

DOI: 10.11949/0438-1157.

## 液氢球阀空化与涡旋耦合机理及非线性流动特性

余向达<sup>1</sup>, 周军超<sup>1</sup>, 顾才利<sup>2</sup>, 刘健<sup>2</sup>( <sup>1</sup> 四川轻化工大学机械学院, 四川 自贡 643000; <sup>2</sup> 自贡自高阀门有限公司, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 球阀是液氢输送系统中的关键部件, 当液氢流经阀芯节流区时, 局部压力骤降会导致液氢汽化, 产生的空泡在溃灭时不仅引发空化, 更直接威胁系统安全与阀门寿命。针对液氢的超低温热效应以及其饱和蒸气压对温度变化的敏感性, 基于原始的 Schnerr-Sauer 空化模型, 结合气液能量平衡与 Clausius-Clapeyron 方程, 提出一种更加适用于液氢介质的空化模型, 并通过实验结果验证空化模型的准确性。详细观察并讨论了启闭过程中空化的产生、发展及溃灭等动态演化规律, 揭示了空化现象与涡流结构之间的相互耦合作用关系, 探讨了不同入口压力对空化的影响, 并进一步量化了阀芯转速对涡旋演变的影响。研究表明, 该流动过程具有显著的路径依赖性和非线性特征; 较高的入口压力会明显增强空化强度并延长下游空穴流区, 而阀芯转速主要影响下游涡流结构的演化速率。

**关键词:** 球阀; 液氢; 空化; 流动特性; 涡旋

**中图分类号:** O352; O359

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

## Cavitation and vortex interaction mechanism and nonlinear flow characteristics of liquid hydrogen ball valves

YU Xiangda<sup>1</sup>, ZHOU Junchao<sup>1</sup>, GU Caili<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China; <sup>2</sup> Zigong Zigao Valve Co., Ltd, Zigong 643000, Sichuan, China)

**Abstract:** The ball valve is a key component in the liquid hydrogen delivery system. When the liquid hydrogen flows through the throttle area of the valve core, the local pressure drop will lead to the vaporization of the liquid hydrogen. The generated cavitation will not only cause cavitation when it collapses, but also directly threaten the system safety and valve life. Aiming at the ultra-low temperature thermal effect of liquid hydrogen and the sensitivity of its saturated vapor pressure to temperature change, based on the original Schnerr-Sauer cavitation model, combined with gas-liquid energy balance and Clausius-Clapeyron equation, a cavitation model more suitable for liquid hydrogen medium is proposed, and the accuracy of the cavitation model is verified by experimental results. The dynamic evolution law of cavitation generation, development and collapse during the opening and closing process was observed and discussed in detail. The coupling relationship between cavitation phenomenon and vortex structure was revealed. The influence of different inlet pressures on cavitation was discussed, and the influence of spool speed on vortex evolution was further quantified. The results show that the flow

收稿日期: 2026-03-08 修回日期: 2026-04-30

通信作者: 周军超(1987—), 男, 博士, 副教授, zhou1987g@163.com; 顾才利(1971—), 男, 2158746918@qq.com

第一作者: 余向达(2000—), 男, 硕士研究生, 2959241932@qq.com

基金项目: 四川省科技成果转化项目(2024ZHCG0063)

引用本文: 余向达, 周军超, 顾才利, 刘健. 液氢球阀空化与涡旋耦合机理及非线性流动特性[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–10

**Citation:** YU Xiangda, ZHOU Junchao, GU Caili, LIU Jian. Cavitation and vortex interaction mechanism and nonlinear flow characteristics of liquid hydrogen ball valves[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–10

process has significant path dependence and nonlinear characteristics. Higher inlet pressure will significantly

**Keywords:** ball valve; liquid hydrogen; cavitation; flow characteristics; vortex

enhance the cavitation intensity and extend the downstream cavitation flow area, while the spool speed mainly affects the evolution rate of the downstream vortex structure.

## 引 言

氢能因其能量密度高、可再生、零碳排放等优点,已成为推动能源结构转型、实现“双碳”目标的关键清洁能源之一<sup>[1-2]</sup>。液氢因其高储氢密度,已逐步覆盖航空航天与交通运输等多个领域<sup>[3-4]</sup>。而球阀作为液氢输送系统的关键控制部件,其启闭过程中的压力突变以及液氢饱和蒸汽压对温度高度敏感极易诱发空化现象,引发剧烈振动、噪声及材料侵蚀,严重影响系统的正常运行<sup>[5]</sup>。因此,针对液氢的超低温工况,开展球阀空化机理研究,对于提升氢能关键设备的可靠性具有重要的理论与工程意义。

近年来,许多研究人员对流体机械进行了实验研究和数值模拟<sup>[6-15]</sup>。Tabrizi等<sup>[16]</sup>指出球阀开度对流量性能起着非常重要的作用。Irvani<sup>[17]</sup>和Toghraie<sup>[18]</sup>通过实验分析了球阀的流量系数和损耗系数,结果表明,损耗系数值随开度的增大而减小。王俊鹏等<sup>[19]</sup>研究了曲折式与阵列式迷宫阀芯在不同入口压力下的空化现象与动态流动特性。Zhao等<sup>[20]</sup>研究了空化对套筒调节阀内流量的影响,分析了压差、开度对损失系数的影响。Lin等<sup>[21]</sup>采用滑动网格技术对低温球阀进行模拟,研究启闭过程中阀芯开度和阀芯速度对流动特性的影响。而在低温条件下,热效应对空化流动的影响非常重要,因此针对热效应下的空化研究非常重要<sup>[22-24]</sup>。早在1973年,Hord等<sup>[25]</sup>就对液氢的超低温空化进行了实验研究,其实验结果为后续超低温空化的研究提供了可靠的参考。何庆中等<sup>[26]</sup>发现调节阀降压过程会因能量转化和汽化潜热吸收引起介质温升,而温升会提高局部饱和蒸汽压从而扩大空化范围。王永康等<sup>[27]</sup>对液氢绕回转体的流动进行了模拟,发现热力学效应抑制了空化的发展,增强了空化的非定常特性。Zhou等<sup>[28]</sup>基于热力学效应,模拟了不同工况下低温截止阀的空化流动特性。Liu等<sup>[29]</sup>通过实验研究了不同空化数下低温流体的空化特征,并观察了低温

空化的发展过程。Xiang等<sup>[30]</sup>通过考虑低温流体的热效应并修改相变传热引起的附加能量项,提出了一种低温空化模型。Zhang等<sup>[31]</sup>通过引入热效应修正传统空化模型,分析了不同开度下低温空化的动态过程。

综上所述,低温空化的研究主要集中在空化现象本身的表征和观察上,而对空化与涡流相互作用的深层机理及其对流场影响的探索相对不足,特别是对于超低温液氢球阀的相关研究仍然很少。为了更加准确地模拟液氢球阀内部空化流动特性,本文构建适用于超低温液氢的高精度空化模型,通过压力损失、流动性能等分析了球阀内部空化流场。研究了超低温液氢空化的演化规律,结合 $\Omega$ 准则进行空化流场涡度分布的相关性,探讨了不同入口压力和阀芯转速对关闭过程中空化流动的影响。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

低温空化是气相和液相之间的转变过程。在Fluent求解器中,通常在计算效率和精度的前提下,将流体介质视为具有单一密度的混合物。因此,考虑连续性、动量、能量和质量传输方程。

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_m = \rho_l(1 - \alpha_v) + \rho_v \alpha_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_m u_j}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2\partial u_k}{3\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_m (h_m + f_v L_{ev})] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho_m u_j (h_m + f_v L_{ev})] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_m}{Pr_L} + \frac{\mu_t}{Pr_T} \right) \frac{\partial h_m}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}^+ - \dot{m}^- \quad (5)$$

### 1.2 湍流模型

考虑到低温空化引发的复杂湍流效应,本研究在求解器中选用Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型进行数值模拟。该模型相较于标准 $k-\varepsilon$ 模型的主要改进在于其湍流黏度公式引入了与流线曲率和旋转相关的

变量,从而在复杂流动中具有更好的“可实现性”。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (7)$$

$$G_k = -\rho \overline{\mu'_i \mu'_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

### 1.3 空化模型

Schnerr-Sauer 模型是一种基于气泡动力学的输运方程模型,其核心通过气泡半径变化描述蒸发和凝结过程,标准形式如下:

$$\dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(p_v - p, 0)}{\rho_l}} \quad (9)$$

$$\dot{m}^- = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(p - p_v, 0)}{\rho_v}} \quad (10)$$

Schnerr-Sauer 空化模型假设气泡内部压力保持恒定,忽略了空化的热力学效应。实际过程中汽化的潜热导致气化区域温度下降,进一步解释气泡内部压力的一定降低。气泡生长过程中热力学边界层的存在保证了相转换过程中热量的传输。根据 Huang 等的研究<sup>[32]</sup>,给出了气液界面的能量平衡方程。

$$\alpha_l \rho_l c_{pl} \frac{\Delta T}{\sqrt{a_l t}} 4\pi R_B^2 = \frac{d}{dt} \left( \frac{4}{3} \pi R_B^3 \rho_v \right) L_v \quad (11)$$

$$\frac{dR_B}{dt} = \frac{\rho_l c_{pl} \sqrt{a_l}}{\rho_v L_v \sqrt{t}} \Delta T \quad (12)$$

液氢的饱和蒸汽压与温度的关系可以用 Clausius-Clapeyron 方程<sup>[33]</sup>,是一个温度相关的修正因子,表示超低温环境下蒸汽生成的变化:

$$\frac{dp_v}{dT} = \frac{L_v}{T \Delta V} \quad (13)$$

基于此方程,液氢饱和蒸汽压随温度变化的关系可以积分得到:

$$\ln \left( \frac{p_v}{p_{v,ref}} \right) = -\frac{L_v}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (14)$$

因此,修改后的饱和蒸汽压计算公式为

$$p_v(T) = p_{v,ref} \exp \left( -\frac{L_v}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (15)$$

结合能量平衡方程(12)与饱和蒸汽压计算公式(15),修改后的蒸发率与凝结率公式为

$$\dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(p_v(T) - p_v, 0)}{\rho_l}} -$$

$$\left[ \frac{\rho_l c_{pl} \sqrt{a_l}}{\rho_v L_v \sqrt{t}} |\Delta T| \right] \quad (16)$$

$$\dot{m}^- = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(p - p_v(T), 0)}{\rho_l}} \quad (17)$$

## 2 数值模型与网格无关性验证

### 2.1 空化模型验证

为了验证改进空化模型的准确性,使用 Hord 等获得的实验结果与数值模拟的结果进行比较<sup>[23]</sup>。Hord 等通过水翼模型(248C)对液氢的超低温空化进行了实验可视化,其边界条件为温度 20.46K、入口速度 51.2m/s。采用传统的 Schnerr-Sauer 空化模型与改进空化模型对其进行模拟,模型如图 1 所示。

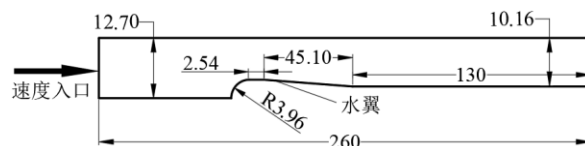


图1 水翼模型

Fig.1 Hydrofoil model

将传统空化模型、改进空化模型的模拟结果与实验数据进行了对比,如图 2 所示,其中 X=0 表示水翼空化初始化的位置。在压力预测方面,压降最显著处的实验值为 69.5KPa,传统模型为 107.5KPa,误差高达 54.7%;而改进模型为 72.6KPa,误差仅为 4.5%。在压力恢复阶段实验值为 171.0KPa,传统模型为 158.2KPa,改进模型为 175.1KPa,其误差 2.4% 亦远低于传统模型的 7.5%。在温度预测方面,传统等温模型无法反映温度变化,而改进模型的计算结果与实验数据高度吻合。以上对比表明所提出的改进空化模型能更准确地预测液氢的超低温空化过程。

### 2.2 球阀结构与流体域模型

图 3 表示超低温液氢球阀的结构示意图与流体域模型。为了便于网格划分,将阀门流道分成了入口流域、阀芯流域和出口流域。为确保流体流动充分发展,入口流域的长度设置为 5D,出口流域的长度设置为 10D,且明确了流道中心线位置以便后续分析研究。通过使用 Fluent 中的滑动网格技术,控制阀芯旋转流体区域,初始的边界条件为入口总压 0.30MPa,出口为标准大气压,温度为 20.15K。

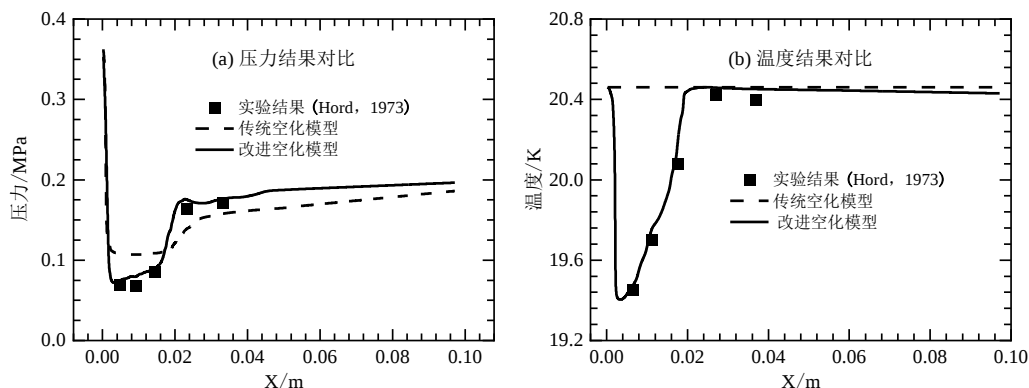


图2 空化模型验证

Fig.2 Cavitation model verification

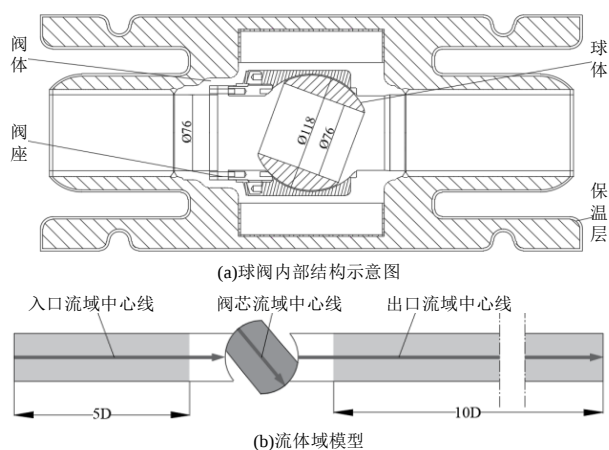


图3 球阀结构与流体域模型

Fig.3 Ball valve structure and fluid field mode

### 2.3 网格无关性验证

为避免网格数对数值计算的影响,进行无关性验证,分析了气体体积分数在不同开度下随网格数量的收敛情况,如图4所示。采用网格数为 $7 \times 10^5$ 时,最大气体体积分数明显偏大,最大值达到0.727;当网格加密至 $3 \times 10^6$ 与 $5 \times 10^6$ 时,该值分别为0.585与0.563,两者相对偏差仅为3.76%,且各开度下的数值分布已基本稳定。综合考虑计算精度和计算成本,选择网格数量约 $3 \times 10^6$ 的划分方法。

## 3 空化效应下的流动特性

### 3.1 启闭过程中的瞬态流动特性

通过引入损耗系数,定量分析液氢球阀在启闭过程中的流动阻力特性,边界条件为入口总压0.3MPa、阀芯转速 $20^\circ/\text{s}$ 、出口为标准大气压,工作温度为20.15K,所得结果如图5所示。在球阀启闭过程中,在开度小于 $40^\circ$ 时损耗系数都随着阀芯开度的增加而急剧下降。在小开度下,关闭过程中流体

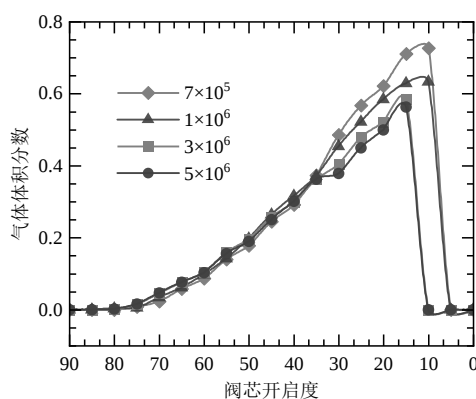


图4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification

已具备较高的动能,流道的骤然收缩,会产生更剧烈的流动分离、局部湍流甚至是空化现象导致更大的局部能量耗散,损失系数也更大。而在较大开度下,开启阀门需要将管道中低速的流体加速至较高流速,这一过程需要消耗大量能量以推动整个管道段的流体并克服其惯性,导致损失系数大于关闭过程。

图6表示液氢球阀启闭过程中不同开度下的压力分布情况。在球阀启闭过程中入口流体的压力分布都比较稳定,且随着开度的增加压力不断降低;而液氢在流经阀芯入口( $-59\text{mm}$ )与出口处( $59\text{mm}$ )时,流通面积的减小导致流速显著增大,从而引起压力急剧下降并伴随复杂的压力波动。在开启过程中,开度从 $30^\circ$ 增大至 $70^\circ$ 时,流通面积增加使节流效应减弱,阀芯出口处的压力骤降程度有所缓和,在出口流域中压力恢复得更快、更充分,整体压力损失减小。相较于开启过程,相同开度下关闭过程中出口流域的压力恢复更加缓慢,尤其在 $30^\circ$ 开度时,低压区范围明显扩大,压力在阀芯后约

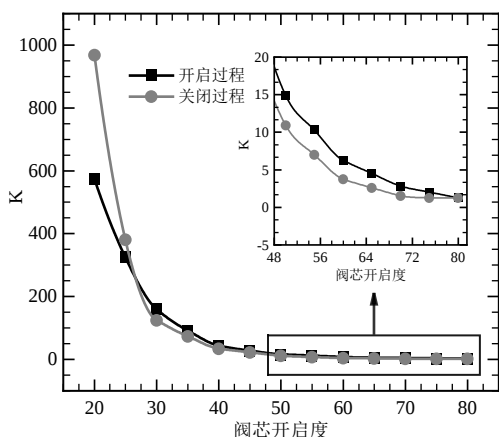


图5 启闭过程中不同开度下的损失系数

Fig.5 Loss coefficient under different opening in the process of opening and closing

600mm处才开始回升。这是由于关闭过程始于全开状态,流体具有较高的初始动量,上游流体的高速惯性导致出口流域的压力更难恢复,低压区扩大并持续维持,这种稳定的低压区域是诱发空化的重要因素。

图7是启闭过程中不同开度下的速度分布。在所有开度下,最大流速区域均稳定出现在阀芯与出口流域处的狭窄流道,且开度越大高流速区域的范围和强度也持续扩大。在开启过程中,流道面积从封闭状态逐渐扩大,流场处于从静止到加速的建立与发展过程,在 $30^\circ$ 下出口流域平均流速为 $6.28\text{m/s}$ 。而关闭过程中的出口流域平均流速与高流速区域显著高于开启过程,在相同的 $30^\circ$ 开度时,出口流域平均流速高达 $28.49\text{m/s}$ ,约为开启过程的4.5倍。关闭过程中流体具有较高的初始动量,当流道骤然收缩时,上游流体在惯性作用下以较高速度冲向狭窄流道,导致动能急剧积聚引发更剧烈、更集中的高速射流,根据伯努利原理,流速突然增加会导致压力骤降。这种高流速区域是促使空化剧烈发展的重要因素。

### 3.2 超低温液氢球阀的空化演化

启闭过程中不同开度对应的空化现象如图8所示。在启闭过程中,球阀的空化演化呈现出典型的进程依赖性与非对称性。在开启过程中,空化的发

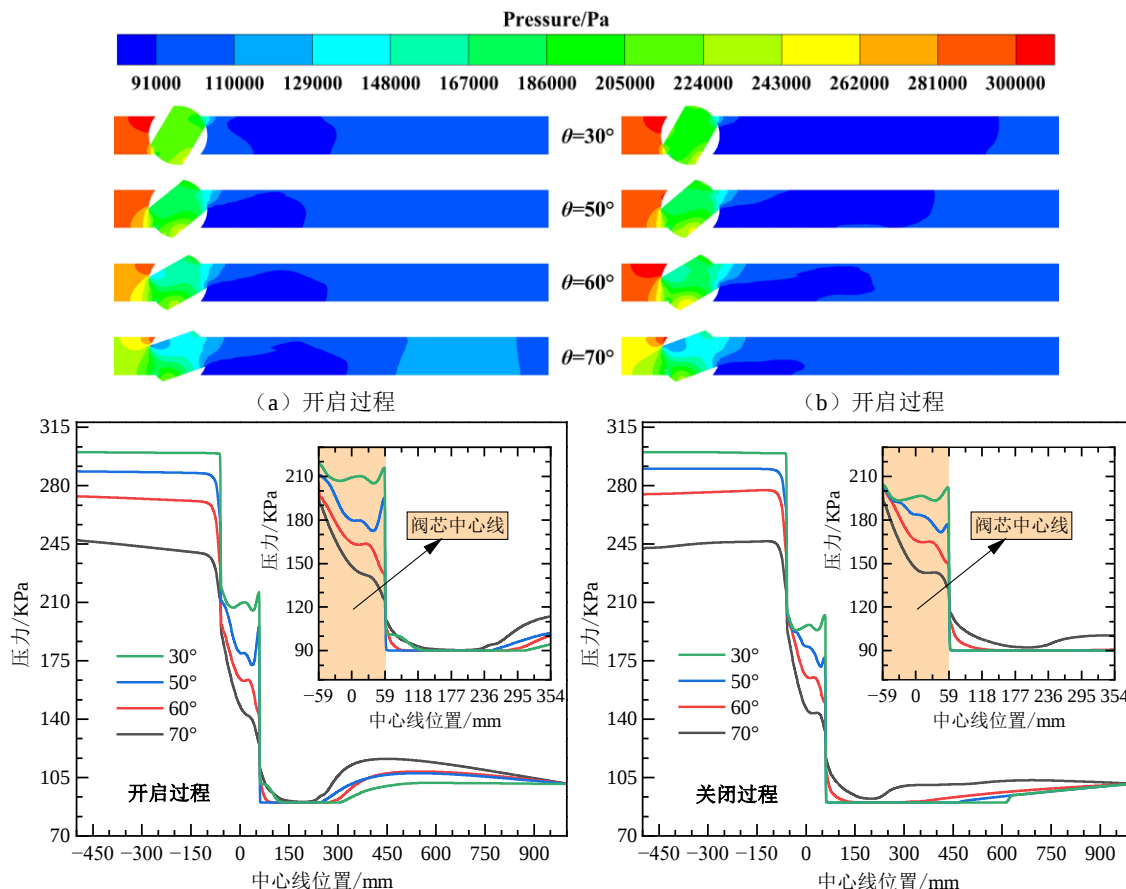


图6 不同开度下压力云图与中心线压力分布

Fig.6 Pressure nephogram and centerline pressure distribution under different openings

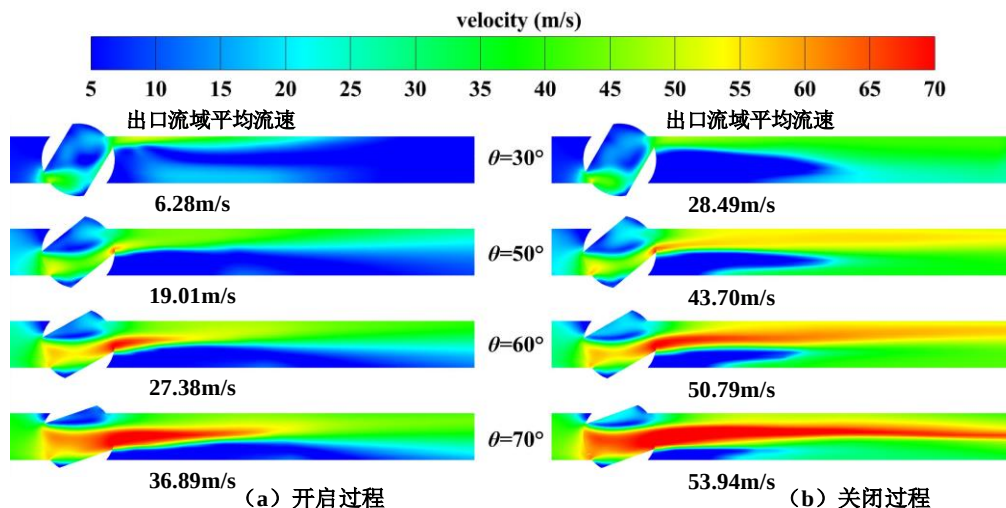


图7 启闭过程中不同开度下速度分布

Fig.7 Velocity distribution under different opening degrees during opening and closing

生和发展受到流场建立过程的影响。在30°的初始阶段,由于流场尚未充分发展,流速与压力梯度变化相对平缓,空化强度较弱。随着阀门开启至60°,流场能量增强,节流效应趋于显著,空化区域与强度随之增强,出口流域的平均气体体积分数升至0.101,表明空化进入发展阶段。然而当开度进一步增大,流通面积显著增加,压力恢复能力增强,局部压力回升至饱和蒸汽压之上,空化现象因此出现减弱的趋势。与之相比,关闭过程中的空化特性则表

现出更为强烈的滞后效应。在关闭的初始阶段,流场通畅稳定、压力水平较高,空化现象微弱,与开启过程类似。但随着开度持续减小,上游流体的高速惯性使得出口流域的速度维持在较高的水平,压力无法像开启过程那样有效恢复,从而维持了一个范围更广、状态更稳定的低压区,导致空化强度显著增强。在30°开度下,气体体积分数高达0.405,明显高于同开度下的开启过程。

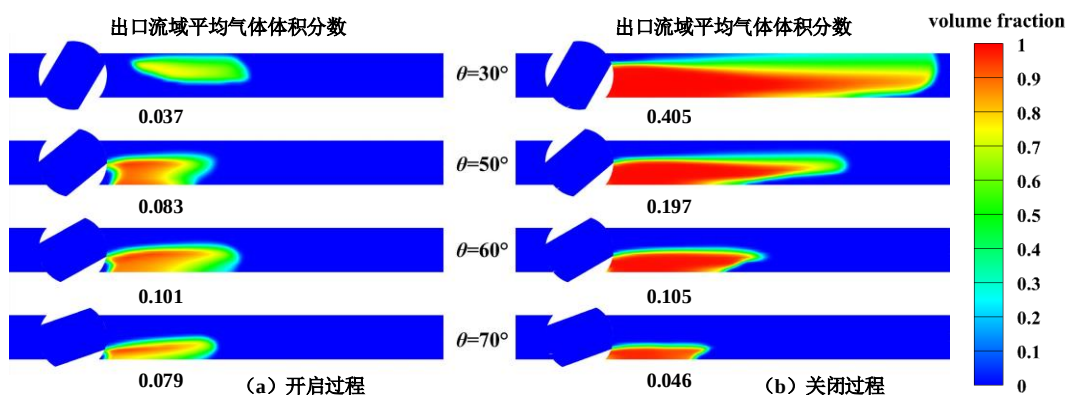


图8 启闭过程中不同开度下的空化现象

Fig.8 Cavitation phenomenon under different opening degrees during opening and closing

### 3.3 空化与涡流的相关性

球阀的开度和低温空化的演化导致下游出现极度湍流以及复杂的涡旋。为了进一步分析涡旋结构与下游动态空化的相互作用,引入 $\Omega$ 准则捕捉启闭过程中不同开度下的涡流分布, $\Omega$ 大于0.52的区域被定义为涡旋<sup>[34]</sup>,结果如图9所示。在开启过程中,涡流与空化的发展高度同步。在开启初期流

场尚未充分发展,涡流结构出现且范围局限,对应空化的初生阶段。随着开启至60°,流场动能积聚,节流效应导致的剪切流动增强,涡流结构变得复杂、范围扩大,空化现象也随之增强。但当开度进一步增大,流通面积增大使流道趋于通畅,剪切流动减弱,涡流范围明显收缩,空化也相应减弱。而在关闭过程则呈现不同的演化规律。在初始阶段

涡流随着开度的减小开始产生并不断发展扩大,至 $60^\circ$ 时涡流范围显著提升。随着阀门关闭到小开度下,空化强度显著增强,涡流范围反而减少,当关闭至 $30^\circ$ 时,出口流域的涡流结构显著减少,仅分布于阀芯附近。这一关键现象表明,当空化发展到极端

强度时,其与涡流的关系从“协同发展”转变为“非线性抑制”。其机理可能在于剧烈空化引发的气-液两相流改变了流体的有效黏度;同时,剧烈的相变过程消耗了大量流动能量,从而抑制了大尺度涡旋结构的维持与发展。

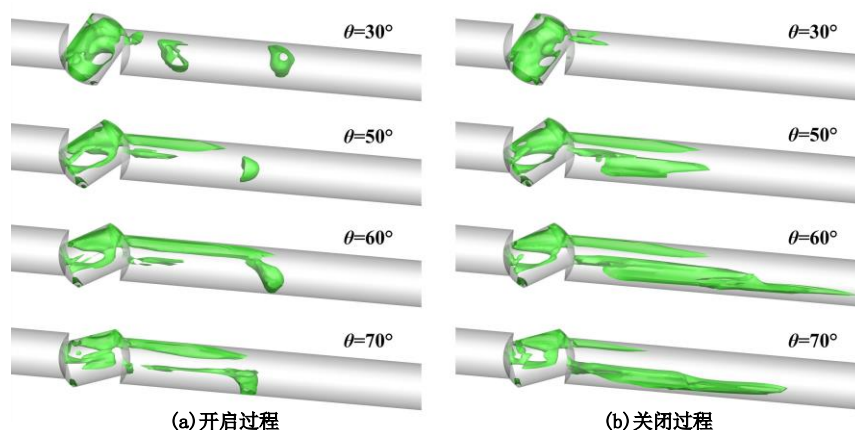


图9 超低温液氢球阀不同开度下的涡流分布

Fig.9 The Vortex Distribution of Ultra-low Temperature Liquid Hydrogen Ball Valve with Different Openings

## 4 运行工况对空化与涡旋的影响

### 4.1 入口压力对空化的影响

调节入口压力是控制流量的关键手段。针对关闭过程中空化剧烈的问题,为研究入口压力对空化特性的影响,保持其余边界条件不变,建立了 $0.22\text{MPa}$ 、 $0.25\text{MPa}$ 、 $0.30\text{MPa}$ 和 $0.35\text{MPa}$ 四种不同入口压力,分析空化现象显著的 $30^\circ$ 开度下的中心线压力分布,如图10所示。在不同入口压力下,液氢流过阀芯时压力都会产生波动,在流出阀芯后都会急剧下降,随后压力又逐渐恢复。在小开度下,流通面积的快速收缩,此时入口压力提高就会增大了流经阀芯的压差导致流速显著增加,根据伯努利原理,更高的流速会在阀芯出口的节流区域又引起更剧烈的压降;同时出口流域中压力回复更慢,低压区范围也随之延长。这种现象说明小开度下入口压力的升高会加剧了阀芯附近的压降,可能会导致空化强度增强,甚至是延长空化影响的流动区域。

为了探究不同入口压力对液氢球阀空化的影响,以 $60^\circ$ 和 $30^\circ$ 开度为例,展示阀门内空化的变化,如图11所示。在四种入口压力下,均发生了空化现象。在较大开度( $60^\circ$ )时,流通面积较大,节流效应入口压力对空化的影响较弱。而在小开度下,入口压力提高会加剧流经阀芯的压差,空化也随之显著

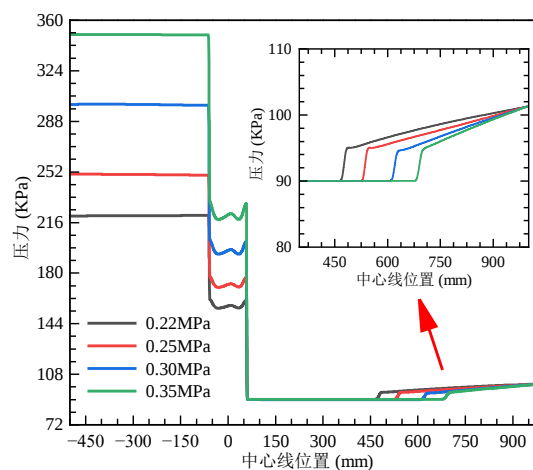


图10 不同入口压力下中心线压力分布

Fig.10 Distribution of centerline pressure under different inlet pressures

增强。在 $30^\circ$ 开度下,入口压力从 $0.22\text{MPa}$ 提升至 $0.35\text{MPa}$ 时,出口流域内的平均气体体积分数由 $0.315$ 提高到 $0.444$ ,增长了约 $40.95\%$ 。高气体体积分数意味着更密集的空泡群,其溃灭时将产生更频繁、更强烈的冲击。此外,高速流动的液氢会将空泡向下游输送,形成更长的空穴流,致使出口流域压力恢复困难,空化范围不断扩大。

### 4.2 阀芯关闭速度对涡旋的影响

除了入口压力外,阀芯关闭速度对于液氢球阀的正常运行也很重要。为分析阀芯转速对超低温

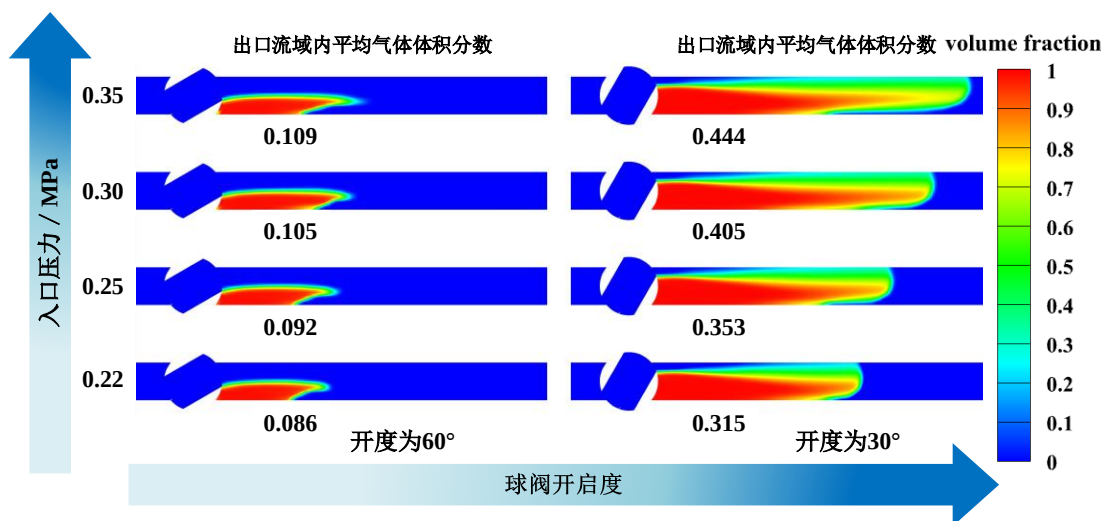


图11 不同入口压力下的空化现象

Fig.11 Cavitation phenomenon under the same inlet pressure

液氢球阀流动特性的影响,本研究在保持其余边界条件不变的情况下,选取四种转速( $5^\circ/\text{s}$ ,  $10^\circ/\text{s}$ ,  $20^\circ/\text{s}$ ,  $40^\circ/\text{s}$ )进行分析。鉴于关闭过程中开度为 $60^\circ$ 时涡旋结构最为复杂、范围最大,故选定该开度作为研究对象。为系统观察出口流域涡旋演变,沿流道方向依次选取四个垂直截面(距阀芯0.2m、0.4m、0.6m、0.8m)进行分析,图12展示了不同转速下涡旋的生成、发展与耗散过程。出口流域由大尺度涡旋结构主导,其强度、形态及演化过程均受阀芯转速与下游位置的显著影响。所有工况下均出现明显的大尺度涡旋,表明液氢流经阀芯出口节流区域后发生强烈流动分离与剪切层失稳。尽管各转速下涡旋的整体演化过程相似,但其演变速率随转速提高而显著加快。以 $20^\circ/\text{s}$ 为例,在0.2m至0.4m截面处,中心区域形成两个主要涡旋并持续发展;到达0.8m处已基本占据整个流道,而上方两个次要涡旋在0.6m处已基本耗散。随着阀芯转速增加,涡旋的生成位置向上游移动,发展更为迅速,耗散进程也相应提前,说明高转速工况下流场具有更高的不稳定性与能耗散率。

## 5 结 论

本研究针对超低温液氢的热效应,对传统的空化模型进行了修改,并通过实验结果进行了验证。通过数值模拟,系统探究了超低温液氢球阀在启闭过程中的非定常流动与空化特性,重点分析了开度、入口压力及阀芯转速对内部流场结构、空化演变及涡流动力学行为的影响。研究结果如下:

(1)球阀启闭过程中的动态特性表现出强烈的路径依赖性与非线性效应,在压力、速度分布、空化强度及涡流结构上均呈现出显著的非对称性。相同开度下,关闭过程中较高的流体动量惯性导致低压区范围更大,阀芯射流速度更高范围更广,空化现象更为剧烈,涡流强度更大。

(2)空化与涡流结构在时空演化上存在紧密的耦合关系。涡旋核心的低压区是空化初生的主导区域;而在小开度下,剧烈空化产生的空泡群会通过改变流体的两相属性与能量分布,反作用于流场,抑制大尺度涡旋结构的发展。

(3)入口压力与阀门开度共同决定了空化的强度与范围。在较小开度下,较高的入口压力会加剧降压,导致剧烈的空化现象并延长下游的空穴流,而阀芯转速则主要调控下游涡流结构的演化速率。

## 符 号 说 明

- $a_l$ ——液体的热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$
- $C_1, C_2$ ——经验常数,分别为1.44和1.9
- $c_{pl}$ ——液体的热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $f$ ——质量体积分数
- $G_k$ ——平均速度引起的湍流动能的生成项,  $\text{W}/\text{m}^3$
- $h$ ——焓,  $\text{J}/\text{kg}$
- $k$ ——湍流动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$
- $L_v$ ——汽化潜热,  $\text{J}/\text{kg}$
- $\dot{m}^+, \dot{m}^-$ ——分别为蒸发和凝结质量传递速率的源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
- $\text{Pr}_L, \text{Pr}_T$ ——分别为层流与湍流 Prandtl 数
- $p$ ——压强,  $\text{Pa}$

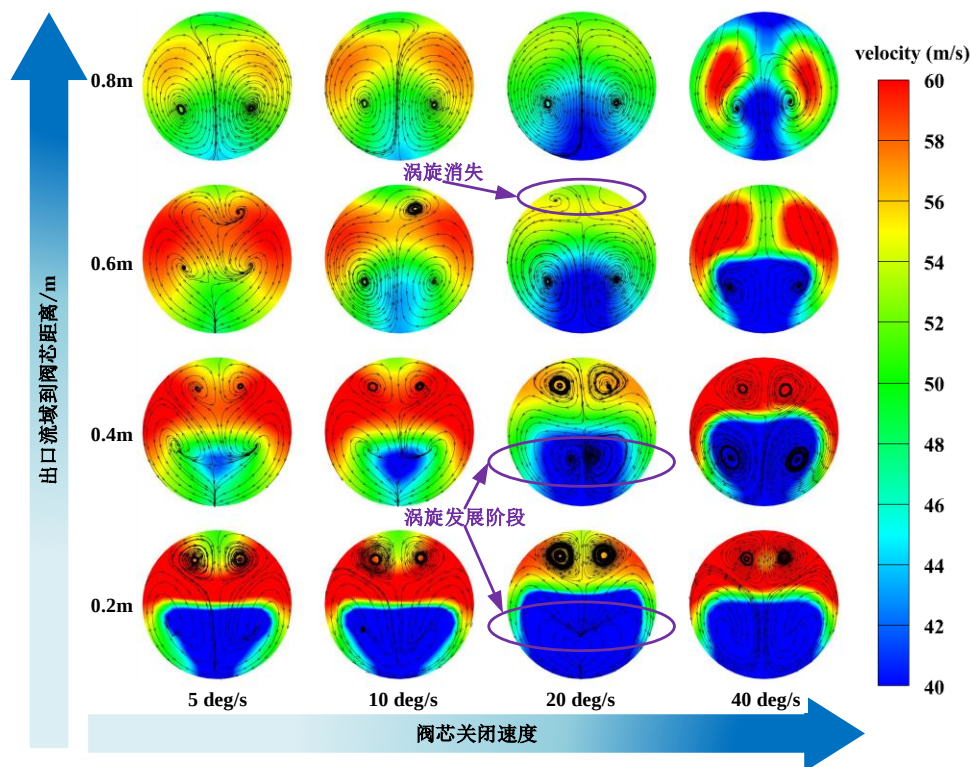


图12 不同阀芯转速下涡旋演化

Fig.12 Vortex evolution at different spool speeds

$p_v$ ——饱和蒸汽压,Pa

$R$ ——气体常数,J/(kg·K)

$R_B$ ——气泡半径,m

$T$ ——温度,K

$\Delta T$ ——气泡内外温差,K

$u$ ——速度,m/s

$\Delta V$ ——相变过程中的体积变化, $m^3$

$\alpha_v$ ——气相体积分数

$\varepsilon$ ——湍流耗散率, $m^2/s^3$

$\mu_m, \mu_l$ ——分别为混合物黏度、湍流黏度, $Pa \cdot s$

$\rho_l$ ——液相密度, $kg/m^3$

$\rho_m$ ——混合物密度, $kg/m^3$

$\rho_v$ ——气相密度, $kg/m^3$

$\sigma_k$ ——湍流动能的Prandtl数

$\sigma_\varepsilon$ ——湍流耗散率的Prandtl数

下角标

$m, l, v$ ——气液混合物,液相,气相

$i, j, k$ ——笛卡尔坐标

## 参考文献

- [1] Li C C, Li H R, Yue H, et al. Flexibility value of multimodal hydrogen energy utilization in electric - hydrogen - thermal systems[J]. Sustainability, 2024, **16**(12): 4939.
- [2] 宋薇薇, 杨凤田, 项松, 等. 氢能飞机研制进展及产业化前景分析[J]. 中国工程科学, 2023, **25**(5): 192-201.

Song W W, Yang F T, Xiang S, et al. Development progress and industrialization prospect of hydrogen-powered aircraft[J]. Strategic Study of CAE, 2023, **25**(5): 192-201.

- [3] Cheli L, Guzzo G, Adolfo D, et al. Steady-state analysis of a natural gas distribution network with hydrogen injection to absorb excess renewable electricity[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, **46**(50): 25562-25577.
- [4] 翟庆伟, 林锦辉, 李彦锋, 等. 新型泵-热协同增压液氢加氢站系统 ■ 分析[J]. 化工学报, 2025, **76**(10): 5390-5401.  
Zhai Q W, Lin J H, Li Y F, et al. Exergy analysis of novel pump-thermal synergistic pressurization liquid hydrogen refueling station system[J]. CIESC Journal, 2025, **76**(10): 5390-5401.
- [5] Seol H, Paik B-G. Correlation study between propeller noise and cavitation erosion with inclined propeller model test[J]. The Journal of the Acoustical Society of Korea, 2019, **38**(3): 328-333.
- [6] Rong X, Ruan Y X, Liu X F, et al. Numerical study of the effects of injection fluctuations on liquid nitrogen spray cooling[J]. Processes, 2019, **7**(9): 564.
- [7] 陈家成, 陈泰然, 梁文栋, 等. 收缩扩张管内液氮空化流动演化过程试验研究[J]. 力学学报, 2022, **54**(5): 1242-1256.  
Chen J C, Chen T R, Liang W D, et al. Experimental study on the evolution of liquid nitrogen cavitating flows through converging-diverging nozzle[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, **54**(5): 1242-1256.
- [8] Liu M J, Li W, Li H M, et al. Numerical simulation of cryogenic cavitating flow by an extended transport-based cavitation model with thermal effects[J]. Cryogenics, 2023, **133**: 103697.
- [9] Fan Y D, Chen T R, Liang W D, et al. Numerical and theoretical investigations of the cavitation performance and instability for the

- cryogenic inducer[J]. *Renewable Energy*, 2022, **184**: 291–305.
- [10] Chen J C, Liang W D, Han L, et al. Numerical investigation of compressible cryogenic cavitating flows by a modified mass transport model[J]. *Physics of Fluids*, 2023, **35**(4): 043304.
- [11] 马壮, 王世强, 朱斌权, 等. 液压锥阀启闭过程及空化的研究[J]. *液压气动与密封*, 2024, **44**(3): 36–41.
- Ma Z, Wang S Q, Zhu B Q, et al. Study on opening and closing process and cavitation of hydraulic cone valve[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2024, **44**(3): 36–41.
- [12] 李曼迪. 液压锥阀空化机制及气蚀预测研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2025.
- Li M D. Research on the cavitation mechanism and cavitation erosion prediction of hydraulic poppet valves[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2025.
- [13] Mu Y P, Liu M S, Ma Z X. Research on the measuring characteristics of a new design butterfly valve flowmeter[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, **70**: 101651.
- [14] Zhang G, Wang K, Yu M, et al. Numerical analysis on dynamic evolution characteristics of cryogenic cavitation through a Venturi tube[J]. *Cryogenics*, 2024, **143**: 103937.
- [15] Ito Y, Tsunoda A, Kurishita Y, et al. Experimental visualization of cryogenic backflow vortex cavitation with thermodynamic effects[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, **32**(1): 71–82.
- [16] Tabrizi A S, Asadi M, Xie G, et al. Computational fluid-dynamics-based analysis of a ball valve performance in the presence of cavitation[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, **23**(1): 27–38.
- [17] Iravani M, Toghraie D. Design a high-pressure test system to investigate the performance characteristics of ball valves in a compressible choked flow[J]. *Measurement*, 2020, **151**: 107200.
- [18] Toghraie D, Khouzani H H. Experimental and numerical investigations of choked air flow and heat transfer in a ball valve for optimization the cross-sectional area[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2020, **30**(5): 2705–2737.
- [19] 王俊鹏, 冯佳琪, 张恩搏, 等. 曲折式与阵列式迷宫阀芯结构内流动与空化特性研究[J]. *化工学报*, 2025, **76**(S1): 93–105, F0003.
- Wang J P, Feng J Q, Zhang E B, et al. Study on flow and cavitation characteristic in zigzag and array labyrinth valve core structures[J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(S1): 93–105, F0003.
- [20] Zhao L, Wu J Y, Jin Z J, et al. Cavitation effect on flow resistance of sleeve regulating valve[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2022, **88**: 102259.
- [21] Lin Z-H, Li J Y, Jin Z J, et al. Fluid dynamic analysis of liquefied natural gas flow through a cryogenic ball valve in liquefied natural gas receiving stations[J]. *Energy*, 2021, **226**(C): 120376.
- [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 J W, Wang S P, Yang Y D, et al. A review on cavitation flows considering thermal effects[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, **56**(8): 2165–2183.
- [23] 时素果, 王国玉. 不同流体介质的空化热力学效应[J]. *船舶力学*, 2021, **25**(3): 263–272.
- Shi S G, Wang G Y. Thermal effect on cavitation in different fluids[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, **25**(3): 263–272.
- [24] Zhu J K, Xie H J, Feng K S, et al. Unsteady cavitation characteristics of liquid nitrogen flows through venturi tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **112**: 544–552.
- [25] Hord J. Cavitation in liquid cryogenics. 2: hydrofoil[R]. NASA, 1973.
- [26] 何庆中, 刘佳, 陈雪峰, 等. 热力学效应对高温高压调节阀空化的影响[J]. *浙江工业大学学报*, 2020, **48**(3): 350–354.
- He Q Z, Liu J, Chen X F, et al. Influence of thermodynamics effect on cavitation of high temperature and high pressure regulating valve[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, **48**(3): 350–354.
- [27] 王永康, 张敏第, 陈泰然, 等. 热力学效应对液氢非定常空化流动的影响[J]. *航空动力学报*, 2018, **33**(12): 2866–2876.
- Wang Y K, Zhang M D, Chen T R, et al. Effects of thermodynamic on unsteady cavitation flow of liquid hydrogen[J]. *Journal of Aerodynamics*, 2018, **33**(12): 2866–2876.
- [28] Zhou X, Zhi X Q, Gao X, et al. Cavitation evolution and damage by liquid nitrogen in a globe valve[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2022, **23**(2): 101–117.
- [29] Liu X M, Song J Q, Li B B, et al. Experimental study on unsteady characteristics of the transient cavitation flow[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, **80**: 102008.
- [30] Xiang L, Tan Y H, Chen H, et al. Numerical simulation of cryogenic cavitating flow in LRE oxygen turbopump inducer[J]. *Cryogenics*, 2022, **126**: 103540.
- [31] Zhang G, Wang W W, Wu Z Y, et al. Effect of the opening degree on evolution of cryogenic cavitation through a butterfly valve[J]. *Energy*, 2023, **283**: 128543.
- [32] Huang B, Wu Q, Wang G Y. Numerical investigation of cavitating flow in liquid hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(4): 1698–1709.
- [33] Brown O L I. The clausius–Clapeyron equation[J]. *Journal of Chemical Education*, 1951, **28**(8): 428.
- [34] Liu C Q, Wang Y Q, Yang Y, et al. New omega vortex identification method[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, **59**(8): 684711.