

波面环境对高速入水载荷及弹道特性影响试验研究

杨晓光^{1,2}, 党建军¹, 王鹏¹, 王亚东², 韩颖骏², 陈诚², 李得英²

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2.北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要:波面环境是真实条件下物体入水所遇到的普遍情形,其改变了入水点自由界面的形貌,对入水过程中流动及入水后物体运动参数演变的影响尚不明确。在试验水池中采用摇板式造波机生成波面环境,以搭载内测系统的截锥头回转体外形为试验模型,利用压缩空气炮提供发射动力,发控系统统一控制造波机与发射炮的启动时序,二者协同以控制模型入水点与波面的相对位置,开展了平静水面、遭遇波面不同位置和不同波高的波浪情形下的入水试验,获得了模型入水过程加速度和姿态角度等定量的弹道参数,拍摄了入水过程的流场演变历程。试验结果表明:高速条件下,波面对入水过程的影响主要体现在其改变了模型入水时刻相对于水面的入水角度,遭遇负倾角情形的波面可降低入水冲击载荷,但更易诱导出现“跳弹”等极端情形。

关键词:流体力学;高速入水;波面环境;冲击载荷;弹道特性

中图分类号: TJ630.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2021)06-1259-07

高速入水过程中,物体以高瞬态穿越水气界面,伴随了入水空泡形成与演变、瞬变非线性流体动力生成过程,入水流场与物体运动呈紧耦合状态发展。真实情形下,水气自由界面受多方面因素的影响,不可避免存在波面环境,使得高速入水研究更加复杂化,而获得波面环境下的入水特性,是入水技术实际应用的必备基础。

针对高速条件下入水过程,国内外学者开展了大量研究。Kazuo等^[1]针对小型射弹射的高速入水问题,开展了基于X射线成像方法的试验,获得了实测入水图像,并进行了入水冲击流场引发的池壁压力场定量测量、不同材质弹丸入水特性研究。Alaoui等^[2]以匀速入水的刚性物体为研究对象,通过加速度计等设备测得了入水过程的水动力特性,并针对速度等因素的影响进行了分析。张伟等^[3]用试验方法研究了小型弹丸高速条件下入水弹道及速度衰减特性。王云等^[4]采用预置头部斜面的方法实现了入水弯曲弹道,施红辉等^[5]利用小尺度模型获得了入水空泡形成与演变的历程,但以上高速入水试验研究均未涉及波面环境的影响。针对波面环境对入水过程影响,王文华和杨衡等^[6-7]以圆柱

体为对象,建立数值造波方法研究了波高、周期、入水点相位等影响;王平等^[8]采用数值手段研究了楔形体波浪入水问题,获得了波浪对楔形体入水的影响主要由波浪内部流场变化及表面波形决定的结论;邹丽等^[9]通过自由落体的入水方式,分别在静水和规则波中开展了2种不同横剖面的曲面楔形体入水砰击问题试验研究,揭示了波浪载荷和砰击载荷的共同作用会使模型所受砰击压力显著增大的特性。文献[10-11]利用基于速度势理论的完全非线性边界元方法,研究了楔形体在不同弗劳德数和波浪参数下的入水过程,获得了运动与波浪载荷的相互作用以及楔面的压力分布规律。Jin等^[12]基于有限体积法建立了楔形体波浪入水的数值仿真模型,研究获得了物体在不同波面位置入水过程的运动参数和流场变化过程。Xiang等^[13]对圆柱体入水后在水流和波浪影响下的运动规律开展了理论研究。以上波浪环境影响的相关研究,多集中于低速入水情形,而对于物体高速携超空泡入水条件下的波面影响的研究相对较少。

本文以搭载可测量并记录入水过程加速度及角度的内测系统模型为研究对象,采用造波机与空气

炮相协同的设备开展了波面条件下的高速入水试验,获得了入水过程的轴向加速度及模型姿态演变历程,并针对入水点相位、波高等参数开展了系列化参数影响试验研究,分析了波面环境对入水过程影响的机制以及有利于入水弹道稳定的条件。

1 试验设备与模型

1.1 主要试验设备

试验在室外水池开展,试验区域尺度为 $10\text{ m} \times 5\text{ m} \times 2\text{ m}$,采用 3 个单元组合摇板式造波机产生波浪,每单元宽 0.5 m ,高 2 m ,摇摆角度 8.5° ,最大造波频率 1 Hz ,最大波高 0.5 m ,造波机如图 1 所示。

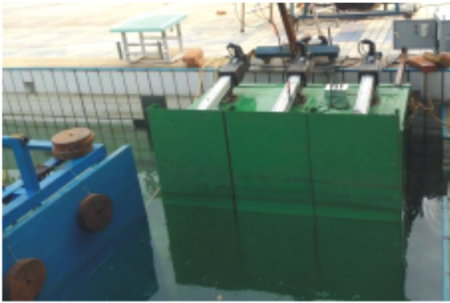


图 1 造波机

采用图 2 所示压缩空气炮为动力源将模型加速到指定速度。该装置由高压气舱、电磁阀、发射管、支架、充气组件和空压机组成。炮管内径 60 mm ,最大设计压力 1.0 MPa ,炮管长度 6 m ,其具备将 2 kg 的模型加速到 100 m/s 的发射能力。



图 2 压缩空气炮

下降沿信号,结合传感器间距离,得出模型出管速度。由于模型空中飞行阻力小、时间较短,可近似将出管速度作为入水速度。

采用高速摄像记录入水过程,高速摄像采用 Phantom 系列 V711 型号高速摄像机,满分辨率 ($1\ 280 \times 800$) 拍摄帧速率为 $5\ 000\text{ frame/s}$ 时,可持续拍摄 4 s ,本试验采用 $1\ 000\text{ frame/s}$ 速率在水面上拍摄入水弹道及流场的演变过程。

定制专用的发控系统实现造波机、高速摄像及压缩空气炮的统一管理,可实现造波机开启、模型延迟发射、高速摄像硬触发的同步控制,以满足调整模型入水遭遇波面不同位置的试验需求。

各试验设备在试验场地的布置如图 3 所示。

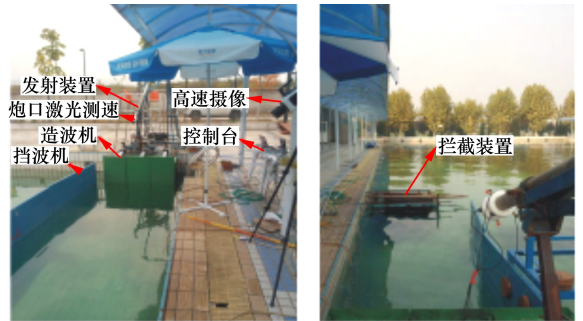


图 3 试验布置

1.2 模型及内测系统

以截锥头回转体作为入水试验模型,模型总长 225 mm ,圆柱段直径 60 mm ,质量为 1.9 kg ,转动惯量 $I_{xx} = 5.0 \times 10^{-4}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{yy} = I_{zz} = 5.3 \times 10^{-4}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。具体尺寸及模型实物如图 4 所示。

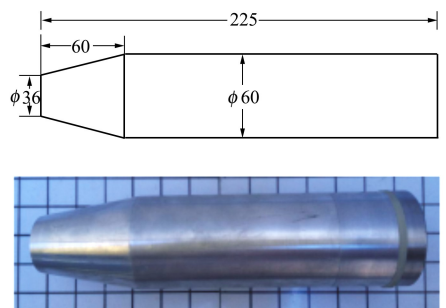


图 4 试验模型

定制了测量与记录模型入水过程三轴加速度和三轴角速度时间历程原始数据的内测系统,简称内测系统,采用模块化设计,3 个通道的加速度计通过

炮管口布置有 2 个激光传感器,通过捕捉 2 个

延长线与主板连接,加速度计模块采用单面电路板设计,用2个螺钉刚性连接在金属材质的内测支架上。模型开始加速时刻,内测系统根据轴向加速度值变化特征作为触发条件。主要技术指标为:加速度计的量程为 $\pm 250g$;陀螺仪的量程为 $\pm 2\ 000\ ^\circ/s$;采样精度为16位;采样率为3 kHz;数据存储器可连续工作时间为4.5 s。

2 结果与分析

由于水池波浪耗散衰减较慢,为了保证试验条件,相邻发次的时间间隔不得小于10 min。本试验中,炮管与水平面夹角为 20° ,模型的标称入水速度均选为70 m/s,实际数值会因发射条件的微弱差异存在小幅波动,但差值较小。

2.1 平静水面工况

不启动造波机,开展平静水面下的入水试验,提供对照的基础数据,试验测得不同时刻入水空泡形态如图5所示。

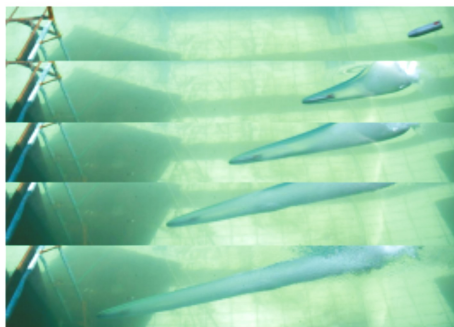


图5 平静水面入水流场与弹道

本文重点针对模型以超空泡状态高速入水初期的水动特性开展研究,由于模型关于纵平面对称,同时试验结果也表明模型以稳定状态运动时其力学特性集中于轴向,姿态特性集中于在纵平面内转动,本文中只给出了轴向加速度和俯仰角,其他参数均为小量,且对本文研究结果无影响,对此不再赘述。

对于平静水面入水工况,内测系统实测的轴向加速度及俯仰角如图6~7所示。结果表明:入水过程中作用于模型上的流体动力在毫秒级的时间内迅速达到峰值,而后逐渐衰减;模型入水后被超空泡包裹,在40 ms内重力矩作用下自由偏转约 8° 后模型尾部接触空泡壁面,产生回复力矩,模型姿态偏转减小,本文不再对之后时间段的运动状态进行研究。

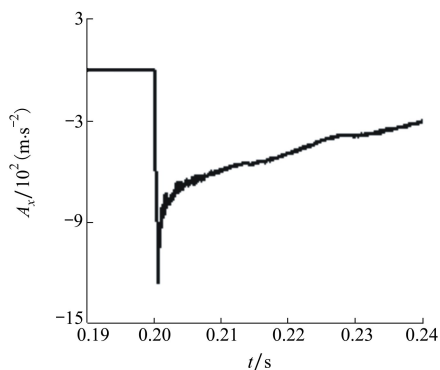


图6 轴向加速度-时间历程

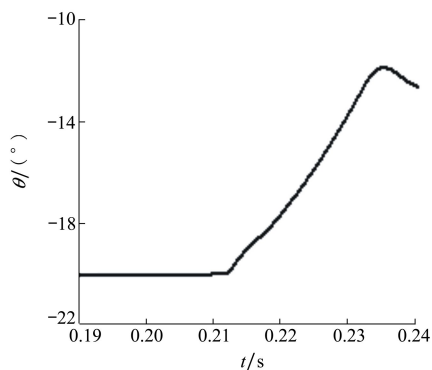


图7 俯仰角-时间历程

2.2 入水相位影响

模型以70 m/s速度入水,其穿越水面过程仅需要数毫秒时间,相比而言,波浪的周期要大几个量级,故而从直观上分析,波面对模型入水的影响应主要体现在改变了模型与水面的相对夹角。

按以上思路,探究模型入水点处于不同波面位置时的影响。引入入水点相位的概念,其定义如图8所示。

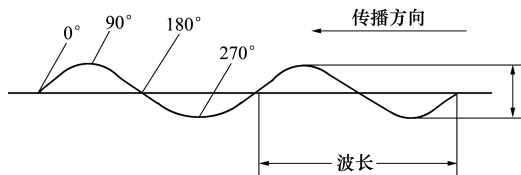


图8 相位定义示意图

通过发控系统控制模型在波面环境下不同遭遇点的方法:调整发控系统造波机与模型发射同步控制的时延量,开展预试发射试验,获得模型在波面上的不同入水相位,标定出时延量与入水相位的关系,供正式试验选择。

试验过程中所造正弦波的波长均为1.56 m,周

期均为 1 s,波高 0.15 m 开展试验。

测得了入水点分别位于波形的 0°, 90°, 180° 和 270° 相位的轴向加速度及俯仰角度,数据对比如图

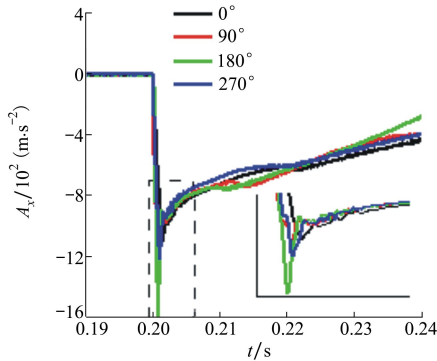


图 9 不同相位下轴向加速度对比

9~10 所示,提取的特征数据值见表 1,并以平静水面下的轴向加速度峰值为基准,将不同相位下的轴向加速度峰值无量纲化。

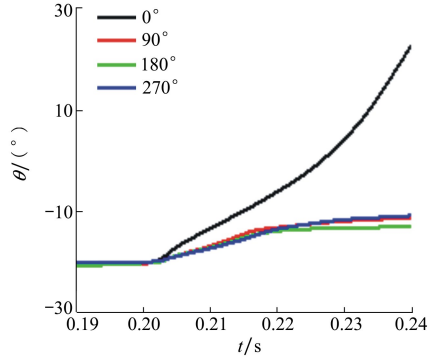


图 10 不同相位下俯仰角对比

表 1 不同相位下入水特征参数

入水点相位/ (°)	波倾角/ (°)	实际入水角/ (°)	加速度峰值/ (m · s ⁻²)	加速度峰值 无量纲化	拦截点俯 仰角变化/(°)
0	-17	3	-1 098	0.87	40
90	0	20	-1 294	1.03	10
180	17	37	-1 574	1.25	7
270	0	20	-1 212	0.97	10

从试验结果来看,当模型入水点对应 90° 和 270° 相位,即处于波峰或波谷位置时,入水冲击载荷相对较小,且与上节中给出的平静水面下入水特征基本一致;当入水点位于 0° 相位时,冲击载荷进一步减小,但入水弹道发生明显偏转,弹道失稳;入水点位于 180° 相位时,冲击载荷增大,而入水弹道相对稳定。

波浪环境下模型与入水处自由面的夹角改变,进而导致模型的实际入水角改变。从图 8 可以看出,入水点位于 0° 相位时相当于减小了入水角,180° 情形相反。根据前期开展的平静水面下变入水角对轴向载荷的影响研究^[14]可知,模型撞水时,水体向四周流动,出现液面隆起现象,入水角越小,水流向水面以上流动受到的阻力越小,水面隆起效果越明显,从而使航行体头部上部分高压区域泄压较快,形成相对低压区,进而导致模型受到的轴向冲击载荷峰值减小。

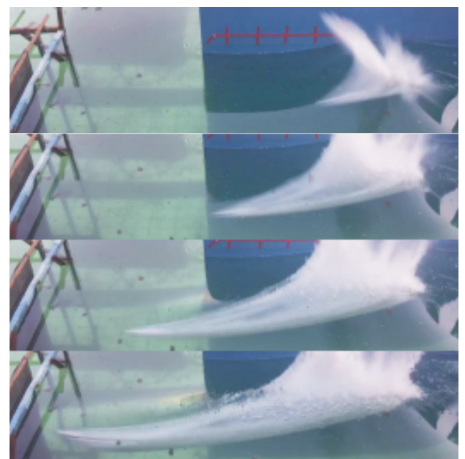


图 11 0° 相位入水流场

2.3 波高影响

上节获得了入水点相位对模型入水特性的影响,其最危险的情形为 0° 入水,虽然入水冲击载荷小,但弹道上扬将导致入水过程失败,故本文选取 0° 相位为典型工况开展了进一步研究。入水点相位确定后,波高成为了影响相对入水角的另一主要因

素。本节针对 0.1 与 0.2 m 波高开展试验,研究波高对入水特性的影响。

值得说明的是,当波高为 0.2 m 时,波形在 0° 相位处的斜率大于 20° 角,因此模型以 20° 入水角入水时无法遭遇 0° 相位,实际相位约为 180°,如图 12 所示。

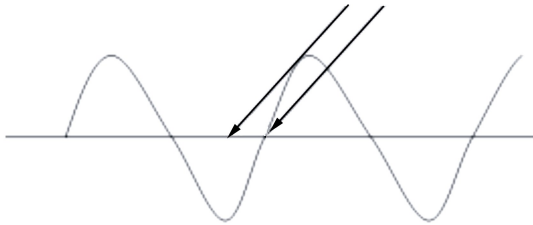


图 12 波高对入水点影响示意图

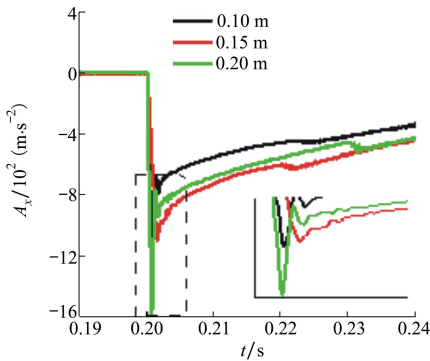


图 13 不同波高下轴向加速度对比

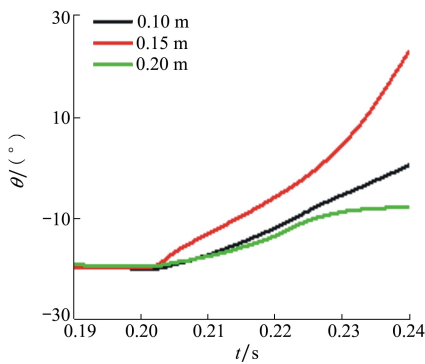


图 14 不同波高下俯仰角对比

3 种波高工况对应的入水轴向加速度及入水过

程俯仰角变化如图 13~14 所示,提取的特征参数见表 2。

表 2 不同波高对应特征参数

波高/ m	波倾角/ (°)	实际入 水角/(°)	加速度峰 值/(m·s ⁻²)	加速度峰值 无量纲化
0.10	-11	9	-1 152	0.92
0.15	-17	3	-1 098	0.87
0.20	-22	>20	-1 579	1.26

结果表明:波高对入水特性的影响仍体现为局部入水角度,波高值越大,波倾角越大,实际入水角度减小,对于 0° 入水工况,模型更易发生跳弹;但当波高达到一定数值时,入水点无法达到 0° 相位,实际为 180° 相位,实际入水角度增大,入水载荷增加,但在弹道上有利于稳定入水。

3 结 论

本文利用造波机与压缩空气炮相协同的试验设备,采用截锥头回转体构型的试验模型,开展了波面环境下的入水试验,利用模型内测系统获得了轴向加速度与模型姿态,分析了波面环境对入水载荷与姿态的影响,主要结论如下:

1) 波浪环境改变了模型入水时刻相对水面的入水角度,入水点相位为 90° 或 270° 时,实际入水角与平静水面下一致,入水点相位为 180° 时,实际入水角增大,入水点相位为 0° 时,实际入水角减小,随着实际入水角度减小,轴向冲击载荷减小;

2) 入水点相对波面的相位对入水过载、入水弹道存在直接影响,入水点位于 0° 相位时虽有利于减小入水载荷,但可能产生模型跳弹现象;

3) 0° 相位下波高越大,波浪对相对入水角的影响越大,进而导致对过载及弹道影响更大,但波高超过一定程度时,不会出现 0° 相位入水的情形。

参考文献:

[1] KAZUO S, TAKENORI O. Study of water entry of high-speed projectile[J]. Procedia Engineering, 2014, 58: 232-239

[2] ALAOUI A E M, NEME A, TASSIN A, et al. Experimental study of coefficients during vertical water entry of axisymmetric rigid shapes at constant speeds[J]. Applied Ocean Research, 2012, 37: 183-197

[3] 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

ZHANG Wei, GUO Zitao, XIAO Xinke, et al. Experimental investigation on behaviors of projectile high-speed water entry[J].

- Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579-584 (in Chinese)
- [4] 王云,袁绪龙,吕策. 弹体高速入水弯曲弹道实验研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 1998-2002
WANG Yun, YUAN Xulong, LYU Ce. Experimental research on curved trajectory of high-speed water-entry missile[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(12): 1998-2002 (in Chinese)
- [5] 施红辉,周浩磊,吴岩,等. 伴随超空泡产生的高速细长体入水实验研究[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 49-55
SHI Honghui, ZHOU Haolei, WU Yan, et al. Experiments on water entry of high-speed slender body and the resulting supercavitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(1): 49-55 (in Chinese)
- [6] 王文华,王言英. 圆柱在波浪中入水的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(10): 1393-1399
WANG Wenhua, WANG Yanying. Numerical study on cylinder entering water in wave[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(10): 1393-1399 (in Chinese)
- [7] 杨衡,孙龙泉,刘莹,等. 波浪作用下圆柱体入水特性的三维数值模拟研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(10): 1186-1195
YANG Heng, SUN Longquan, LIU Ying, et al. 3D numerical simulation on water entry of cylindrical under wave and stream action[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(10): 1186-1195 (in Chinese)
- [8] 王平,袁帅,张宁川,等. 楔形体在波浪中自由入水的数值模拟[J]. 海洋工程, 2017, 35(5): 42-50
WANG Ping, YUAN Shuai, ZHANG Ningchuan, et al. Numerical study of the free water-entry wedge in wave[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(5): 42-50 (in Chinese)
- [9] 邹丽,李振浩,孙铁志,等. 楔形物体在静水与波浪中自由入水砰击试验研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 1-11
ZOU Li, LI Zhenhao, SUN Tiezhi, et al. Experimental study on free fall slamming of wedge-shaped objects under still water and waves conditions[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(1): 1-11 (in Chinese)
- [10] SHI Y S, CHEN H L, XU G. Water entry of a wedge into waves in three degrees of freedom[J]. Polish Maritime Research, 2019, 26: 117-124
- [11] SUN S Y, SUN S L, WU G X. Oblique water entry of a wedge into waves with gravity effect[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 52: 49-64
- [12] JIN Y T, ZHI H L, LU Y J, et al. Numerical simulation of three dimensional tank impacting on wavy water[C]//AIAA Aviation Forum, Texas, USA, 2019
- [13] XIANG G, LIN X, YU X C, et al. Motion dynamics of dropped cylindrical objects in flows after water entry[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 659-671
- [14] CHEN C, YUAN X L, LIU X Y, et al. Experimental and numerical study on the oblique water-entry impact of a cavitating vehicle with a disk cavitator[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 11: 482-494

Experimental research on influence of wave environment on high-speed water entry load and trajectory characteristics

YANG Xiaoguang^{1,2}, DANG Jianjun¹, WANG Peng¹, WANG Yadong²,
HAN Yingjun², CHEN Cheng², LI Deying²

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Wave environment is a common fact happened when objects enter water under real conditions, which changes the morphology of the free interface when entering water. However, the influence of wave environment on the flow when entering water and on the evolution of object motion parameters after entering water is not clear. In this research, a rocking plate wave maker is used to generate a wave environment in the test pool, and a truncated cone rotating body equipped with an internal test system is used as the test model. The compressed air cannon is used to provide launch power, and the launch control system uniformly controls the start timing process of the wave maker and the launcher. The wave maker and the launcher will control the relative position of the object's entry point and the wave surface in collaboration. Various condition tests were carried out, including enter in static water, different wave surface positions and different wave heights. Quantitative trajectory parameters including the acceleration, and attitude angle of the model in the water-entry process were obtained, and the evolution of the flow field was photographed. The experimental results show that under high-speed conditions, the influence of waves on the water-entry process is mainly reflected in the change of the water entry angle relative to the water surface at the water-entry moment. The wave surface encountering negative inclination can effectively reduce the impact load of water entry, but it is more likely to induce the extreme situation such as "jumping".

Keywords: fluid dynamics; high-speed water entry; wave environment; impact load; trajectory characteristics

引用格式: 杨晓光, 党建军, 王鹏, 等. 波面环境对高速入水载荷及弹道特性影响试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1259-1265

YANG Xiaoguang, DANG Jianjun, WANG Peng, et al. Experimental research on influence of wave environment on high-speed water entry load and trajectory characteristics[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1259-1265 (in Chinese)