

液氮在突扩微间隙内空化流动的实验研究

王桢¹, 颜少航¹, 高宇卓¹, 崔振浩¹, 赖天伟^{1,2}, 侯予^{1,2}

(1. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学深低温技术与装备教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对螺旋槽液体自润滑轴承微间隙内的结构突变易引发空化效应,进而影响自润滑流体流动特性的问题,搭建了突扩微间隙低温热敏介质空化流动可视化实验系统,旨在揭示突扩结构对低温空化流动机制的影响。通过实验研究分析了背压、来流压力和间隙高度对突扩微间隙内,液氮空化形态演变和温度压力特性的影响。研究表明:无量纲背压的降低、无量纲来流压力的增大以及无量纲间隙高度的减小均会增强空化效应。其中,无量纲背压由 0.758 降至 0.694 可使空化区域的面积、压力降幅与温度降幅分别增加 39%、14%和 17%;无量纲来流压力由 1.048 升至 1.371 可使空化区域的面积、压力降幅和温度降幅分别增加 135%、77%和 61%;无量纲间隙高度由 3.0 降至 1.8 可使空化区域的压力和温度降幅分别提高 96%和 22%。压降、温降及空化长度随来流空化数的上升而减小。该研究所获得的突扩微间隙空化流动规律可为低温流体自润滑动压轴承的优化设计提供理论依据。

关键词: 液氮;空化流动;动压轴承;突扩微间隙

中图分类号: TB655 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202610018 **文章编号:** 0253-987X(2026)10-0209-11

Experimental Investigation of Cavitating Flow of Liquid Nitrogen in a Sudden Expansion Micro-Clearance

WANG Zhen¹, YAN Shaohang¹, GAO Yuzhuo¹, CUI Zhenhao¹, LAI Tianwei^{1,2}, HOU Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment of Ministry of Education,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the issue that structural discontinuities within the micro-clearance of spiral-grooved liquid self-lubricating bearings readily induce cavitation and consequently affect the flow characteristics of the self-lubricating fluid, a visualized experimental system for the cavitating flow of a cryogenic thermosensitive medium in a sudden expansion micro-clearance was established to reveal the influence mechanism of the sudden expansion structure on cryogenic cavitating flow. Through experimental investigations, the effects of back pressure, inlet pressure, and clearance height on the morphological evolution and temperature and pressure characteristics of liquid nitrogen cavitation in the sudden expansion micro-clearance were analyzed. The results indicate that the cavitation effect is enhanced by a decrease in dimensionless back pressure, an increase in

收稿日期: 2026-01-14。 作者简介: 王桢(2001—),男,硕士生;赖天伟(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976150)。

网络出版时间: 2026-05-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260509.0927.002>

dimensionless inlet pressure, and a reduction in dimensionless clearance height. Specifically, when the dimensionless back pressure is reduced from 0.758 to 0.694, the cavitation area, pressure drop, and temperature drop in the cavitation area are increased by 39%, 14%, and 17%, respectively. When the dimensionless inlet pressure is increased from 1.048 to 1.371, the cavitation area, pressure drop, and temperature drop are increased by 135%, 77%, and 61%, respectively. Furthermore, when the dimensionless clearance height is decreased from 3.0 to 1.8, the pressure drop and temperature drop in the cavitation area are increased by 96% and 22%, respectively. Additionally, the pressure drop, temperature drop, and cavitation length are decreased with an increase in the inlet cavitation number. A theoretical basis for the optimal design of cryogenic fluid self-lubricating hydrodynamic bearings is provided by the cavitating flow laws in the sudden expansion micro-clearance obtained in this study.

Keywords: liquid nitrogen; cavitating flow; hydrodynamic bearing; sudden expansion micro-clearance

近年来,低温流体在航空航天^[1]、新型清洁能源以及超导技术等领域得到了日益广泛的应用^[2-3],对低温工质的快速、大流量输运需求随之不断增加^[4]。浸没式低温高速离心泵因具备较高的能量密度和良好的低温适应性,已成为低温工质输运的关键装备。

在此类离心泵中,螺旋槽液体自润滑轴承的液力悬浮技术被广泛应用于高速转子支承^[5-7],其结构如图1(a)。其中,螺旋槽轴承表面通常划分为槽区、台区与坝区。由图1(b)可知,其工作机理在于:槽区和台区通过相对运动产生的黏性泵吸作用,将流体吸入并向高压侧输送。随着螺旋槽几何尺寸的收缩,流道截面积减小,流体将动能转化为压力能,

从而在槽区与台区之间形成压力梯度,实现抽吸与初步增压;坝区则利用窄间隙节流效应阻挡流体泄漏,使压力在坝前达到峰值并维持高压流体膜,从而实现蓄压与密封承载^[8-10]。同时,液膜的厚度与转速、载荷以及流场压力有关。这种液膜能够有效分隔转子与轴承,实现无接触支承和高速旋转。同时,由于螺旋槽能够持续抽液并维持压力梯度,该类轴承无需额外供液泵即可保持稳定运行,具备典型的自润滑特性。这种刚性表面轴承微间隙内,槽-台区的交替出现,造成了几何结构突变形成的突扩微间隙的存在,如图1(c)所示。图1(b)和1(c)中,B为断面标识。

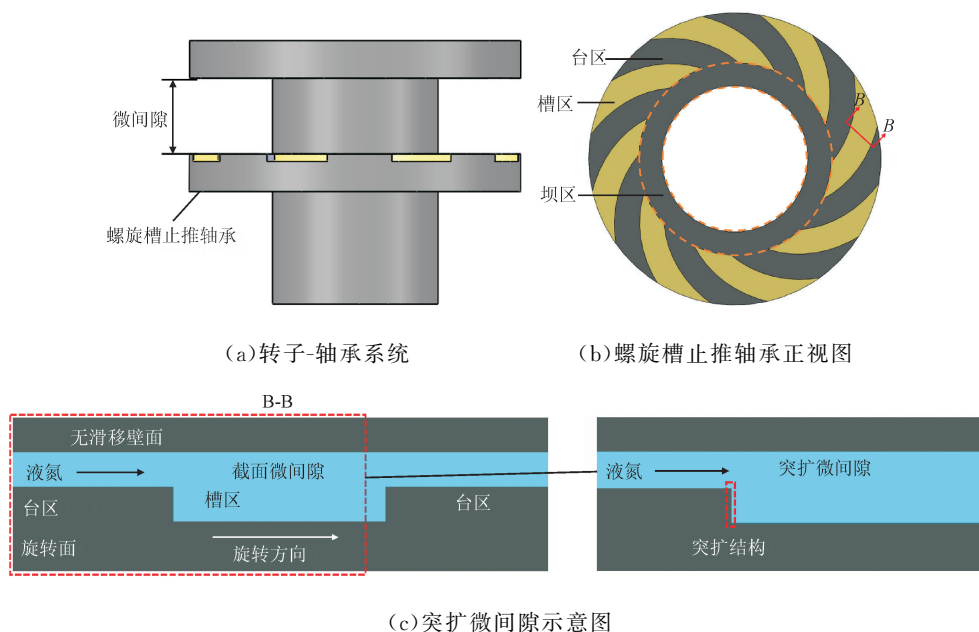


图1 螺旋槽止推轴承及突扩微间隙结构

Fig. 1 Structure of spiral-grooved thrust bearings and stepped micro-clearance

突扩处流通面积的突增导致的局部压力的降低,极易诱发空化现象。空化气泡在生成与溃灭过程中释放的微射流与冲击波不仅会导致轴承表面的侵蚀^[11],对于低温近饱和自润滑流体还会伴随有较强的热力学效应,且会扰乱自润滑流体的温度和压力分布,破坏动压润滑流体的稳定性,严重时甚至引发轴承的失效^[12]。因此,从产生空化的几何突扩结构出发,研究空化相变区域形态和演变,以及空化区域温度和压力分布的影响规律,有利于提升低温自润滑高速轴承的可靠性。

受限空间内的气泡演化过程与非受限流场存在显著差异^[13]。在壁面约束作用下,气泡的形态、生长与溃灭行为均表现出与在自由空间内不同的特征。Gonzalez-Avila 等^[14]发现,当微间隙高度较大时,气泡破裂时受壁面影响较弱,而在更小间隙下,气泡破裂时间相对膨胀时间显著延长。Sun^[15]等利用高速摄影观察了不同直径微管中的气泡演化过程,并发现气泡在初期球形膨胀后,会因受限而沿轴向优先生长。Yang 等^[16]研究了轴流泵顶部间隙对气蚀特性的影响,并指出间隙的增大会减小气泡的体积。Dai 等^[17]通过实验,研究了气泡流经缩径等限域结构的破裂行为,发现微通道尺寸、毛细管数会直接影响破裂结果。秦思宇等^[18]通过实验发现,在空间高度为 10 mm 的受限蒸气腔内,气泡的行为与高度为 50 mm 时的相比存在较大差异。上述结果均表明,受限空间几何特征对空化行为具有关键作用。

此外,低温工质的热物性参数与常温工质存在显著差异,其空化阈值更低,在动压作用下,局部几何突变处更容易诱发强烈的空化^[19]。针对低温微间隙空化行为,已有学者开展了多方面探索。Reinke 等^[20]在微间隙内的库埃特型流实验中发现,大尺寸气泡的演化行为显著受限于壁面效应。空化过程中的热效应在空化流动中不仅能够改变流体的物理化学性质,还会影响气泡的动力学行为^[21-22]。初凯新^[23]建立了适用于不同尺度并考虑热效应的低温空化数值计算方法,发现微尺度下,低温空穴在垂直于流动方向上的发展会明显受到流道壁面的限制,且会形成明显的负压区。颜少航等^[24]提出了考虑热力学效应、湍流以及表面张力影响的改进空化模型,并将其应用于螺旋槽止推轴承的数值模拟,其结果表明,空化热效应对轴承性能影响显著。此外,该团队还搭建了微间隙工质空化的可视化实验平台,研究了 R134a 在不同进出口压差、过冷度及来流速

度下的空化特征^[25]。

尽管已有研究揭示了低温工质在受限空间内空化行为的一些规律,但轴承表面开槽所引入的局部突扩结构对空化流动的具体作用机制尚不清晰。因此,本文搭建了突扩微间隙低温介质空化流动可视化实验系统,重点分析在不同背压、入口压力和间隙高度条件下,近饱和液氮在可视化突扩微间隙内的空化流动行为及其作用机理。研究结果可为低温液体自润滑动压轴承的优化设计与可靠性提升提供理论依据。

1 实验平台

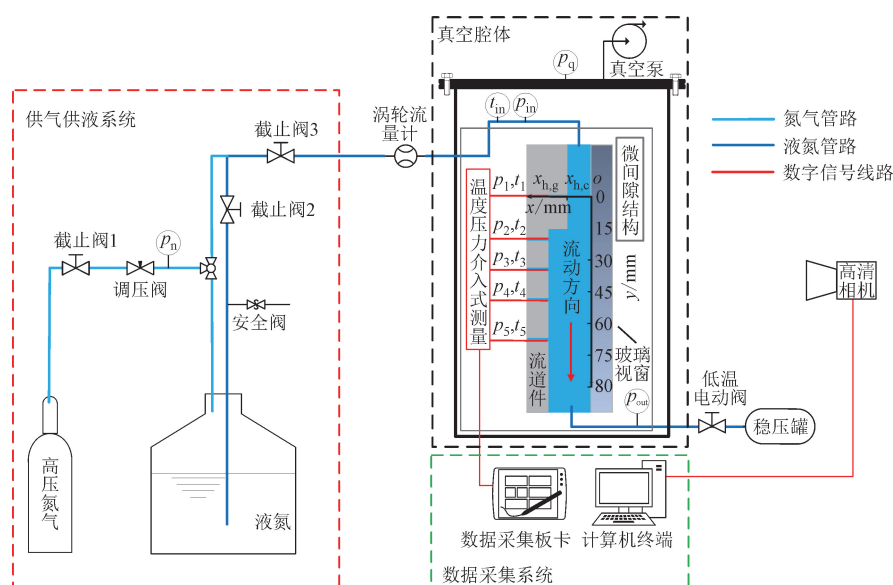
1.1 实验平台

根据止推轴承开槽区域的微间隙突扩位置的结构特点,设计了突扩微间隙低温介质空化流动的可视化实验系统,选取近饱和液氮作为实验工质进行空化实验。实验平台由包含可视化微间隙结构的真空腔体、供气供液系统和数据采集系统组成,其结构如图 2(a)所示。图中, p_n 为调压阀阀后压力; p_q 为真空腔体内部压力; t_{in} 为来流温度; p_{in} 为来流压力; p_{out} 为背压; $x_{h,c}$ 为突扩前间隙高度; $x_{h,g}$ 为突扩后间隙高度; $t_1 \sim t_5$ 、 $p_1 \sim p_5$ 分别为微间隙内空化流道流向沿程 5 个测点的温度、压力; x 为微间隙高度方向; y 为流道流向。由图可知,微间隙内,液氮的供应和来流压力的调节由供气供液系统实现,并通过三通阀在实验开始后依次实现吹扫、预冷降温 and 实验流动 3 种功能。背压通过低温电动阀调节,间隙高度通过调节支撑的 0.1 mm 厚的铜箔数调节。 p_{in} 的范围为 0.65~0.85 MPa;背压 p_{out} 的范围为 0.43~0.47 MPa;在分析单一压力参数的影响时,将另一侧压力维持在 0.62 MPa。 $x_{h,c}$ 的范围为 0.2~0.5 mm; $x_{h,g}$ 的范围为 0.6~0.9 mm;间隙突变量($x_{h,c}$ 和 $x_{h,g}$ 之差的绝对值)恒为 0.4 mm;以间隙高度为变量时取 $p_{in} = 0.8$ MPa, $p_{out} = 0.62$ MPa。为了准确获取液氮空化流动过程中压力和温度的分布特性,加工时在流道机架底部设有 2 组共 10 个直径为 1 mm 的微孔,并通过微孔采用介入式的方法来测量。本文借鉴 Hord^[26]的水翼液氮空化实验设计经验,为了覆盖从空化的初生、空泡的充分发展到溃灭后恢复的完整流场结构,流道底部微孔测点沿流向 y 方向的坐标分别设为 0、17、33、49、69 mm,依次对应测点 1~5。

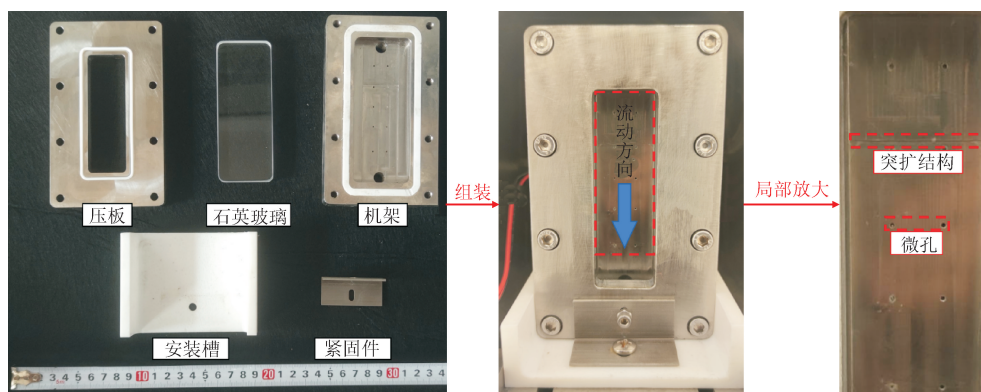
可视化突扩微间隙结构是实验的核心部件,其结构实物如图 2(b)所示。由图可知,该结构的流道

长度为 100 mm, 宽度为 29 mm, 流场入口到间隙突扩位置的距离为 20 mm, 间隙突扩后的流场长度为 80 mm。视窗由石英玻璃制成, 以在保证透光性的同时与流道机架配合形成突扩微间隙。在实验中, 微间隙内流动介质为液氮, 温度极低。为了减少漏热, 并避免因可视化突扩微间隙结构的视窗表面结霜而影响观测, 在外部设置了真空腔体, 并将 p_q 维

持在 100 Pa 以下。在实验过程中, 使用数据采集板卡采集不同来流压力和背压下, 微间隙内空化流动的温度、压力变化, 并拍摄液氮空化流动的图像。为了保证实验过程中供给液氮温度的稳定性, 实验系统的所有液氮管路均使用 20 mm 厚的二氧化硅隔热气凝胶毡进行包覆, 以保证保温材料外侧不存在结霜和结露现象。



(a) 实验系统



(b) 突扩微间隙结构

图 2 突扩微间隙低温液体空化流动可视化实验系统

Fig. 2 Experimental visualization system for cavitating flow of cryogenic liquid in a stepped micro-clearance

1.2 实验测量设备

本实验使用可视化拍摄方法捕捉液氮在微间隙内的空化流动形态, 通过直接测量方法获取空化流场的温度和压力分布特性。所使用测试设备的型号和主要参数如表 1 所示。在实验过程中, 液氮体积流量由低温液体涡轮流量计直接测量, 并以此间接

确定微间隙内部的平均流动速度; 微间隙内流场的压力由高频压力传感器测量, 输出为高频数字信号; 温度由 T 型热电偶进行测量, 输出为模拟信号。温度、压力信号均通过航空插头引出真空腔体, 并使用 NI-USB6363 板卡采集, 结合 Labview2018 软件编写的数据采集程序进行读取。

表 1 实验系统重要设备及参数

Table 1 Main equipment and parameters of the experimental system

设备名称	品牌型号	重要参数	精度
低温液体涡轮流量计	阁欣, LWGY-L	量程为 $0.2 \sim 1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 适用温度范围为 $-200 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$	线性度为 0.2%
低温压力传感器	钛合, PPM-S312B	量程为 $0 \sim 1 \text{ MPa}$, 采样频率为 5 kHz	0.1% 满量程
常温压力传感器	轩胜, PCM300	量程为 $0 \sim 1 \text{ MPa}$	0.1% 满量程
热电偶	Omega, T 型铜-康铜	量程为 $77 \sim 92 \text{ K}$	不确定度为 $\pm 0.24 \text{ K}$
数据采集板卡	NI, USB6363	采集频率为 1.25 MHz	
高清相机	SG0-500CX	分辨率为 1080 像素	
真空泵	莱宝	抽速为 $8.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	

2 可视化图像处理方法

在实验过程中,通过高清相机对微尺度流道内液氮空化现象进行动态捕捉,并记录不同背压与来流压力组合工况下,空化形态的演变特征。由于微间隙内,空化表现为高度密集的细微泡沫群,难以精确界定单个气泡的生长界面与运动轨迹,因此本研究仅对空化区域的整体空间分布规律进行研究。本文采用图像预处理与阈值分割^[27]相结合的技术路线:首先,调整原始图像的灰度范围,加强气液区域的对比度;然后,通过自适应二值化算法将灰度图像转化为黑白二值图,并利用空化区与液相区的灰度阈值差异,实现区域的精准分割;最后,提取空化区域在流道内的投影面积和长度等宏观参数,具体处理过程如图 3 所示。

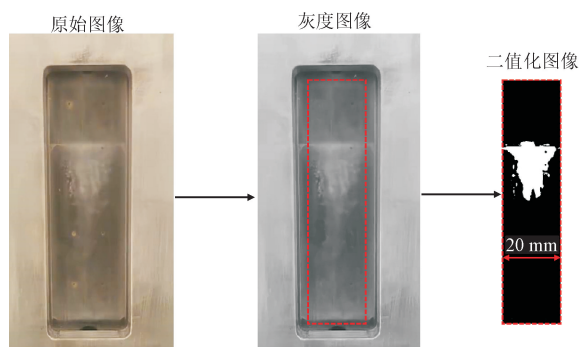


图 3 突扩微间隙内液氮空化流动拍摄图像处理过程

Fig. 3 Image processing procedure of cavitating flow of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance

3 实验结果及分析

为消除不同实验工况下绝对数值的差异,揭示突扩微间隙内流动的通用特性,本节对图 2 所示的

5 个测点的压力 $p_1 \sim p_5$ 和温度 $t_1 \sim t_5$ 进行了无量纲化处理,得到无量纲压力 $p_1^* \sim p_5^*$ 和无量纲温度 $T_1 \sim T_5$, 其表达式为

$$p_i^* = \frac{p_i}{p_1} \quad (1)$$

$$T_i = \frac{t_i}{t_1} \quad (2)$$

式中: i 为测点序号, $i = 1, 2, 3, 4, 5$; p_i^* 、 T_i 为第 i 个测点的无量纲压力、温度。

对实验中不同背压 p_{out} 和不同来流压力 p_{in} 也进行了无量纲化处理,得到无量纲来流压力 p_{in}^* 和无量纲背压 p_{out}^* , 表达式为

$$p_{\text{in}}^* = \frac{p_{\text{in}}}{p_0} \quad (3)$$

$$p_{\text{out}}^* = \frac{p_{\text{out}}}{p_0} \quad (4)$$

式中: p_0 为恒定压力, 取值为 0.62 MPa 。

同时,本节使用无量纲间隙高度 $H_g^{[28]}$ 表示不同的间隙高度的工况, H_g 的表达式为

$$H_g = \frac{x_{\text{h},g}}{x_{\text{h},c}} \quad (5)$$

3.1 不同背压下液氮空化特性

图 4 展示了不同背压下,液氮空化流动拍摄图像的二值化处理结果。在保持来流压力和间隙高度不变的前提下,背压的变化直接决定了驱动空化发生的系统有效压差,对空化区域的总面积具有一定的影响。随着背压的降低,空化程度整体呈加深趋势,宏观表现为空化区域面积的增加。通过统计可知,在背压逐渐降低的 5 个工况中,空化区域面积占流道总面积的比例分别是 12.13% 、 14.28% 、 11.88% 、 14.05% 和 16.92% ,空化区域面积占比增大了约 39.00% 。尽管受复杂相变流动结构的影响,实验数据在中间工况存在局部波动,但总体趋势

表明:较低背压工况有利于维持更大的压差,并促使空化气穴占据更大的空间区域,从而导致空化面积占比的显著增加。在流向上,因压力最终均会逐渐降至背压,从而抑制了空化的进一步延伸,这一过程在图像中表现为不同背压下,空化区域在流向上的长度基本保持不变。

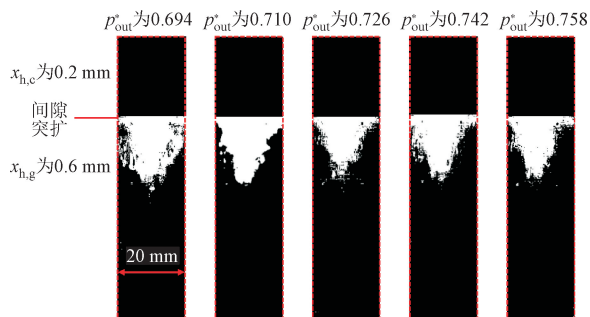


图4 不同背压下突扩微间隙内液氮空化流动拍摄图像处理结果

Fig. 4 Processed images of cavitating flow of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different downstream pressures

不同背压条件对突扩微间隙内液氮空化流动沿程压力的影响如图5所示。由于间隙高度极小,液氮流动受到较大的摩擦阻力与黏性效应的影响,从而导致沿程压力整体呈现下降趋势,并最终趋于出口背压。在突扩处,间隙高度的突然增加,导致流体因惯性脱离壁面产生流动分离,并在突扩处后方形成低压回流区,该区域压力骤降至液氮饱和蒸气压以下,从而产生空化。空化区域的形成和扩张会使局部流场发生剧烈变化,而在空化区域的后部,由于

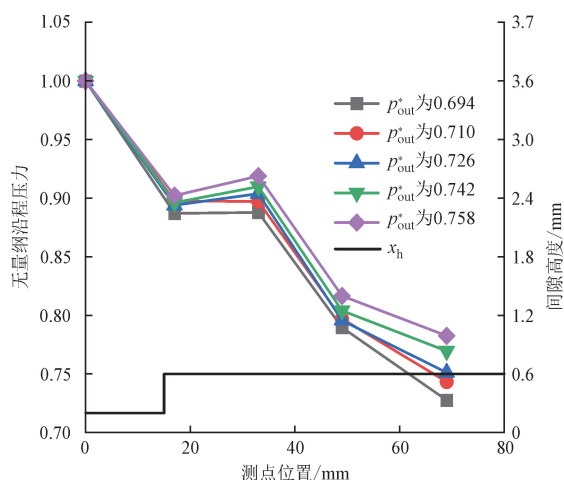


图5 不同背压下突扩微间隙内液氮空化流场压力变化

Fig. 5 Pressure variations in the cavitating flow region of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different downstream pressures

泡沫群的壅塞作用,流体压力出现了轻微的回升。在空化区域之后,由于沿程存在持续的摩擦阻力和能量损失,流动压力不断下降。随着无量纲背压 p_{out}^* 的逐渐降低,在 $y = 17$ mm 处的无量纲压力 p_2^* 随之降低, p_{out}^* 由 0.758 降低至 0.694; 在 $y = 17$ mm 处,无量纲压力 p_2^* 相较于 $y = 0$ 处的 p_1^* ,其降幅增大了约 15%,这表明在 $y = 15$ mm 处的突扩处压降更大。这是因为,随着背压的降低,沿程各测点的压力均有所降低,突扩处的静压更易跌至饱和蒸气压以下,并同时诱发更强的空化。但由于背压变化幅度不大,背压对空化区域长度以及液氮流动的沿程压力的影响并不显著。

在获得不同背压条件下,微间隙内液氮空化流动沿程压力后,测量流场中的温度有助于对空化行为的进一步分析,温度的变化如图6所示。在空化区域中(即 $y > 15$ mm),微间隙内液氮发生空化现象,该相变过程吸收了大量的热能,从而导致流场温度的明显降低。在空化区域之后,气泡的溃灭和液氮流动的恢复作用使温度逐渐回升至主流温区。降低背压有利于空化的发展并加剧局部温降的幅度。当 p_{out}^* 由 0.758 降低至 0.694 时,在 $y = 17$ mm 处的无量纲温度 T_2 相较于 $y = 0$ mm 处的 T_1 ,其降幅增大了约 17%,这说明降低背压加剧了空化程度,空化区域内吸收的热量更多。随着 p_{out}^* 的增加,在 $y = 33$ mm 处,无量纲温度 T_3 由 0.837 增加到 0.937。该处温度的升高印证了流动背压的增大会减小空化区域的面积,使空化区域不断向流场中心轴线收缩,从而造成测点逐渐脱离低温区域,使温度随之升高,温度提升速度随之加快。

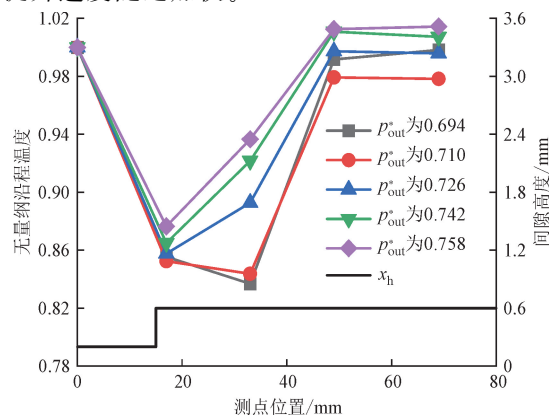


图6 不同背压条件下突扩微间隙内液氮空化流场温度变化

Fig. 6 Temperature variations in the cavitating flow region of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under downstream pressures

进一步分析发现,当无量纲压力 $p_{\text{out}}^* \leq 0.710$ 时, T_3 大幅降低,这表明该工况下,空化强度及空化区域面积的突增。所以,为抑制螺旋槽止推轴承在低温工况下的空化现象,建议将其微间隙内压力的极小值与工作压力的无量纲比值维持在 0.710 以上。

3.2 不同来流压力下液氮空化特性

不同来流压力下,液氮空化流动拍摄图像的二值化处理结果如图 7 所示。图中白色区域表征了空化气穴的分布范围。对图像数据的定量统计结果显示,在保持背压和间隙高度不变时,来流压力的升高显著加剧了空化程度,宏观表现为空化区域面积占比的整体增大。通过统计可以得到,在来流压力逐渐增加的 5 个工况中,空化区域面积占流道总面积的比例分别为 6.98%、11.53%、13.89%、12.58% 和 16.43%,空化区域面积占比增大了约 135.00%。尽管在实验范围内存在局部数据波动,但整体呈现出明显的增长态势。由此可见,提高来流压力,显著提升了流体入口的动能,空化区域在流向上更长。相较于背压的变化,来流压力的变化对液氮空化区域总面积的影响更为敏感和显著,其主要影响的是空化区域的纵向长度。

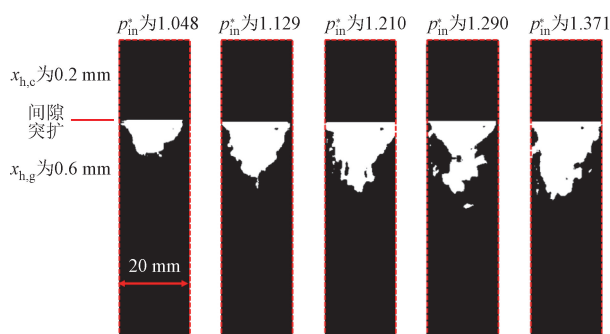


图 7 不同来流压力下突扩微间隙内液氮空化流动拍摄图像处理结果

Fig. 7 Processed images of cavitating flow of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different inlet pressures

不同来流压力对突扩微间隙中的液氮空化流动沿程压力的影响如图 8 所示。当来流压力较小时,流动压差较小,无量纲来流压力 p_{in}^* 较大,间隙高度突扩位置的压降较小,空化现象相对较弱,沿程压力变化幅度较为平缓,空化长度较短;随着来流压力的升高,整体压差增大, p_{in}^* 逐渐减小,突扩处的压力骤降更加显著,局部压力更易降低至液氮饱和蒸气压以下,从而导致更为剧烈的空化现象,空化区域随之延长。不同工况间在 $y = 17 \text{ mm}$ 处的无量纲压力 p_2^* 相较于 $y = 0$ 处的 p_1^* ,其下降幅度最小为

7.3%,而最大为 13.0%,也即当 p_{in}^* 由 1.048 增大至 1.371 时,可使压降幅度增加约 77.0%。在空化区域以后,流场压力略有回升,但由于空化过程中能量损失的不可逆性,随后逐渐趋向于流场背压。

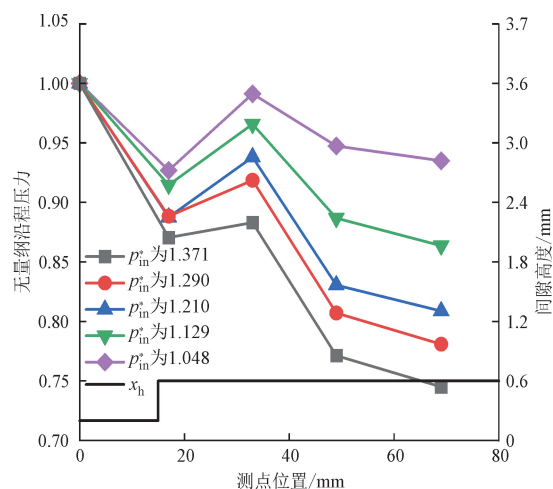


图 8 不同来流压力下突扩微间隙内液氮空化流场压力变化

Fig. 8 Pressure variations in the cavitating flow region of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different inlet pressures

不同来流压力条件下,突扩微间隙内液氮空化区域沿程温度的分布如图 9 所示。由图可知,来流压力的增加对液氮空化流动中的温度降幅有着显著的增强作用。随着来流压力的增加, p_{in}^* 逐渐增大,沿程温度逐步下降,尤其是在空化区域。在 $y = 17 \text{ mm}$ 处的无量纲温度 T_2 相较于 $y = 0$ 处的 T_1 ,其降幅不断增加,从最开始的 9.4% 增加至 15.2%,提高了约 61.0%。

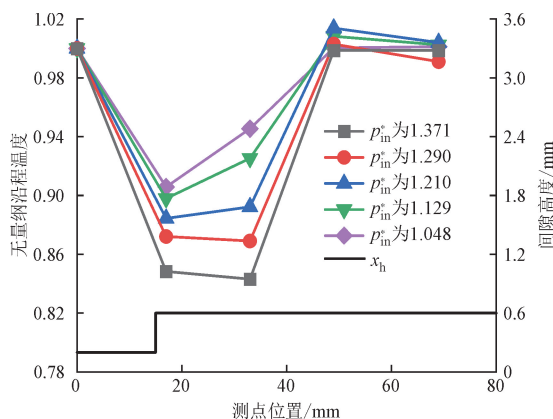


图 9 不同来流压力下突扩微间隙内液氮空化流场温度变化

Fig. 9 Temperature variations in the cavitating flow region of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different inlet pressures

这说明在较高的来流压力条件下,间隙突扩处会产生更加剧烈的空化现象,吸收了更多的热量,使得局部温度明显下降且降幅逐渐增加。来流压力的增大会逐渐使空化区域面积逐渐增大,并且沿流动方向延长,具体表现为在 $y = 33 \text{ mm}$ 处的无量纲温度 T_3 随着来流压力的增大而逐渐降低。且基于无量纲温度数据显示,当 $p_{in}^* \geq 1.210$ 时,在 $y = 17, 33 \text{ mm}$ 处的无量纲温度 T_2 和 T_3 开始更为明显的降低,这也印证了图 8 所示的空化区域的增大和空化现象的加强。所以,为抑制螺旋槽止推轴承在低温工况下的空化行为,建议将其微间隙内压力的极大值与工作压力的无量纲比值维持在 1.210 以下。

3.3 不同间隙高度下液氮空化特性

不同间隙高度对突扩微间隙内液氮空化沿程压力的影响如图 10 所示。在来流压力与背压均保持恒定的条件下,间隙高度 $x_{h,c}$ (突扩前) 和 $x_{h,g}$ (突扩后) 的增加,也即无量纲间隙高度 H_g 的减小会使得沿程压力的变化更加显著。当 $H_g = 3.0$ 时,在 $y = 17 \text{ mm}$ 处的无量纲压力 p_2^* 相较于 $y = 0$ 处的 p_1^* ,其降幅约为 11.2%,而当 $H_g = 1.8$ 时,压降幅度达到 21.4%,增加了约 92.0%。这说明几何突扩程度的增强会显著强化局部流动的膨胀效应,从而促使空化更易发生并延展。较大的间隙高度不仅使突扩位置的流体惯性效应增强,而且在突扩位置后的空化区域内,局部压力梯度进一步扩大,加剧了空化强度。突扩下游区域虽出现一定的压力回升,但由于空化现象伴随的能量耗散及局部阻力的增加,压力恢复幅度有限,最终趋向于出口背压。

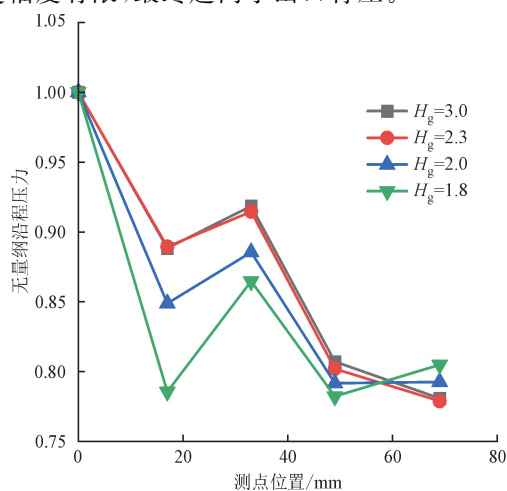


图 10 不同间隙高度下突扩微间隙内液氮空化流域压力变化

Fig. 10 Pressure variations in the cavitating flow region of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different clearance heights

此外,在图中还可以看到,当 $H_g \leq 2.0$ 时,沿程无量纲压力开始呈现出更为陡峭的下降趋势,这说明此时突扩位置压降更大,从而会引发更剧烈的空化现象。所以在螺旋槽止推轴承的设计中,应考虑无量纲间隙高度下限的设置高于 2.0。

不同间隙高度条件对突扩微间隙中液氮沿程温度的影响如图 11 所示。由图可知,随着 H_g 的减小,在 $y = 17 \text{ mm}$ 处的无量纲温度 T_2 逐渐降低,且相较于 $y = 0$ 处的 T_1 ,其降幅分别为 12.8%、13.6%、14.1%、15.5%,呈单调递增趋势。 y 在 $17 \sim 33 \text{ mm}$ 的范围内,温度维持较低水平,这表明突扩产生的空化区域具有一定的空间延展性。随着流体继续向下游发展,空化效应逐渐减弱至消失,并与主流混合,局部温度逐步回升,但总体仍低于入口温度,这反映出空化过程不可逆的能量损失。这一变化规律与前述压力分布的结果相互印证,间隙高度的增加扩大了流通截面,使局部压降和空化强度同步增强,液氮在空化发生时的汽化吸热作用更加显著,从而造成更大的温度降幅,且当 $H_g \leq 2.0$ 时,在 $y = 17 \text{ mm}$ 处的无量纲温度下降幅度最大。

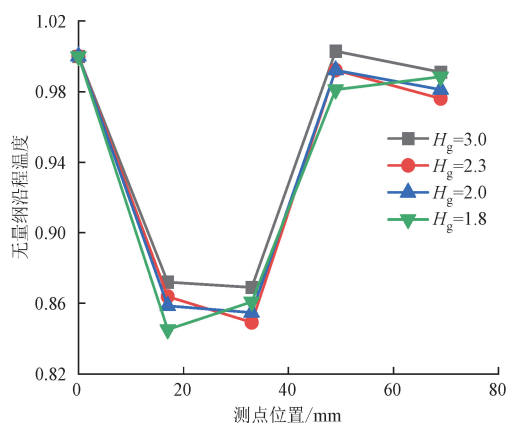


图 11 不同间隙高度下突扩微间隙内液氮空化流域温度变化

Fig. 11 Temperature variations in the cavitating flow region of liquid nitrogen in the stepped micro-clearance under different clearance heights

3.4 来流空化数对液氮空化流动的影响

来流空化数是影响空化产生的重要无量纲判据。基于 $y = 17 \text{ mm}$ 处实测压力定义来流空化数,以表征空化条件,来流空化数 σ 表达式为

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{1/2\rho v^2} \quad (6)$$

式中: p_2 为 y 在 17 mm 处实测压力值; p_v 、 ρ 分别为

该位置实测温度对应的液氮饱和蒸气压和密度; v 为该处液氮流速。

同时,对实验测得的压降、温降和空化长度随来流空化数的变化特性进行了统计分析,并采用来流空化数对这3个参数进行拟合,其表达式为

$$\begin{cases} \Delta p = 5.275\sigma^2 - 47.4\sigma + 161.6 \\ \Delta T = -1.697\sigma + 18.33 \\ L = 22.3e^{-0.2595\sigma} - 10.62e^{-2.293\sigma} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δp 、 ΔT 分别为空化压降、温降; L 为空化区域长度。

统计和拟合结果如图12所示。由图可知,通过拟合方程计算得到的空化压降、温降和空化长度与实验测量值吻合良好,偏差小于 $\pm 10\%$,由此可以证明拟合的准确性。当空化数小于初生空化数时,流场产生空化。随着空化数的不断增大,空化受到抑制,空化流动压降、温降和空化区域长度不断减小。

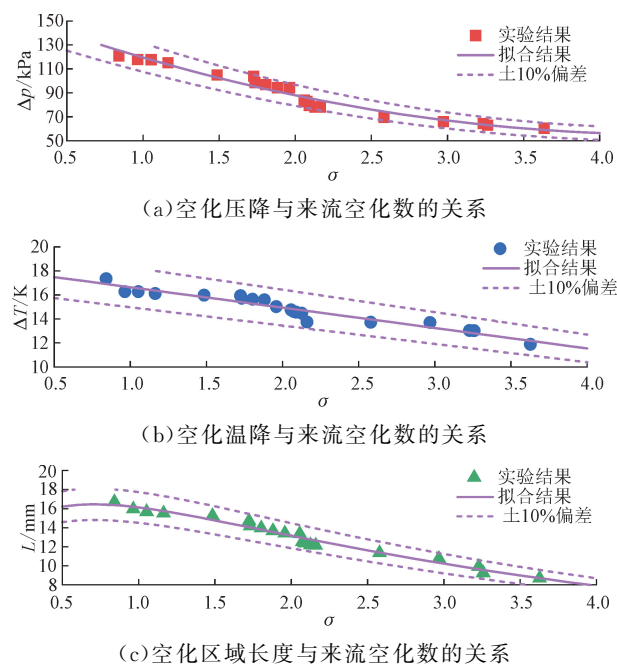


图12 压降、温降和空化长度随来流空化数的变化特性的统计和拟合结果

Fig. 12 Statistical and fitting results of the variation characteristics of pressure drop, temperature drop, and cavitation length with the inlet cavitation number

4 结 论

为了揭示液体自润滑轴承中,开槽区域所引入的突扩结构对微尺度空化流动行为的影响机制,本文开展了近饱和液氮在突扩微间隙空化流动的可视化实验,研究了不同背压、来流压力和间隙高度对液

氮在可视化突扩微间隙内的空化演化过程以及对流场温度、压力的影响,得到如下主要结论。

(1)突扩微间隙中背压的变化会影响空化区域的面积及局部压力、温度的分布。当无量纲背压 p_{out}^* 由0.758降至0.694,空化区域的面积,以及相较于 $y=0$ 处, $y=17\text{ mm}$ 处的压力、温度降幅分别增大了39%、15%和17%。为抑制螺旋槽止推轴承在低温工况下的空化行为,建议将其微间隙内压力的极小值与工作压力的无量纲比值维持在0.710以上。

(2)突扩微间隙中来流压力的提升也会增加液氮空化的强度和空化区域的面积,从而导致突扩区域内,压力和温度波动的增强。无量纲来流压力当 p_{in}^* 由1.048升至1.371,空化区域的面积、以及相较于 $y=0$ 处, $y=17\text{ mm}$ 处的压力、温度降幅分别增大了135%、77%和61%。因此,根据实验结果,建议将螺旋槽止推轴承微间隙内压力的极大值与工作压力的无量纲比值维持在1.210以下。

(3)突扩微间隙的间隙高度是影响微间隙空化强度及沿程压力温度分布特性的关键结构参数。当无量纲间隙高度 H_g 由3.0降至1.8时,相较于 $y=0$ 处, $y=17\text{ mm}$ 处的压力、温度降幅分别提高了96%和22%,这表明更大的间隙会显著增加压力损失和较强的空化效应。由于当无量纲间隙高度小于2.0时空化现象更加剧烈,所以在设计螺旋槽轴承时应使得无量纲间隙高度的下限大于2。

(4)微间隙内液氮空化压降、温降和空化长度均随来流空化数的增大而减小。对空化压降、温降和空化长度与空化数的关系进行了拟合,且拟合的准确性良好。

参考文献:

- [1] Cui Peng, Li Qinglian, Cheng Peng, et al. System scheme design for LOX/LCH₄ variable thrust liquid rocket engines using motor pump [J]. Acta Astronautica, 2020, 171: 139-150.
- [2] 艾立旺,张国民,靖立伟,等. 超导体在低温液体泵中的应用研究与发展现状 [J]. 低温与超导, 2021, 49(2): 32-43.
- Ai Liwang, Zhang Guomin, Jing Liwei, et al. Development status of superconductor applied in cryogenic liquid pump [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(2): 32-43.
- [3] 李承霖. 高速低温离心泵的优化与性能研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2023.

- [4] 房煦峰, 侯予, 蔡毅杰, 等. 变螺距诱导轮对液氢泵空化性能的影响 [J]. 低温工程, 2020(3): 43-47.
Fang Xufeng, Hou Yu, Cai Yijie, et al. Effect of variable pitch inducer on cavitation performance of liquid hydrogen pump [J]. Cryogenics, 2020(3): 43-47.
- [5] 王昱, 侯予, 赵琪, 等. 液氢自润滑动压轴承空化特性的数值研究 [J]. 低温工程, 2020(1): 50-54.
Wang Yu, Hou Yu, Zhao Qi, et al. Numerical study on cavitation characteristics of liquid hydrogen self-lubricated hydrodynamic bearings [J]. Cryogenics, 2020(1): 50-54.
- [6] 汪舜. 高速水润滑螺旋槽推力轴承空化流的动特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [7] 王瑞琪. 考虑空化流多种界面效应的高速水润滑螺旋槽推力轴承热动压润滑特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [8] 张直明, 张言羊, 谢友柏, 等. 滑动轴承的流体动力润滑理论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
- [9] 李凤芹, 王强, 宋远红. 压缩机用螺旋槽干气密封技术 [J]. 风机技术, 2008(1): 33-35.
Li Fengqin, Wang Qiang, Song Yuanhong. Technology of spiral groove dry gas seal for compressors [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2008(1): 33-35.
- [10] 董志强, 白苗岑, 于根亮. 入口压差扰动下螺旋槽动压止推轴承动态响应特性研究 [J]. 润滑与密封, 2025, 50(7): 24-29.
Dong Zhiqiang, Bai Miaocen, Yu Genliang. Study on dynamic response characteristics of spiral groove dynamic pressure thrust bearing under disturbance of inlet pressure difference [J]. Lubrication Engineering, 2025, 50(7): 24-29.
- [11] 赖天伟, 杨山举, 张兴群, 等. 直叶片离心泵内 R134a 流动与空化特性的 CFD 分析 [J]. 化工学报, 2014, 65(增刊 2): 45-51.
Lai Tianwei, Yang Shanju, Zhang Xingqun, et al. Computational fluid dynamic analysis on flow and cavitation characteristics of R134a in centrifugal pump with straight blades [J]. CIESC Journal, 2014, 65(S2): 45-51.
- [12] Sun Weihua, Tan Lei. Cavitation-vortex-pressure fluctuation interaction in a centrifugal pump using bubble rotation modified cavitation model under partial load [J]. Journal of Fluids Engineering, 2020, 142(5): 051206.
- [13] Braun M J, Hannon W M. Cavitation formation and modelling for fluid film bearings: a review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part J Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(9): 839-863.
- [14] Gonzalez-Avila S R, Klaseboer E, Khoo B C, et al. Cavitation bubble dynamics in a liquid gap of variable height [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 682: 241-260.
- [15] Sun Chao, Can E, Dijkink R, et al. Growth and collapse of a vapour bubble in a microtube: the role of thermal effects [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 632: 5-16.
- [16] Yang Min, Song Wenwu. Investigation of the effect of top clearance on cavitation characteristics and stability of axial flow pump [C]//2024 6th International Conference on Energy, Power and Grid (ICEPG). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1290-1297.
- [17] Dai Caili, Fang Sisi, Wu Yining, et al. Experimental study of bubble breakup process in non-Newtonian fluid in 3-D pore-throat microchannels [J]. Colloids and Surfaces; A Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 535: 130-138.
- [18] 秦思宇, 刘艺佳, 杨佳成, 等. 受限蒸汽腔内气液两相传热特性研究 [J]. 化工学报, 2024, 75(增刊 1): 47-55.
Qin Siyu, Liu Yijia, Yang Jiacheng, et al. Characteristics of gas-liquid two-phase heat transfer in a confined vapor chamber [J]. CIESC Journal, 2024, 75(S1): 47-55.
- [19] Utturkar Y. Computational modeling of thermodynamic effects in cryogenic cavitation [D]. Gainesville, FL, USA: University of Florida, 2005.
- [20] Reinke P, Ahlrichs J, Beckmann T, et al. Bubble dynamics in a narrow gap flow under the influence of pressure gradient and shear flow [J]. Fluids, 2020, 5(4): 208.
- [21] Petkovšek M, Dular M. Experimental study of the thermodynamic effect in a cavitating flow on a simple Venturi geometry [C]//9th International Symposium on Cavitation. Bristol, UK: IOP Publishing, 2015: 012179.
- [22] 马静雯, 王诗平, 杨英狄, 等. 考虑热效应的空化流动研究进展 [J]. 力学学报, 2024, 56(8): 2165-2183.
Ma Jingwen, Wang Shiping, Yang Yingdi, et al. A review on cavitation flows considering thermal effects [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(8): 2165-2183.
- [23] 初凯新. 不同尺度下考虑热效应低温空化流动特性研究 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.
- [24] 颜少航, 赖天伟, 刘玉涛, 等. 低温工质润滑螺旋槽止推轴承中空化现象研究 [J]. 真空与低温, 2022,

- 28(3): 341-345.
- Yan Shaohang, Lai Tianwei, Liu Yutao, et al. Research on the cavitation of spiral groove thrust bearing lubricated by cryogenic working medium [J]. Vacuum and Cryogenics, 2022, 28(3): 341-345.
- [25] 颜少航, 赖天伟, 王彦武, 等. 微间隙内 R134a 空化可视化实验研究 [J]. 化工学报, 2023, 74(3): 1054-1061.
- Yan Shaohang, Lai Tianwei, Wang Yanwu, et al. Visual experimental study on cavitation of R134a in micro clearance [J]. CIESC Journal, 2023, 74(3): 1054-1061.
- [26] Hord J. Cavitation in liquid cryogens; 2 hydrofoil [EB/OL]. [2025-12-25]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730007528>.
- [27] 熊伟, 贾锈闵, 金靖熠, 等. 基于 MD-LinkNet 的低质量文档图像二值化算法 [J]. 光电子·激光, 2019, 30(12): 1331-1338.
- Xiong Wei, Jia Xiuhong, Jin Jingyi, et al. Binarization of degraded document images based on MD-LinkNet neural networks [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2019, 30(12): 1331-1338.
- [28] Grpss W A, Matsch L A, Castelli V, et al. Fluid film lubrication [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 1980.
- (编辑 刘懿莹)