

调节阀低温空化流动特性的数值仿真

梁文栋, 赵梦芸, 刘 博, 郭文君
(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要:采用数值计算的方法针对某型液体火箭发动机中液氧调节阀的流场分布和空化流动特性进行了研究。数值计算获得的阀门流通面积与液流实验数据基本吻合,验证了数值模型的准确性。分析了球阀内部流道压力、温度、涡和空穴结构的分布特性及不同工况下的演化规律。研究结果表明:液氧流经球阀,压力变化分为缓慢下降、急剧下降、急剧回升、缓慢下降和缓慢回升这 5 个阶段。在阀芯流道内部观察到了显著的 Q 等值面结构。相同压差时,水的空化数大于液氧。空穴结构主要分布在阀芯入口,随着空化数的降低,逐渐向流道内部发展。对于常温水,发生空化的临界空化数为 1.38 左右。空穴结构的发展受空化数和热力学效应的耦合影响。液氧温度从 95 K 上升到 100 K 时,空化数减小,名义温降增加,此时热力学效应影响起主导作用,空穴的发展受到抑制。

关键词:调节阀;液氧;空化模型;热力学效应

中图分类号:V434

文献标志码:A

文章编号:1672-9374(2024)02-0098-09

Numerical simulation on cryogenic cavitating flow characteristics of regulating valve

LIANG Wendong, ZHAO Mengyun, LIU Bo, GUO Wenjun
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Distributions of flow field and the characteristics of liquid oxygen cavitating flow inside the regulating valve of a liquid rocket engine are investigated by the numerical simulation method. The accuracy of the established model is verified by comparing the simulation results with the experimental data. Then, the evolution laws of pressure, temperature, vortex and cavity structures under different operating conditions are analyzed. The results indicate that the pressure undergoes five stages including slow decrease, sharp decrease, sharp increase, slow decrease and subsequent increase, when liquid oxygen flows through the ball valve. Notably, a significant Q structure is observed inside the flow channel. In addition, the cavitation number of room-temperature water is greater than that of liquid oxygen under the same pressure difference. The cavity structure initially grows at the valve inlet and gradually move towards the interior of the flow channel as the cavitation number decreases. For room

收稿日期:2023-06-18 修回日期:2023-12-13

基金项目:集团科技创新自主研发项目

作者简介:梁文栋(1994—),男,博士,工程师,研究领域为低温介质空化流体动力特性与机理、液体火箭发动机设计仿真。

引用格式:梁文栋,赵梦芸,刘博,等. 调节阀低温空化流动特性的数值仿真[J]. 火箭推进,2024,50(2):98-106.

LIANG W D, ZHAO M Y, LIU B, et al. Numerical simulation on cryogenic cavitating flow characteristics of regulating valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(2):98-106.

temperature water, the critical cavitation number is around 1.38. Furthermore, the development of cavity structure is affected by both the cavitation number and thermodynamic effects. When the temperature of liquid oxygen rises from 95 K to 100 K, the cavitation number decreases and the nominal temperature drop increases. In this case, the thermodynamic effect controls the evolution of the cavitating flows and suppresses the development of cavity.

Keywords: regulating valve; liquid oxygen; cavitation model; thermodynamic effect

0 引言

阀门作为液体火箭发动机的重要控制组件,其功能是供给或切断推进剂组元流量、维持其出口给定的压力、按要求改变推进剂的流量^[1-3]。调节型阀门在调节流量过程中,空泡常在阀芯周围的近壁面溃灭,造成阀芯的剥蚀和振动,严重时会导致阀门调节失效^[4,6]。在过去几十年,人们对阀门空化现象的研究通常采用常温水作为研究对象^[7-8]。随着航天发射领域的需求不断增加,流体机械的工质已不再局限于常温水^[9-10]。液氢、液氧和甲烷等低温介质作为液体火箭发动机的工质在航天领域得到了越来越广泛的应用^[11-12]。由于低温介质独特的物质属性,其空化的形态和特征与常温水空化存在很大差异,并伴随强烈的热力学效应^[13-14]。

早在 1961 年, Sarosdy 等^[15]就在实验中观察到了不同流体介质空穴形态的差异,发现与汽液边界清晰呈透明状的常温水空穴相比,氟利昂的空穴更加模糊并且呈现泡沫状。2019 年,北京理工大学 Chen 等^[16]搭建了可进行大范围温度和压力调控的低温介质非定常空化流动测试平台,实现了低温介质空化流动的观测和空穴内部的压力测量。在数值计算方面,空化模型对空化流动的数值仿真有着至关重要的作用。1917 年, Rayleigh^[17]提出了在不可压缩流体中球形空泡溃灭的控制方程。Plesset^[18]提出了著名的 Rayleigh-Plesset 方程,形成了空泡动力学理论基础。Kubota 等^[19]根据 Rayleigh-Plesset 方程最早提出了计算相间传质率的空化模型。由于热力学效应的显著影响,基于常温水建立的传统空化模型已不再能准确预测低温介质空化相变中的相间传质过程。2023 年,北京理工大学 Chen 等^[20]提出了一种考虑汽液相间对流换热的热力学修正模型,指出该模型仿真结果与试验结果吻合较好。

随着 CFD 仿真技术的不断发展,调节阀内部空

化流动特性的研究在最近 20 年得到了越来越多学者的关注。2007 年,北京理工大学的李哲等^[21]对压力调节阀内部流场进行了动态模拟计算,用动网格模拟阀芯运动,获得了阀门动态特性的影响因素和流场周期性演化规律。台湾科技大学的 Chern 等^[22]针对调节阀开展了可视化试验研究,发现对于调节阀而言,开度越小,流场结构越复杂,越容易发生空化现象。随着低温介质在航天领域的广泛应用,最近几年针对超低温阀门内低温介质空化流动特性的研究正在逐步增加。2021 年, Lin 等^[23]数值研究了球阀开闭过程中液化天然气的空化流动特性,研究表明阀门开度低于 20°时,液化天然气空化区域压降最大,随着开度增加,空化区域压降显著降低。2022 年, Zhou 等^[24]采用数值方法模拟了二维截止阀内部的液氮空化流动,发现液氮空穴主要分布在阀腔和阀门下游底部;在相同工况下,随着截止阀开度的增加,空穴体积分数显著下降,空穴位置从阀腔向侧挡板移动。2023 年,李永喜^[25]等采用 Zwart 空化模型对 LNG 超低温球阀内部的液化天然气(100 K)空化流动进行了数值仿真研究,发现空化现象主要位于结构发生突变的地方,比如焊接法兰位置、阀座附近和球体附近等。

综上所述,目前阀门低温空化流动研究将常温水更换为低温介质后,在数值模型和分析方法上没有反映出热力学效应特征,尤其是热力学效应强度会随低温介质的温度变化而变化。并且对于液体火箭相关领域的阀门低温空化流动研究更少。某型火箭发动机调节阀在液流试验中常常观察到显著的空化现象,空化的产生、发展和溃灭均会对阀芯产生作用力,造成液动力矩和流量特性测量不准确。为了获得调节球阀空化流动的临界工况,分析调节球阀实际运行时的低温流场分布特征,本文采用数值仿真的方法对某型调节球阀常温水 and 液氧的空化流动及流场分布特性进行了研究。

1 数学模型和数值方法

1.1 基本控制方程

本文研究的球型调节阀在发动机运行时流过液氧介质^[9],在液流试验中流过常温水,因此本文分别模拟了发动机运行工况压差下液氧和液流试验工况下常温水的三维不可压两相稳态流动。常温水模拟结果用来和液流试验数据对比。笛卡尔坐标系下的连续方程、动量方程、焓和质量输运方程分别为

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_m (H_m + f_v L_{ev})] + \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho_m u_i (H_m + f_v L_{ev})] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_m}{Pr_{lam}} + \frac{\mu_{tur}}{Pr_{tur}} \right) \frac{\partial H_m}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_1 \alpha_1}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_1 \alpha_1 u_j)}{\partial x_j} = m^+ + m^- \quad (4)$$

式中: u 、 p 、 f 、 α 、 L_{ev} 和 H 分别为速度、压力、质量分数、体积分数、潜热和焓; ρ_m 为混合物密度; μ_m 和 μ_{tur} 分别为混合物的层流黏性系数和湍流黏性系数; δ_{ij} 为克罗内克函数; Pr_{tur} 和 Pr_{lam} 分别为湍流普朗特数和层流普朗特数;下标 i, j, k 代表笛卡尔坐标系的方向;源项 m^+ 和 m^- 表示凝结率和蒸发率。

本文选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型应用多,计算量适中,有较多数据积累和比较高的精度。

1.2 考虑对流传热的热力学修正空化模型

相变过程中考虑传热对空泡生长过程影响的修正空化模型为^[20]

$$m^+ = F_{cond} \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_b} \times \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max[p_v(T), 0]}{\rho_l} - \frac{(T_\infty - T)H_b}{\rho_v L_{ev}}} \quad (5)$$

$$m^- = -F_{vap} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_b} \times \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max[p - p_v(T), 0]}{\rho_l} - \frac{(T_\infty - T)H_b}{\rho_v L_{ev}}} \quad (6)$$

式中: F_{vap} 和 F_{cond} 分别为蒸发和凝结项常数; α_{nuc} 为成核点位的体积分数; H_b 表征汽液间的对流传热系

数; R_b 为空泡直径; T_∞ 为来流温度; $p_v(T)$ 为对应来流温度下的饱和蒸汽压; p 为液体压强。

1.3 计算区域和边界条件

本文研究的球型调节阀计算域如图1所示,进出口分别延长5倍管道直径以确保流动充分发展。中间为阀芯区域,右侧为阀芯沿着 x 轴逆时针旋转 80° 的位置,为额定工况下的实际开度。计算域表面为无滑移壁面边界条件,进出口面的压差和流量与试验工况及实际发动机运行工况保持一致。

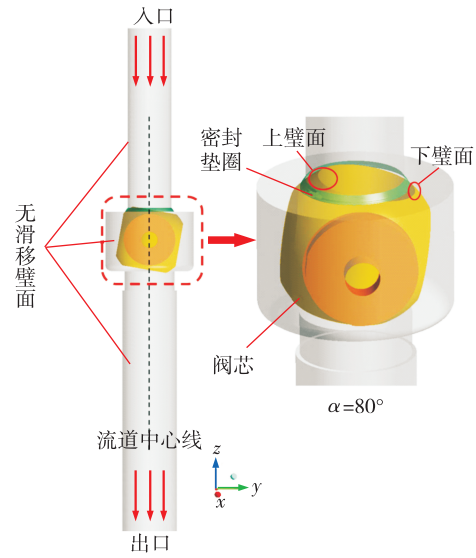


图1 计算域及边界条件

Fig.1 Computation domain and boundary conditions

采用ICEM CFD对图1所示的三维流域进行网格划分,进出口圆柱流道采用六面体网格,几何结构比较复杂的中间阀芯区域采用四面体网格,网格特征尺寸为0.8 mm,总网格数为400万。本文首先计算单相定常流动过程,并将单相结果作为初值计算两相定常空化流动过程,设置RMS残差为 10^{-4} 。

1.4 数值仿真方法验证

工况参数如表1所示,本文针对不同压差下常温水 and 液氧的空化流动特性开展数值仿真研究。95 K和100 K的液氧工况对比用来探究温度对流场分布的影响。图2给出了数值仿真计算得到的阀门流通面积与文献[26]中实验数据对比。工程应用中通常采用流通面积 μF 来表征调节阀的流量系数,如图2虚线所示,在固定开度下,试验测得阀门流通面积为定值,与介质和工况等参数无关。数值仿真结果的阀门流通面积 μF 通过流量 Q 、压差 Δp 、

密度 ρ 等计算获得,即

$$\mu F = \frac{Q}{\sqrt{2\Delta p\rho}} \quad (7)$$

表 1 不同介质下的工况参数

Tab. 1 Operating conditions under different flow mediums

工作 介质	工况	来流温度 T/K	上游压力 p_{in}/MPa	下游压力 $p_{\text{out}}/\text{MPa}$	饱和 蒸气压力 $p_v(T)/\text{MPa}$
常温水	1	293	5	2.9	0.003 17
	2	293	5	2.7	0.003 17
	3	293	5	2.5	0.003 17
	4	293	5	2.3	0.003 17
液氧	5	95	5	2.9	0.163 00
	6	95	5	2.7	0.163 00
	7	95	5	2.5	0.163 00
	8	95	5	2.3	0.163 00
液氧	9	100	5	2.9	0.254 00
	10	100	5	2.7	0.254 00
	11	100	5	2.5	0.254 00
	12	100	5	2.3	0.254 00

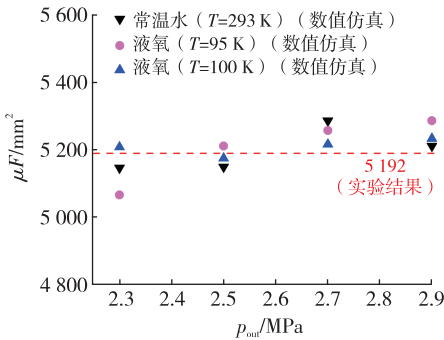


图 2 不同工况数值仿真获得流量系数与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of flow coefficient between experimental data and numerical simulation

本文通过对比调节阀固定开度 $\alpha = 80^\circ$ 时,数值仿真获得的阀门流通面积(离散点)和实验测量数据,验证仿真方法的准确性。如图 2 所示,本文针对常温水 and 不同温度下的液氧,开展了变出口压力工况仿真,结果表明流通面积稳定在实验数据附近,表明了本文数值计算方法对不同介质、不同工况的适应性较好。值得注意的是,空化产生的空穴结构会堵塞流道,进而影响阀门流通能力,降低流通面积,这可以解释图 2 中出口压力最小时,流通面积低于实验数据。而出口压力最大为 2.9 MPa 时,3 种

结果均为无空化工况,数值仿真所得阀门流通面积相似,并且与实验数据吻合较好。

2 结果与讨论

图 3 给出了球阀在工况 1 ~ 工况 4 下中心平面流道中心线位置(如图 1 虚线所示)的压力分布,横坐标 $z = 0 \text{ m}$ 表示球心位置,右端为入口,左端为出口。不同工况下压力变化趋势基本一致,介质从入口开始流动后,压力呈现缓慢下降特征。在 $z = 0.08 \text{ m}$ 位置压力开始急剧下降,到球心 $z = 0 \text{ m}$ 位置附近达到压力最小值,随后压力开始急剧回升。在 $z = -0.05 \text{ m}$ 和 $z = -0.1 \text{ m}$ 时分别达到一个上升极值和下降极值,随后介质向出口流动,压力开始回升。 p_{out} 分别为 2.3 MPa 和 2.9 MPa 时,压力最小值分别为 0.87 MPa 和 1.93 MPa。上述分析表明介质流过阀芯时,压力变化并非单调减小和单调增加两种情况,而是分为缓慢下降、急剧下降、急剧回升、下降和回升这 5 个阶段。

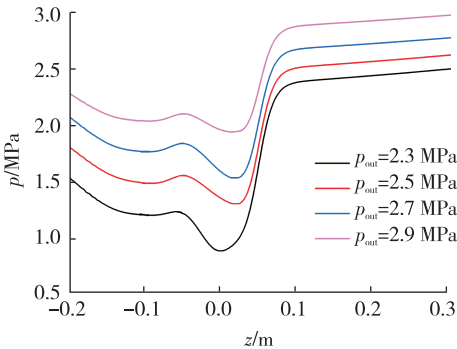


图 3 不同压差下的球阀流场中心线压力分布(介质为水)

Fig. 3 Pressure distribution at the center line of ball valve under different pressure differences (medium is water)

$z > 0.1 \text{ m}$ 时,压力缓慢下降是管道内存在流阻损失造成的。 $z = -0.1 \sim 0.1 \text{ m}$ 范围内压力变化包含了急剧下降、急剧回升和缓慢下降 3 个阶段,为了研究每个阶段介质演化特征,图 4 给出了 $z = -0.1 \sim 0.1 \text{ m}$ 这 5 个水平截面的速度和压力云图及流线分布($\Delta z = 0.05 \text{ m}$)。介质从进口管道进入球阀后,由于阀芯流道 $\alpha = 80^\circ$,流道横截面积急剧减小,速度急剧增加,速度由 65 m/s 增加到 80 m/s,对应的压力云图由红色变为黄色,造成压力急剧下降约 0.8 MPa。当介质到达球心位置左右,即图 4 中间横截面位置附近时,流道面积达到最小值,

此时速度最大,压力最小。在 $z=0$ m 水平截面上,球阀圆柱流道内观察到右侧的红色高速区和左侧的蓝绿色低速区。左侧的绿色低速区存在一对显著的漩涡结构。随着介质的进一步向下流动,流道面积增加,速度急剧减小,压力开始急剧回升,至 $z=-0.05$ m时,即图 4 中第 4 个横截面,为球阀旋转流道出口,此时流道横截面积增加至最大值,速度最小,压力最大。

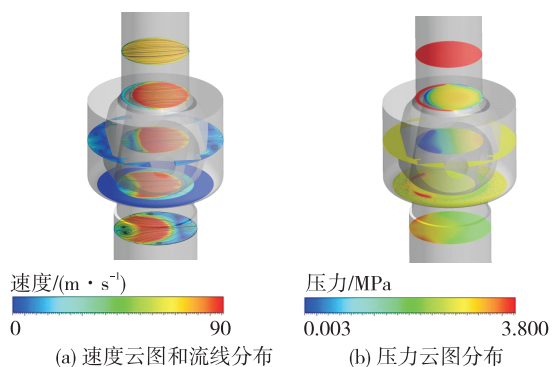


图 4 球阀不同高度横截面速度云图和流线分布及压力云图($p_{\text{out}}=2.3$ MPa, 介质为水)

Fig. 4 Distribution of streamline, velocity and pressure contours at different positions ($p_{\text{out}}=2.3$ MPa, medium is water)

随着介质流出旋转流道,从第 4 个横截面向第 5 个横截面流动时,如图 4 (b) 压力云图所示, $z=-0.1$ m 水平截面观察到左侧绿色中速区域、中间红色高速区域和右侧蓝色低速区域。在红色高速区以外均观察到了呈对称分布的 6 个漩涡结构,表明介质在阀芯出口位置流场结构十分复杂。中心压力观察到 0.02 MPa 左右的轻微下降。这是因为 $z=-0.1$ m 平面比 $z=-0.05$ m 平面多出了数个漩涡。在有漩涡的情况下,轴向局部流速受影响会增加,漩涡数量增多,导致了压力的轻微下降。在 $z<-0.1$ m 时,流道横截面不再变化,横截面漩涡最终都会消失,流速下降,导致压力缓慢上升。

上述基于二维截面的漩涡结构分析不足以完全表征三维流场湍流特征,图 5 给出了 p_{out} 分别为 2.3 MPa 和 2.9 MPa 时的 Q 等值面分布 ($Q=4 \times 10^7$)。 Q 等值面的颜色表征速度的大小。由图 5 可以观察到 Q 等值面基本分布在变截面位置,比如进口管道和阀芯之间、阀芯和出口管道之间,因为在变截面位置存在较大的速度梯度。 $p_{\text{out}}=2.3$ MPa

时,阀芯流道内部观察到两个细长弯钩结构,这是因为随着截面的变化,每一个水平截面的高速区和低速区分界面向左侧移动(见图 4),分界面位置存在较大的速度梯度,因此阀芯流道内部存在 Q 等值面。而在 $p_{\text{out}}=2.9$ MPa 时,出口压力较大,流量较小,未观察到阀芯流道内的 Q 结构。

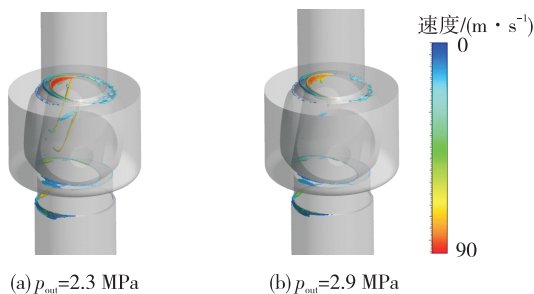


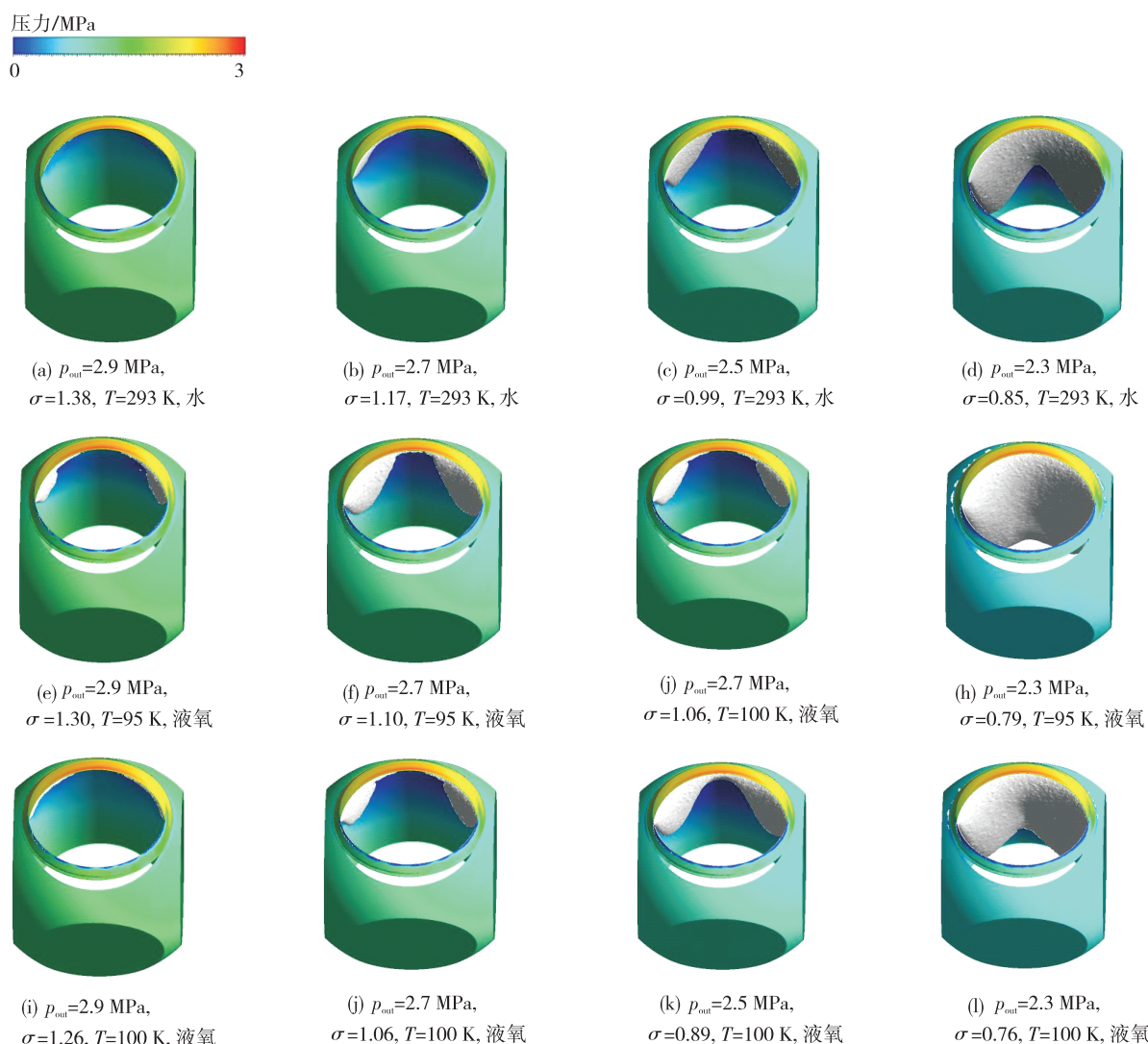
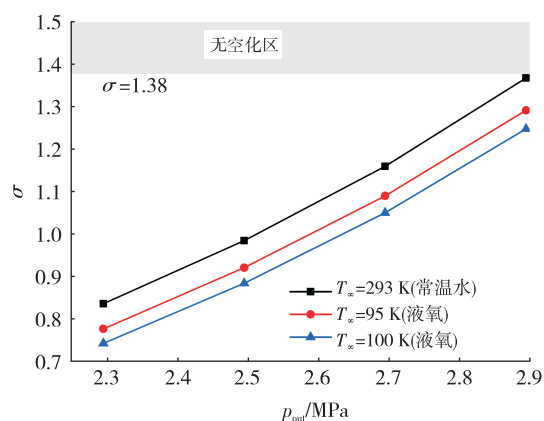
图 5 不同压差 Q 分布 ($Q=4 \times 10^7$)

Fig. 5 Distribution of Q structures under different pressure differences ($Q=4 \times 10^7$)

液流实验中常常听到汽蚀噪声,这是因为水流过阀芯,由于局部压力低于饱和蒸气压时发生了空化现象。该球阀实际工作介质为液氧,温度范围为 95 ~ 100 K。图 6 给出了不同介质不同温度下数值仿真得到的气相体积分数等值面。随着出口压力的降低,空化区域逐渐增加,空化区域的大小取决于空化数,其表达式为

$$\sigma_{\infty} = \frac{p_{\text{out}} - p_v}{p_{\text{in}} - p_{\text{out}}} \quad (8)$$

由图 6 可知,相同压差下常温水空化区域比 95 K 和 100 K 液氧介质小,这是因为相同压差时,常温水空化数比液氧大 0.1 (见图 7)。空化数越小,空穴发展越剧烈,空穴体积越大。对于常温水, $\sigma=1.38$ 时未观察到空穴结构, $\sigma=1.17$ 为初生空化,位于阀芯入口上壁面位置。随着出口压力的进一步降低,空穴结构向阀芯流道发展。液氧空穴体积随出口压差的变化趋势与常温水一致。虽然 95 K 空化数比 100 K 大 0.04 左右,但是对比 95 K 和 100 K 液氧结果可知,100 K 时空穴体积小于 95 K。这是因为随着液氧来流温度的增加,介质的热力学效应对空穴的发展过程起主导作用。而热力学效应会抑制空穴的发展,当液氧温度由 95 K 增加到 100 K 时,热力学效应的抑制作用远大于空化数减小的影响,因此 100 K 空穴体积小于 95 K。对于常温水,发生空化的临界空化数为 1.38 左右(见图 7)。

图 6 不同温度下液氧流动的阀芯空穴分布 ($\alpha_v=0.1$, $p_{in}=5$ MPa)Fig. 6 Cavity structures of liquid oxygen flow under different temperatures ($\alpha_v=0.1$, $p_{in}=5$ MPa)图 7 不同工况下空化数随出口压力的变化 ($p_{in}=5$ MPa)Fig. 7 Variation of cavitation number with the outlet pressure under different operating conditions ($p_{in}=5$ MPa)

热力学效应的大小通常可以用名义温降 ΔT^* 表征,即

$$\Delta T^* = \frac{\rho_v L_{ev}}{\rho_l c_p} \quad (9)$$

名义温降仅与流体介质的物质属性相关。如图 8 所示,随着来流温度的升高,名义温降逐渐增加。常温水的名义温降 ΔT^* 仅为 0.008 K,而 95 K 和 100 K 液氧的名义温降分别为 0.76 K 和 1.12 K。名义温降 ΔT^* 合理地解释了常水中热力学效应通常被忽略的原因及液氧的热力学效应明显强于常温水。

受热力学效应的影响,与常温水相比,液氧球阀内部流动温度变化和温度变化对空化的影响不可忽略。液氧各个工况下阀芯温度云图如图 9 所

示。温度云图分布与空穴结构基本一致,表明空化区域存在显著的温降。随着空化数的降低,温降区域逐渐向阀芯流道发展。 T 分别为 95 K 和 100 K 时最大温降分别为 2.5 K 和 1.5 K。

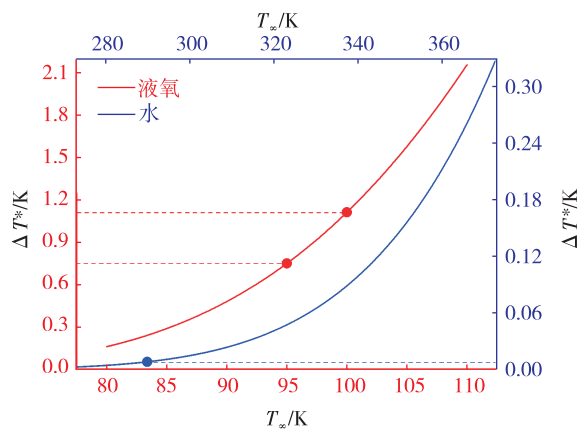


图 8 液氧和水的名义温降 ΔT^* 随温度的变化

Fig. 8 Variation of nominal temperature with temperature of liquid oxygen and room-temperature water

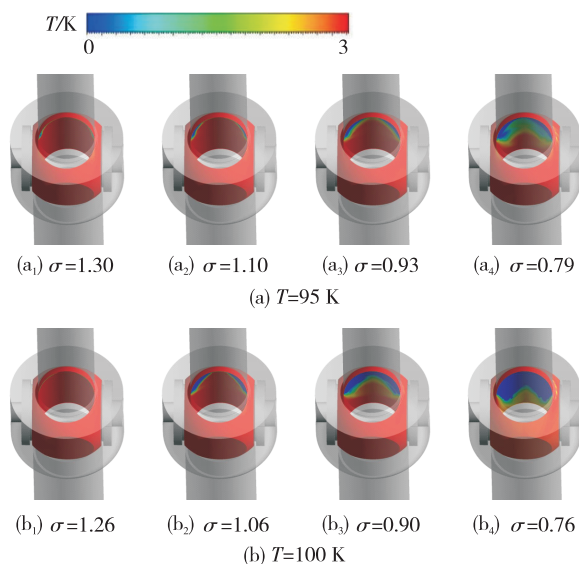


图 9 不同温度下液氧流动的阀芯温度分布云图

Fig. 9 Temperature contours of liquid oxygen inside the valve under different temperatures

3 结论

本文通过数值仿真研究了某型调节阀在发动机额定工况压差和开度时的流场特性和空穴结构,为了模拟液氧热力学效应对球阀流动的影响,空化模型采用了考虑汽液相间对流传热的热力学修正

模型。不同工况下数值计算获得的流通面积与液流实验数据基本吻合,验证了数值模型的准确性。讨论了球阀内部流道压力、温度、涡和空穴结构的分布特性及不同工况下的演化规律,得到的主要结论如下。

1) 工质流经球阀,受流道几何结构变化的影响,压力变化分为缓慢下降、急剧下降、急剧回升、缓慢下降和缓慢回升这 5 个阶段。介质在阀芯流道内部流动时,截面速度区域分为高速区和低速区,两个区域分界线上存在较大的速度梯度,并在阀芯流道内部观察到了显著的 Q 等值面结构,表明流道内的涡量较大。随着压差的减小,阀芯流道漩涡结构消失。

2) 相同压差时,水的空化数大于液氧。随着液氧温度的升高,空化数逐渐减小。空穴结构主要分布在阀芯入口,随着空化数的降低,逐渐向流道内部发展。空穴结构的发展受空化数和热力学效应的耦合影响。液氧温度由 95 K 上升到 100 K 时,空化数减小,名义温降增加,此时热力学效应影响占据主导作用,所以尽管空化数减小,空穴结构反而增加。对于常温水,发生空化的临界空化数为 1.38 左右。

参考文献

- [1] 王博, 蒋平, 赵骞, 等. 氢氧火箭发动机组件研制阶段可靠性技术综述[J]. 火箭推进, 2021, 47(2): 1-8.
WANG B, JIANG P, ZHAO Q, et al. Review on reliability technology of hydrogen-oxygen rocket engine components in development[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(2): 1-8.
- [2] 孙纪国, 郑孟伟, 龚杰峰, 等. 220 tf 补燃循环氢氧发动机研制进展[J]. 火箭推进, 2022, 48(2): 11-20.
SUN J G, ZHENG M W, GONG J F, et al. Development of staged combustion cycle LH_2/LO_x engine with 220 tf thrust[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(2): 11-20.
- [3] 李东, 王珏, 陈士强. 长征五号运载火箭动力系统总体技术分析[J]. 推进技术, 2021, 42(7): 1441-1448.
LI D, WANG J, CHEN S Q. Key technology analysis of CZ-5 launch vehicle propulsion system[J]. Journal of

- Propulsion Technology, 2021, 42(7): 1441-1448.
- [4] 贺杰. 液压调节阀空化流场特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- HE J. Investigation of cavitation flow characteristics in the regulating valve [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [5] 张希恒, 王宇, 张孙力. 基于动网格的调节阀空化流场数值模拟研究[J]. 化工机械, 2021, 48(4): 542-545.
- ZHANG X H, WANG Y, ZHANG S L. Numerical simulation and research of cavitation flow field in control valve based on dynamic mesh [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2021, 48(4): 542-545.
- [6] 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.
- [7] 黄彪, 吴钦, 王国玉. 非定常空化流动研究现状与进展[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(1): 1-14.
- HUANG B, WU Q, WANG G Y. Progress and prospects of investigation into unsteady cavitating flows[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(1): 1-14.
- [8] 项乐, 李春乐, 许开富, 等. 诱导轮超同步旋转空化传播机理[J]. 火箭推进, 2022, 48(2): 76-85.
- XIANG L, LI C L, XU K F, et al. Inducer super-synchronous rotating cavitation propagation mechanism[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(2): 76-85.
- [9] 王维彬, 巩岩博. 50吨级氢氧火箭发动机的设计与研制[J]. 推进技术, 2021, 42(7): 1458-1465.
- WANG W B, GONG Y B. Design and development of 50-ton LOX/LH₂ rocket engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(7): 1458-1465.
- [10] 孙纪国, 何学青, 阳代军, 等. 大推力氢氧发动机关键制造技术[J]. 火箭推进, 2022, 48(2): 117-126.
- SUN J G, HE X Q, YANG D J, et al. Key manufacturing technology for large thrust LH₂/LOX cycle engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(2): 117-126.
- [11] 郑孟伟, 岳文龙, 孙纪国, 等. 我国大推力氢氧发动机发展思考[J]. 宇航总体技术, 2019(2): 12-17.
- ZHENG M W, YUE W L, SUN J G, et al. Discussion on Chinese large-thrust hydrogen/oxygen rocket engine development [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019(2): 12-17.
- [12] 郑大勇, 颜勇, 孙纪国. 液氧甲烷发动机重复使用关键技术发展研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(2): 31-35.
- ZHENG D Y, YAN Y, SUN J G. Development study of key reusable technology for LOX/methane engine [J]. Missiles and Space Vehicles, 2018(2): 31-35.
- [13] 梁文栋, 王国玉, 黄彪, 等. 液氮空化流动的实验和数值计算研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(10): 2299-2304.
- LIANG W D, WANG G Y, HUANG B, et al. Experimental and numerical simulation of cavitating flows in liquid nitrogen[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(10): 2299-2304.
- [14] LIANG W D, CHEN T R, WANG G Y, et al. Experimental investigations on transient dynamics of cryogenic cavitating flows under different free-stream conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 178: 121537.
- [15] SARO SDY L R, ACOSTA A J. Note on observations of cavitation in different fluids[J]. Journal of Basic Engineering, 1961, 83(3): 399-400.
- [16] CHEN T R, CHEN H, LIU W C, et al. Unsteady characteristics of liquid nitrogen cavitating flows in different thermal cavitation mode[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 63-76.
- [17] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1917, 34(200): 94-98.
- [18] PLESSET M S. The dynamics of cavitation bubbles[J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 277-282.
- [19] KUBOTA A, KATO H, YAMAGUCHI H. A new modeling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 240: 59.
- [20] 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.
- [21] 李哲, 魏志军, 张平. 燃气调压阀内流场三维数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(3): 210-213.
- LI Z, WEI Z J, ZHANG P. 3D numerical simulation on internal flow field for pressure regulating valve of gas generator[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(3): 210-213.

- [22] CHERN M J, WANG C C, MA C H. Performance test and flow visualization of ball valve [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31(6): 505-512.
- [23] 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: 120376.
- [24] 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.
- [25] 李永喜, 杨扬, 成世春, 等. 液化天然气输送系统超低温球阀介质流动仿真分析 [J]. *阀门*, 2023(4): 477-479.
- LI Y X, YANG Y, CHENG S C, et al. Simulation analysis of medium flow of cryogenic ball valve in LNG transportation system [J]. *Valve Magazine*, 2023(4): 477-479.
- [26] 赵莹, 许健, 张强. 仿真技术在球阀特性研究中的应用 [J]. *火箭推进*, 2013, 39(6): 29-34.
- ZHAO Y, XU J, ZHANG Q. Application of simulation technology in ball valve characteristic study [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2013, 39(6): 29-34.