

El、Scopus 收录 中文核心期刊

## 收缩扩张管内液氮空化流动演化过程试验研究

陈家成,陈泰然,梁文栋,谭树林,耿 昊

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVOLUTION OF LIQUID NITROGEN CAVITATING FLOWS THROUGH CONVERGING-DIVERGING NOZZLE

Chen Jiacheng, Chen Tairan, Liang Wendong, Tan Shulin, and Geng Hao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/0459-1879-21-614

# 您可能感兴趣的其他文章

# Articles you may be interested in

# 高压捕获翼构型亚跨超流动特性数值研究

NUMERICAL STUDY ON FLOW CHARACTERISTICS OF HIGH–PRESSURE CAPTURING WING CONFIGURATION AT SUBSONIC, TRANSONIC AND SUPERSONIC REGIME

力学学报. 2021, 53(11): 3056-3070

# 单一水平轴风电机组尾迹的模拟方法与流动机理研究综述

REVIEW OF RESEARCH ON THE SIMULATION METHOD AND FLOW MECHANISM OF A SINGLE HORIZONTAL–AXIS WIND TURBINE WAKE

力学学报. 2021, 53(12): 3169-3178

# 环形槽对通气空泡融合的促进作用分析

ANALYSIS OF THE PROMOTING EFFECT OF ANNULAR GROOVE ON THE COALESCENCE OF VENTILATED CAVITY 力学学报. 2021, 53(2): 386-394

# 基于S-ALE方法的圆柱体垂直出水破冰研究

RESEARCH ON VERTICAL MOVEMENT OF CYLINDRICAL STRUCTURE OUT OF WATER AND BREAKING THROUGH ICE LAYER BASED ON S–ALE METHOD

力学学报. 2021, 53(11): 3110-3123

# 基于XFEM-MBEM的嵌入式离散裂缝模型流固耦合数值模拟方法

NUMERICAL SIMULATION FOR COUPLING FLOW AND GEOMECHANICS IN EMBEDDED DISCRETE FRACTURE MODEL BASED ON XFEM–MBEM

力学学报. 2021, 53(12): 3413-3424

# 基于半解析VOF-DEM的激光直接沉积多尺度过程模拟

WHOLE–PROCESS CROSS–SCALE MODELLING OF LASER DIRECT DEPOSITION WITH SEMI–RESOLVED VOF–DEM COUPLING

力学学报. 2021, 53(12): 3228-3239

流体力学

2022 年 5 月

# 收缩扩张管内液氮空化流动演化过程试验研究

陈家成\* 陈泰然\*,<sup>†,2</sup>) 梁文栋\* 谭树林\* 耿 昊\*

\*(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081) †(北京理工大学重庆创新中心,重庆 401120)

**摘要** 本文基于低温空化试验平台研究了收缩扩张流道内液氮非定常空化流动的演化过程.试验采用高时空 分辨率的高速摄像机对 77 K 液氮在不同空化数 σ 下空穴结构的演变进行了精细化的分析和研究.利用试验得 到的空穴长度和面积等数据,定量分析了液氮空化流动的非定常特性与时空演变规律.研究结果表明:(1)在相 似来流速度和温度条件下,随着空化数的减小,液氮空化流动呈现四种典型流型,空穴长度在 2.5 h 以内为初生 空化、空穴长度在 2.5 h ~ 7.5 h 之间为片状空化、空穴长度在 7.5 h ~ 15 h 之间为大尺度云状空化,空穴长度超 过 15 h 为双云状空化,且在大尺度云状空化和双云状空化阶段均捕捉到了回射流现象;(2)液氮空化流动从初 生空化到双云状空化,脱落空穴的尺度逐渐增大,空穴面积脉动的幅值和准周期均有所增加.同时,在大尺度云 状空化与双云状空化阶段,喉口处堵塞效应对空化流动的影响显著增强;(3)相比于初生空化,片状空化、大尺 度云状空化以及双云状空化中脱落空穴的移动距离依次增加了 0.97 倍、2.65 倍与 2.68 倍,溃灭时间依次增加 了 1.18 倍、3.59 倍与 4.47 倍,但溃灭速度依次减小了 0.10 倍、0.20 倍与 0.30 倍.除此之外,对于双云状空化 阶段,存在两种显著不同的脱落空穴演化过程.

关键词 液氮, 空化流动, 空化流型, 非定常演化, 试验观测

中图分类号: O352 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-614

# EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVOLUTION OF LIQUID NITROGEN CAVITATING FLOWS THROUGH CONVERGING-DIVERGING NOZZLE<sup>1)</sup>

Chen Jiacheng \* Chen Tairan \*, <sup>†</sup>, <sup>2</sup>) Liang Wendong \* Tan Shulin <sup>†</sup> Geng Hao \*

\* (School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

<sup>†</sup> ( Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China)

Abstract The objective of this paper is to investigate the unsteady characteristics of liquid nitrogen cavitating flow in a converging-diverging (C-D) nozzle via a cryogenic experimental facility. A high-speed camera with high resolution was employed to study the evolution of cavity with varying cavitation numbers  $\sigma$  under  $T_{\text{throat}} \approx 77$  K. In order to quantitatively analyze the unsteady characteristics and temporal-spatial evolution, processed data such as the length and area of cavitation based on experimental images were obtained. The results show that: (1) As the cavitation number decreases and under similar free-stream velocity and temperature, the liquid nitrogen cavitation shows four typical flow

2) 陈泰然, 助理教授, 主要研究方向: 低温 (超低温) 相变与传热. E-mail: chentairan@bit.edu.cn

引用格式: 陈家成, 陈泰然, 梁文栋, 谭树林, 耿昊. 收缩扩张管内液氮空化流动演化过程试验研究. 力学学报, 2022, 54(5): 1242-1256 Chen Jiacheng, Chen Tairan, Liang Wendong, Tan Shulin, Geng Hao. Experimental study on the evolution of liquid nitrogen cavitating flows through converging-diverging nozzle. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(5): 1242-1256

<sup>2021-11-23</sup> 收稿, 2022-01-27 录用, 2022-01-28 网络版发表.

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金 (52009001,52079004)、中国博士后科学基金(2020M680380)、技术领域基金(2021-JCJQ-JJ-0766)、重庆市自然科学基金 (cstc2021jcyj-msxmX1046) 和北京理工大学青年教师学术启动计划 (XSQD-202003008) 资助项目.

patterns, with the cavitation length within 2.5 h for incipient cavitation, between 2.5 h and 7.5 h for sheet cavitation, between 7.5 h and 15 h for large-scale cloud cavitation, and over 15 h for double-cloud cavitation, Additionally, a significant phenomenon of re-entrant jet is captured in the large-scale cloud cavitation and double-cloud cavitation; (2) as the liquid nitrogen cavitating flow evolves from incipient cavitation to double-cloud cavitation, the scale of shedding cavity increases gradually, meanwhile, the amplitude and quasi-period of cavity area pulsation is getting longer. In addition, it is observed that the blockage effect on the cavitation flow at the throat is significantly enhanced in the large-scale cloud cavitation, the travel distance of shedding cavities increases by 0.97, 2.65 and 2.68 times in sheet cavitation, large-scale cloud cavitation and double-cloud cavitation, there are two significantly different evolutions of shedding cavity.

Key words liquid nitrogen, cavitating flows, cavitation patterns, unsteady evolution, experimental observation

# 引言

空化流动是高速水动力学研究的核心问题,指 的是当液体局部压力降低到饱和蒸汽压以下时,液 相转变为气相的过程[1]. 空化现象通常发生在以液 体为工质的流体机械中,如液体火箭发动机涡轮泵, 船舶喷水推进器和螺旋桨等[2-3] 其产生的噪声[4-6]、 压力脉动[7] 与空蚀[8-9] 严重影响了流体机械的稳定 运转与使用寿命.目前,空化研究大多以常温水为主 要研究对象[10-12]. 然而, 在航天领域, 为了满足我国 新一代运载火箭大推力、高性能、无毒环保等要 求,火箭发动机采用液氢、液氧等低温介质作为工 质.在发动机涡轮泵高速运转时,诱导轮叶片上会出 现低温介质空化现象,严重制约了火箭发动机涡轮 泵系统水力性能和可靠性的提升[13-14].由于液氢、 液氧等低温介质具有液/汽密度比小等独特的物质 属性,其空化过程伴随热效应引起的局部温度变化 往往不能忽略,显著的温度变化会改变当地的物质 属性和流动参数,进而改变空穴结构、脱落和溃灭 等空化行为[15-17].因此,揭示低温介质非定常空化流 动的演化过程,对液体火箭发动机可靠性提升具有 十分重要的意义[18-19].

试验研究一直是推动认识空化流动机理的主要 方式.由于低温介质对试验装置的耐低温、密封等 性能要求高,对低温介质开展可视化观测远比常温 水困难,同样具有空化热力学效应的制冷剂、高温 水等作为代替介质被大多数学者采用.早在1961年, Sarosdy和 Acosta<sup>[20]</sup>通过试验直观研究了水和 R113 中空化现象的不同,他们发现 R113 的空泡界 面模糊,呈"泡沫状",而在冷水中空泡清晰透明,呈 "透明玻璃状".为满足液体火箭发动机发展的需要, 对低温介质空化流动的试验研究多以诱导轮为载 体. Franc 等[21-22] 通过试验分析了诱导轮在不同温度 的 R114 中的空化流动, 指出温度显著影响了附着空 穴的生长,且在高温条件下空化的发展受到抑制. Cervone 等<sup>[23]</sup> 研究了不同温度水的诱导轮内非定常 空化流动现象,研究发现随着温度的升高,诱导轮中 压力的非定常脉动程度降低,对应的频谱峰值降低. Watanabe 等<sup>[24]</sup>试验发现在相同工况下同一诱导轮 内的冷水和液氮的空穴形态存在显著的差异. Yoshida 等[25-27] 以不同温度液氮为工作介质, 试验研究了 诱导轮旋转空化和空化喘振等空化不稳定性. 试验 结果表明热力学效应引起空化数的降低,降低了诱 导轮内部的空化不稳定性. Ito 等<sup>[28]</sup> 对比了不同温度 水和液氮在诱导轮中空化特征,他们发现常温水空 化区整体呈"泡沫"状, 气泡体积较大, 液氮空化区整 体呈"雾"状, 气泡体积较小. 项乐等[29] 开展了不同工 况条件下的空化流动试验获得了诱导轮从无空化到 扬程断裂整个过程流道内空穴的回流涡空化、间隙 空化等非定常空化过程,上述研究主要是工业部门 针对航天领域的发展需求而开展,并未对低温空化 流动的演变过程和特性进行较为深入的探讨.

近几年来,由于新能源、航空航天以及超导等 高新技术领域对空化热流动研究的迫切需求,越来 越多的学者开始基于水翼、文丘里管等试验手段开 展相关低温空化流动机理研究工作,低温空泡内、 外部流动及流场特征测量成为了研究的焦点<sup>[30-31]</sup>. Hord<sup>[32-33]</sup>最早采用液氮和液氢,在不同尺寸的文丘 里管与水翼上进行了一系列低温空化试验,全面采 集了空穴长度以及空化区温度与压力的分布.一直

以来,该试验数据为检验低温介质空化流动的数值 计算模型和方法提供了校核的依据. Gustavsson 等[34] 试验研究了一种典型的热敏感介质氟酮在不同速度 和空化数下绕 NACA 0015 水翼的空化流动. 结果表 明随着温度的升高存在一个从经典空化流动到热敏 空化流动的转化过程. Dular 等[35-37] 研究了热水在收 缩扩张流道内的空化流动现象,通过高速红外热成 像法测量了空穴周围的温度分布,他指出温度显著 影响了汽蚀程度,且在60℃左右汽蚀程度达到最大. Zhu 等<sup>[38-39]</sup> 对文丘里管内的液氮非定常空化流动进 行了可视化研究,给出了上下游压力比、流速和局 部声速对空化非定常特性的影响.随后,他们分析了 片状空化与云状空穴的动力学特性,指出热力学效 应会延缓片状空穴向云状空穴的过渡. Wei 等<sup>[30]</sup> 基 于高速摄像机和激光多普勒测速仪研究了收缩扩张 管内液氮空化流动大尺度云状空穴的脱落机制. Liang 等[31] 试验研究不同温度下收缩扩张管道内液 氮空化流动,同时通过 POD 讨论了液氮空化流动中 的热力学效应,发现热力学效应会延长空泡溃灭的 时间,最近,研究发现热效应开始显著影响低温空化 时存在某一转捩温度,且空化程度在该阶段达到最 大<sup>[40-42]</sup>. Ohira 等<sup>[41]</sup> 采用不同尺寸的收缩扩张流道, 研究了过冷液氮空化流动的不稳定性机理. 他们发 现随着液氮温度的降低, 空化从连续模式过渡道中 间模式,最后转变为间歇模式. Chen 等[42] 对收缩扩 张流道内液氮空化流动的进行了可视化分析,他们 指出随着液氮温度的升高,空化流动动力学行为从 惯性模式转变为热敏模式,两种模式间的转变过程 为转捩模式,空化程度在转捩模式达到最大,转捩温 度约为 77 K~78 K.

在上述研究中,低温空化流动中存在随温度变 化的流动特征转捩现象开始达成普遍的共识,通常 称之为热转捩模式.然而,对该模式下不同空化阶段 空穴的初生、发展、脱落和溃灭等非定常特性还未 开展充分的研究.为此,本文在前期研究的基础上, 通过试验研究了收缩-扩展管道内的液氮非定常空 化流动,旨在获得温度为77K左右的液氮在不同空 化数下空化流动的非稳态特性和演化过程.本文主 要研究内容包括:(1)利用高速摄像机对液氮空化流 型进行精细地捕捉,分析了液氮瞬态空穴的演化特 性;(2)采用后处理程序<sup>[43]</sup>,定量分析了液氮空化流 动的非稳态特性,阐明不同空化数下非定常特性的 演变规律; (3) 通过时空分布图, 明确了不同空化流型下脱落空穴的非稳态发展过程.

# 1 试验装置及方法

#### 1.1 低温空化测试平台

图1给出了低温空化测试平台的总体示意图, 该试验台主要包括:一个运行罐(容量40L)、试验 段以及一个收集罐 (容量 60 L), 试验过程中可以关 闭所有阀门增加罐内压力使液氮温度上升,温度下 降可以通过真空泵抽压来实现.实验开始前,首先将 真空泵与真空控制阀相连将真空隔热层抽真空,且 实验过程中真空泵对试验段的真空层一直抽压. 当 运行罐内温度降低到 200 K 以下后, 打开中间控制 阀使液氮在两罐之间来回流动几次以保证整个实验 装置被冷却下来,但是两罐内温度很难完全保持统 一,实验过程中以运行罐内温度为准<sup>[42]</sup>.综合考虑试 验平台观察窗的低温承压能力以及液氮的物质属性 等因素,表1列出了以液氮为试验工质时,该试验台 的整体运行参数.图2给出了收缩扩张流道的几何 尺寸与实物图. 测试段为一套组装式的收缩扩张流 道, 总长为 258.2 mm. 收缩扩张流道主体采用不锈 钢材质,考虑到低温条件下的变形管道底部材料为 聚四氟乙烯;试验段两侧开有观察窗,两观察窗长度 为70mm,高度为7mm,采用高透光率石英玻璃,为 拍摄提供了良好的基础条件;流道内部宽度为 5 mm; 77 K 下喉口高度 h 为 2 mm, 上游段和下游段 的高度为 20 mm, 本文中流动的特征长度为 h. 收缩 扩张流道上游、下游处以及下壁面的绝对压力是由 绝对压力传感器 (Helm Instrument Co, Inc., 范围为 0~0.6 MPa, 精度为±0.1%FS) 测量的, 上游绝对压 力、下游绝对压力分别标记为 pup 和 pdown; 且试验 台采用 Cernox 温度计 (Lake Shore Cryotronics, Inc., 该温度计在 77 K 时精度为 ±16 mK) 测量运行罐、 收集罐、收缩扩张流道上游和下游处温度,分别标 记为 Tun 和 Tdown. 同时在流道下游段设置有涡轮流 量计 (Hoffer 流量控制公司, 范围为 1.3~13.2 L/min, 精度为±0.25%)用于检测采集液氮流速.用高速摄 像机 (Phantom Co, Inc.) 捕捉流动细节, 试验中高速 摄像机平行于观察窗放置在试验段一侧, LED 灯 (Larson Electronics LLC, 160 W-21600 流明) 平行于 观察窗放置在观察窗另一侧并与高速摄像机平行相



图 1 低温空化测试平台的总体示意图 (1.运行罐 2.试验段 3.涡轮流量计 4.收集罐 5.真空隔热层 6.高速相机 7.LED 灯 8.数据采集模块) Fig. 1 Schematic of cryogenic cavitation test rig (1. run tank 2. test section 3. turbine flowmeter 4. catch tank 5. vacuum insulation chamber 6. high

speed camera 7. LED lamp 8. data collection module)

#### 表1 低温试验台的整体运行参数[42]

#### Table 1 The overall operating parameters of the cryogenic cavitation test rig<sup>[42]</sup>

Pressure/Pa	Temperature/K	$Velocity/(m \cdot s^{-1})$	Cavitation number	Reynolds number/10 <sup>5</sup>
30 ~ 300	68 ~ 86	20	0.1 ~ 0.9	$0.6 \sim 2.6$





对,以确保光路的平行<sup>[42]</sup>.除此之外,高速摄像机配 有可变焦微距镜头,焦距聚焦于流道中间平面,根据 收缩扩张流道尺寸以及空穴长度将微距镜头的空间 采集像素设置为 384 × 80,采集频率设置为 200000 帧每秒,总采集时间为 1 s.

## 1.2 试验参数及条件

本文中液氮空化流动的强度由空化数σ和雷诺 数 Re 来表征<sup>[42]</sup>,分别定义为

$$\sigma = \frac{p_{\text{down}} - p_v T_{\text{throat}}}{0.5\rho_l U_{\text{throat}}^2} \tag{1}$$

$$Re = \frac{U_{\text{throat}}h}{v_l} \tag{2}$$

由于试验前收缩扩张流道上游温度 T<sub>up</sub>和下游温度 T<sub>down</sub>是十分接近的,收缩扩张流道喉口温度 T<sub>throat</sub>取 T<sub>up</sub>和 T<sub>down</sub>的平均值.上式中,U<sub>throat</sub>代表 收缩扩张流道喉咙处的速度;  $p_{down}$ 和 $p_v$ 分别为收缩 扩张流道下游静压和喉口温度  $T_{throat}$ 的饱和蒸汽压 力.  $\rho_l$ 和 $v_l$ 分别代表液氮的密度和运动黏度; h为喉 口高度, 取为 2 mm.

空化数σ不确定度和相对不确定度分别表示为

$$\Delta \sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta p_{\text{down}}}{0.5\rho_1 U_{\text{throat}}^2}\right)^2 + \left[\frac{2(p_{\text{down}} - p)\Delta U_{\text{throat}}}{0.5\rho_1 U_{\text{throat}}^3}\right]^2}$$
(3)

$$\Delta \sigma / \sigma = \sqrt{(\Delta p_{\rm down} / p_{\rm down})^2 + (2\Delta U_{\rm throat} / U_{\rm throat})^2} = 3.6\%$$
(4)

雷诺数 Re 不确定度和相对不确定度分别表示为

$$\Delta Re = \sqrt{(\Delta U_{\text{throat}} L_0 / \nu_1)^2 + (U_{\text{throat}} L_0 / \nu_1)^2}$$
(5)

力

报

$$\Delta Re/Re = \sqrt{\left(\Delta U_{\text{throat}}/U_{\text{throat}}\right)^2 + \left(\Delta L_0/L_0\right)^2} = 1\%$$
(6)

计算得到空化数  $\sigma$  和雷诺数 Re 的相对不确定 度分别为  $\pm 3.6\%$  和  $\pm 1\%$ .

# 1.3 图像后处理

当液氮在收缩扩张流道内发生空化时,空化区 域遮挡平行光路,空穴将以阴影呈现,由于流道宽度 较小,重叠效应可以忽略,二维阴影的变化基本代表 宏观流过程, 阴影部分越暗代表空化越严重. 为了从 时间和空间两个维度对液氮非定常空化流动的演化 过程进行定量分析,本文基于后处理程序[43] 对试验 图片进行灰度批处理.首先,通过 Imread 函数对一 系列实验图片进行批处理,读取出每个像素点的灰 度值. 然后, 利用 MidGrayPic 函数基于所得到的灰 度参数创建一个二维全零矩阵,用于储存每个像素 点的灰度值. 最终, 利用 Imwrite 函数将后处理的灰 度矩阵写入到图像文件中. 由高速摄像机拍摄的所 有试验图片都可以看作成一个 384 × 80 的二维矩 阵,矩阵元素为各自像素点的灰度值,数值范围为 0~255,0对应为黑色,255对应为白色,将本试验图 像进行批处理得到灰度值数值范围为 0~143.

图 3(a) 给出了高速摄像机拍摄得到的试验段无 空化图片, 灰色区域代表液氮无空化发生流动状态, 黑色阴影部分为收缩扩张流道上下壁面. 高速摄像 机捕捉到液氮空化图像如图 3(b) 所示, 一个附着型 空穴可以在图 3(b) 中观察到, 当液氮流过试验段喉 口处时, 由于速度急剧增加, 压力急剧降低, 当局部 压力降低到低于来流温度的饱和蒸汽压时, 就会发 生空化现象, 形成附着空穴并附着在扩张段流道下 壁面. 图 3(c) 展现了基于后处理程序<sup>[43]</sup> 得到的 1 s 内空穴的时均结构图, 图中蓝色实线为空穴外围 轮廓, 两条红线虚线之间的距离为空穴长度的时均 值, 左边的红色虚线位于喉咙的位置, 右侧红色虚线 的位置取决于空腔的轮廓线.

为了得到实际空穴面积,利用后处理程序<sup>[43]</sup>,将 原始试验图像背景处理为白色,同时对流道的无空 化区进行灰度处理,并且移除收缩扩张流道上下壁 面,得到只包含空穴的灰度图像.图4给出了典型液 氮空化流动可视化图像及图像处理步骤.为保证小 尺度空穴在后处理过程中不被过滤掉,经过多次的 验证最终选取灰度值等于100作为阈值,即当像素







图 4 典型液氮空化流动可视化图像及图像处理步骤 (黑色阴影为空穴) Fig. 4 Images of liquid nitrogen cavitation flow and image processing (black shadow is the cavity)

点的灰度值大于 100 时将该像素点的灰度值设定 为 255 即显示为白色,当像素点的灰度值小于 100 时该像素点的灰度值不变,通过计算流域内具有非 白色灰度值的像素点个数,再乘以像素点的空间分 辨率即可得到空穴的实际面积.

为将汽相体积分数通过灰度值归一化表征,将 图像灰度值表示为

1246

$$g(x,y) = \frac{G(x,y)}{255}$$
(7)

其中, *G*(*x*,*y*) 代表试验图片像素点 (*x*,*y*) 的灰度值, *G*(*x*,*y*) 数值范围为 0~143, *g*(*x*,*y*) 的数值范围为 0~ 0.56, *g*(*x*,*y*) 的值越小意味着汽相体积分数越高. 为 了进一步分析分离空穴的脱落机制与溃灭机理等非 定常特征,可以对某一时间段内的试验图片进行灰 度批处理,得到该工况下在选定直线上的灰度值随 时间与空间的分布. 图 5 展示了试验图像沿直线 Line1, Line2 与 Line3 的灰度分布得到的时空分布结 果. 选定三条线的起始位置均在喉口附近, Line1 紧 贴流道下壁面用于捕捉由逆压梯度产生的回射流; Line2 位于上、下壁面之间用于捕捉下附着空穴与 下脱落空穴; Line3 平行于上壁面用于捕捉上附着空 穴与上脱落空穴. 黑色虚线和红色折线图表示该工 况在 t<sub>0</sub> + 7.5 ms 时选定三条直线上的灰度值随时间 的变化, 可以观察到此时上下脱落空穴都处于分离 状态, 但靠近喉口的附着空穴保持相对稳定, 对每个 时刻进行相同的处理就能够得到时空分布的结果.





Fig. 5 Spatio-temporal processing results obtained by analyzing grayscale distribution along the selected three lines on the cavity image

# 2 结果与讨论

#### 2.1 液氮空化流动中典型的空化流型

图 6 展示了喉口温度 *T*<sub>throat</sub> ≈ 77 K 液氮空穴在 1 s 内的长度 *l*<sub>cavity</sub> 的时均值随空化数σ的变化. 其 中, 横坐标轴、纵坐标轴分别代表空化数与时均空 穴长度. 图中还包括了 Liang 等<sup>[31]</sup> 报道的 *T*<sub>throat</sub> ≈ 77 K 下收缩扩张管道内液氮空化流动的试验数据. 由图可知, 时均空穴长度随空化数的变化趋势和 Liang 等<sup>[31]</sup> 的试验结果基本一致, 从无空化流动向 有空化流动转变的临界空化数为 0.7. 当空化数在 0.3~0.7之间时,空穴长度随空化的降低缓慢增加. 当空化数小于 0.3 时,空穴长度随空化数的降低急剧 上升.根据空穴长度与脱落空穴演化过程将液氮空 化流动分成了四种典型的空化流型:初生空化、片 状空化、大尺度云状空化和双云状空化,分别用黄 色、蓝色、灰色以及绿色的实心点表示.同时,图中 给出了四种典型空化流型的时均结构图以及典型时 刻的空穴形态.对于初生空化,空穴长度最短,通常 在 2.5 h 以内;随空化数的降低,空化流动型态转变 为片状空化,空穴长度在 2.5 h~7.5 h之间;随空化 数的进一步降低,空化流动型态为大尺度云状空化,



图 6 空穴长度时均值随空化数  $\sigma$  的变化 ( $T_{throat} \approx 77$  K)

Fig. 6 The variations of time-averaged cavity lengths with cavitation number  $\sigma$  ( $T_{\text{throat}} \approx 77 \text{ K}$ )

#### 表 2 所选工况的试验条件与试验结果

Table 2	Experimental	conditions and	results in	n selected	cases
---------	--------------	----------------	------------	------------	-------

Case	Throat tempera- ture $T_{\text{throat}}/\text{K}$	Cavitation number $\sigma$	Reynolds number <i>Re</i> /10 <sup>5</sup>	Velocity $U_{\text{throat}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Up-stream pressure <i>p</i> <sub>up</sub> /kPa	Down-stream pressure p <sub>down</sub> /kPa	Vapor pressure $p_{\text{throat}}/\text{kPa}$	Time-averaged cavity lengths $l_{\text{cavity}}/h$	Time-averaged cavity area $S_{\text{cavity}}/h^2$
1	77.42	0.60	1.93	15.51	185.82	160.41	101.86	2.25	1.03
2	77.36	0.38	1.92	15.43	172.83	138.14	101.38	5.77	6.42
3	77.50	0.18	1.95	15.61	156.21	120.85	103.07	14.15	24.70
4	77.35	0.11	1.92	15.49	149.83	112.14	101.27	16.32	26.83

空穴长度在 7.5 h~15 h之间, 且相比于初生空化与 片状空化,大尺度云状空穴具有明显的回射流现象 和大尺度脱落空穴结构.初生空化、片状空化与大 尺度云状空化均只在流道扩张段下壁面产生空穴, 当流道上壁面发生空化并伴有空穴脱落时,空化流 动为双云状空化,空穴长度超过了15h.

本文选取了四个典型的试验工况 Case1~Case4 进行深入地对比分析,表2列出了所选四个工况 Case1~Case4的试验条件与试验结果. Case1~ Case4 分别代表了典型的初生空化、片状空化、大 尺度云状空化和双云状空化.同时, Case1~Case4的 雷诺数 Re 相似,约为  $1.57 \times 10^5$ ,空化数  $\sigma$ 分别为 0.58, 0.39, 0.18 以及 0.11, 试验中和温度有关的物质 属性参数均从 NIST 数据库得到<sup>[44]</sup>.

为了进一步分析不同空化数下液氮空穴的演化 过程,图7给出了Case1~Case4在一个准周期内液 氮空化的演化过程及流动细节,将一个周期平均分 为 6 个时刻, 时间间隔为  $0.2t_{cycle}$ , 起始时刻  $t_0$  的空 穴面积为该周期最小,需要注意的是对于不同工况

准周期的时间是不同的. Case1 瞬态试验图像如 图 7(a) 所示, to 时刻在喉口附近观察到空穴附着在 流道下壁面,表明空化已经发生. $t_0$  + 0.4 $t_{cycle}$  时刻附 着空穴开始增长并在空穴尾部伴有小尺度空穴的脱 落,在t0+0.6tcvcle时刻该小尺度空穴已经完全与附 着空穴分离.相比于 Case1, Case2 的整体空穴长度 增大,由表2可知,Case2附着空穴长度的时均值约 为 Case1 的 2.55 倍.  $t_0$  + 0.2 $t_{cvcle} \sim t_0$  + 0.8 $t_{cvcle}$  时刻给 出了一个空穴分离的演变过程,包含空穴的生长、 脱落和溃灭.对比图 8(b) 和图 8(c) 可知, Case3 与 Case2的空穴演变过程相似. 与 Case2 相比, Case3 空穴的整体长度增大,脱落空穴转变为大尺度 云状空穴. 空穴分离位置也更加远离喉口, 并在 to+ 0.4t<sub>cycle</sub> 时刻观察到空穴尾部与流道下壁面之间存在 一个明显的缝隙. 在  $t_0 + 0.6 t_{cvcle}$  时刻脱落空穴与附 着空穴完全分离,此时空穴面积达到最大值.

相比于 Case1 ~ Case3, Case4 的空化演化过程 存在明显的不同. 如图 7(d) 所示, 在流道扩张段上下 壁面同时形成了附着空穴,且在上下附着空穴尾部



图 7 一个准周期内空穴形态的演化过程 (Case1 ~ Case4, T<sub>throat</sub> ≈ 77 K)

Fig. 7 Evolution of cavitating flow during a quasi-cycle (Case1 ~ Case4,  $T_{\text{throat}} \approx 77 \text{ K}$ )



图 8 双云状空化中上附着空穴的演变过程 Fig. 8 Evolution of the upper attached cavity in double cloud cavity

都伴有空穴的脱落.为进一步探索双云状空化中上 附着空穴以及上下脱落空穴的形成机理及演变过 程,将t<sub>0</sub>~t<sub>0</sub>+0.2t<sub>evele</sub>等分成4份,图8列出了每个 时刻对应的试验图像. 图中蓝色实心箭头表示液氮 自由流方向;灰色实线表示流道下壁面;黄色虚线用 于跟踪上壁面空穴演变过程;红色虚线框内为上下 脱落空穴的演变过程. to 时刻, 在流道下壁面脱落空 穴与附着空穴分离后并未立即溃灭,该脱落空穴使 流通面积急剧减小,喉口流速增大使得上壁面附近 的液氮局部压力降低,在流道上壁面形成附着空穴, 该上附着空穴的初生位置位于下脱落空穴的后方.  $t_0 + 0.05 t_{\text{cycle}}$ 时刻,上附着空穴的尺度有所增大.  $t_0 +$ 0.1tcvcle 时刻,流道上下壁面同时产生脱落空穴.由于 近壁区域速度较低为低速区而主流区为高速区, 上、下脱落空穴分别沿逆时针和顺时针方向旋转.  $t_0 + 0.1 t_{\text{cycle}} \sim t_0 + 0.2 t_{\text{cycle}}$ 时刻展示了上、下脱落空 穴的形成、分离与溃灭过程.通过对上述四种空化 流动一个准周期内典型时刻的空化流型分析可以发 现,在 $t_0$ +0.6 $t_{cycle}$ 时刻左右空化面积达到一个周期

内的最大值. 这表明空化溃灭所需的时间要少于空 穴增长所需的时间. 值得注意的是, 在整个液氮非定 常空化流动周期内, 下附着空穴靠近喉口部分的核 心区域始终保持稳定状态, 并伴随着尾部空穴的分 离和溃灭现象, 这种非定常流动过程称之为部分脱 落模式, 此时空化流动的非定常特性主要取决于脱 落空穴的动态演化过程.

#### 2.2 液氮空化流动的非定常特性

为了定量分析液氮空化流动的非定常特性, 图 9 展示了 Case1 ~ Case4 空穴面积在 60 ms 内随 时间的演化过程及 FFT 频率分析结果. 图中空穴面 积随时间的发展沿其平均值线上下的波动,反映了 收缩扩张流道内液氮空化流动的准周期性演变特 征. 这种显著波动的准周期 t<sub>cycle</sub> 随空化数的降低而 增加,根据 FFT 频率分析 Case1 ~ Case4 的准周期分 别约为 1.62 ms, 3.16 ms, 4.00 ms 和 5.01 ms. 同时从 Case1 到 Case4, 空穴面积上下波动的最大幅值越来 越大. 相比于 Case1, Case2 中脱落空穴尺度较大,进 力





而空穴面积的波动幅值也相应增大.相比于 Case1 与 Case2, Case3 空穴面积的脉动幅值显著增大,约 为 12.5 h<sup>2</sup>. 尽管 Case3 与 Case4 的时均面积接近,但 是两种工况下液氮空化流动的演化过程存在显著不 同. Case4 的面积最大振幅为 Case3 的 1.6 倍,约为 20 h<sup>2</sup>,且 Case4 与 Case3 的面积脉动准周期 t<sub>cycle</sub> 明 显不同,意味着两种工况下的非定常空化特征存在 显著的差异,在 Case4 中堵塞效应已经对液氮空化 流动产生了严重的影响.

图 10 给出了空穴面积在 5 ms 内随时间的演变, 起始时刻 t<sub>0</sub> 与图 9 相对应.除此之外,为进一步验证 空化流动的非定常特性主要取决于云状空化的动态 演化过程,将 5 ms 等分成 20 份.图 11 展示了 t<sub>0</sub>~ t<sub>20</sub> 时刻分别对应的试验图像,图 11(a)~图 11(d)分别 代表初生空化、片状空化、大尺度云状空化以及双 云状空空化.图中彩色虚线用于跟踪脱落空穴的演 化过程;黄色虚线框用于观察图像中的回射流;白色 括号内的数字代表 5 ms 内附着空穴脱落的次序.

对于 Case1, 在 5 ms 内可以捕捉到 14 个附着空 穴分离脱落的演化过程,单个周期平均约为 0.39 ms, 相邻两周期的时间间隔平均约为 0.35 ms. 由于一个 周期还未结束而下一周期已经开始,一个完整的空 穴脱落周期引起的面积脉动并不能与图 11 完全对 应,但仍然可以在典型时刻相对应.具体来说,空穴 面积最大值出现在第⑩、第⑪、第⑫演化过程中某 一中间时刻(t14~t15, t15~t16, t17~t18), 面积最小值出 现在第⑦、第⑨演化过程的结束时刻(t11, t14). 值得 注意的是,在14个脱落空穴演化过程中附着空穴始 终保持稳定.相比于 Case1,在5 ms 内捕捉到了8个 附着空穴分离脱落的演化过程,单个演化周期和相 邻两周期的时间间隔均有所增加,分别平均约为 0.91 ms 和 0.57 ms. 同时, Case2 中附着空穴的整体 尺度有所增大但在脱落空穴演化过程中仍始终保持 稳定. 从图像中可以观察到 Case1 与 Case2 空穴界 面较为清晰,这是由于脱落空穴尺度小、分离后立 即溃灭. 对于 Case3, 附着空穴的整体尺寸进一步增 大,在5ms内只能捕捉到4个附着空穴分离脱落的 演化过程,其中第②、第③演化过程展为一个完整





Fig. 10 Temporal evolution of cavity area during a period of 5 ms (the starting moment  $t_1$  is the  $t_0 + 12.5$  ms moment in Fig. 9)



图 11  $t_0 \sim t_{20}$  时刻分别对应的瞬态空穴图像 (Casel ~ Case4) Fig. 11 The transient cavity images corresponding to the moments  $t_0 \sim t_{20}$  respectively (Casel ~ Case4)

的周期,包含了脱落空穴的形成、分离与溃灭,单个 演化周期平均约为 2.75 ms,相邻两周期的时间间隔 平均约为 1.63 ms.且相比于 Case1 与 Case2, Case3 中脱落的脱落空穴尺度较大、溃灭时间变长, 使得脱落空穴的汽液界面较为模糊同时图 10 中 Case3 的面积曲线也更加平缓.除此之外,第②、第 ③演化过程中分离的大尺度脱落空穴改变了喉口下 游处的流通面积,降低了了当地流速,抑制了空化的 发展,导致第④演化过程空穴的整体尺度有所减小, 但附着空穴靠近喉口的核心部分仍然保持稳定.因 此,图 9 中 Case3 的空穴面积脉动的幅值更大.除此 之外,在 t<sub>1</sub>~t<sub>7</sub> 时刻黄色虚线框内观察到沿流道下 壁面向上游推进的回射流,该回射流向上游推进并 最终导致空穴的脱落,但并未观察到回射流推进到 喉口处.

对于 Case4, 在图 12(d) 中观察到了两种空穴脱 落机制 Mode I 与 Mode II, 分别用单线和双线表示. 在 Mode I 发展过程中, 上附着空穴尺度较小, 并未 对下附着空穴脱落造成较大的影响, 下附着脱落空 穴的演变过程与 Case3 相似,但 Mode I 中脱落空穴 的整体尺度进一步增大,单个周期达到 3.25 ms. 与 此同时,该脱落空穴使堵塞效应加强,上附着空穴的 长度和厚度均增加,上空穴尺度也相应变大,而下附 着空穴收到抑制,脱落方式转变为 Mode II. 在 Mode II 发展过程中,在5ms内捕捉到3个演化过 程,其中第①、第②演化过程展为一个完整的周期, 单个周期平均约为 2.25 ms, 相邻两周期的时间间隔 平均约为 0.88 ms, 且在 t<sub>2</sub>~t<sub>5</sub>, t<sub>16</sub>~t<sub>20</sub> 时刻黄色虚线 框内均观察到回射流,综上所述,部分脱落模式中下 壁面的附着空穴始终保持稳定脱落空穴的动态演化 过程主导了液氮空化流动的非定常特性.且随着空 化数的降低:(1) 空穴面积脉动的准周期越来越长; (2) 附着空穴的整体尺度和脱落空穴的尺度均逐渐 增大;(3)堵塞效应对空化流动的影响逐渐增强;(4)空 穴面积波动幅值越来越大.

#### 2.3 液氮空化流动的时空演变特征

为了从时间和空间两个维度对液氮不同阶段的 空化流动进行定量分析,图 12展示了 Case1~



图 12 选定三条直线上灰度强度在 30 ms 内的时空分布

Fig. 12 Spatio-temporal processing results obtained by analyzing grayscale distribution along the selected three lines on the cavity image during 30 ms

Case4 的空穴沿三条典型位置直线上的归一化灰度 值随时间与空间的分布,三条线的位置已在1.3节中 具体说明, 总采集时间为 30 ms, 起始时间 t<sub>0</sub> 与图 9 保持一致,喉口位置如黑色虚线箭头所示.时空分布

图的红色区域表征体积分数较大的空化区域,由于 溃灭的影响,脱落空穴的气相体积分数远小于附着 空穴的气相体积分数.图 12 中黑色和黄色虚线框代 表一次完整的空化发展过程, 白色与黑色实心点分

学 学 报

别为上下空穴分离点. 在之前的试验图像中可以观 察到,当流道下壁面的空穴造成严重阻塞时,流道上 壁面也会生成附着空穴、Case4 中 Line3 清晰地捕捉 到了此现象,且上附着空穴的初始生长位置始终位 于从下壁面脱落空穴的后方. 由图可知, Line1 并未 在 Case1 与 Case2 捕捉到明显的回射流. 在 Case2 中附着空穴更长, 空穴分离点也更加远离喉 口. 对于 Case3, Line1 捕捉到了显著的回射流, 回射 流向上游发展到距离喉口 14 mm 左右时,引起尾部 空化脱落形成云状空化. 对于 Case4, 30 ms 内在捕 捉到两种脱落机制 Mode I 与 Mode II, 分别用黑色 虚线和黄色虚线表示. 对于 Mode I, Line2 可以捕 捉到一个下空穴开始与附着空穴分离,而在同一时 刻 Line3 捕捉到一个上附着空穴开始增长; 对于 Mode II, 在同一时刻 Line2 与 Line3 都分别捕捉到 脱落空穴与附着空穴发生分离.由于脱落空穴溃灭 时间进一步增长分离后溃灭为更多的小尺度空泡, 空穴界面变得更加模糊,加上空泡的重叠效应, Linel 无法清晰地捕捉到向上游推进的回射流. 然 而,在某些时刻 Line1 仍然可以观察到回射流的运 动.同时可以观察到, Mode I 与 Mode II 的下脱落空 穴分离点与喉口距离分别约为 17.5 mm 和 21 mm, 因此, Mode I 中回射流向上游推进的更远, 回射流 强度更大.

图 12 中黑色虚线框代表脱落空穴分离后的溃 灭过程. 将脱落空穴与附着空穴分离到完全溃灭的 时间定义为溃灭时间用  $\Delta t_{ci}$ 表示,在  $\Delta t_{ci}$ 内脱落空 穴沿 x 轴的移动距离为  $\Delta x_{ci}$ ,则脱落空穴沿 x 轴的平 均移动速度 $\Delta \bar{\nu}_{ci}$ 定义为

$$\Delta \overline{v}_{ci} = \frac{\Delta x_{ci}}{\Delta t_{ci}} \tag{8}$$

图 13 给出了统计与计算的结果, 脱落空穴沿 x 轴的移动距离  $\Delta x_{ci}$ 、运动时间  $\Delta t_{ci}$  以及平均移动 速度 $\Delta v_{ci}$ 分别用黑色、红色、蓝色散点表示,  $i=1\sim4$ 分别代表 Case1 ~ Case4, 用 4', 4"分别代表 Case4 中 两种脱落机制 Mode I 与 Mode II. 对于 Case1 ~ Case3, 脱落空穴沿 x 轴的平均移动速度  $\Delta v_{ci}$  逐渐 减小,  $\Delta v_{c1}$ ,  $\Delta v_{c2}$ ,  $\Delta v_{c3}$  分别约为 11.59 m/s, 10.47 m/s 与 9.23 m/s. 相比于 Case1 ~ Case3, Case4两种空穴脱 落模式 Mode I 和 Mode II 的脱落空穴沿 x 轴的平 均移动速度  $\Delta v_{c4'}$  与 $\Delta v_{c4''}$  进一步减小, 分别约为 8.16 m/s, 7.57 m/s, 则 Case4 脱落空穴沿 x 轴的平均



图 13 脱落空穴沿 x 轴的移动距离  $\Delta x_{ci}$ 、运动时间  $\Delta t_{ci}$  以及平均移 动速度 $\Delta v_{ci}$  随空化数的分布 ( $i = 1 \sim 4$  分别代表 Case1 ~ Case4, 用 4', 4"分别代表 Case4 中两种脱落机制 Mode I 与 Mode II)

Fig. 13 Distribution of the distance, the movement time and the average movement velocity of detaching cavities moving along the x-axis with cavitation number ( $i = 1 \sim 4$  represent Case1 ~ Case4 respectively, 4' and 4" are used to represent the two shedding mechanisms Mode I and Mode II in Case4, respectively)

移动速度Δν<sub>c4</sub> 为 7.865 m/s. 由图 13 可知, 虽然 Mode I 和 Mode II 脱落空穴溃灭时间接近, Δt<sub>c4</sub>, Δt<sub>c4</sub>,分别平均约为 1.86 ms 与 1.83 ms, 但是 Mode I 脱落空穴沿 x 轴的移动距离比 Mode II 更远, Δx<sub>c4</sub>, Δx<sub>c4</sub>,分别平均约为 15.18 mm 与 13.85 mm. 因此, 相 比于 Mode II, 在 Mode I 发展过程脱落空穴沿 x 轴 的移动速度更快. 综上所述, 从初生空化到双云状空 化, 脱落空穴的移动距离和溃灭时间均逐渐增加, 但 溃灭速度越来越小. 相比于初生空化, 片状空化、大 尺度云状空化以及双云状空化中脱落空穴的移动距 离依次增加了 0.97 倍、2.65 倍与 2.68 倍, 溃灭时间 依次增加了 1.18 倍、3.59 倍与 4.47 倍, 但溃灭速度 依次减小了 0.10 倍、0.20 倍与 0.30 倍.

图 14 展示了不同空化数下收缩扩张管内液氮 空化流动的演化过程. 图中蓝色实心箭头表示自由 流方向, 灰色阴影表示附着空穴与云状空, 穴阴影中 的圆圈表示空穴内的小气泡, 两条黄色虚线之间为 脱落空穴的演变过程, 绿色坐标轴表示脱落空穴速 度方向. 脱落空穴漩涡运动显著, 旋转方向用蓝色或 红色箭头表示. 在附着空穴分离、生长和溃灭过程 中, 附着空穴靠近喉口的核心部分始终保持稳定. 图 14(a)~图 14(d) 分别代表初生空化、片状空化、 大尺度云状空化以及双云状空化. 从初生空化到双 云状空化, 脱落空穴沿 x 轴的平均移动速度 Δν<sub>ci</sub> 逐 渐减小.



图 14 不同空化流型中脱落空穴脱落的演化过程 Fig. 14 Shedding process and mechanism of cloudy cavity in different cavitation flow patterns

具体来说,对于初生空化和片状空化,脱落空穴 界面清晰、空穴尺度小且溃灭时间短.但在空穴尾部 没有出现显著的回射流现象.对于大尺度云状空化, 回射流是脱落空穴发生分离的主要诱导因素.由于 脱落空穴尺度较大且溃灭时间较长,空穴的汽液界 面变得模糊.对于双云状空化,流道上下壁面同时产 生附着空穴,存在两种脱落空穴演化机制 Mode I 与 Mode II.在 Mode I 发展过程中,上附着空穴尺 度较小并未对下空穴脱落产生影响,脱落空穴的演 化过程基本与大尺度云状空化保持一致.相比于 Mode I,Mode II上附着空穴增大,下附着空穴受到 抑制,回射流强度减弱,上下同时产生旋向相反的脱 落空穴,二者在向下游发展的过程中发生分离与溃灭.

#### 3 结论

本文通过试验研究了收缩-扩展管道内的液氮 空化流动的演化过程.采用试验的方法研究了宽范 围自由流条件下液氮空化流动的非定常特征.深入 对比分析了不同空化流型的空穴结构,讨论了不同 空化流型非定常特性的演变规律,以及脱落空穴的 非定常发展过程,尤其重点关注了双云状空化阶段 的空化发展及其空穴脱落过程,得到的主要结论如下. (1) 液氮非定常流动过程为部分脱落模式,即在整个液氮非定常空化流动周期内,下附着空穴靠近 喉口部分的核心区域始终保持稳定状态,并伴随着 尾部空穴的分离与溃灭.根据空穴长度和非定常脱 落特性将液氮空化流动分成了四种典型的空化流 型:初生空化、片状空化、大尺度云状空化与双云 状空化.其中,初生空化空穴长度最短,通常在2.5*h* 以内;大尺度脱落空穴阶空穴长度在7.5*h*~15*h* 之间,此时回射流成为了脱落空穴发生分离的主要 诱导因素.对于双云状空化,流道上下壁面同时发生 空化,并伴有上下空穴脱落,空穴长度超过了15*h*.

(2) 从初生空化到双云状空化, 液氮空化流动的 空穴面积脉动的准周期越来越长. 空化流动的非定 常特性主要取决于尾部脱落空化的动态演化过程. 同时,随着空化数的降低, 脱落空穴的尺度逐渐增大, 堵塞效应对空化流动的影响逐渐增强, 导致空穴面 积波动幅值越来越大, 脱落空穴的汽液界面也变得 模糊.

(3) 从初生空化到双云状空化, 脱落空穴的移动 距离和溃灭时间均逐渐增加, 但溃灭速度越来越小. 相比于初生空化, 片状空化、大尺度云状空化以及 双云状空化中脱落空穴的移动距离依次增加了 0.97 倍、2.65 倍与 2.68 倍, 溃灭时间依次增加了 1.18 倍、3.59 倍与 4.47 倍, 但溃灭速度依次减小了 0.10 倍、0.20 倍与 0.30 倍. 在大尺度云状空化与双 云状空化中均捕捉到回射流现象. 对于双云状空 化, 存在两种明显不同空穴脱落机制 Mode I 与 Mode II. 在 Mode I 发展过程中, 上附着空穴尺度较 小并未对下空穴脱落产生影响, 脱落空穴的演化过 程基本与大尺度云状空化保持一致. 在 Mode II 发展 过程中, 上附着空穴的整体尺寸有所增大, 下附着空 穴尾部的回射流强度减弱, 上下壁面同时产生旋向 相反的脱落空穴.

#### 参考文献

- 1 Brennen CE. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford: Oxford University Press, 1995
- 2 黄彪, 樊亚丁, 梁文栋等. 诱导轮液氧空化热力学效应数值计算研究. 北京理工大学学报, 2021, 41(1): 53-58 (Huang Biao, Fan Yading, Liang Wengdong, et al. Numerical study on thermodynamic effect of the inducer cavitation in liquid oxygen. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(1): 53-58 (in Chinese))
- 3 季斌,程怀玉,黄彪等.空化水动力学非定常特性研究进展及展

#### 第5期

望. 力学进展, 2019, 49: 201906 (Ji Bin, Cheng Huaiyu, Huang Biao, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation. *Advances in Mechanics*, 2019, 49: 201906 (in Chinese))

- 4 谢庆墨,陈亮,张桂勇等. 基于动力学模态分解法的绕水翼非定常 空化流场演化分析.力学学报,2020,52(4): 1045-1054 (Xie Qingmo, Chen Liang, Zhang Guiyong, et al. Analysis of unsteady cavitation flow over hydrofoil based on dynamic mode decomposition. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(4): 1045-1054 (in Chinese))
- 5 王一伟, 黄晨光. 高速航行体水下发射水动力学研究进展. 力学进展, 2018, 48: 259-298 (Wang Yiwei, Huang Chenguang. Research progress on hydrodynamics of high speed vehicles in the underwater launching process. *Advances in Mechanics*, 2018, 48: 259-298 (in Chinese))
- 6 Wu W, Liu YL, Zhang AM, et al. Numerical investigation on underwater explosion cavitation characteristics near water wave. *Ocean Engineering*, 2020, 205: 107321
- 7 吴钦, 郭一梦, 刘韵晴等. 非定常空化流动及其诱导振动特性研究 综述. 空气动力学学报, 2020, 38(4): 746-760 (Wu Qin, Guo Yimeng, Liu Yunqing, et al. Review on the cavitating flow-induced vibrations. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(4): 746-760 (in Chinese))
- 8 王巍,张庆典,唐滔等.射流对绕水翼云空化流动抑制机理研究. 力学学报,2020,52(1): 12-23 (Wang Wei, Zhang Qingdian, Tang Tao, et al. Mechanism investigation of water injection on suppressing hydrofoil cloud cavitation flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(1): 12-23 (in Chinese))
- 9 王春民,张晓光,高玉闪等. 液氧煤油补燃发动机起动过程氧预压 泵加速起旋方案研究. 推进技术, 2020, 41(7): 1441-1448 (Wang Chunmin, Zhang Xiaoguang, Gao Yushan, et al. Investigation on schemes for accelerating oxidizer boost pump during start-up of LOX/kerosene staged combustion rocket engine. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(7): 1441-1448 (in Chinese))
- 10 王一伟, 黄晨光, 杜特专等. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理 分析. 力学学报, 2012, 44(1): 39-48 (Wang Yiwei, Huang Chenguang, Du Tezhuan, et al. Mechanism analysis about cavitation collapse load of underwater vehicles in a vertical launching process. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(1): 39-48 (in Chinese))
- 11 王畅畅,王国玉,黄彪. 空化可压缩流动空穴溃灭激波特性研究. 力学学报, 2018, 50(5): 990-1002 (Wang Changchang, Wang Guoyu, Huang Biao. Numerical simulation of shock wave dynamics in transient turbulent cavitating flows. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(5): 990-1002 (in Chinese))
- 12 程怀玉,季斌,龙新平等. 空化对叶顶间隙泄漏涡演变特性及特征 参数影响的大涡模拟研究. 力学学报, 2021, 53(5): 1268-1287 (Cheng Huaiyu, Ji Bin, Long Xinping, et al. LES investigation on the influence of cavitation on the evolution and characteristics of tip leakage vortex. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(5): 1268-1287 (in Chinese))
- 13 Li DY, Ren ZP, Li Y, et al. Thermodynamic effects on the cavitation flow of a liquid oxygen turbopump. *Cryogenics*, 2021, 116:

103302

- 14 Liu YY, Li XJ, Ge MH, et al. Numerical investigation of transient liquid nitrogen cavitating flows with special emphasis on force evolution and entropy features. *Cryogenics*, 2021, 113: 103225
- 15 Zheng ZY, Wang L, Wei TZ, et al. Experimental investigation of temperature effect on hydrodynamic characteristics of natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination. *Renewable Energy*, 2021, 174: 278-292
- 16 Liang WD, Chen TR, Wang GY, et al. Investigation of unsteady liquid nitrogen cavitating flows with special emphasis on the vortex structures using mode decomposition methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157: 119880
- 17 Li XJ, Shen TJ, Li PC, et al. Extended compressible thermal cavitation model for the numerical simulation of cryogenic cavitating flow. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(16): 10104-10118
- 18 Murakami M, Harada K. Experimental study of thermo-fluid dynamic effect in He II cavitating flow. *Cryogenics*, 2012, 52(11): 620-628
- 19 Chen TR, Mu ZD, Huang B, et al. Dynamic instability analysis of cavitating flow with liquid nitrogen in a converging-diverging nozzle. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 116870
- 20 Sarosdy L, Acosta A. Note on observations of cavitation in different fluids. *Transactions of the ASME*, 1961, 83(3): 399-400
- 21 Franc JP, Janson E, Morel P, et al. Visualizations of leading edge cavitation in an inducer at different temperatures//4th International Symposium on Cavitation, CAV2001, Pasadena, CA, June 20-23, 2001
- 22 Franc JP, Rebattet C, Coulon A. An experimental investigation of thermal effects in a cavitating inducer. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(5): 716-723
- 23 Cervone A, Testat R, Bramanti CL, et al. Thermal effects on cavitation instabilities in helical inducers. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(5): 893-899
- 24 Watanabe M, Nagaura K, Hasegawa S, et al. Direct visualization for cavitating inducer in cryogenic flow//JAXA Research and Development Memorandum, Report No. JAXA-RM-09-010, 2010
- 25 Yoshida Y, Kikuta K, Hasegawa S, et al. Thermodynamic effect on a cavitating inducer in liquid nitrogen. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 129(3): 273-278
- 26 Kikuta K, Yoshida Y, Hashimoto T, et al. Influence of rotational speed on thermodynamic effect in a cavitating inducer//ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. American Society of Mechanical Engineers, 2009: 77-83
- 27 Yoshida Y, Sasao Y, Watanabe M, et al. Thermodynamic effect on rotating cavitation in an inducer. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 2009, 131(9): 091302
- 28 Ito Y, Tsunoda A, Kurishita Y, et al. Experimental visualization of cryogenic backflow vortex cavitation with thermodynamic effects. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(1): 71-82
- 29 项乐,陈晖,谭永华等.液体火箭发动机诱导轮空化热力学效应研究.推进技术,2020,41(4):812-819 (Xiang Le, Chen Hui, Tan Yonghua, et al. Study of cavitation thermodynamic effect of liquid rocket engine inducer. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(4):812-819 (in Chinese))

报

力

- 30 Wei AB, Yu LY, Gao R, et al. Unsteady cloud cavitation mechanisms of liquid nitrogen in convergent-divergent nozzle. *Physics of Fluids*, 2021, 33: 092116
- 31 Liang WD, Chen TR, Wang GY, et al. Experimental investigations on transient dynamics of cryogenic cavitating flows under different free-stream conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 178: 121537
- 32 Hord J. Cavitation in liquid cryogens. II–hydrofoil, NASA Contractor Report, NASA CR-2156, 1973
- 33 Hord J. Cavitation in liquid cryogens. III-ogives, NASA Contractor Report, NASA CR-2242, 1973
- 34 Gustavsson JPR, Denning KC, Segal C. Hydrofoil cavitation under strong thermodynamic effect. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130: 091303
- 35 Dular M, Coutier-Delgosha O. Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 736: 44-66
- 36 Petkovšek M, Dular M. IR measurements of the thermodynamic effects in cavitating flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44: 756-763
- 37 Petkovšek M, Dular M. Observing the thermodynamic effects in cavitating flow by IR thermography. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 88: 450-460

- 38 Zhu JK, Xie HJ, Feng KS, et al. Unsteady cavitation characteristics of liquid nitrogen flows through venturi tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 544-552
- 39 Zhu JK, Wang SH, Zhang XB. Influences of thermal effects on cavitation dynamics in liquid nitrogen through venturi tube. *Physics* of *Fluids*, 2020, 32: 012105
- 40 Ge M, Petkovsek M, Zhang G, et al. Cavitation dynamics and thermodynamic effects at elevated temperatures in a small Venturi channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 170: 120970
- 41 Ohira K, Nakayama T, Nagai T. Cavitation flow instability of subcooled liquid nitrogen in converging-diverging nozzles. *Cryogenics*, 2012, 52(1): 35-44
- 42 Chen TR, Chen H, Liang WD, et al. Experimental investigation of liquid nitrogen cavitating flows in converging-diverging nozzle with special emphasis on thermal transition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 132: 618-630
- 43 Huang B, Young YL. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation. *Journal* of *Fluids Engineering*, 2013, 135(7): 071301
- 44 Refprop N. Reference fluid thermodynamic and transport properties. NIST Reference Database. Version 2013: 9