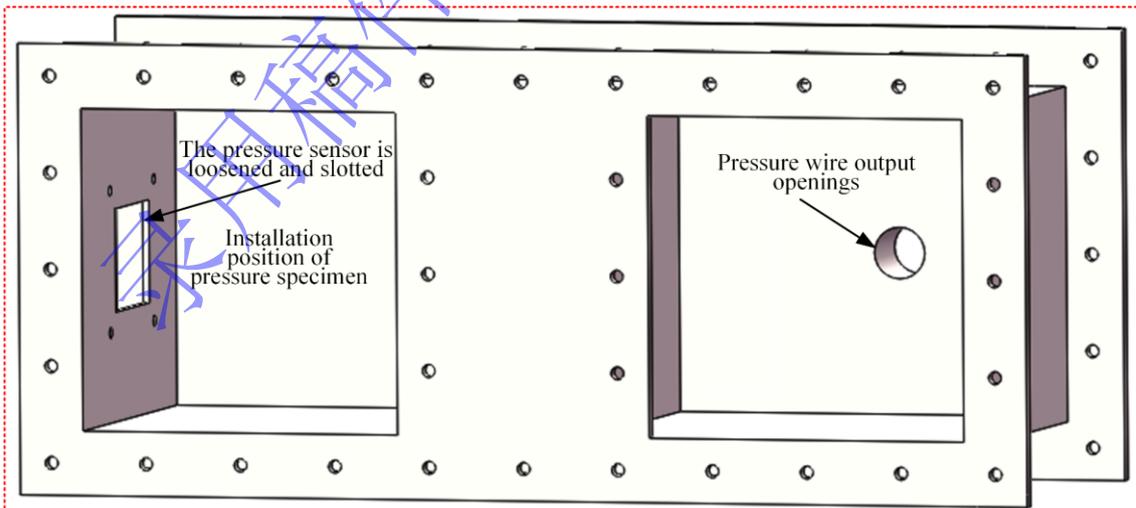


图 2 实验试样安装箱体
Fig.2 Installation box of test sample

1.2 实验试样

如图3所示, 蜂窝夹芯板由面板和芯层组成, 面板材料为 1060 铝合金, 蜂窝芯层为 3003 铝合金, 面板和蜂窝芯层间采用环氧树脂胶进行粘接。蜂窝夹芯结构的材料及尺寸如表 1 所示。面板的总体区域平面尺寸为 350*350mm, 有效区域平面尺寸为 250*250mm, 前面板、后面板的厚度 δ_f 、 δ_b 均为 0.5mm; 蜂窝芯层有效区域平面尺寸为 250*250mm, 芯层厚度 δ_c 为 15mm, 蜂窝胞元边长 l 为 15mm。蜂窝芯层采用拉伸法制作工艺, 胞元壁有单层和双层两种厚度, 分别为 $\delta_{single}=0.04\text{mm}$, $\delta_{double}=0.08\text{mm}$ 。同时, 为区分蜂窝夹芯板的两块面板, 现将实验时蜂窝夹芯板与水直接接触的面板命名为“前面板”, 不与水接触的面板命名为“后面板”。

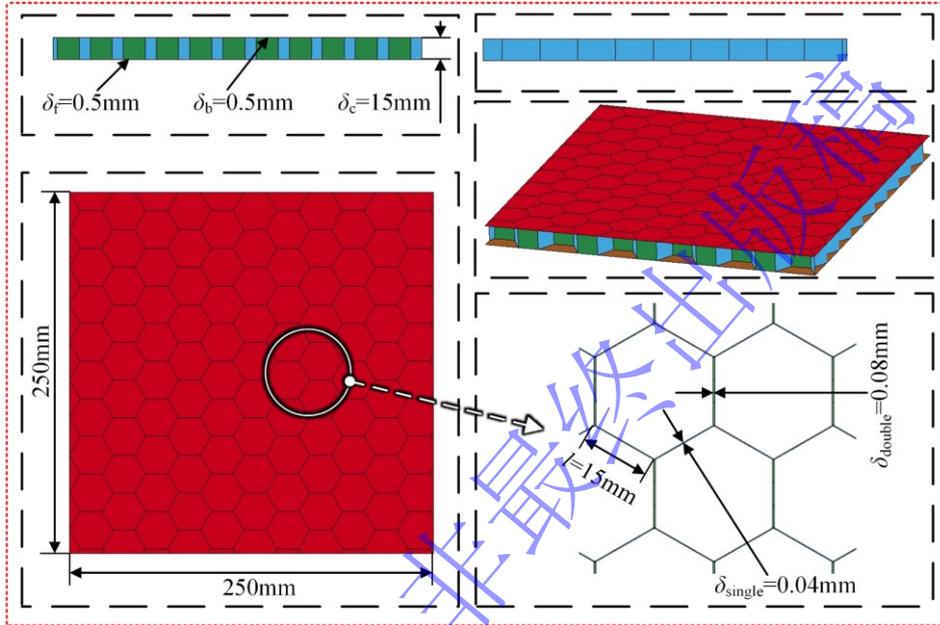


图3 夹芯板试样三维示意图

Fig.3 Three-dimensional sketch of AHSPs

表 1 蜂窝夹芯板材料及尺寸

Table 1 Material properties and dimensions of AHSPs

蜂窝夹芯板	材料类型	总体尺寸/mm ²	有效尺寸/mm ²	厚度/mm	胞元边长 l /mm	δ_{single} /mm	δ_{double} /mm
前面板	Al 1060	350*350	250*250	0.5	—	—	—
芯层	Al 3003	250*250	250*250	15	15	0.04	0.08
后面板	Al 1060	350*350	250*250	0.5	—	—	—

1.3 边界条件及夹具设计

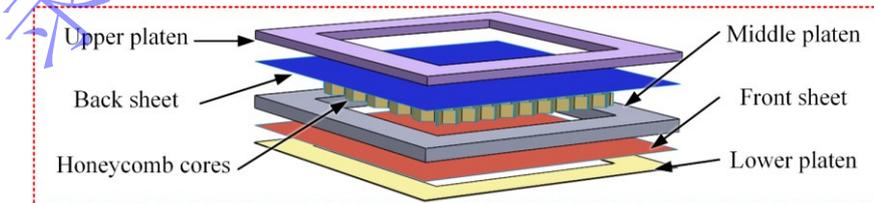


图4 夹具与蜂窝夹芯板安装示意图

Fig.4 Installation diagrams for clamp and AHSPs

在实际的船体结构中, 板格四周大都是强框架结构, 因此板格四周可近似认为是固支边界。为了实现蜂窝夹芯板四周固支边界条件, 自行设计了固支夹具, 该套夹具共包括三块钢板, 各钢板与蜂窝夹芯板的相对位置如图 4 所示。其中上层钢板可通过沉头螺栓固定在箱体上, 而中层钢板则位于蜂窝

夹芯板四周，下层钢板位于蜂窝夹芯板最下方。该套夹具装置不仅为蜂窝夹芯板四周提供固支边界条件，还避免了拆卸时对蜂窝夹芯板造成的二次变形影响，提高了其前面板和后面板变形测量的准确度。

1.4 入水冲击压力与变形测量

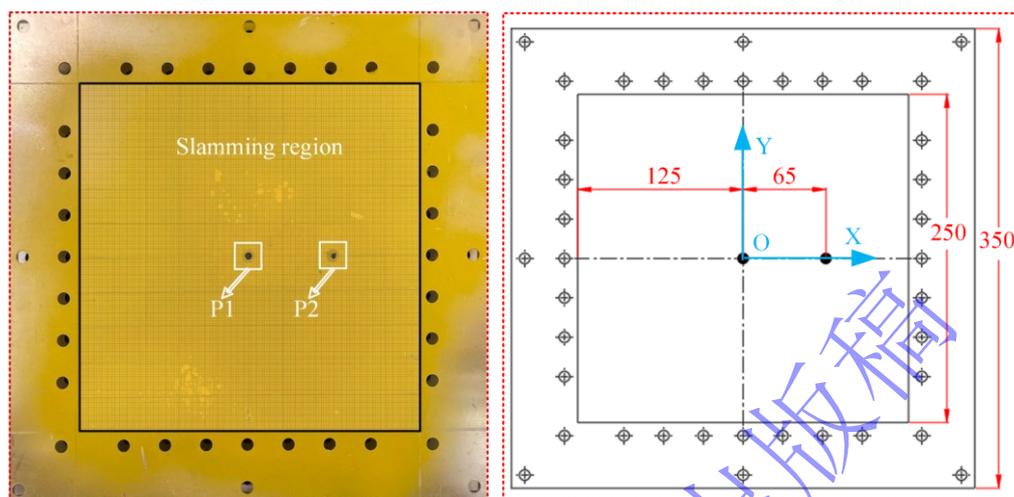


图 5 入水试样和测点位置
Fig.5 Water impact specimen and measuring point position

为研究蜂窝夹芯板入水冲击动态响应特性，实验时需测量其入水冲击压力以及面板变形。由于安装压力传感器需要在面板上开孔，会影响结构的连续性。因此，需同时制作两块试样，分别为测量入水冲击压力和结构变形。入水冲击压力由压力传感器（PCB—113B27）测得，压力传感器量程为 0-690kPa，灵敏度为±0.1mV/kPa，谐振频率高于 500kHz，上升时间低于 0.1μs。压力传感器的布置位置如图 5 所示，压力测点 P1 位于面板中心处，压力测点 P2 距面板中心 62.5mm，即位于面板实验区域 X 轴方向 1/4 处。入水冲击压力由动态数据采集仪（M+P）采集，其采集频率为 102.8kHz。

实验过程中，采用高速摄像机记录试样的入水冲击过程，拍摄频率为 2000Hz，追踪入水冲击箱体上的标记点的运动过程即可计算入水冲击箱体的实测入水速度。实验结束后，采用 3D 扫描仪，以便得到准确的最终变形轮廓，分析变形特性。蜂窝夹芯板的相关测量和采集系统如表 2 所示。

表 2 数据测量与采集系统

Table 2 Data measurement and acquisition system

测量设备	用途
M+P 动态采集分析系统	P1 和 P2 测点的压力时程
三维激光扫描仪	前面板和后面板的变形
高速摄像机	入水冲击箱体的实测入水速度
LED 灯	实验场景补光

1.5 实验工况介绍

为了分析入水冲击载荷及结构响应随落体高度的变化规律，需要开展不同落体高度下的入水冲击实验。本文中，蜂窝夹芯板的落体入水冲击高度一共有 5 种，分别为 0.4m、0.5m、0.6m、0.7m、0.8m。为了便于分析，对不同工况进行编号。具体实验工况如表 3 所示。

如表 4 所示为高速摄影得到的不同落体高度 h 下蜂窝夹芯板入水瞬间的实测速度 v_a 以及自由落体理论计算速度 $v_b = \sqrt{2gh}$ 。不同落体高度下的 v_a 均比相应的 v_b 小，但误差均在 2.00% 以内。故在实验过程中，可以将蜂窝夹芯板沿入水冲击实验架导轨下降的过程近似认为是自由落体运动。

表 3 入水冲击实验工况

Table 3 Cases for water impact tests

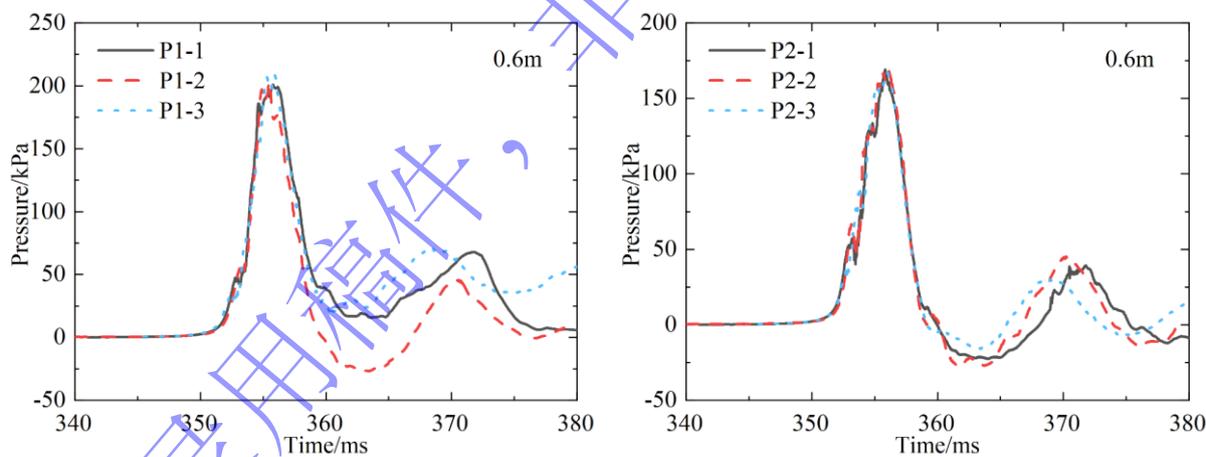
实验工况	落体高度 h/m
Test-1	0.4
Test-2	0.5
Test-3	0.6
Test-4	0.7
Test-5	0.8

表 4 不同落体高度下对应的速度

Table 4 The water entry velocity under different drop heights

落体高度 h/m	理论入水速度 $v_b/(m/s)$	实测入水速度 $v_a/(m/s)$	误差 $((v_b - v_a) / v_b) \times 100\%$
0.4	2.80	2.76	1.43
0.5	3.13	3.08	1.60
0.6	3.43	3.39	1.17
0.7	3.70	3.65	1.35
0.8	3.96	3.90	1.52

2 入水冲击实验重复性验证



(a) Pressure measuring point P1

(b) Pressure measuring point P2

图 6 重复实验的入水冲击压力时程曲线

Fig.6 Water impact pressure time-history curves of the repeated water impact tests

入水冲击压力载荷是一种持续时间很短的脉冲载荷，因此实验的可靠性与仪器测量结果的准确性对实验结果具有很大的影响。为验证本文实验的可重复性以及仪器测量结果的准确性，需在正式实验前，进行实验的重复性验证。本文选取 Test-R 的蜂窝夹芯板进行三次重复性入水冲击实验，分析三次实验数据间的差异。重复实验分别命名为 Test-R- i ，其中， i 取 1, 2, 3。

图 6 所示为三次入水冲击实验得到的 P1 测点和 P2 测点处的入水冲击压力时程曲线。从图中可以观察到，两测点处的压力时程曲线均存在多个压力脉冲，随着时间的推移脉冲峰值逐渐减小，而首个脉冲之后的脉冲变化趋势存在一定差异，可能是由于箱体入水后与弹簧减震器之间的相互作用导致的。

从整体而言，三次入水冲击实验得到两测点处的入水冲击压力曲线，在压力峰值和第一个脉冲变化趋势上均吻合较好。图 7 所示为利用三维激光扫描仪得到的其前面板与后面板中剖面变形轮廓。从图中可以发现，前面板中剖面变形轮廓和后面板中剖面变形轮廓存在略微差异，可能是由于蜂窝夹芯板是采用人工粘接制作而成，不同试样间会存在一定差异。从整体而言，三次入水冲击实验得到的蜂窝夹芯板前面板中剖面变形轮廓和后面板中剖面变形轮廓均基本重合。图 8 为蜂窝夹芯板下落过程不同阶段的拍摄图，分别为入水冲击箱体下落阶段（a），箱体与水面相对冲击阶段（b），最后出现飞溅现象（c）。

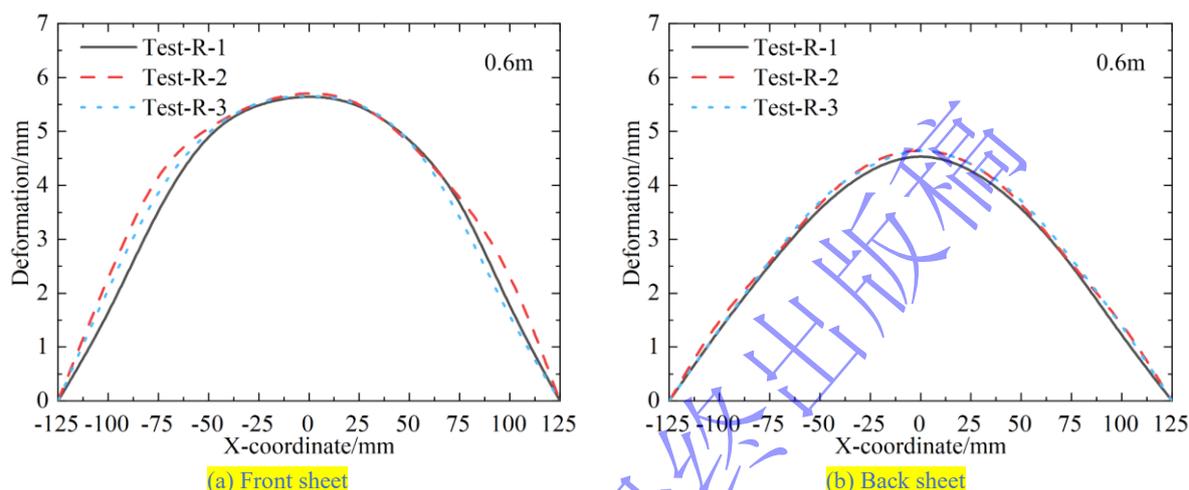


图 7 重复实验的蜂窝夹芯板中剖面变形轮廓
Fig.7 Mid-section deformation profile of AHSPs on the repeated water impact tests



图 8 蜂窝夹芯板落体入水冲击过程
Fig.8 AHSPs drop body water impact process

表 5 重复性实验结果

Table 5 Results of the repeated water impact tests

实验编号及 误差	P1 测点压力峰 值/kPa	P2 测点压力峰 值/kPa	前面板中点最终 挠度/mm	后面板中点最终 挠度/mm
Test-R-1	200.86	169.05	5.69	4.63
Test-R-2	204.36	168.70	5.76	4.72
Test-R-3	208.51	167.06	5.69	4.75
$\eta/\%$	1.87	0.63	0.71	1.33

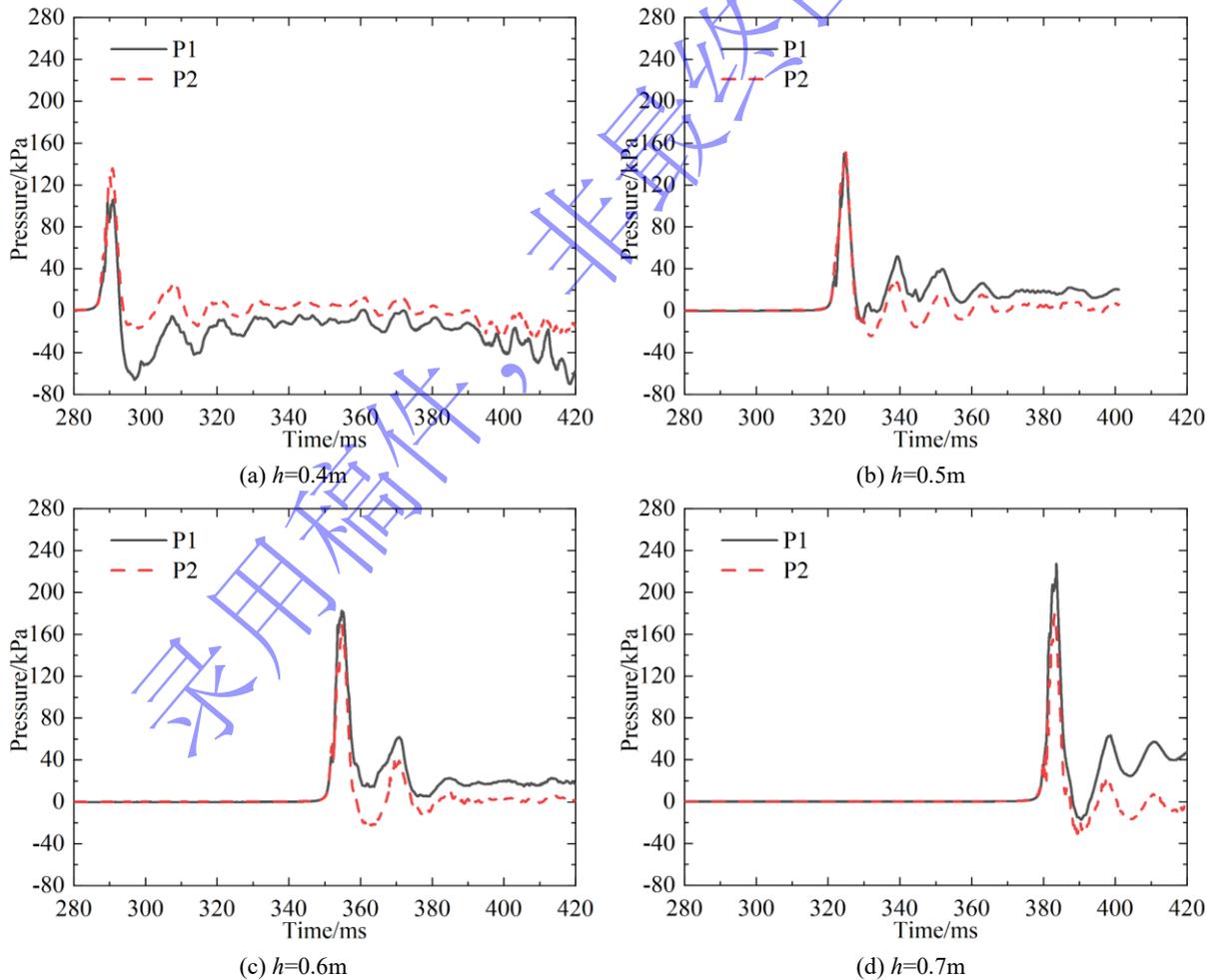
基于蜂窝夹芯板三次重复性入水冲击实验所得 P1 测点和 P2 测点压力峰值，以及前面板和后面板中点处的最终挠度，按公式 (1) 计算了入水冲击压力峰值和面板最终挠度的相对标准偏差 η (Relative Standard Deviation, RSD)，每种工况的相对标准偏差等于重复工况的实验数据的标准差与均值的比值，相对标准偏差越小表示重复性越好，相关数据见表 5 重复性实验结果。从表中可以发现，P1 测点压力峰值、P2 测点压力峰值、前面板中点最终挠度和后面板中点最终挠度的相对标准偏差分别为 1.87%、0.63%、0.71%和 1.33%，相对标准偏差均小于 2%。

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， x_i 为测量值， \bar{x} 为测量平均值， n 为测量个数。

综上所述，三次实验结果的重复性较好，表明本文所采用的入水冲击实验装置具有较高的稳定性，获得的实验数据具有较高的准确性。

3 入水冲击压力特性



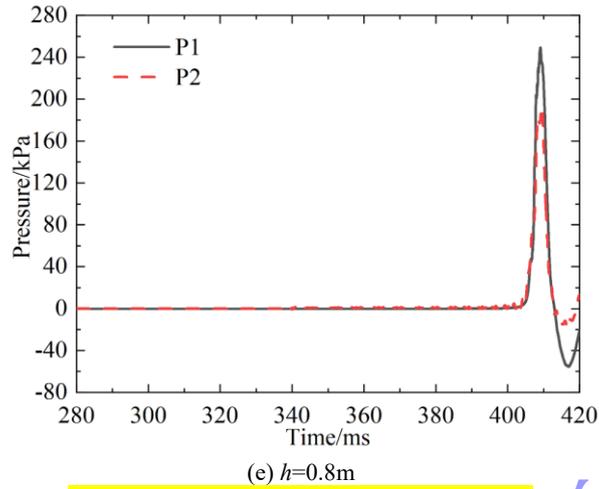


图 9 不同落体高度下水冲击压力时程曲线
Fig.9 Time-history curves of water impact pressure under different drop heights

图 9 所示为不同落体高度工况下，P1 测点和 P2 测点处的入水冲击压力时程曲线。从图中可以发现，同一工况下不同测点处的入水冲击压力时程曲线变化规律基本相同，类似三角形脉冲，且入水冲击压力峰值对应的时刻基本相同。同时可以发现，入水冲击压力峰值随落体高度的增加而增大，但是压力时程曲线的形状基本不变。

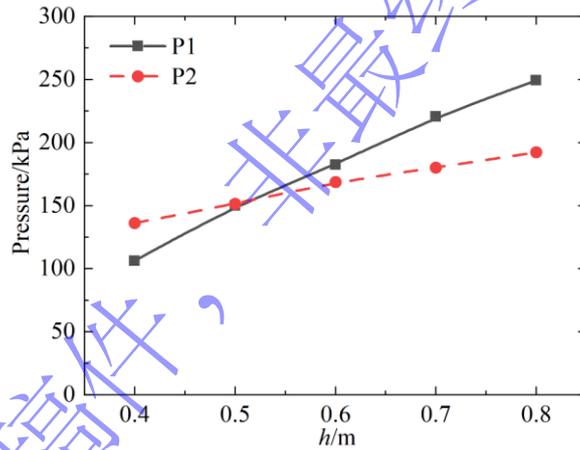


图 10 不同落体高度下压力测点的入水冲击压力峰值
Fig.10 The peak values of water impact pressure for the pressure measuring points under different drop heights

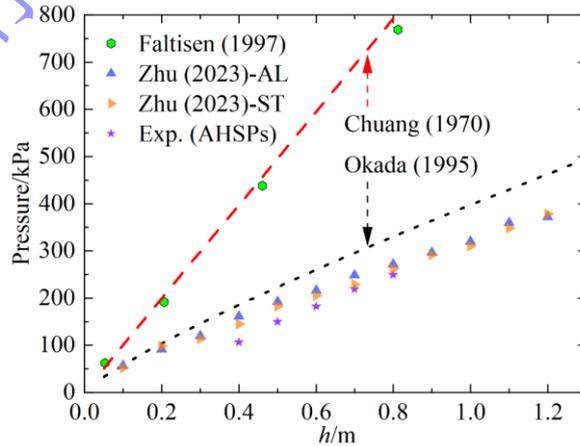


图 11 入水冲击压力峰值与落体高度的关系曲线 (AL: aluminum plate; ST: steel plate)
Fig.11 Relationship between peak value of water impact pressure and water entry velocity (AL: aluminum plate; ST: steel plate)

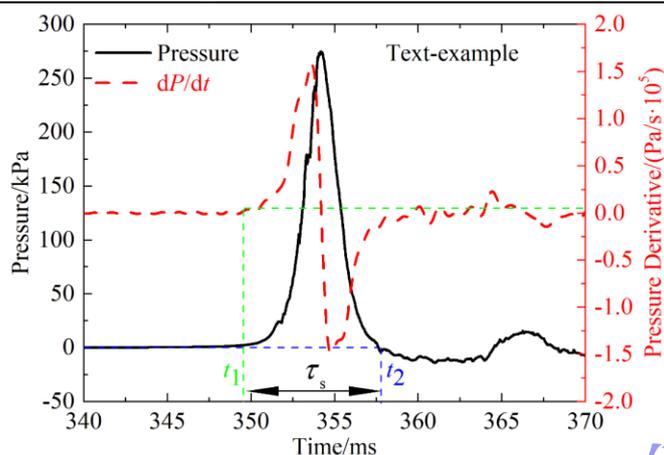


图 12 入水冲击压力持续时间定义示意图
Fig.12 Definition diagram of water impact pressure duration

然而，不同测点处的入水冲击压力峰值大小不同，表明蜂窝夹芯板表面的入水冲击压力分布具有一定的不均匀性。由图 10 可知，当落体高度大于 0.5m 时，P1 测点处入水冲击压力峰值基本大于 P2 处，且随着落体高度的增加，两测点的压力峰值差值逐渐增大。由于蜂窝夹芯板是弹性结构，在入水冲击过程中会产生变形，P1 测点和 P2 测点的变形不同，其入水冲击压力峰值大小也会存在一定的差异。这一点与 Wang 等^[24]的研究结论类似，存在中心测点处压力峰值低于四周测点处压力峰值的情况，即蜂窝夹芯板表面的入水冲击压力不是均匀分布的。此外，对于 0.4m 和 0.5m 落体高度工况而言，P1 测点入水冲击压力峰值低于 P2 测点；而当落体高度大于 0.5m 时，P1 测点入水冲击压力峰值高于 P2 测点。两测点入水冲击压力峰值差异的主要原因，可能是蜂窝夹芯板入水冲击过程中的空气垫效应以及不同位置芯层压缩程度不同。当落体高度较小时，蜂窝夹芯板入水速度较小，前面板外围空气容易逃逸，仅在中心区域附近会产生空气垫，P1 测点位于空气垫中心，因此其入水冲击压力峰值小于位置边长 1/4 位置处的 P2 测点。当落体高度较大时，蜂窝夹芯板入水速度较大，前面板产生变形的区域更大，此时 P1 测点和 P2 测点均位于空气垫范围内。气垫效应对两测点的压力峰值削弱作用均存在，而中间芯层更易被压缩，导致中间的局部刚度更大，因此 P1 测点的入水冲击压力大于 P2 测点，这与平板入水冲击时在中间区域的入水冲击压力大于外围入水冲击压力结果保持一致^[6]，且随着落体高度的增加，二者的差异越来越大。

如图 11 所示，本文将不同落体高度下蜂窝夹芯板的入水冲击压力峰值，与不同文献中的平底结构入水冲击压力峰值进行了对比分析，其中包括：根据 Chuang^[5]提出的预报公式计算得到的刚性平板入水冲击压力峰值，Faltinsen 等^[25]通过入水冲击试验得到的 8mm 厚的钢板入水冲击压力峰值，根据 Okada 等^[26]考虑弹塑性响应的经验公式得出的单板入水冲击压力峰值，Zhu 等^[8]在入水冲击实验中得到的铝板和钢板的入水冲击压力峰值。对比结果表明，在不同落体高度下，蜂窝夹芯板的入水冲击压力峰值远小于 Chuang^[5]和 Faltinsen 等^[25]的大厚度钢板入水冲击压力峰值，其主要原因是蜂窝夹芯板在入水冲击过程中会产生弹塑性变形，而变形会进一步影响入水冲击压力，使压力峰值减小。同时可知，在不同落体高度下，Okada 等^[26]的单板入水冲击压力峰值以及 Zhu 等^[8]的单板入水冲击压力峰值均大于蜂窝夹芯板。通过拟合入水冲击压力峰值与落体高度间的函数关系发现，在 0.4m 至 0.8m 落体高度范围内，入水冲击压力峰值与落体高度近似呈线性关系。

入水冲击压力持续时间 τ_s 可以根据 Talioua 等^[7]在文献中的定义给出，入水冲击压力的起始时刻 t_1 取 $dP(t)/dt > 110\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ，结束时刻 t_2 取 $P(t)=0$ ，如图 12 所示。表 6 给出了蜂窝夹芯板不同落体高度下 P1 测点和 P2 测点的压力持续时间。从表中可以发现，不同落体高度下，P1 测点和 P2 测点的压力持续时间均在 8.50ms~13.50ms 之间，即压力持续时间与落体高度关系不明显。

表 6 不同落体高度的蜂窝夹芯板 P1 和 P2 测点压力持续时间

Table 6 The pressure duration of P1 and P2 of AHSPs under different drop heights

落体高度 h/m	P1 测点压力持续时间 t_p/ms	P2 测点压力持续时间 t_p/ms
0.4	8.93	10.32
0.5	10.55	9.11
0.6	13.36	11.20
0.7	12.15	11.63
0.8	10.86	11.68

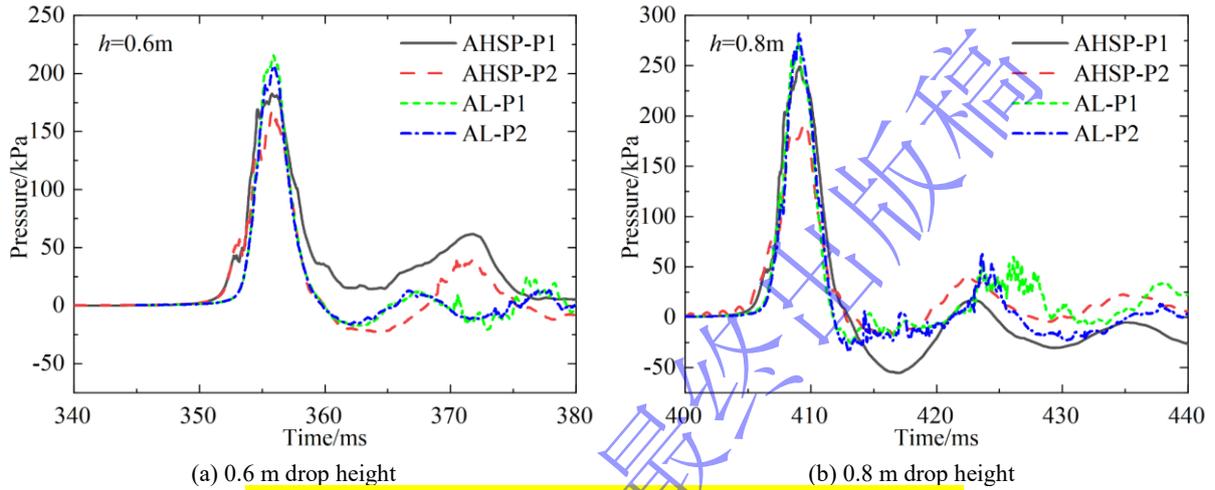


图 13 典型落体高度下蜂窝夹芯板与质量等效铝板入水冲击压力对比

Fig.13 Comparison of water impact pressure between AHSPs and ALs under typical drop heights

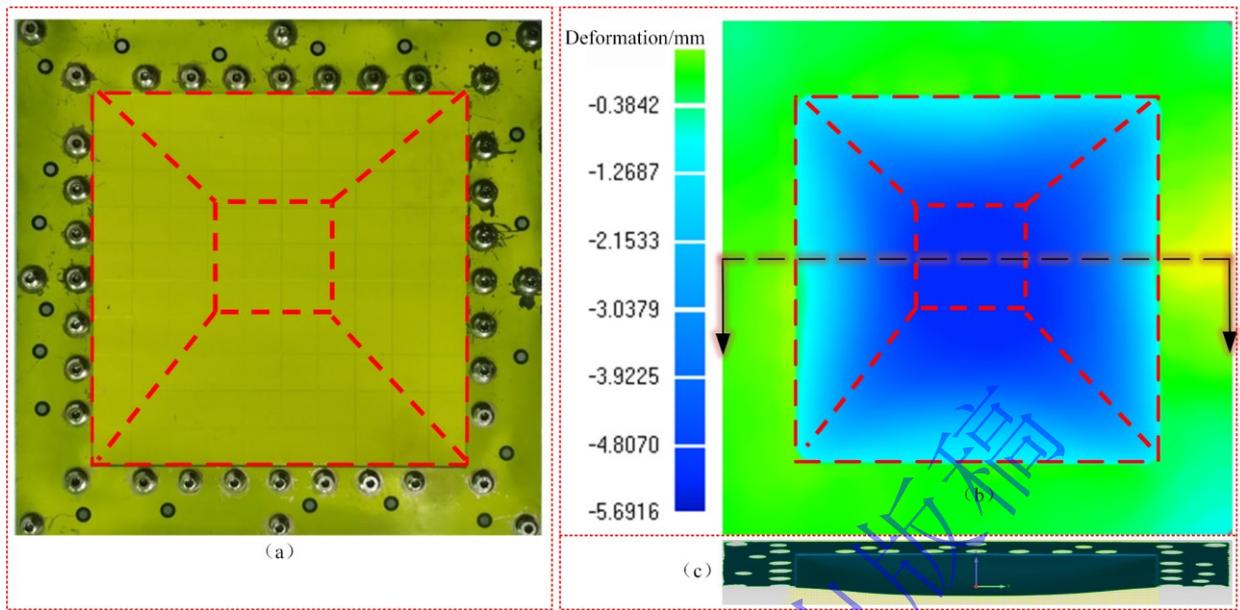
由 Zhu 等^[8]开展的入水冲击实验可知,该实验中的试样为 1mm 厚的铝板,平面尺寸和本文中使用的是一致的,该铝板与本文中 AHSPs 是质量等效的。通过对图 13 中 0.6m 与 0.8m 典型工况下入水冲击压力时程对比分析,可以发现,在不同测点处蜂窝夹芯板的入水冲击压力峰值均小于等效铝板的入水冲击压力峰值,而入水冲击压力持续时间却均大于等效铝板。这是由于,入水冲击过程中质量相等、高度相同的蜂窝夹芯板和铝板所产生的入水冲击压力脉冲冲量基本相同。因此,对于同一落体高度,AHSPs 的入水冲击压力峰值更小,又因入水冲击压力脉冲冲量基本相同,AHSPs 的入水冲击压力持续时间则会更长。

4 结构响应特性

4.1 变形模式

为分析蜂窝夹芯板在入水冲击载荷下的变形模式,在实验结束后,利用 3D 激光扫描仪得到了不同工况下蜂窝夹芯板前面板和后面板的变形轮廓。

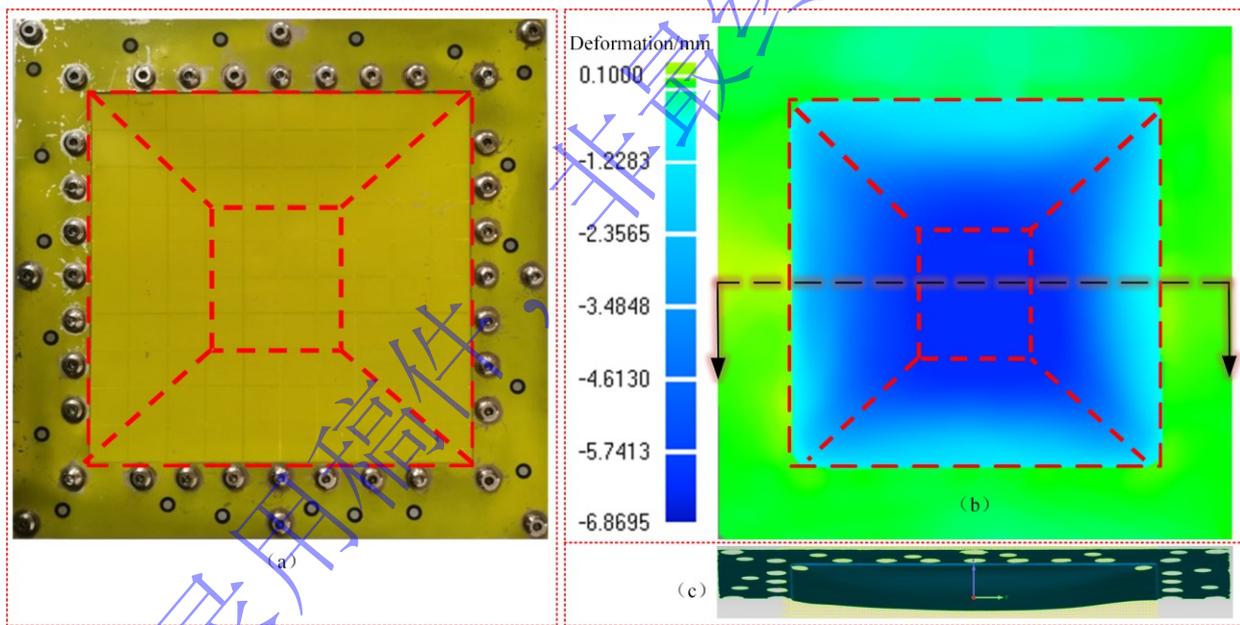
图 14 和图 15 分别为 0.6m 和 0.8m 落体高度下蜂窝夹芯板前面板的变形轮廓。从图中可以看出,不同落体高度下前面板的变形模式基本相同,即中间区域出现四条塑性铰线围成的矩形变形区,四周是梯形变形区。而随着落体高度增加,矩形变形区增大,塑性铰线更加明显。图 16 和图 17 分别为 0.6m 和 0.8m 落体高度下蜂窝夹芯板后面板的变形轮廓。由图可知,后面板的变形模式与前面板的变形模式基本相同,中间区域为四条塑性铰线围成的矩形变形区,四周是梯形变形区。图 18 是蜂窝夹芯板中剖面的三维扫描最终变形,从图中可以看出,随着落体高度的增加,前面板与后面板的最终变形均增大,且前面板最终变形明显大于后面板最终变形。



(a) 3D scanning deformation (b) Front sheet deformation (c) 3D scanning deformation(rotation 10°)

图 14 0.6m 落体高度下蜂窝夹芯板前面板变形模式

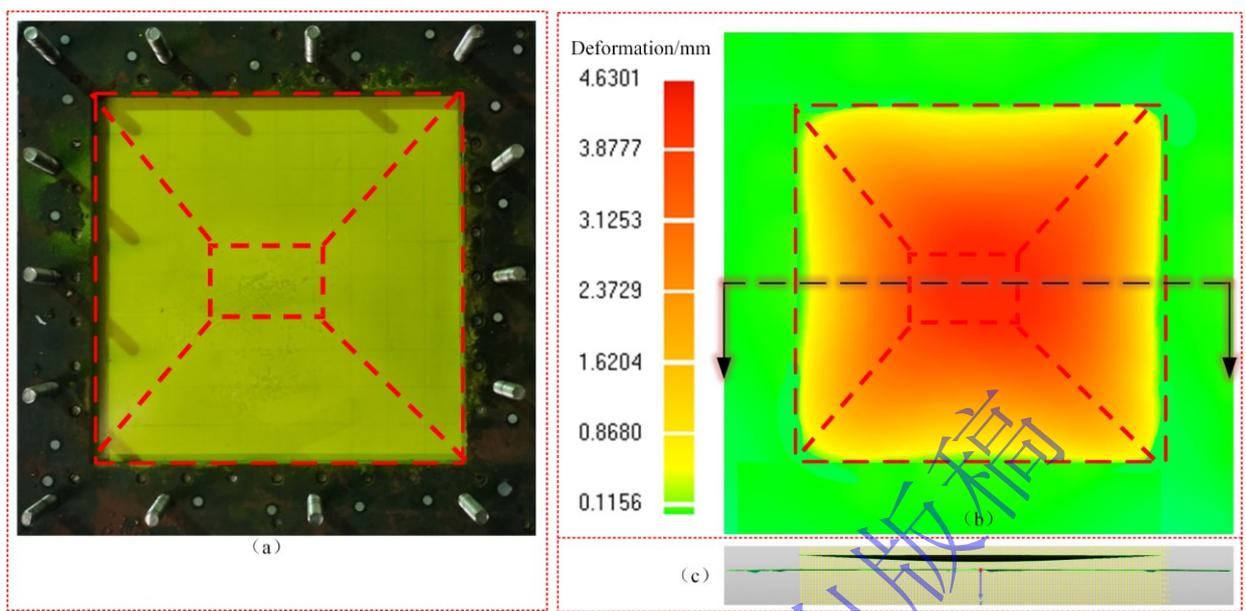
Fig.14 Front sheet deformation of AHSPs under 0.6 m drop height



(a) 3D scanning deformation (b) Front sheet deformation (c) 3D scanning deformation(rotation 10°)

图 15 0.8m 落体高度下蜂窝夹芯板前面板变形模式

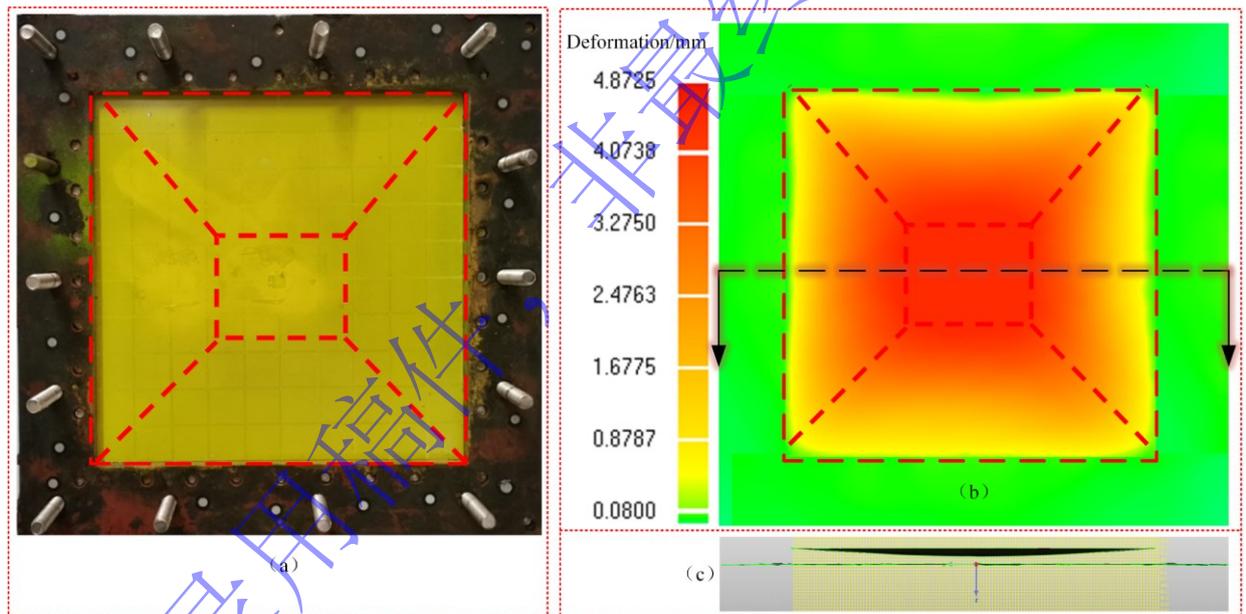
Fig.15 Front sheet deformation of AHSPs under 0.8 m drop height



(a) 3D scanning deformation (b) Back sheet deformation (c) 3D scanning deformation

图 16 0.6m 落体高度下蜂窝夹芯板后面板变形模式

Fig. 16 Deformation of back sheet of AHSPs under 0.6 m drop height



(a) 3D scanning deformation (b) Back sheet deformation (c) 3D scanning deformation

图 17 0.8m 落体高度下蜂窝夹芯板后面板变形模式

Fig. 17 Deformation of back sheet of AHSPs under 0.8 m drop height

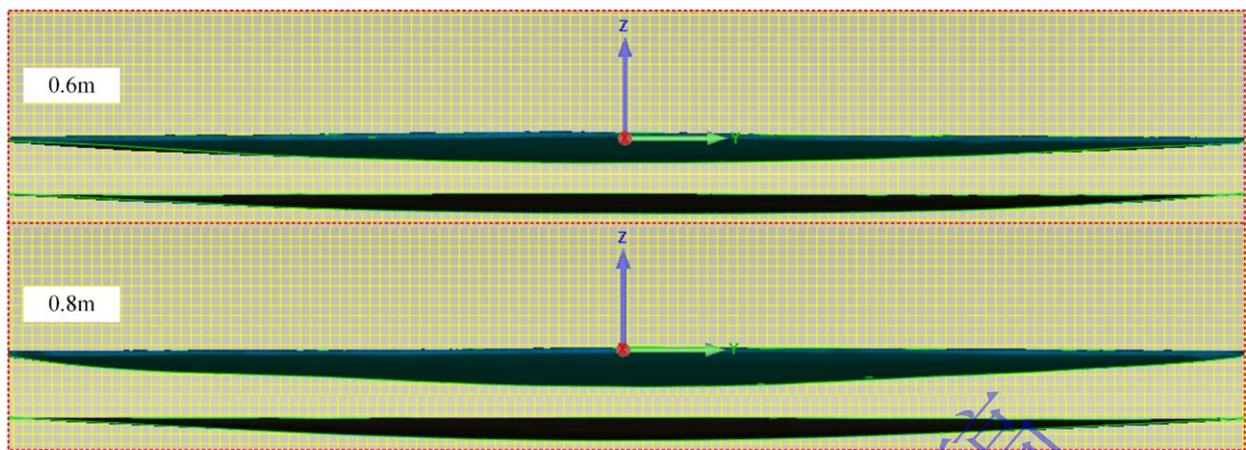


图 18 典型落体高度下蜂窝夹芯板的 3D 扫描中剖面变形
Fig.18 Sectional deformation of AHSPs in 3D scanning under typical drop heights

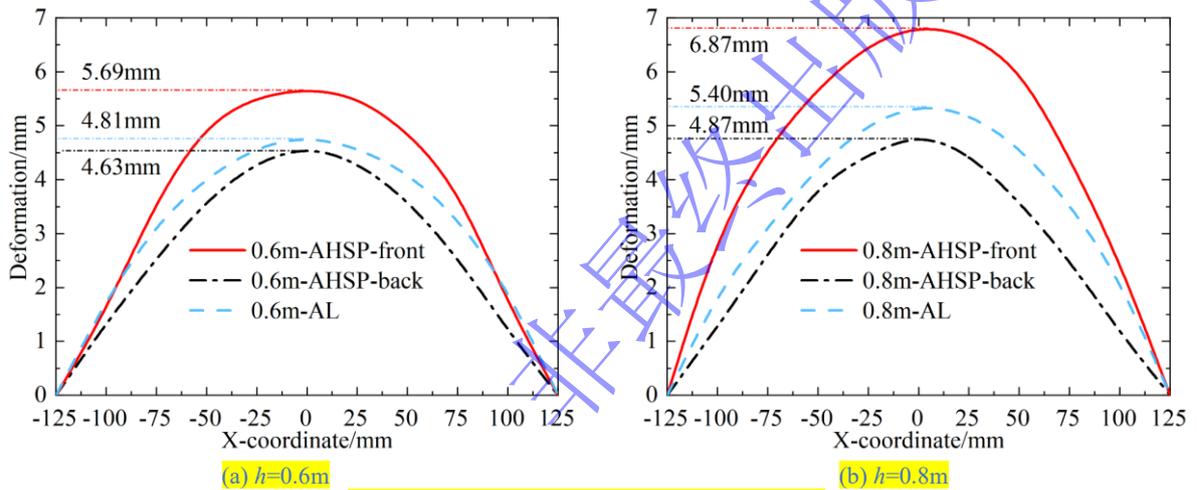


图 19 蜂窝夹芯板与等效铝板中剖面变形轮廓
Fig.19 The deformation profile of the middle section of AHSPs and ALs

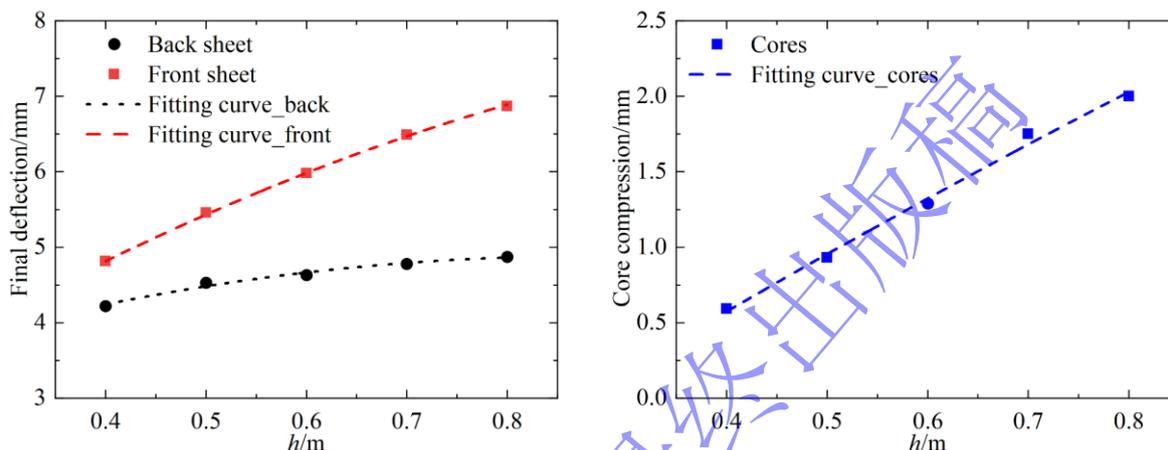


图 20 蜂窝芯层压缩变形图
Fig.20 Compression deformation diagram of AHSPs

图 19 为 0.6m 和 0.8m 落体高度下蜂窝夹芯板前面板和后面板的中剖面变形轮廓，以及 0.6m 和 0.8m 落体高度下等效铝板中剖面变形轮廓。从图 19 中可以看出，在同一高度下，前面板变形大于后面板，且随着落体高度的增加，前面板与后面板的变形差增大，即落体高度增加会使芯层压缩量增大，对后面板起到了一定防护作用。从图 19 中可以发现，在不同落体高度下，蜂窝夹芯板的后面板变形轮廓小于等效铝板变形。在 0.6m 落体高度时，蜂窝夹芯板后面板的中点最终挠度为 4.63mm，等效铝板

的中点最终挠度为 4.81mm，与等效铝板相比，蜂窝夹芯板后面板的中点最终挠度减少了 3.89%；在 0.8m 落体高度时，蜂窝夹芯板后面板的中点最终挠度为 4.87mm，等效铝板的中点最终挠度为 5.40mm，与等效铝板相比，蜂窝夹芯板后面板的中点最终挠度减少了 10.88%。而且随着落体高度的增加，变形轮廓差距越大。结果表明，蜂窝夹芯板比同质量的等效铝板抵抗入水冲击的能力更强，且落体高度越大，防护效果越明显。图 20 是 0.8m 落体高度下蜂窝芯层的压缩变形图，在入水冲击载荷作用下蜂窝芯层的胞壁出现了明显的压溃变形，单个蜂窝胞元的压缩褶皱类似于圆管准静态压缩中的钻石混合模式。

4.2 最终挠度



(a) The permanent deflection of the front sheet and the back sheet (b) Compression of honeycomb cores

图 21 不同落体高度下蜂窝夹芯板中点最终挠度

Fig.21 The permanent deflection of the midpoint of AHSPs at different drop heights

表 7 蜂窝夹芯板最终挠度曲线拟合相关性指标

Table 7 Correlation index of permanent deflection curve fitting of AHSPs

曲线类型	拟合方式	R^2
前面板	多项式拟合-二次	0.99673
后面板	多项式拟合-二次	0.98353
蜂窝芯层	多项式拟合-二次	0.99440

图 21 为不同落体高度下蜂窝夹芯板前面板和后面板中点处的最终挠度以及蜂窝芯层压缩量。从图中可以看出，随着落体高度的增大，蜂窝夹芯板前面板与后面板中点处的最终挠度不断增加，但前面板中点最终挠度的增加速率大于后面板中点最终挠度的增加速率。前面板中点最终挠度与后面板中点最终挠度之间的差值，即为蜂窝夹芯板中点处的蜂窝芯层压缩量。蜂窝芯层压缩量随落体高度的增加而增大，表明随着落体高度的增加，蜂窝芯层的吸能量不断增加。

为了更加准确地分析最终挠度与落体高度之间的关系，对图 21 的面板最终挠度与芯层压缩量随落体高度的关系进行了曲线拟合，拟合结果见公式 (2) - (4)：

$$w_f = -3.36h^2 + 9.22h + 1.66 \quad (2)$$

$$w_b = -2.79h^2 + 4.89h + 2.73 \quad (3)$$

$$w_c = -0.57h^2 + 4.33h - 1.07 \quad (4)$$

式中, w_f 为前面板最终挠度, w_b 为后面板最终挠度, w_c 为芯层压缩量, h 为落体高度。

前面板、后面板最终挠度以及芯层压缩量的判定系数 R^2 如表 7 所示, 公式 (5) 中给出了判定系数 R^2 的定义。从图中可以看出, 拟合相关性非常好, 拟合公式可用于在 0.4m 至 0.8m 落体高度范围内, 蜂窝夹芯板前面板、后面板的最终挠度和芯层压缩量的预测。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (5)$$

式中, y_i 为真实值, \hat{y}_i 为拟合值, \bar{y}_i 为平均值, n 为数据个数。

5 结论

本文搭建了入水冲击实验平台, 开展了蜂窝夹芯板入水冲击响应特性研究。进行了不同落体高度下蜂窝夹芯板的入水冲击实验, 得到了入水冲击压力时间历程曲线, 分析了入水冲击载荷特性。此外, 基于夹芯板最终变形轮廓, 探究了蜂窝夹芯板的变形模式、最终挠度等结构响应特性。可得如下结论:

(1) 蜂窝夹芯板入水冲击实验平台具有较高的可靠性, 三次重复性入水冲击实验获得入水冲击压力时间历程曲线、冲击压力峰值、面板变形轮廓及最终挠度值都吻合较好, 验证了实验装置的可靠性和实验结果的准确性。

(2) 由于气垫效应受到不同位置芯层压缩量不同的影响, 蜂窝夹芯板表面的入水冲击压力分布不均匀, 当落体高度大于 0.5m 时, 中间测点的压力峰值大于 1/4 测点的压力峰值。此外, 与刚性平板入水冲击相比, 蜂窝夹芯板在入水过程中会产生弹塑性变形, 其入水冲击压力峰值较小。相比同质量的等效铝板, 蜂窝夹芯板的入水冲击压力峰值更小, 压力持续时间更长。对于不同方法获得的入水冲击压力而言, 在一定落体高度范围内, 其入水冲击压力峰值与落体高度近似呈线性变化。

(3) 不同落体高度下蜂窝夹芯板的面板变形模式基本一致, 均为中间区域产生由四条塑性铰线组成的矩形变形区, 而四周为梯形变形区, 且随着落体高度的增加, 塑性铰线向四周移动, 矩形变形区增大。随落体高度的增加, 蜂窝夹芯板前面板和后面板中点处的最终挠度近似呈二次抛物线增长, 增长斜率不断减小。随着落体高度的增加, 蜂窝芯层压缩量也随之增大, 表明蜂窝芯层具有一定的吸能防护作用。蜂窝夹芯板在入水冲击载荷作用下, 蜂窝芯层会压缩吸能, 后面板变形明显小于等效铝板变形, 即与等效铝板相比, 蜂窝夹芯板具有更好的抗冲击性能。

参考文献

- [1] 王永虎, 石秀华. 入水冲击问题研究的现状与进展 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(3): 276-282. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0276-07.
WANG Y H, SHI X H. Review on research and development of water-entry impact problem [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(3): 276-282. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0276-07.
- [2] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579-584. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)06-0579-06.
ZHANG W, GUO Z T, XIAO X K, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579-584. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)06-0579-06.
- [3] 潘光, 杨悝. 空投鱼雷入水载荷 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5): 521-526. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0521-06.
PAN G, YANG K. Impact force encountered by water-entry airborne torpedo [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(5): 521-526. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0521-06.
- [4] Chuang S L. Experiments on flat-bottom slamming [J]. Journal of Ship Research, 1966, 10(1): 10-17. DOI: 10.5957/jsr.1966.10.1.10.
- [5] CHUANG S L. Investigation of impact of rigid and elastic bodies with water [J]. Structural Analysis, 1970.

- [6] SHIN H, SEO B, CHO S R. Experimental investigation of slamming impact acted on flat bottom bodies and cumulative damage [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2018, 10: 294-306. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.06.004.
- [7] TALIOUA A, BERKANE B, MARTIN M B, et al. Flat plate pressure impact on a still water surface: The effect of surrounding ambient pressure and plate size [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 263: 111926. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111926.
- [8] ZHU L, ZHU Z K, YU T X, et al. An experimental study of the saturated impulse for metal plates under slamming [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 178: 104601. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104601.
- [9] KARMAN V T. The impact of seaplane floats during landing: **NACA-TN-321** [R]. USA: National Advisory Committee for Aero-nautics, 1929. DOI: 10.1115/1.4023571.
- [10] WAGNER H. Uber stossund gleitvergaenge an der oberflache von flussigkeiten [J]. *Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1932, 12(4): 193-215. DOI: 10.1002/zamm.19320120402.
- [11] 陈小平, 李军伟, 王辉, 等. 大尺度楔形体板架钢楔落体试验和仿真研究 [J]. *船舶力学*, 2012, 16(10): 1152-1163. DOI: 1007-7294(2012)10-1152-12.
CHEN X P, LI J W, WANG H, et al. Experiments and numerical investigation of water entry of large-scale steel wedge models [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(10): 1152-1163. DOI: 1007-7294(2012)10-1152-12.
- [12] 王明振, 褚林塘, 吴彬等. 水陆两栖飞机典型横截面入水撞击实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 313-318. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0313-06.
WANG M Z, CHU L T, WU B, et al. Experimental study on the water impact of a typical cross section for amphibious seaplane [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 313-318. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0313-06.
- [13] ZHU L, DUAN L L, CHEN M, et al. Equivalent design pressure for ship plates subjected to moving slamming impact loads [J]. *Marine Structures*, 2020, 71: 102741. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102741.
- [14] DUAN L L, ZHU L, CHEN M, et al. Experimental study on the propagation characteristics of the slamming pressures [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107868. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107868.
- [15] PARK I C, SEO B C, LEE S H, et al. A study on slamming impact load characteristics of energy storage system case for ships [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 44. DOI: 10.3390/jmse11010044.
- [16] 骆寒冰, 刘鑫, 董德龙, 等. 铝制加筋板楔形体入水砰击模型实验研究 [J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2014, 29(4): 460-468. DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2014.04.011.
LUO H B, LIU X, DONG D L, et al. Experimental investigation of water impact of one free-drop wedge with stiffened aluminum panels [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(4): 460-468. DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2014.04.011.
- [17] CRUPI V, EPASTO G, GUGLIELMINO E. Comparison of aluminium sandwich for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam [J]. *Marine Structures*, 2013, 30: 74-96. DOI: 10.1016/j.marstruc.2012.11.002.
- [18] PALOMBA G, EPASTO G, SUTHERLAND L, et al. Aluminium honeycomb sandwich as a design alternative for lightweight marine structures [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2022, 17(10): 2355-2366. DOI: 10.1080/17445302.2021.1996109.
- [19] DAS K, BATRA R C. Local slamming impact on sandwich composite hulls [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(4): 523-551. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2011.02.001.
- [20] XIE H, REN H L, QU S, et al. Numerical and experimental study on hydroelasticity in water-entry problem of a composite ship-hull structure [J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 942-957. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.06.030.
- [21] HASSOON O H, TARFAOUI M, MOUMEN A E, et al. Mechanical performance evaluation of sandwich panels exposed to slamming impacts: Comparison between experimental and SPH results [J]. *Composite Structures*, 2019, 220: 776-783. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.04.051.
- [22] 赵飞, 程远胜, 刘均, 等. 入水砰击下金字塔点阵夹层板塑性动力响应分析 [J]. *船海工程*, 2013, 42(03): 13-16. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2013.03.003.
ZHAO F, CHENG Y S, LI J, et al. Dynamic plastic responses of light weight pyramidal sandwich plate structures subjected to water-entry impact [J]. *Ship and Ocean Engineering*, 2013, 42(03): 13-16. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2013.03.003.
- [23] HE W T, CUI X F, WANG C Z, et al. Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) characterization of slamming response and failure mechanism on corrugated sandwich structures [J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 116: 102862. DOI: 10.1016/j.apor.2021.102862.
- [24] WANG H, CHENG Y S, LIU J. Hydroelastic behaviours of laser-welded lightweight corrugated sandwich panels subjected to water impact: Experiments and simulations [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 146: 106452. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106452.
- [25] FALTINSEN O M, KVLVOLD J, AARSNES J V. Wave impact on a horizontal elastic plate [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 1997, 2(2): 87-100. DOI: 10.1007/BF02491523.
- [26] OKADA S, SUMI Y. Experimental study on the maximum pressure and the duration time of the horizontal water impact of flat plate [J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1995, 178(17): 381-389. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1995.178_381.

(责任编辑 爆炸与冲击)