

文章编号: 1007-7294(2024)07-1090-10

浮冰反复碰撞下蜂窝金属夹芯板 动态响应实验研究

肖雯^{1,2}, 吴雄^{1,2}, 李应刚^{1,2,3}, 王松^{1,2}, 朱凌^{1,2}

(1. 高性能舰船技术教育部重点实验室(武汉理工大学), 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 三亚科教创新园, 海南 三亚 572025)

摘要: 本文采用水平冲击试验装置开展楔形刚性冲头与楔形冰体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板动态响应实验, 研究蜂窝金属夹芯板结构塑性变形损伤、下面板位移时程曲线和碰撞力时程曲线等动态响应特性, 分析冰体反复碰撞和刚体反复碰撞对蜂窝金属夹芯板动态响应的差异。研究表明: 随着楔形冰体反复碰撞次数的增加, 碰撞力峰值持续增大, 碰撞接触时间明显缩短, 蜂窝金属夹芯板上下面板的局部凹陷和整体弯曲变形逐渐增大, 蜂窝芯层压缩量逐渐增加直至密实化; 由于碰撞过程中存在冰体破碎现象, 冰体碰撞接触面积增大, 与刚性反复碰撞相比, 冰体反复碰撞作用下夹芯板上面板中点的最终挠度偏小, 但局部损伤面积明显偏大; 随着碰撞次数的增加, 蜂窝金属夹芯板结构塑性累积变形由一条塑性铰线发展演化为椭圆形塑性区。

关键词: 浮冰反复碰撞; 蜂窝金属夹芯板; 动态响应; 实验研究

中图分类号: U661.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.07.012

Experimental study on dynamic response characteristics of aluminium honeycomb sandwich panels under repeated ice impacts

XIAO Wen^{1,2}, WU Xiong^{1,2}, LI Ying-gang^{1,2,3}, WANG Song^{1,2}, ZHU Ling^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430063, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. Sanya Science and Education Innovation Park of Wuhan University of Technology, Sanya 572025, China)

Abstract: In this paper, the dynamic response characteristics of aluminium honeycomb sandwich panels under repeated rigid wedge impacts and ice wedge impacts were experimentally studied by using the horizontal impact test apparatus. The impact force-displacement curves and the structural deformation properties were obtained. Results show that with the increase of collision numbers, the peak value of collision force increases continuously, the contact time decreases significantly, the local indentation and global bending deformation of face sheet increase gradually, the compressive deformations of the honeycomb cores enlarge gradually and finally the densification phenomenon appears. Due to the ice fragmentation phenomenon in the collision process, the contact area under ice wedge impact increases. Compared with rigid wedge impact, the midpoint

收稿日期: 2024-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11972269); 武汉理工大学三亚科教创新园开放基金
资助项目(2021KF0029)

作者简介: 肖雯(1999-), 女, 硕士研究生;

李应刚(1988-), 男, 副教授, 博士生导师, 通讯作者, E-mail: liyinggang@whut.edu.cn.

permanent deflection of top facesheet under ice wedge impact is smaller, but the local damage area is obviously larger. With the increase of collision numbers, the plastic accumulated deformation of honeycomb sandwich panel evolves from a plastic hinge line to an elliptic plastic zone.

Key words: repeated ice impacts; honeycomb sandwich panels; dynamic response; experimental study

0 引 言

随着全球气候变暖和极地海冰的快速消融, 极地地区蕴藏的丰富资源和航道价值日益凸显。然而, 极地船舶与海洋工程装备在极地航行与工程作业过程中不可避免地会遭受浮冰碰撞, 可能导致结构变形甚至破坏, 给极地船舶与海洋工程装备带来严重威胁和极大挑战^[1-2]。

船舶结构与浮冰碰撞是一个复杂的非线性动力过程, 由于存在材料非线性、几何非线性和接触非线性等问题, 目前国内外学者主要采用实验和数值仿真方法开展浮冰碰撞下船舶典型结构动力响应研究^[3-4]。张健等^[5]开展了水中船体板架与浮冰的碰撞模型试验, 提出一套船-冰碰撞模型试验的设计方法及数据测量方法, 验证了船-水-冰耦合碰撞数值仿真方法; Sun 等^[6]开展了冰水池中船-冰碰撞模型试验, 实现了对船-冰碰撞载荷的辨识、整体作用轨迹的勾勒及载荷局部空间分布与时间历程特征的提取; 刘俊杰等^[7]采用瞬态动力学方法对某水面舰船在碎冰区航行时受浮冰碰撞的动态过程进行数值仿真, 得到了浮冰碰撞下船体结构响应、碰撞载荷及碰撞过程中的能量转化特征; Zhu 和 Cai 等^[8-10]采用水平冲击试验装置开展了船体板-冰碰撞实验, 开发了基于混凝土本构模型的冰材料数值模型, 采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 研究了浮冰单次和反复碰撞下船体板结构动态响应特性。

随着极地工程装备朝着绿色化和轻量化方向发展, 具有高比强度、高比刚度、高能量吸收等优良力学性能的轻质复合结构逐渐得到了广泛关注^[11-13]。Banik 等^[14]利用 Instron CEAST 9350 落锤冲击试验机开展了冰体低速冲击载荷下碳纤维增强复合材料 PVC 泡沫夹芯板的动态响应与损伤特性研究, 并与等效钢板结构进行了对比。Wu 等^[15]采用有限元数值模拟与实验相结合方法研究了楔形冰单次碰撞下蜂窝金属夹芯板动态冲击响应, 揭示了蜂窝金属夹芯板塑性变形能量吸收机理与冰体破碎能量耗散机制。然而, 目前对于冰体反复碰撞下轻质复合结构动态响应特性尚不清楚, 限制了其在极地船舶与海洋工程装备结构抗冰设计中的应用。因此, 本文采用水平冲击试验装置进行刚性冲头与楔形冰冲头反复碰撞冲击实验, 研究浮冰反复碰撞下蜂窝金属夹芯板动态响应特性, 为其在极地船舶与海洋工程装备结构安全轻量化与碰撞冲击防护领域的应用提供依据。

1 材料与试验

一般而言, 极地浮冰的形状通常是不规则的多棱柱形, 文献[4]中提到楔形浮冰对船舶损伤最为严重。因此, 本文选取楔形冰体作为实验研究对象, 实验设计了专用冰楔模具, 并利用恒温工业冰箱制备楔形冰试样。为了研究冰体破碎对蜂窝金属夹芯板塑性变形与能量吸收的影响, 实验中分别考虑了楔形冰冲头和刚性冲头, 如图 1 所示。刚性楔形冲头是由高强度钢制造, 其几何参数与楔形冰冲头保持一致。

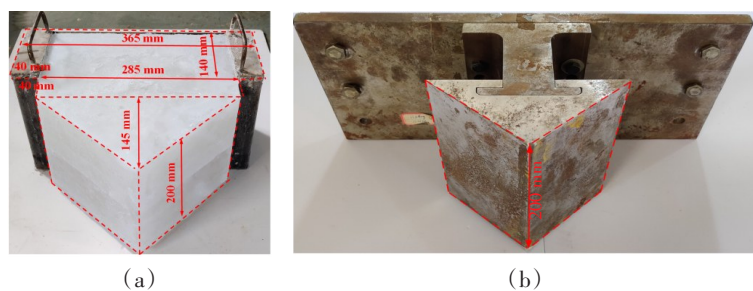


图 1 楔形冰冲头和楔形刚性冲头

Fig.1 Ice wedge impactor and rigid wedge impactor

冰是一种性质较为复杂的天然复合材料,具有十三种晶体结构和两种非晶体结构。由于冰体材料的复杂力学特性,不同条件下冰的力学性质差异较大,其材料力学模型仍然处于研究探索阶段。目前,国内外学者提出的冰体材料模型主要为各向同性弹性断裂模型、弹塑性材料模型和可压碎泡沫型材料模型等动态本构模型,尚未有统一以及完善的冰体材料动态本构模型。由于冰的破坏行为主要表现为脆性,这与混凝土材料的力学性能极为相似,本课题组提出了冰的岩土和混凝土材料模型^[8-10],模型参数如表 1 所示。基于“Tsai-Wu”屈服面提出了屈服应力与静水压力曲线,屈服面通常写成如下形式:

$$f(p, J_2) = J_2 - (a_0 + a_1 + a_2 p^2) = 0 \tag{1}$$

式中, $p = \sigma_{kk}/3 = I_1/3$ 为静水压力, $J_2 = s_{ij}/2 : s_{ij}$ 为偏应力的第二不变量, a_0 、 a_1 和 a_2 为需要拟合的三轴实验数据的常数。在此基础上通过实验和数值验证了冰的岩土和混凝土材料模型的准确性。

表 1 楔形冰体材料参数^[9]
Tab.1 Material parameters of ice wedge^[9]

材料属性	数值	材料属性	数值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	865	屈服应力与压力 (LCYP)	Cai 等 ^[9]
剪切模量 G / GPa	5.26	应力与体积应变 (LCPV)	Cai 等 ^[9]
体积模量 K / GPa	3.3	开始断裂时的塑性应变与压力 (LCFP)	Cai 等 ^[9]
截断压力 P_{cut} / MPa	8	达到残余强度时的塑性应变与压力 (LCRP)	Cai 等 ^[9]
剩余强度系数 B	0.25		

蜂窝金属夹芯板是由上、下面板以及六边形铝蜂窝芯组成,如图 2(a)所示。上、下面板为 SPCC 冷轧碳钢,通过激光切割加工而成,蜂窝芯层为 A3003-H19 铝合金,蜂窝金属夹芯板采用传统的热压成型工艺进行粘接,保证了蜂窝金属夹芯板的粘接可靠性。上、下面板厚度为 1 mm,蜂窝芯层厚度为 20 mm,铝蜂窝单胞壁厚为 0.07 mm,壁长为 6 mm。蜂窝金属夹芯板尺寸为 560 mm×560 mm。实验测试中,蜂窝金属夹芯板是用 M20 螺栓固定在基座上,有效尺寸为 400 mm×400 mm,如图 2(b)所示。

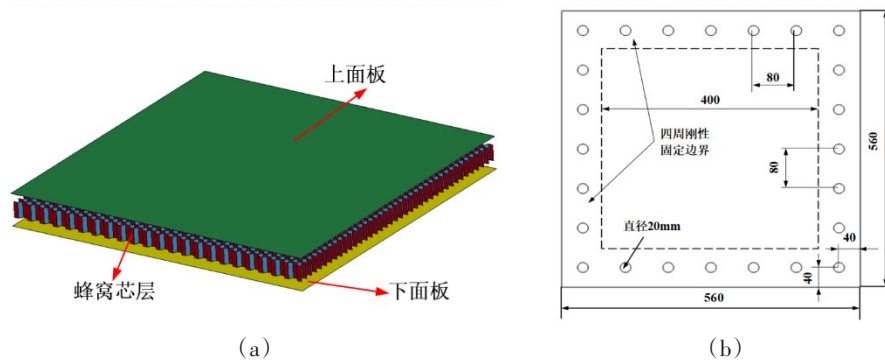


图 2 蜂窝金属夹芯板结构
Fig.2 Aluminium honeycomb sandwich panel

本文重点关注浮冰-蜂窝金属夹芯板瞬态碰撞冲击内部动力学行为过程,忽略流体作用及外部动力学的影响。采用水平冲击试验装置进行了蜂窝金属夹芯板的动态响应碰撞实验,如图 3 所示。该水平冲击试验装置由基座、滑轨、碰撞小车及牵引系统组成。通过改变碰撞小车的碰撞高度和附加配重,可以有效调节碰撞速度和碰撞能量。实验测试中采用 M+P 数据采集仪和 TMR 数据采集仪来记录实验数据,采用激光位移传感器测量蜂窝金属夹芯板中点变形,使用千眼狼高速摄像机对整个碰撞过程和碰撞速度进行了测量。楔形冰体和刚体反复碰撞蜂窝金属夹芯板动态响应试验工况如表 2 所示,符号 P 表示冲头类型, P1 和 P2 分别代表冰体碰撞和刚体碰撞,实验中考虑了两种碰撞动能,分别为 E1 和 E2。

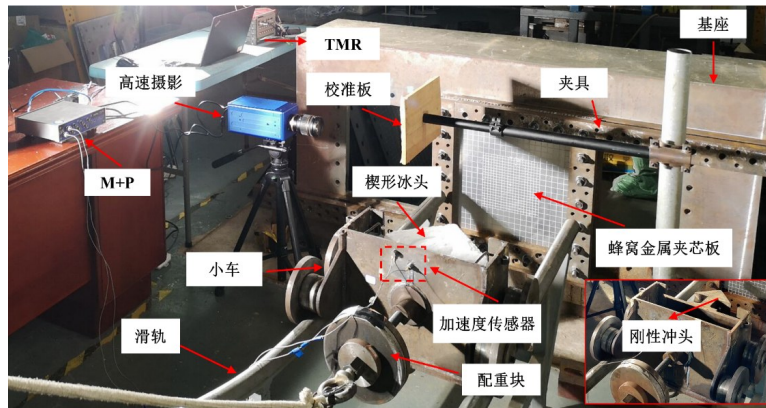


图3 实验测试方案

Fig.3 Experimental test schemes

表2 蜂窝金属夹芯板冲击试验工况

Tab.2 Impact experimental tests of aluminium honeycomb sandwich panels

工况	冲头质量/kg	配重质量/kg	总质量/kg	碰撞速度/(m·s ⁻¹)	碰撞动能/J
P1T1E1	18.2	71.8	90.0	3.2	460.8
P1T1E2	18.2	71.8	90.0	3.6	583.2
P2T1E1	17.4	72.6	90.0	3.2	460.8
P2T1E2	17.4	72.6	90.0	3.6	583.2

2 反复碰撞动态响应

2.1 楔形冰体反复碰撞

为了研究蜂窝金属夹芯板在楔形冰体反复碰撞载荷下的动态响应过程,通过 M+P 数据采集器测量了 P1T1E1 工况条件下碰撞过程的碰撞力-时间曲线,如图4(a)所示。由图可以发现,随着楔形冰体碰撞次数的增加,碰撞力峰值在 32.9 kN 至 68.8 kN 之间,碰撞力峰值持续增大,碰撞时间从 34.1 ms 缩短到 23.1 ms,碰撞接触时间明显缩短。通过激光位移传感器联合 TMR 数据采集器测量了碰撞过程中下面板中点位移-时间曲线,如图4(b)所示。从图可以看出,由于结构弹性的影响,下面板中点位移先增加到最大挠度再回弹到最终挠度。随着碰撞次数的增加,蜂窝金属夹芯板结构下面板的最大挠度

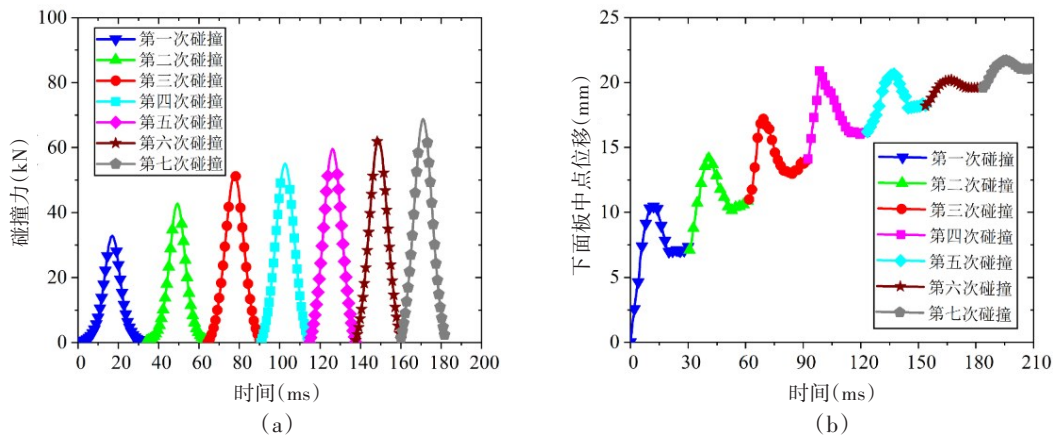


图4 浮冰反复碰撞下蜂窝金属夹芯板动态响应

Fig.4 Dynamic responses of honeycomb sandwich panel under repeated ice impacts

和最终挠度均不断增大,夹芯结构整体弯曲刚度增大,上下面板挠度增幅逐渐降低,最大挠度与最终挠度的差距逐渐减小。

图5为PIT1E1工况条件下楔形冰的损伤情况。从图中可以看出,楔形冰损伤最严重的部分出现在楔形冰的上下两端。随着碰撞次数的增加,由于蜂窝金属夹芯板整体弯曲刚度的提高,楔形冰破碎程度越来越大。由于楔形冰失效面积随着碰撞次数的增加而不断扩大,楔形冰与蜂窝金属夹芯板接触面积增大,蜂窝夹芯板变形范围增大。

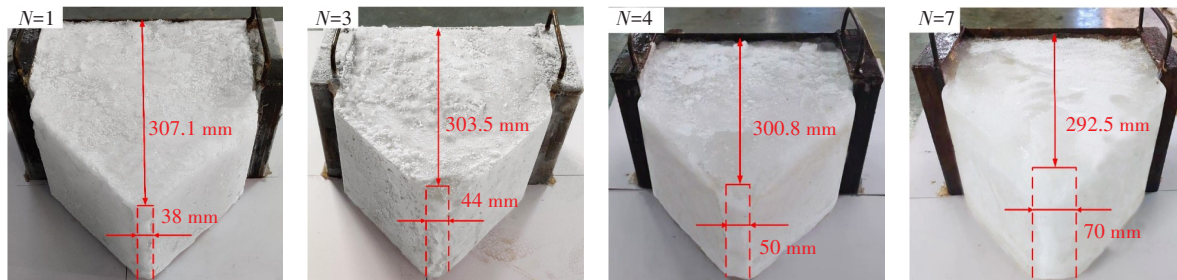


图5 楔形冰损伤

Fig.5 Damage of wedge ice

图6为PIT1E1工况条件下蜂窝金属夹芯板的变形模式。由图可知,随着冰体反复碰撞次数的增加,蜂窝金属夹芯板上面板呈现整体弯曲变形与局部凹陷耦合的变形模式,且局部凹陷逐渐增大,下面板呈现整体弯曲变形的变形模式,且下面板的整体弯曲变形越来越明显。当楔形冰体与蜂窝金属夹芯板碰撞后,由于存在冰体破碎现象,冰体碰撞接触区域变形不平整,且冰体破碎现象使得碰撞接触面积增大。随着碰撞次数的增加,夹芯板局部损伤变形由一条塑性铰线发展演化为椭圆形塑性区。

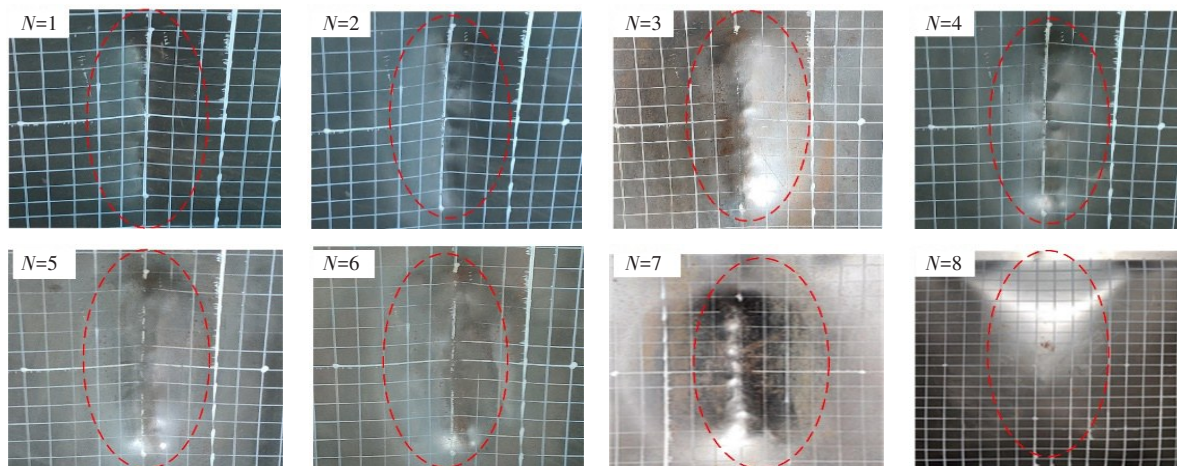


图6 楔形冰体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板的变形模式

Fig.6 Deformation modes of honeycomb sandwich panel under repeated ice impacts

为了进一步定量分析楔形冰体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板塑性变形累积特性,通过游标卡尺测得PIT1E1工况条件下蜂窝金属夹芯板上下面板在垂向中心线与水平中心线上的最终挠度结果,如图7所示。由图可以看出,由于蜂窝金属夹芯板结构上面板的垂向中心线与楔形冰体碰撞位置重合,上下面板的垂向中心线上各点挠度始终大于水平中心线各点挠度。另一方面,楔形冰体反复碰撞过程中冰体破碎主要发生在楔形冰头前端高压应力区,导致上面板的垂向中心线上各点的最终挠度并不完全相同。随着楔形冰体碰撞次数的增加,上下面板的最终挠度逐渐累积增大,蜂窝芯层不断被压缩产生局部凹陷,上面板挠度增长率始终大于下面板,夹芯结构整体弯曲刚度逐渐增加,楔形冰破碎耗散动能及回弹动能逐渐增大,上下面板塑性变形吸能逐渐降低,最终挠度增长率不断下降。第五次碰撞之后,蜂窝芯层达到密实化,蜂窝芯层压缩变形基本保持不变,上下面板挠度增长率基本保持一致。

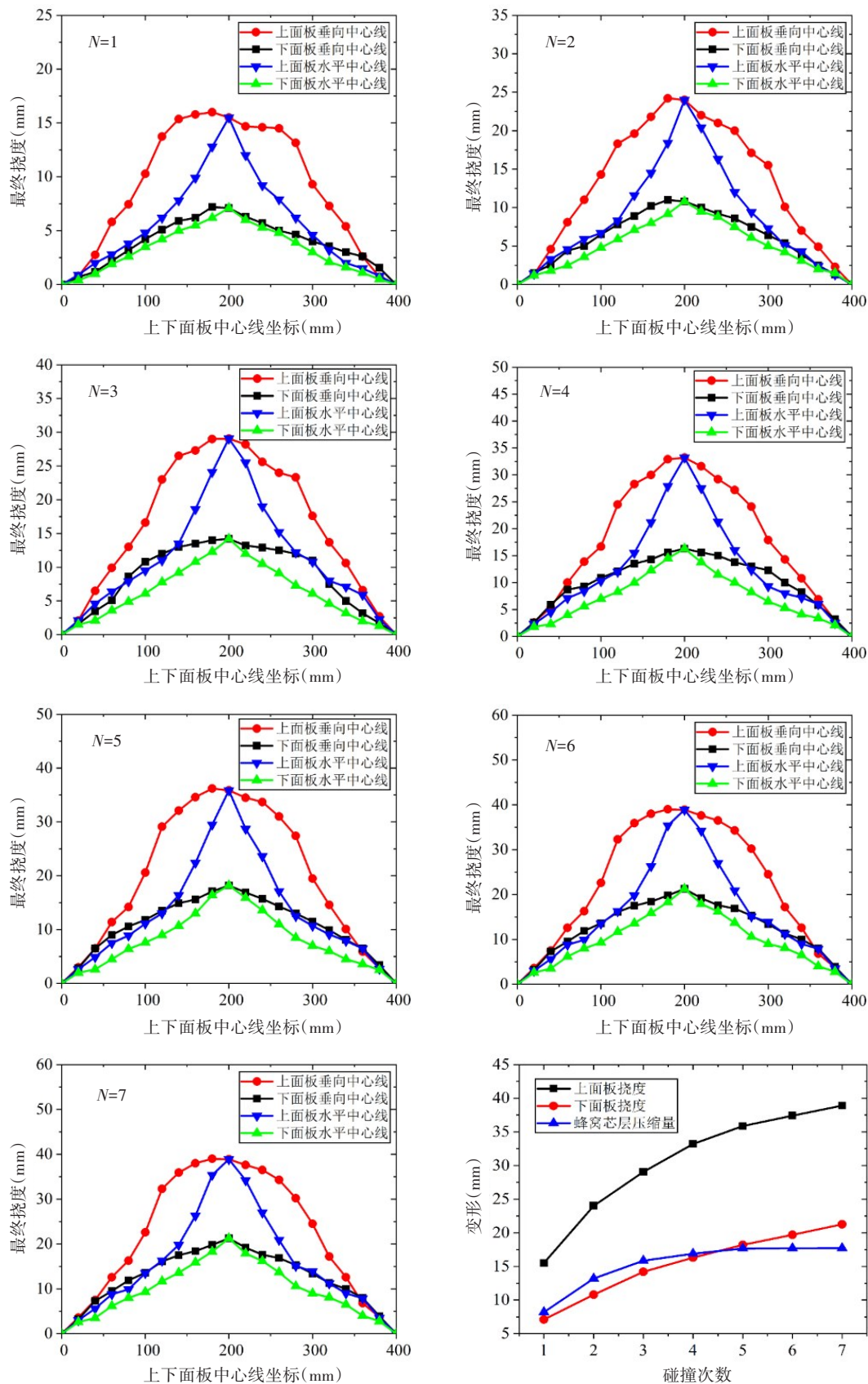


图7 楔形冰体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板最终挠度

Fig.7 Permanent deflection of honeycomb sandwich panel under repeated ice impacts

2.2 楔形冰体与刚体反复碰撞对比

为了分析冰体反复碰撞和刚体反复碰撞对蜂窝金属夹芯板动态响应的差异,通过动态冲击实验得到了蜂窝金属夹芯板碰撞力-时间曲线,如图8所示。由图可以看出,随着碰撞次数的增加,冰体碰撞与刚体碰撞力峰值显著增加,冰体碰撞与刚体碰撞接触时间减少,达到碰撞力峰值的时间缩短,冰体反复碰撞蜂窝金属夹芯板的碰撞力峰值小于刚体碰撞。

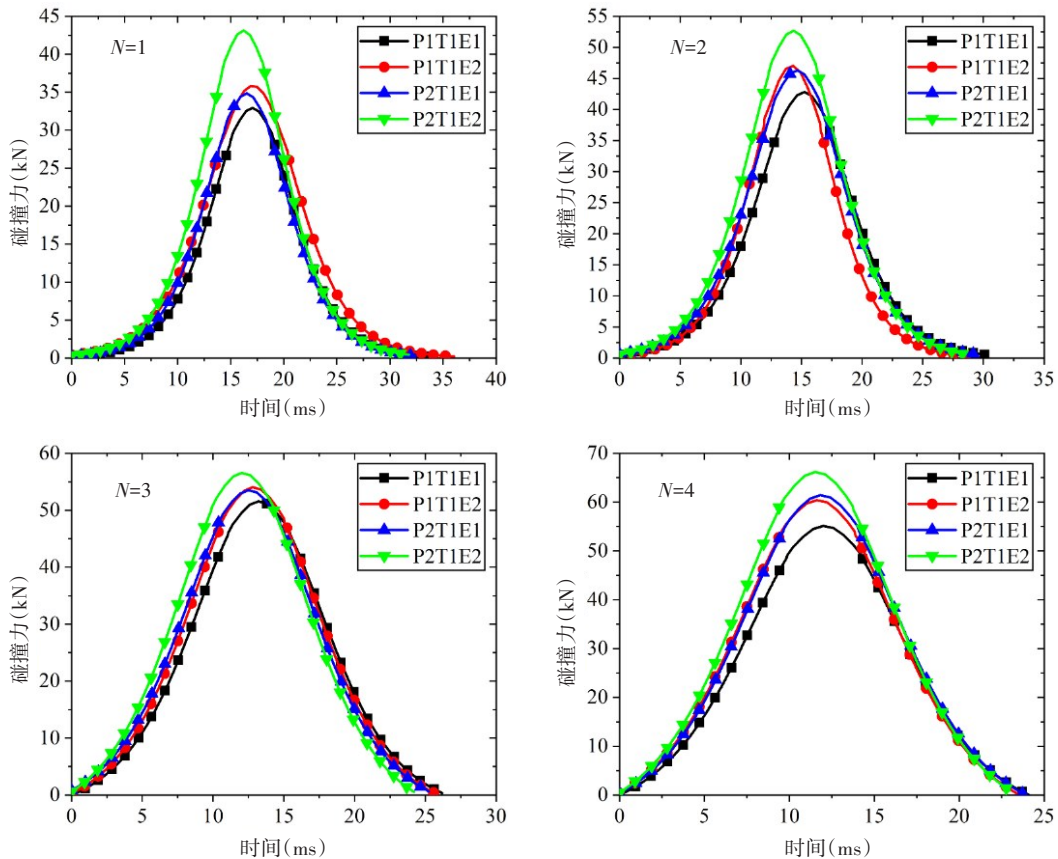
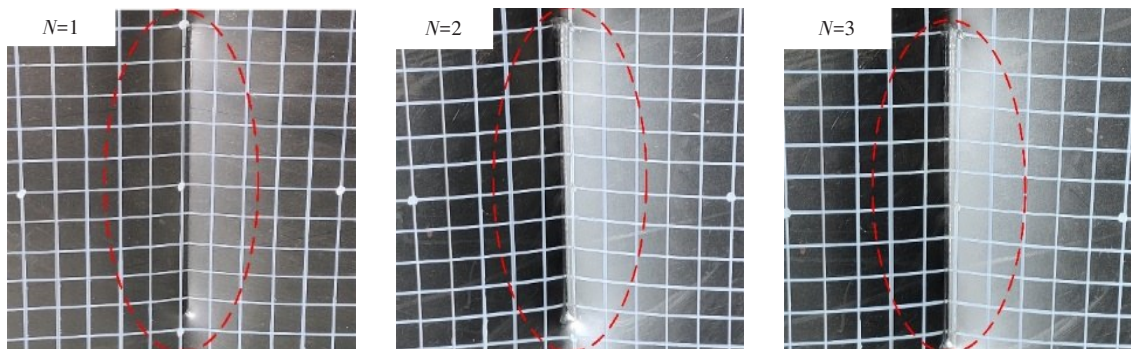


图8 冰体和刚体反复碰撞力-时间曲线

Fig.8 Comparison of impact force-time curves under repeated impacts

为了进一步阐明楔形冰体反复碰撞蜂窝金属夹芯板动态变形累积与能量吸收机制,对比分析了P2T1E2工况条件下刚体反复碰撞变形模式,如图9所示。采用游标卡尺测得蜂窝金属夹芯板上下面板垂向中心线与水平中心线上的最终挠度对比,如图10所示。从图可以发现,随着刚体反复碰撞次数增加,蜂窝金属夹芯板上下面板的整体弯曲变形与局部凹陷也逐渐增大,刚体反复碰撞结构塑性变形累积特性与楔形冰体反复碰撞规律基本相同。



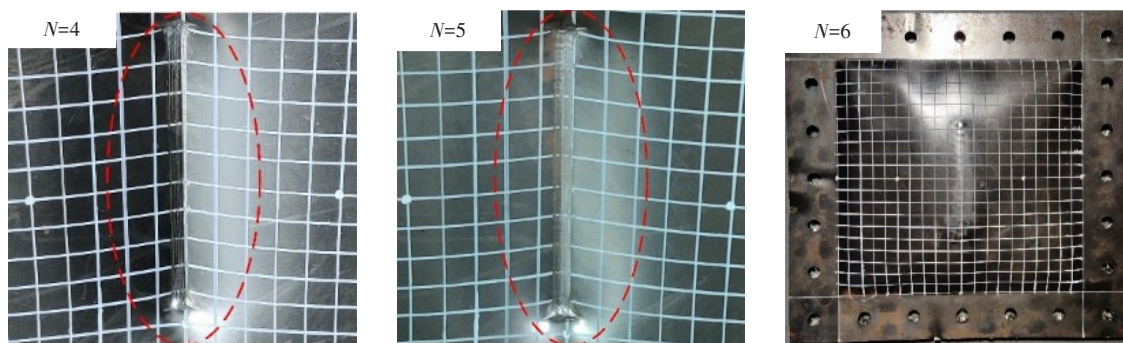
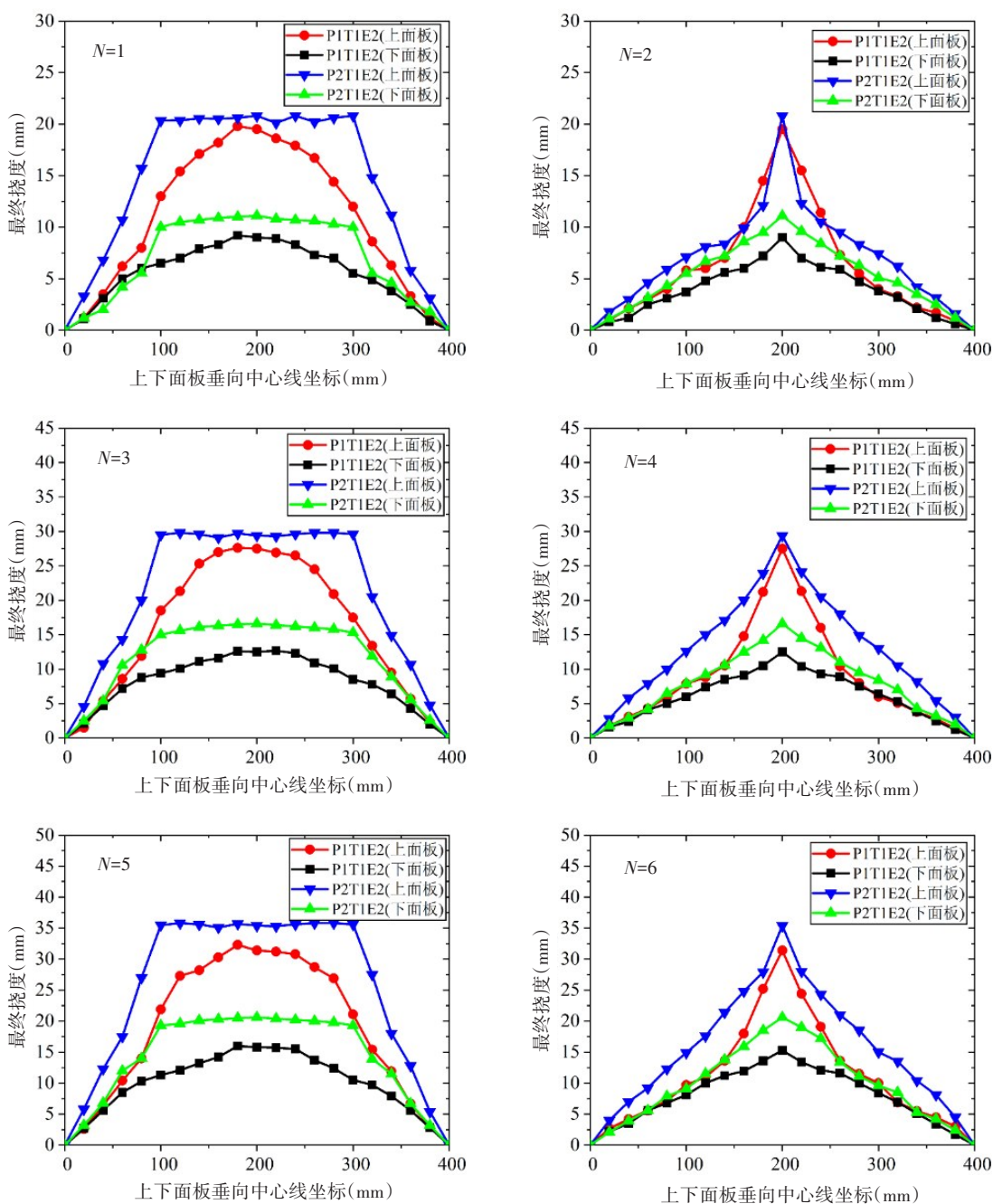


图9 刚体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板的变形模式

Fig.9 Deformation modes of honeycomb sandwich panel under repeated rigid impacts



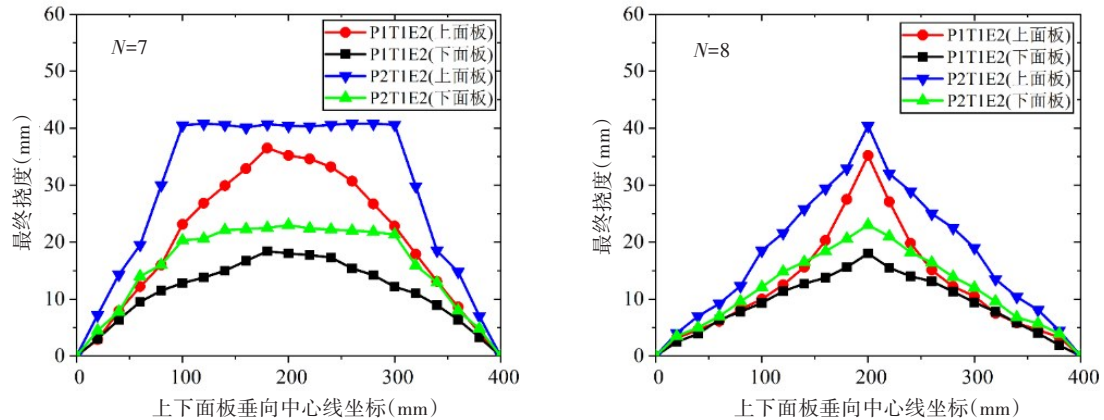


图10 蜂窝金属夹芯板反复碰撞最终挠度对比

Fig.10 Comparison of permanent deflection of honeycomb sandwich panel under repeated impacts

同时,由图可以发现刚体反复碰撞结构局部变形模式与冰体反复碰撞明显不同,由于楔形刚头与垂向中心线重合,刚体反复碰撞的局部变形区域为垂向直线,形成一条明显的塑性铰线,而冰体反复碰撞作用下由于冰体破碎导致结构局部损伤变形发展演化为椭圆形塑性区。由于碰撞过程中存在冰体破碎现象,冰体碰撞接触面积增大,与刚性反复碰撞相比,冰体反复碰撞作用下夹芯板上面板中点的最终挠度偏小,但局部损伤面积明显偏大。

3 结 论

本文采用水平冲击试验装置开展了楔形冰体与刚体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板动态响应实验研究,获得了冰体与刚体反复碰撞下蜂窝金属夹芯板的塑性变形损伤、下面板位移时程曲线和碰撞力时程曲线等动态响应结果,对比分析了冰体反复碰撞和刚体反复碰撞对蜂窝金属夹芯板动态响应影响的差异,可为其在极地船舶与海洋工程装备结构安全轻量化与碰撞冲击防护领域的应用提供依据。研究得出以下结论:

(1) 随着楔形冰体反复碰撞次数的增加,碰撞力峰值持续增大,碰撞接触时间明显缩短,蜂窝金属夹芯板上面板呈现整体弯曲变形与局部凹陷耦合的变形模式,蜂窝金属夹芯板上下面板的局部凹陷和整体弯曲变形逐渐增大,蜂窝芯层压缩量逐渐增加直至密实化,夹芯板整体弯曲刚度逐渐增大,挠度增幅逐渐减小。

(2) 当楔形冰体与蜂窝金属夹芯板碰撞后,由于存在冰体破碎现象,冰体碰撞接触区域变形不平整,碰撞接触面积增大。与刚性反复碰撞相比,冰体反复碰撞作用下夹芯板上面板中点的最终挠度偏小,但局部损伤面积明显偏大。随着碰撞次数的增加,蜂窝金属夹芯板结构塑性累积变形由一条塑性铰线发展演化为椭圆形塑性区。

参 考 文 献:

- [1] 朱英富,刘祖源,解 德,等. 极地船舶核心关键技术现状及我国发展对策[J]. 中国科学基金, 2015, 29(3):178-186.
Zhu Y F, Liu Z Y, Xie D, et al. Advancements of the core fundamental technologies and strategies of China regarding the research and development on polar ships[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015, 29(3): 178-186. (in Chinese)
- [2] 薛彦卓,倪宝玉. 极地船舶与浮体结构物力学问题研究综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(1): 36-40.

- Xue Y, Ni B Y. Review of mechanical issues for polar region ships and floating structures[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(1): 36–40. (in Chinese)
- [3] Liu Z, Amdahl J, Loset S. Plasticity based material modelling of ice and its application to ship–iceberg impacts[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65: 326–334.
- [4] 蔡 伟, 朱 凌, 毕璐泽. 船–冰碰撞下冰材料有限元数值方法研究进展[J]. *船舶力学*, 2021, 25(8): 1116–1126.
Cai W, Zhu L, Bi L Z. Review on development of finite element numerical method of ice material model under ship–ice collision[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, 25(8): 1116–1126. (in Chinese)
- [5] 张 健, 王甫超, 刘海冬, 等. 水介质中船体板架模型与冰体碰撞试验研究[J]. *船舶力学*, 2020, 24(4): 492–500.
Zhang J, Wang F, Liu H D, et al. Experimental study on collision of hull plate model and ice in water medium[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(4): 492–500. (in Chinese)
- [6] Sun J, Huang Y. Investigations on the ship–ice impact: Part 1. Experimental methodologies[J]. *Marine Structures*, 2020, 72: 102772.
- [7] 刘俊杰, 夏劲松, 金 言, 等. 冰–水耦合作用下船舶与浮冰碰撞动响应数值仿真研究[J]. *船舶力学*, 2020, 24(5): 651–661.
Liu J, Xia J, Jin Y, et al. Numerical simulation of dynamic response of collision between ship and floating ice under ice–water coupling effect[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(5): 651–661. (in Chinese)
- [8] Zhu L, Cai W, Chen M, et al. Experimental and numerical analyses of elastic–plastic responses of ship plates under ice floe impacts[J]. *Ocean Engineering*. 2020, 218: 108174.
- [9] Cai W, Zhu L, Yu T X, et al. Numerical simulations for plates under ice impact based on a concrete constitutive ice model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103594.
- [10] Cai W, Zhu L, Qian X. Dynamic responses of steel plates under repeated ice impacts[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104129.
- [11] Palomba G, Epasto G, Crupi V. Lightweight sandwich structures for marine applications: A review[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021: 1–26.
- [12] 周 雷, 朱 凌, 李应刚, 等. 冰碰载荷下船用泡沫铝夹层板冲击动力响应研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(2): 293–298.
Zhou L, Zhu L, Li Y G, et al. Research on dynamic response of hull foam aluminium sandwich plates under ice impact load [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(2): 293–298. (in Chinese)
- [13] 胡文进, 倪宝玉, 白晓龙, 等. 基于非线性有限元法的冰区玻璃钢实验船碰撞性能研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 262–268.
Hu W J, Ni B Y, Bai X L, et al. Impact performance of a glass fiber reinforced plastic ship with ice floes based on the non-linear FEM[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(14): 262–268. (in Chinese)
- [14] Banik A, Zhang C, Khan M H, et al. Low–velocity ice impact response and damage phenomena on steel and CFRP sandwich composite[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104134.
- [15] Wu X, Li Y, Cai W, et al. Dynamic responses and energy absorption of sandwich panel with aluminium honeycomb core under ice wedge impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104137.