

# 铝蜂窝夹芯板入水冲击动态响应特性实验研究\*

郭开岭<sup>1,2</sup>, 廖永<sup>2</sup>, 朱志奎<sup>2</sup>, 刘栋<sup>3</sup>, 朱凌<sup>2,4\*</sup>

(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<sup>1,2</sup>, LIAO Yong<sup>2</sup>, ZHU Zhikui<sup>2</sup>, LIU Dong<sup>3</sup>, ZHU Ling<sup>2\*</sup>

(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

\*收稿日期: 2024-08-02; 修回日期: 2024-12-02;

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.

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<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[4,5]</sup>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<sup>[6]</sup>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性响应的影响。Talioua等<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>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<sup>[10]</sup>基于势流理论并考虑水流与平板的相对冲击速度,提高了求解入水冲击压力的计算精度。在此之后,陈小平等<sup>[11]</sup>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<sup>[12]</sup>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<sup>[13]</sup>和Duan等<sup>[14]</sup>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 $0^\circ$ 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 $0.2^\circ$ 时,冲击压力产生移动现象;当斜升角在 $4^\circ$ 至 $45^\circ$ 时,冲击压力移动过程中压力时程形状几乎不变。Park等<sup>[15]</sup>分析了入水冲击现象的内部机理,将斜升角为 $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 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<sup>[16]</sup>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<sup>[17,18]</sup>,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<sup>[19]</sup>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<sup>[20]</sup>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<sup>[21]</sup>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<sup>[22]</sup>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<sup>[23]</sup>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<sup>[24]</sup>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

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上开孔,其次安装轻质的铝合金传感器基座,且传感器基座的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

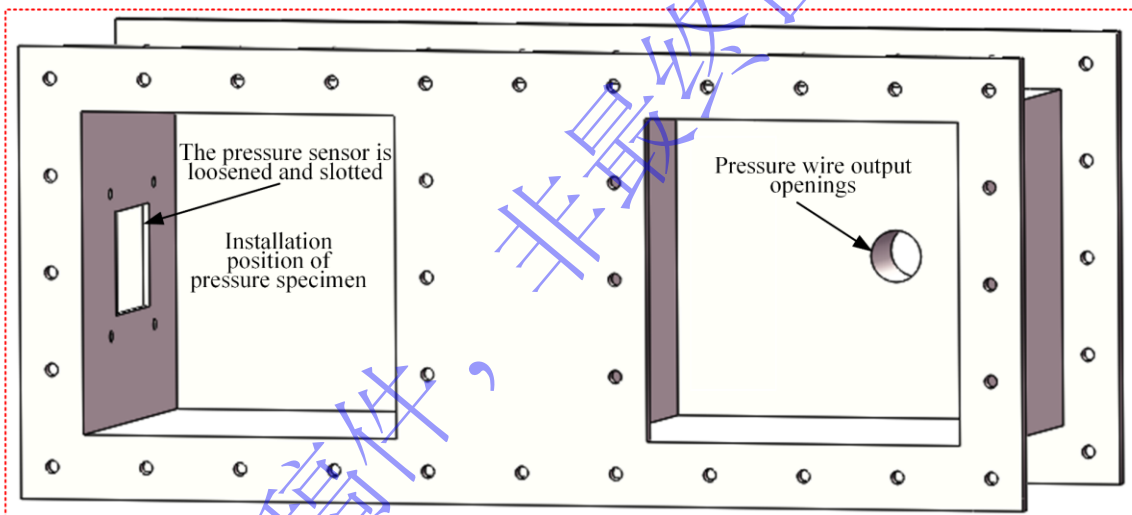


图2 实验试样安装箱体  
Fig.2 Installation box of test sample

## 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 $\delta_f$ 、 $\delta_b$ 均为0.5mm;蜂窝芯层有效区域平面尺寸为250\*250mm,芯层厚度 $\delta_c$ 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”。

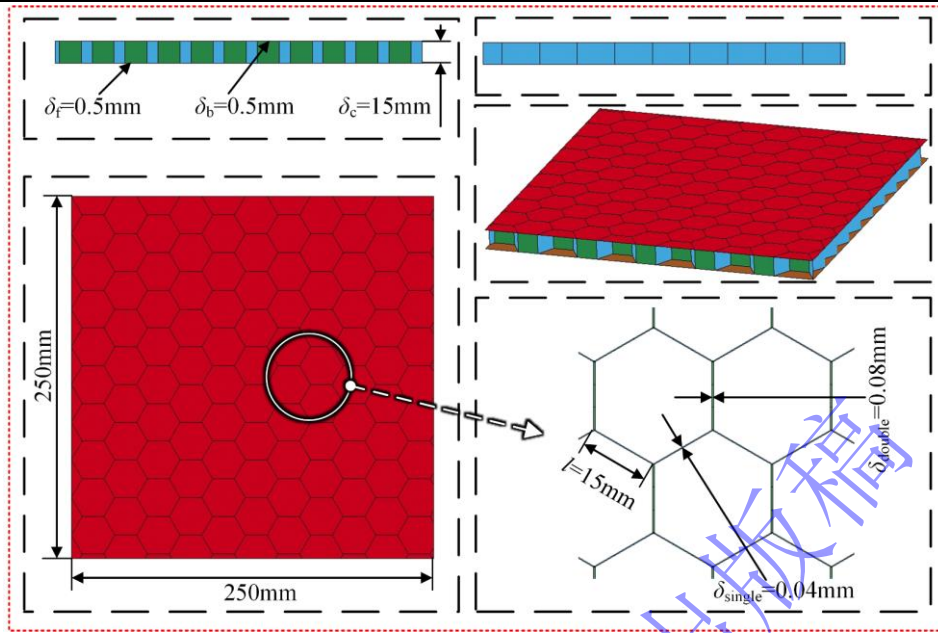


图3 夹芯板试样三维示意图  
Fig.3 Three-dimensional sketch of AHSPs

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 <sup>2</sup>	有效尺寸/mm <sup>2</sup>	厚度/mm	胞元边长 l/mm	$\delta_{\text{single}}$ /mm	$\delta_{\text{double}}$ /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

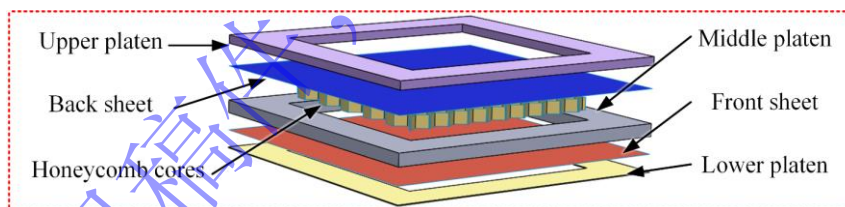


图4 夹具与蜂窝夹芯板安装示意图  
Fig.4 Installation diagrams for clamp and AHSPs

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

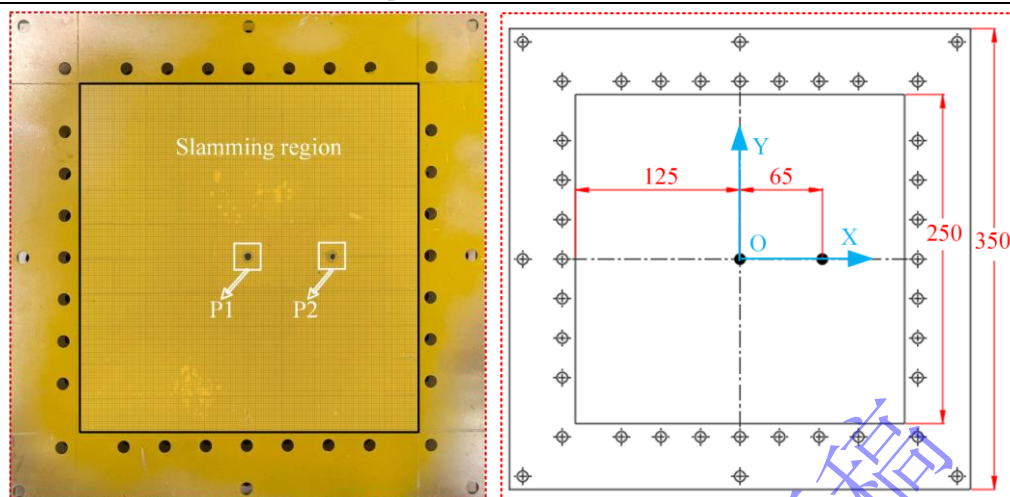


图5 入水试样和测点位置

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