

诱导轮液氧空化流动特性数值仿真

项乐, 李春乐, 许开富, 张凯
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要:诱导轮是决定涡轮泵抗空化能力的关键部件,为了揭示诱导轮内部液氧空化流动特性,建立了基于能量方程源项修正的低温空化数值计算方法,同时耦合了液氧物性随温度变化关系,利用经典低温空化和诱导轮空化试验数据进行了充分验证,对某三叶片诱导轮内部液氧空化流动进行了仿真分析。结果表明:低温介质空化过程中与周围液体存在剧烈的能量交换,但只有一部分空化溃灭释放的热量被传递至周围流场,通过调节能量方程源项中空化溃灭释热比例可使空化区尾部温度场预测精度提升0.5%。对比等温计算,考虑热效应后,液氧空化区范围和内部汽相体积分数大幅减小,对流道的阻塞程度降低,有效延缓了诱导轮扬程断裂。对3种温度下液氧空化流动进行仿真研究,发现液氧温度越高,空化范围越小,同时空化区温降越大,诱导轮空化性能改善也越显著。

关键词:诱导轮;液氧空化;数值仿真;空化模型;热效应

中图分类号:TV131.32;V431

文献标志码:A

文章编号:1672-9374(2024)03-0011-08

Numerical simulation on LOX cavitating flow characteristics of inducer

XIANG Le, LI Chunle, XU Kaifu, ZHANG Kai
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Inducer is key component which determinates the anti-cavitation ability of a turbopump. In order to clarify the LOX cavitation flow characteristic inside the inducer, a novel numerical simulation for cryogenic cavitation method has been built based on the correction of energy equation source term, and the relationship between physical properties and temperature variation is coupled. The numerical method has been verified by the classical cryogenic cavitation and the inducer cavitation experimental data. Then, a simulation analysis of cavitation flow inside a three-bladed inducer are conducted, and it is found that: there is strong energy exchange between cavities and the surrounding liquid during the cryogenic cavitation, but only part of the heat released by the cavitation collapse can be transferred to the surrounding liquid. By adjusting the heat release ratio of heat by cavitation collapse in the source term of energy equation, the prediction precision of temperature field near the cavity rear can be improved by

收稿日期:2023-11-20 修回日期:2024-03-12

基金项目:国家重大基础研究项目(613321)

作者简介:项乐(1991—),男,博士,研究领域为涡轮泵设计。

引用格式:项乐,李春乐,许开富,等.诱导轮液氧空化流动特性数值仿真[J].火箭推进,2024,50(3):11-18.

XIANG L, LI C L, XU K F, et al. Numerical simulation on LOX cavitating flow characteristics of inducer[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(3): 11-18.

0.5%。Compared with isothermal calculation results, the LOX cavitation area and vapor volume fraction decrease remarkably when the thermal effect is considered, thus the blocking effect to the blade channels decreases either, and the inducer head breakdown is delayed effectively. The simulation study of the LOX cavitation flow at different temperature shows that the higher the liquid oxygen temperature, the smaller the cavitation range, and the larger the temperature drop in the cavitation region, the more significant the improvement of cavitation performance for the induced wheel.

Keywords: inducer; LOX cavitation; numerical simulation; cavitation model; thermal effect

0 引言

液氧、液氢、甲烷等低温介质由于比冲高、环境友好等优势越来越多应用于现代航天液体动力系统,但是相较于传统常温推进剂,低温、物性对温度变化敏感等特性决定了针对低温介质的处理更为棘手。液体火箭发动机工作过程中,涡轮泵、文氏管、阀门等众多过流部件内部不可避免地发生局部压力降低引起的空化现象,导致局部流动变得复杂,增大了设计难度。相比目前研究较成熟的常温空化,低温介质的空化过程存在剧烈的能量交换,与温度升高驱动的沸腾现象难以进行严格区分,物理过程更加复杂。诱导轮是决定涡轮泵抗空化能力的关键部件,对诱导轮内部低温空化流动特性展开深入研究对于提升低温液体火箭发动机的工作可靠性具有重要意义。

针对低温空化,早期的研究主要集中于稳态特性。NASA 的 Robert 等^[1]首次以液氮、液氢等低温介质为工质,以文氏管、翼型、离心泵等为研究对象,开展大量实验研究,发展了定量预测低温空化流动特性的半经验理论模型。Hord^[2-3]进一步以翼型、回转体为研究对象开展液氮空化实验研究,进一步发展了空化区温降理论预测模型,且其实验数据长期以来被作为低温空化数值算法的校核标准。Yoshida 等^[4-5]通过大量实验深入研究了不同工况下液氮空化流动特性。Ito 等^[6-7]首次通过可视化的方法获得了诱导轮内液氮空化流动形态。近年来,Chen 等^[8-9]搭建了宽工作范围文氏管低温空化流动可视化实验平台,深入研究了液氮空化热效应对空化动态特性的影响规律和机理。

上述研究为认识低温介质空化流动特性积累了宝贵的实验数据,考虑到低温空化实验的难度、成本和危险性等因素,针对诱导轮低温空化开展可视化实验研究仍是一项巨大的挑战,数值仿真成为

众多研究者的选择。文献[10-12]发展了基于Merkle模型的低温空化数值计算方法,并研究了某诱导轮内液氢空化流动特性。文献[13-14]等分析了Zwart模型中经验系数的影响,针对液化天然气给出了推荐值。文献[15-16]验证了Singhal模型在低温空化仿真中的适用性。Tsuda 等^[17]基于B因子理论建立了一种低温空化仿真方法,无需求解能量方程,提升了计算效率。

综上,针对低温空化目前没有成熟仿真方法,且数值预测精度依赖于空化模型中的经验系数,没有一种空化模型适用于所有工况。而且大部分相关文献关注的是翼型表面空化,诱导轮内低温空化相关仿真工作比较少见,特别是液氧的空化流动特性更少见报道。本文提出一种基于能量方程源项修正的低温空化仿真方法,利用Hord经典实验数据^[2-3]对方法进行充分验证,进一步对某三叶片诱导轮内液氧空化流动特性展开仿真研究。

1 研究方法

1.1 控制方程

本文针对低温空化流动的数值模拟是基于均相模型,即将汽液两相视为充分混合的均匀介质,其内部汽液处于热平衡,共享同一套流场信息。采用相体积分对两相进行区分,利用输运型空化模型求解相体积分,具体方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \mu_{\text{eff}} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial x_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_m H_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_j H_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_m}{Pr_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial H_i}{\partial x_j} \right] + S_E \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha u_i)}{\partial x_i} = \Gamma = \Gamma_{lv} - \Gamma_{vl} \quad (4)$$

式中: ρ_m 为混合密度,且 $\rho_m = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l$; α 为蒸汽体积分分数; ρ_v 、 ρ_l 分别为汽相、液相密度; μ_{eff} 为有效黏度,且 $\mu_{eff} = \mu_m + \mu_t$, μ_m 为混合黏度, μ_t 为湍流黏度; H_l 为总焓,且 $H_l = H_m + u_i^2/2$, $H_m = [\alpha \rho_v H_v + (1 - \alpha) \rho_l h_l]/\rho_m$; Pr_l 、 Pr_t 分别为层流和湍流普朗特数; S_E 为相变过程引起的热交换; Γ_{lv} 、 Γ_{vl} 分别为蒸发源项和凝结源项,分别控制着蒸发和凝结过程。

$$\Gamma_{lv} = \begin{cases} C_e \frac{\max(1, \sqrt{k})}{s} \rho_l \rho_v \left\{ \frac{2}{3} \left[\frac{p_v(T) - p}{\rho_l} \right]^{1/2} \right\} \times (1 - f_v) & p < p_v(T) \\ 0 & p \geq p_v(T) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Gamma_{vl} = \begin{cases} C_e \frac{\max(1, \sqrt{k})}{s} \rho_l \rho_l \left\{ \frac{2}{3} \left[\frac{p - p_v(T)}{\rho_l} \right]^{1/2} \right\} f_v & p \geq p_v(T) \\ 0 & p < p_v(T) \end{cases} \quad (6)$$

式中: k 为湍动能; s 为液体的表面张力系数; f_v 为蒸汽的质量分数; p 为当地压力; $p_v(T)$ 为由当地温度决定的饱和蒸汽压; C_e 、 C_c 为经验系数, $C_e = 0.02$ 、 $C_c = 0.01$ 。

由于低温介质的物理属性对温度变化极其敏感,物性的变化对空化发展过程有重要影响,因此仿真过程中须根据当地温度场实时更新物性参数。介质的物性参数是由压力和温度决定,由于空化过程中,汽液处于局部热平衡状态,仅需将物性参数取为随饱和温度变化的函数。同时考虑到流场中未发生空化的区域介质处于过冷状态,不满足热平衡条件,以饱和状态物性参数进行仿真计算可能会导致收敛问题,随温度变化的物性函数仅在式(5)、式(6)中发挥作用。

低温介质空化所需热量较大,与周围液体存在剧烈的能量交换,因此需在能量方程中添加源项以考虑相变的影响,其表达式为

$$S_E = Q_{vl} - Q_{lv} = c \Gamma_{vl} L - \Gamma_{lv} L \quad (7)$$

式中: L 为蒸发潜热; $Q_{lv} = \Gamma_{lv} L$ 为蒸汽形成时从周围液体吸收的热量; $Q_{vl} = c \Gamma_{vl} L$ 为蒸汽凝结时释放的热量,考虑到凝结释热可能通过湍流或其他形式耗散掉,通过修正系数 c 对凝结释热进行控制,其具体取值将在下文中讨论。

1.3 数值计算与设置

首先利用 Hord 经典液氮实验数据对本文的低

考虑到诱导轮内部流动复杂性,本文选择 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟,其在水力机械中良好的适用性已被众多研究者证实^[18-19]。

1.2 空化模型

空化模型的选择对准确模拟空化流动特性至关重要,文献[20-21]对目前常见的几种输运型空化模型进行过对比分析,发现 Singhal 模型在温度场预测中具有一定优势,且不过度依赖经验系数。因此本文选择 Singhal 模型做进一步研究,其原始表达式为

温空化仿真方法进行验证,其计算域如图 1 所示,由于该算例中流动上下完全对称,本文只模拟一半的流域。计算域长 230 mm,宽 12.7 mm,翼型长 63.5 mm,头部直径为 7.92 mm,沿流向扩张角度为 1.82°。随机选择两种 Hord 实验工况 290C、293A 进行计算,介质为液氮,温度分别为 83.06 K、77.64 K,详细工况见文献[2]。根据实验结果,入口给定速度,调整出口压力,保证来流空化数与实验结果一致。网格节点数为 64 884,根据文献[22]的研究,该网格数已经满足网格无关性要求。

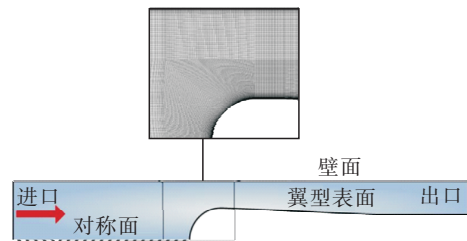


图 1 2D 翼型计算域和网格细节

Fig. 1 Calculation domain of 2D hydrofoil and mesh details

本文的研究对象是典型的大稠度、等螺距、变轮毂直径的三叶片诱导轮,具体计算域见图 2,诱导轮详细结构参数可参考文献[23]。进出口流域为直管路,划分结构化网格,旋转域划分非结构网格,为了避免进出口回流,进出口流域长度均取 10 倍管径。整体网格数量为 6.97×10^6 ,满足网格无关性

要求^[18]。入口设置为总压入口、同时给定温度和来流湍流度,出口设置为流量出口,计算结果显示叶片表面最大 $y^+ < 100$,满足壁面函数对近壁网格尺寸的要求。

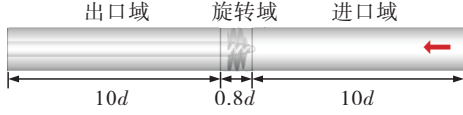


图2 诱导轮计算域

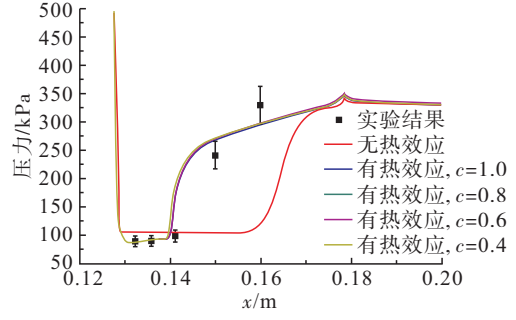
Fig.2 Calculation domain of inducer

2 结果与讨论

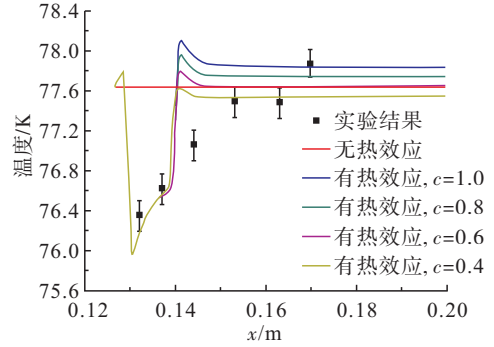
2.1 仿真方法验证

首先对本文建立的低温空化仿真方法进行充分验证,基于二维翼型算例验证算法对低温空化表面参数分布特性预测能力进行验证,实验数据来自文献[2];基于三维诱导轮验证算法对复杂三维空化结构和外特性预测能力进行验证,实验数据来自文献[23]。

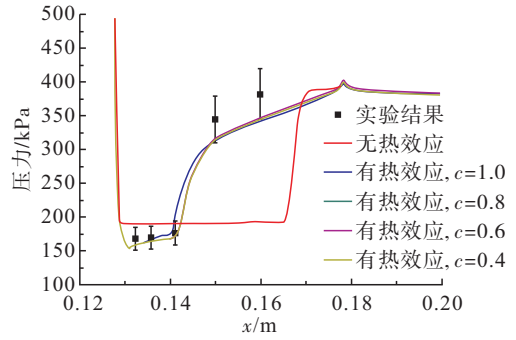
图3为仿真预测的翼型表面压力和温度分布与实验结果对比,其中包括等温计算和考虑热效应时调节修正系数 c 的计算结果^[2]。首先能看到,等温计算无法预测空化区的温度分布,预测的压力分布与实验结果存在较大的偏差,压力分布曲线中的低压区也与实验结果有较大偏差,表明等温计算预测的空化区范围显著大于实验结果。考虑热效应以后,仿真预测的压力和温度分布明显更接近实验结果,最大温降和最低压力位置均位于翼型头部位置,表明蒸汽的形成主要发生在头部,引起当地温度大幅降低。压力和温度沿流向逐步增大,直至恢复至与主流一致,在空化区尾部存在大量的气泡溃灭释热,导致当地温度有一定程度上升,两种工况压力温度分布变化趋势类似。调整修正系数 c 时,对压力分布没有影响,但会显著影响空化区尾部的温度,当地温度随 c 值减小而降低。由式(7)可知, c 值控制气泡溃灭释热的份额,综合两种工况仿真结果, $c=0.4$ 时空化区尾部温度与实验结果一致,相较于 $c=1.0$ 时,空化区尾部温度预测精度提升约 0.5%,表明空化溃灭释放的热量只有 40% 传递至周围流场中,其余热量以其他形式耗散掉,没有对流场产生影响。因此,本文以下计算均取 $c=0.4$ 。



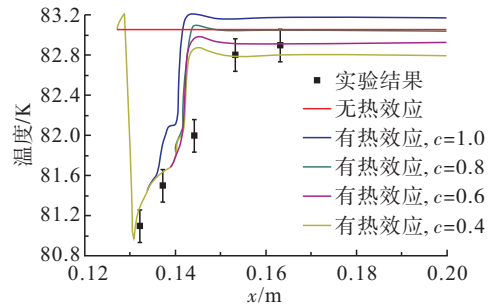
(a) 压力(293A)



(b) 温度(293A)



(c) 压力(290C)



(d) 温度(290C)

图3 翼型表面压力、温度分布

Fig.3 Pressure and temperature distribution on the hydrofoil surface

图4为仿真预测的诱导轮空化性能与 298 K 常温水实验结果对比^[23] (其中 ψ 为扬程系数),首先相较于应用广泛的 Zwart 模型,本文建立的方法预测的空化性能曲线与实验结果几乎重合,充分证实

了本文方法的精确性。同时以 100 K 的液氧为工质,对比了等温计算和考虑热效应的预测结果。等温计算结果与常温水仿真结果比较接近,考虑热效应后,大幅延缓了空化断裂的发生,改善了空化性能。

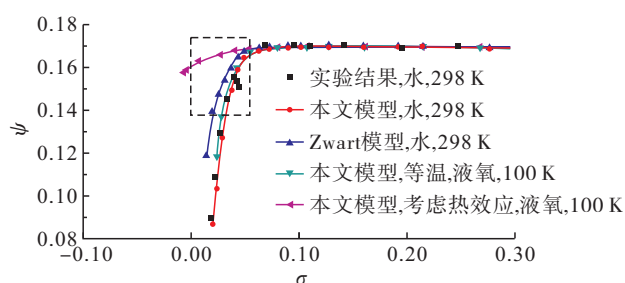


图 4 诱导轮空化性能

Fig. 4 Cavitation performance curves of inducer

图 5 为不同空化数下仿真预测的空化形态与 298 K 常温水实验结果^[23]对比(其中左图为实验结果,右图为仿真结果),空化区以汽相体积分数 $\alpha = 0.01$ 的等值面来表征。可以看出:不同空化数下仿真预测的空化形态与实验结果非常接近,实验结果中空化区尾部有大量小尺度的空化脱落,呈强非定常特征,无法通过本文的定常计算方法捕捉。综上,本文建立的低温空化数值计算方法有较好的准确性,可用于进一步研究。

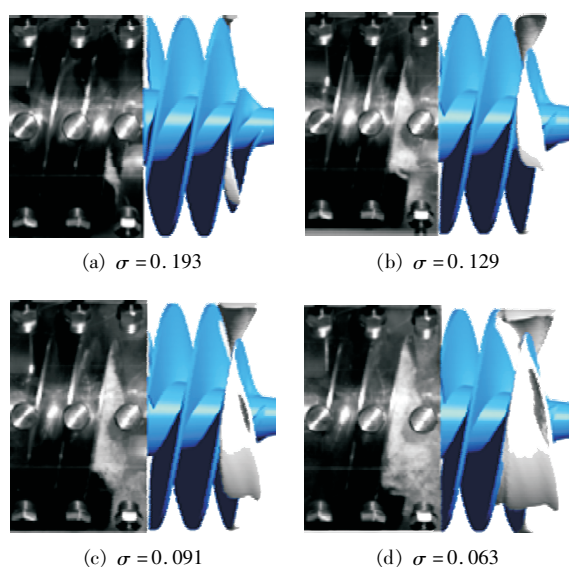


图 5 诱导轮内部空化形态

Fig. 5 Cavitation morphology inside the inducer

2.2 诱导轮液氧空化流动特性分析

前文指出,考虑热效应以后会大幅延缓空化断裂,改善诱导轮空化性能,本节进一步分析原因。图 6 对比了 $\sigma = 0.108$ 时等温计算和考虑热效应的诱导轮内部流动状态,能看到等温计算时,由于空化区内部被大量汽相占据,造成较严重阻塞,当地速度显著减小,泄漏涡轨迹受到明显的排挤作用;考虑热效应后,空化区范围显著减小,其内部的汽相体积分数也大幅减小,表明此时空化区内部以汽液两相流为主,来流能顺利通过空化区,对流动造成的阻塞程度较小,泄漏涡轨迹受到的排挤作用也较弱。

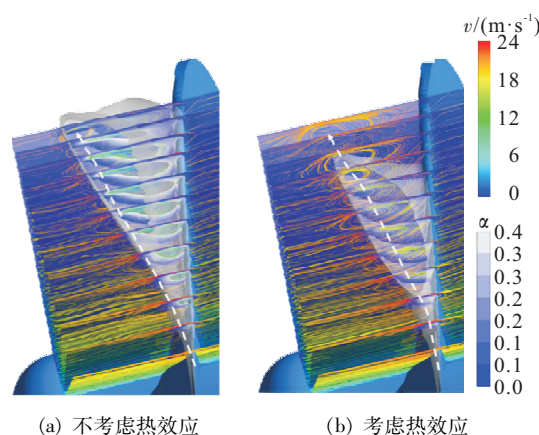


图 6 等温计算和考虑热效应计算结果对比
($\sigma = 0.108$, 液氧, 100 K)

Fig. 6 Comparison of flow details with and without thermal effect ($\sigma = 0.108$, LOX, 100 K)

进一步降低空化数, $\sigma = 0.027$ 时不同叶高位置的汽相体积分布如图 7 所示,其中左图为等温计算结果,右图为考虑热效应计算结果。由图 4 可知:该空化数下等温计算时诱导轮扬程已经完全断裂,这是由于空化区已经发展至叶片流道内部,对流动造成较严重阻塞,同时影响出口液流角,导致诱导轮失去做功能力。而考虑热效应后,空化区范围和汽相体积分数 α 都大幅减小,且空化区仍集中在喉部上游区域,未对叶片流道造成阻塞,因此诱导轮做功能力不受影响。

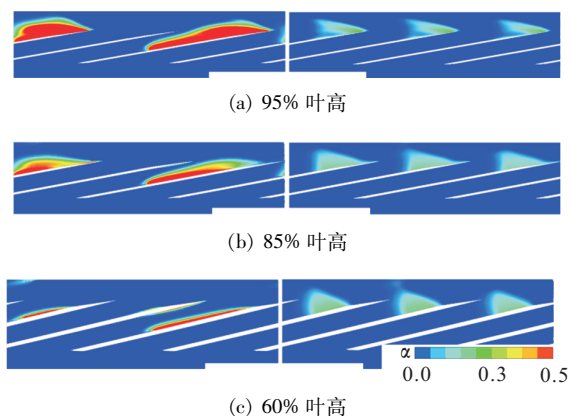


图 7 不同叶高位置汽相体积分($\sigma=0.027$, 液氧, 100 K)

Fig. 7 Vapor volume fraction at different blade span
($\sigma=0.027$, LOX, 100 K)

图 8 为 88、93.5、100 K 这 3 种不同液氧温度下仿真预测的诱导轮空化性能。可以看出:随温度升高,热效应增强,空化断裂的过程更加平缓;以扬程下降 5% 作为临界空化数,3 种温度下临界空化数分别为 0.025 5、0.022、0.008,充分证实了热效应对诱导轮空化性能的改善效果。特别是在 100 K 时,最低空化数已经降低至 -0.02 ,即此时来流静压已经低于来流温度对应的饱和蒸汽压,来流几乎呈两相流状态,但诱导轮扬程系数只下降了 7%。过去针对低温涡轮泵的设计,通常以水试结果为基准换算至真实液氧工况,没有考虑液氧空化热效应的影响,这里的仿真结果表明液氧是一种空化热效应很强的工质,且随温度升高,其热效应会进一步增强,对空化发展的抑制也进一步增强,对诱导轮空化性能有较强的提升作用,应当在设计过程中谨慎考虑。

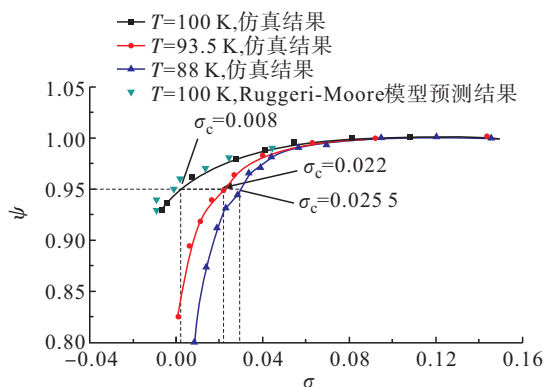


图 8 不同液氧温度诱导轮空化性能

Fig. 8 Cavitation performance at different LOX temperatures

图 9 为 $\sigma=0.1$ 时诱导轮内部空化区和温降分布,可以看到虽然空化数相同,但是空化区范围明显随温度升高而减小,空化区内部最大温降也随温度升高而增大,相应的饱和蒸汽压减小量分别为 $\Delta p_v=3.697$ kPa ($T=88$ K), $\Delta p_v=7.621$ kPa ($T=93.5$ K) 和 $\Delta p_v=18.164$ kPa ($T=100$ K),饱和蒸汽压减小抑制了空化的进一步发展,很好地解释了图 8 中温度升高对空化性能的提升效果。

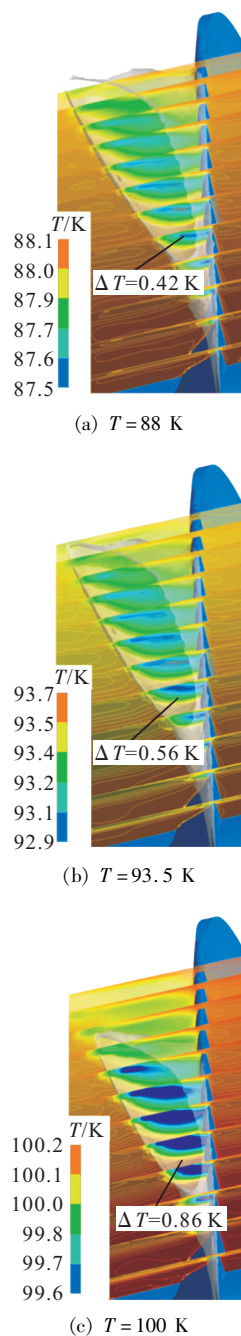


图 9 空化区温度分布 ($\sigma=0.1$)

Fig. 9 Temperature distribution inside cavities ($\sigma=0.1$)

上述分析揭示了空化热效应现象及其对空化性能的影响,对水力机械设计者而言,关心的是如何定量预测热效应的影响。图8中给出了利用Ruggeri-Moore模型预测的空化性能与仿真结果对比,该模型需要两个基准工况,其中至少一个显示出明显的热效应,模型的假设条件及完整推导过程见文献[1]。可以看出:模型预测结果与仿真结果非常接近,表明模型具有较好的准确性,将来可有效应用于工程中指导低温泵和优化设计。

3 结论

本文基于输运型空化模型建立一种低温空化数值计算方法,通过对能量方程源项的修正实现了温度场的准确预测,进一步对诱导轮液氧空化流动特性展开了仿真研究,获得如下结论。

1)建立了基于能量方程源项修正,且考虑温度对介质物性参数影响的低温空化数值计算方法,发现低温空化过程中只有一部分空化溃灭释放热量被传递至周围流场中,通过调整能量方程源项中空化溃灭释热的比例,可显著提高温度场的预测精度。

2)建立的仿真方法对常温水空化也具有较好的适用性,能够准确预测诱导轮的外特性和空化形态。

3)相较于等温计算,考虑热效应后空化区范围和汽相体积分显著减小,大幅减小了对流道的阻塞程度,因此显著延缓诱导轮扬程断裂,热效应随温度升高而增强。

参考文献

- [1] ROBERT S, RUGGERI R D. Prediction of thermodynamic effects of developed cavitation based on liquid-hydrogen and Freon 114 in scaled venturis [R]. NASA TN D-4899, 1968.
- [2] HORD J. Cavitation in liquid cryogen II: hydrofoil [R]. NASA-CR-2156, 1973.
- [3] HORD J. Cavitation in liquid cryogen III: ogives [R]. NASA-CR-2242, 1973.
- [4] YOSHIDA Y, KIKUTA K, HASEGAWA S, et al. Thermodynamic effect on a cavitating inducer in liquid nitrogen [J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(3): 273-278.
- [5] YOSHIDA Y, SASAO Y, WATANABE M, et al. Thermodynamic effect on rotating cavitation in an inducer [J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(9): 1.
- [6] ITO Y, TSUNODA A, KURISHITA Y, et al. Experimental visualization of cryogenic backflow vortex cavitation with thermodynamic effects [J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(1): 71-82.
- [7] ITO Y, SATO Y, NAGASAKI T. Theoretical analyses of the number of backflow vortices on an axial pump or compressor [C]//ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference. San Francisco, California: ASME, 2019.
- [8] 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.
- [9] CHEN T R, CHEN H, LIANG W D, et al. Experimental investigation of liquid nitrogen cavitating flows in converging-diverging nozzle with special emphasis on thermal transition [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132: 618-630.
- [10] HOSANGADI A, AHUJA V. Numerical study of cavitation in cryogenic fluids [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(2): 267-281.
- [11] MERKLE C L, FENG J, BUELOW P. Computational modeling of dynamics of sheet cavitation [C]//3rd International Symposium on Cavitation. Grenoble, France: [s. n.], 1998.
- [12] HOSANGADI A, AHUJA V, UNGEWITTER R J, et al. Analysis of thermal effects in cavitating liquid hydrogen inducers [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(6): 1225-1234.
- [13] SONG P, SUN J J, HUO C J. Cavitating flow suppression for a two-phase liquefied natural gas expander through collaborative fine-turning design optimization of impeller and exducer geometric shape [J]. Journal of Fluids Engineering, 2020, 142(5): 051401.
- [14] LE A D, OKAJIMA J, IGA Y. Numerical simulation study of cavitation in liquefied hydrogen [J]. Cryogenics, 2019, 101: 29-35.
- [15] 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.
- [16] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H Y, et al.

- Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(3): 617-624.
- [17] TSUDA S I, TANI N, YAMANISHI N. Development and validation of a reduced critical radius model for cryogenic cavitation [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, 134(5): 1.
- [18] YANG B F, LI B, CHEN H, et al. Numerical investigation of the clocking effect between inducer and impeller on pressure pulsations in a liquid rocket engine oxygen turbopump [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2019, 141(7): 071109.
- [19] YANG B F, LI B, CHEN H, et al. Entropy production analysis for the clocking effect between inducer and impeller in a high-speed centrifugal pump [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(15): 5302-5315.
- [20] 项乐, 谭永华, 陈晖, 等. 水温对空化流动影响的数值研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(6): 1324-1333.
- XIANG L, TAN Y H, CHEN H, et al. Numerical study of effects of water temperature on cavitating flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1324-1333.
- [21] 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.
- [22] 李雨濛, 陈晖, 项乐, 等. 水翼非定常空化流动中湍流模型研究[J]. *火箭推进*, 2019, 45(6): 29-37.
- LI Y M, CHEN H, XIANG L, et al. Study on turbulent model of unsteady cavitating flow around hydrofoil [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2019, 45(6): 29-37.
- [23] XIANG L, TAN Y H, CHEN H, et al. Experimental investigation of cavitation instabilities in inducer with different tip clearances [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(9): 168-177.