

水温对空化流动影响的数值研究^{*}

项 乐¹, 谭永华^{1,2}, 陈 晖¹, 许开富³

(1. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;

2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100;

3. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了研究温度升高对翼型表面空化流动的影响, 以水为介质, 首先对几种现有空化模型的预测能力进行了对比分析, 发现Singhal模型能够较准确预测空化区的形状、压力和温度分布。通过添加空化引起的能量源项、耦合介质物性参数与温度关系等方式考虑了热力学效应的影响, 并利用现有实验数据充分验证了仿真方法的可靠性, 发现考虑热力学效应对压力分布影响较小, 但是会导致空化区最大温降减小10%左右。基于建立的仿真方法, 对298K~393K温度范围内空化流动进行数值仿真, 发现空化区温降随温度升高而增大, 但是空化区面积随温度变化在 $T=353\text{K}$ 存在拐点, $T<353\text{K}$ 时, 空化区面积随温度升高而增大; 而 $T\geq 353\text{K}$ 时, 空化区随温度升高而减小。最后研究了雷诺数变化对空化发展的影响, 发现雷诺数增大有一定促进作用, 而温度升高同时导致热力学效应增强(抑制空化)和雷诺数增大(促进空化), 正是这两种相反作用之间的平衡决定着温度对空化流动的影响。

关键词: 液体火箭发动机; 温度; 空化模型; 热力学效应; 翼型表面

中图分类号: V431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 06-1324-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190572

Numerical Study of Effects of Water Temperature on Cavitating Flow

XIANG Le¹, TAN Yong-hua^{1,2}, CHEN Hui¹, XU Kai-fu³

(1. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China;

3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to study the effects of increasing temperature on cavitating flow on surface of hydrofoil, a comparison analysis of the predicted ability of different cavitation models was performed firstly using water as working fluid. It was found that Singhal model can accurately predict the cavity appearance, pressure and temperature distribution. The thermodynamic effect was taken into account by adding the energy source term caused by cavitation and coupling with the relationship between physical properties and temperature, the validity of the numerical method is verified by available experimental data. Little influence on the pressure distribution is identified after considering thermodynamic effect, but the maximum temperature depression is decreased by about 10%. Numerical simulations of cavitating flow within temperature range 298K~393K were conducted based on the developed numerical method. It was found that the temperature depression increased with increasing tempera-

^{*} 收稿日期: 2019-08-19; 修订日期: 2019-10-17。

基金项目: 国家重大基础研究项目 (613321)。

通讯作者: 项 乐, 博士生, 研究领域为流体机械及低温空化动力学。E-mail: 13126986485@163.com

引用格式: 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 Le, TAN Yong-hua, CHEN Hui, et al. Numerical Study of Effects of Water Temperature on Cavitating Flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1324-1333.)

ture, whereas there is an inflection point at $T=353\text{K}$ of the curve of cavitation area versus temperature, the cavitation area increased with increasing temperature when $T<353\text{K}$, while decreased after $T\geq 353\text{K}$. At last the influence of Reynolds number on cavitation development was identified, elevated Reynolds number is found to have promotion effect, and increasing temperature produces both stronger thermodynamic effect (suppress cavitation) and larger Reynolds number (promote cavitation), the influence of temperature on the cavitating flow depends on the balance between these two inverse effects.

Key words: Liquid rocket engine; Temperature; Cavitation model; Thermodynamic effect; Hydrofoil surface

1 引言

随着如今液体火箭发动机越来越低温化,液氧、液氢、甲烷等低温介质由于清洁环保、比冲高、不易结焦等优势被认为是面向未来的主流推进剂,然而其特殊属性使得低温发动机的研制工作比常温发动机更加复杂棘手^[1]。当这些低温介质工作在高速、低压的环境下,容易发生空化,引起结构材料破坏或剧烈震动。同时由于热力学效应的存在,低温空化与常温水空化呈现出不同的特征^[2],而且尚有许多问题不清楚,使得低温介质的空化问题逐渐成为空化领域的研究热点。

由于低温介质的储存、保温等问题,低温空化的实验操作难度较大,Hord^[3]在NASA的支持下基于文氏管和翼型进行了大量实验,不过受早期技术条件的限制,获得的实验数据局限于稳态的空化区形态及定常实验结果。近年来,国内陈泰然等^[4-7]搭建了利用液氮为工质的文氏管空化可视化试验台,研究了液氮空化流动的非定常特性,深化了对低温空化特征的认识。考虑到低温介质操作的复杂性,许多研究者采用高温水替代低温介质,研究空化热力学效应。Petkovsek等^[8]利用红外测温(IR)技术测量了高温水中空化区内的温度,发现 95°C 热水中空化区温降约为 0.4K 。Yamaguchi等^[9]利用热电偶直接测量了翼型表面空化区内温度,得到了空化区内的温降,发现温降随温度升高而增大。Cervone等^[10]通过在NACA0015翼型吸力面布置测点,获得了不同温度下发生空化时吸力面压力分布。张皓晨等^[11]搭建了基于热水的文氏管可视化试验台,研究了不同热敏感条件下含气率对空化发展的影响。上述实验为空化热力学效应研究积累宝贵的实验数据,为相应的仿真计算提供必要的实验支撑。

目前应用最为广泛的是基于输运方程的空化流动数值模拟方法,其基本思想是在传统N-S方程基础上,额外添加一个气相体积分数输运方程,通过构建

不同的源项表达式控制气相体积分数的发展。Singhal等^[12-18]基于不同的假设条件建立了不同的空化模型,得到了较广泛应用。不过这些模型均基于等温假设建立,没有考虑热力学效应,因此当应用于低温介质或高温水等热敏介质时可能产生不合理的预测结果。Hosangadi等^[19]基于Merkle模型,通过耦合物性参数随温度变化关系模拟液氮的空化流动;曹潇丽等^[20]验证了Singhal模型在低温介质中的适用性;项乐等^[21-22]考虑热力学效应对Liu模型进行了修正,对液氮空化流动进行了数值模拟研究;朱佳凯等^[23]通过修正气泡数等方式拓展了Schnerr模型在低温介质中的应用;时素果等^[24]利用Kunz模型研究液氮的空化热力学效应;Le等^[25]基于Saito模型研究热水中的热力学效应,发现其能够较好预测空化区温降。

针对热水的数值仿真相对较少,王巍等^[26-28]基于不同空化模型研究了热水中的热力学效应,发现在高温下($T\geq 100^\circ\text{C}$),热力学效应对空化有较明显的抑制作用。但是,一方面上述部分考虑热力学效应的空化模型应用于不同的求解器平台时,可能需要对经验系数重新标定,即普适性较差;另一方面当温度并不高时,一种新的“反热力学效应”现象逐渐引起重视,Cervone等^[10]首先在热水中发现这一现象,并将其原因归结于实验装置的阻塞效应;最近Chen等^[4-5]通过实验验证在液氮中也存在该现象,并利用气液密度比随温度变化关系进行了分析。但是目前为止,该现象还没有得到很好的解释,即温度对空化流动的影响规律和机理依然有待澄清。本文通过对不同空化模型的对比验证,建立普适性较好的数值仿真方法,并基于现有实验数据进行充分验证;结合建立的数值方法对温度如何影响水的空化发展进行详细分析。

2 研究方法

2.1 控制方程

本文的数值方法是基于雷诺平均守恒型控制方

程组,在笛卡尔坐标下,其表达式为

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

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

$$\frac{\partial (\rho_m \lambda_{pl} T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i \lambda_{pl} T)}{\partial x_i} = \nabla \cdot (\xi_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_v \alpha_v u_i)}{\partial x_i} = \dot{m} = \dot{m}_v - \dot{m}_c \quad (4)$$

式中 ρ_v 和 ρ_m 分别为蒸汽密度和混合密度, λ_{pl} 为比热容, μ_m 为混合粘度, ξ_{eff} 为有效导热系数, T 为当地温度, S 为动量方程源项, S_E 为能量方程源项,当考虑介质空化的热力学效应时,气液两相之间的换热将通过添加源项的方式被引入至能量方程中。

为了模拟空化流动,本文采用基于输运方程型空化模型,在三大方程之外额外添加气相体积分数 α_v 的输运方程,如方程(4)所示,方程右边为控制空化区发展的源项, $\dot{m}_v$ 为蒸发源项, $\dot{m}_c$ 为凝结源项,不同空化模型的源项表达式不同,下文将具体介绍。

2.2 湍流模型

众多研究^[19,21,29]表明,传统的二方程湍流模型($k-\varepsilon$, $k-\omega$ 等)过高估计了空化区中的湍流粘性,导致对空化区发展过程预测不准确。为了提高数值计算准确性,本文采用 Coutier-Delgosha 等^[29]提出的基于密度修正的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,计算过程中 k , ε 方程及相关参数与标准 $k-\varepsilon$ 模型一致,对湍流粘性表达式进行如下修改,即

$$\mu_t = \frac{0.09 \rho_m k^2}{\varepsilon} f_{DCM} \quad (5)$$

$$f_{DCM} = \frac{\rho_v + (1 - \alpha_v)^n (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v + (1 - \alpha_v) (\rho_l - \rho_v)} \quad (6)$$

式中 μ_t 为湍流粘性系数, ρ_l 液体密度, n 为调节系数,文献^[29]推荐值为 $n=10$,在本文的前期数值验证中,发现由于大幅减小了空化区湍流粘性,促进了空化区的发展,导致时均空化区面积过大,且定常计算难以收敛。本文采用文献^[21]的推荐值 $n=3$,下文中所有计算均采用该值。

2.3 空化模型

由于目前空化模型仍处于不断发展阶段,且大量空化模型是基于等温假设建立,能否适用于本文拟研究的热热水介质需要进行对比分析。首先对6种空化模型进行对比验证,其表达式如表1所示,其中 r

为模型中气泡初始半径,一般为常数, R 为随时间变化的气泡半径, χ_1 和 χ_2 为经验系数,不同模型取不同值, f_v 为气相质量分数, R_g 为气体常数, τ 为表面张力系数, U_∞ 为来流速度, p 为当地压力, p_v 为饱和蒸汽压。表中空化模型大致上可以分为三类,第一类是基于简化的 Rayleigh-Plesset 方程得到 $dR/dt \sim (2/3(p-p_v)/\rho_l)^{0.5}$,再通过不同假设条件建立气相体积分数 α_v 与气泡生长 dR/dt 之间的关系,如 Zwart, Schnerr 和 Singhal。由于物理意义明确,这类空化模型应用较为广泛,且已被嵌入至商业软件中。Merkle 模型则认为空化区的发展直接由压差($p-p_v$)驱动,并考虑液体的密度变化,利用动压($0.5\rho_l U_\infty^2$)将压差无量纲化,同时引入特征时间 t_∞ ,考虑了气液相变所需要的时间;Kunz 模型是对 Merkle 模型进一步发展,其蒸发源项与 Merkle 一致,凝结过程主要由液相体积分数来驱动,由于几乎与气液密度比无关,能够较好预测空化流动非定常特性,这是第二类空化模型。第三类是从分子运动理论的角度出发,分析了蒸发和凝结过程,认为气液分子交换的势与温度的平方根成反比,因此空化发展主要由压差与温度平方根比值驱动,如 Liu 模型,其借鉴了 Zwart 等的思路,模型中引入初始气泡半径。需指出的是,上述所有空化模型都依赖经验系数,而经验系数的选取跟具体的流动工况、计算介质以及数值求解器等因素密切相关,需要根据实际情况对经验系数进行调节。

准确模拟温度对水空化流动的影响,需要在求解器中引入物性参数随温度变化的关系式,本文采用下式计算液体水的密度^[18]

$$\rho_l = \frac{p + p_c}{F_l(T + T_c)} \quad (7)$$

式中 $p_c=1944.61\text{MPa}$, $F_l=472.27\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $T_c=3837\text{K}$ 均为常数。

水蒸汽则采用理想气体状态方程来计算^[21]

$$\rho_v = \frac{p}{F_v T} \quad (8)$$

式中 $F_v=461.6\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 为水蒸汽的气体常数。

饱和蒸汽压随温度变化关系按下式计算^[17]

$$p_v(T) = p_k \exp \left\{ \left(1 - \frac{T_k}{T} \right) \left[x_0 + (x_1 - x_2 T)(T - x_3)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

式中 $p_k=22.13\text{MPa}$, $T_k=647.31\text{K}$, $x_0=7.21379$, $x_1=1.152 \times 10^{-5}$, $x_2=-4.787 \times 10^{-5}$, $x_3=481.6$ 。

汽化潜热、比热容、粘性及表面张力系数等参数简单采用随温度变化的多项式拟合公式,其中物性参数来自 NIST 数据库。

Table 1 Expressions of different cavitation models

	$\dot{m}_v$	$\dot{m}_c$
Zwart ^[13] (2004)	$\chi_1 \frac{3\rho_v(1-\alpha_v)}{R} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{\rho_1} \right) \right]^{1/2}$	$\chi_2 \frac{3\rho_v\alpha_v}{R} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p - p_v}{\rho_1} \right) \right]^{1/2}$
Schner ^[14] (2003)	$\frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)}{R} \frac{\rho_1\rho_v}{\rho_m} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{\rho_1} \right) \right]^{1/2}$	$\frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)}{R} \frac{\rho_1\rho_v}{\rho_m} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p - p_v}{\rho_1} \right) \right]^{1/2}$
Singhal ^[12] (2002)	$\chi_1 \frac{\sqrt{k}}{\tau} \rho_1\rho_v \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{\rho_1} \right) \right]^{1/2} (1-f_v)$	$\chi_2 \frac{\sqrt{k}}{\tau} \rho_1\rho_1 \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p - p_v}{\rho_1} \right) \right]^{1/2} f_v$
Merkle ^[15] (1998)	$\frac{\chi_1\rho_1\text{Min}(p-p_v,0)(1-\alpha_v)}{(0.5\rho_1U_\infty^2)\rho_v t_\infty}$	$\frac{\chi_2\text{Max}(p-p_v,0)\alpha_v}{(0.5\rho_1U_\infty^2)t_\infty}$
Kunz ^[16] (2000)	$\frac{\chi_1\rho_1\text{Min}(p-p_v,0)(1-\alpha_v)}{(0.5\rho_1U_\infty^2)\rho_v t_\infty}$	$\frac{\chi_2\rho_v(1-\alpha_v)^2\alpha_v}{t_\infty}$
Liu ^[17] (2006)	$\chi_1 \frac{3(1-\alpha_v)}{r} \left(\frac{p_v - p}{\sqrt{2\pi R_g T}} \right)$	$\chi_2 \frac{3\alpha_v}{r} \left(\frac{p - p_v}{\sqrt{2\pi R_g T}} \right)$

为进一步考虑相变过程对空化发展的影响,在能量方程中引入空化过程中的气液交换热量,表达式为

$$S_E = (q \cdot \dot{m}_c - \dot{m}_v) \cdot L \tag{10}$$

式中 L 为蒸发潜热。

根据 Le 等^[30]的研究,适当减小能量源项中凝结项比例能够更准确预测空化区尾部的温度分布,即对公式(10)中的系数 q 进行调节,这里取其推荐值 $q=0.8$ 。

此外,上述所有空化模型计算过程中均考虑了湍流脉动对饱和蒸汽压的影响^[12],即

$$p_v^*(T) = p_v(T) + 0.195\rho_m k \tag{11}$$

2.4 数值计算设置与验证

本文选取 Cervone 等^[10]的实验工况进行数值仿真研究,文献[10]通过在 NACA0015 翼型吸力面布置传感器测量了三种水温下发生空化时的压力分布,其实验数据获得了国际认可,已广泛应用于数值仿真方法的验证。由于本文只关注翼型表面沿流向和法向的空化区发展,不考虑流道侧壁面(展向)的影响,因此只进行二维计算,计算域如图 1 所示,翼型弦长为 $H=0.115\text{m}$,攻角 $\alpha=5^\circ$,流道宽度为 $1.04H$ 。上下壁为无滑移壁面,进出口距离翼型足够远以避免回流的影响,进口给定速度、湍流度和初始气相体积分数等,出口给定静压。计算平台为 CFX 17.2,利用 CFL 语言将上述空化模型和湍流模型嵌入至软件中。首先为了验证网格无关性,划分三套网格进行计算,网格数量分别为 12 万、18 万和 28 万,从计算结果可知,翼型表面 y^+ 平均为 10 左右,满足壁面函数对网格尺寸的要求。计算得到的吸力面压力系数分布如图 2 所示,这里压力系数定义为

$$-C_p = \frac{p_\infty - p}{0.5\rho_1 U_\infty^2} \tag{12}$$

式中 p_∞ 为出口压力。

可以看出三种网格计算结果几乎完全重合,同时与实验结果均吻合较好,表明这里采取的网格数量已满足网格无关性要求,能够准确预测翼型表面压力分布。本文采用的网格数为 18 万,具体网格细节如图 3 所示。

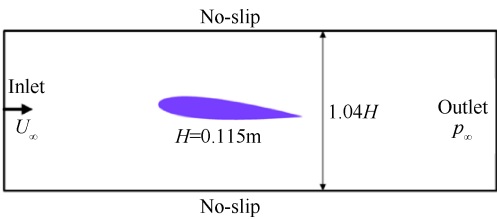


Fig. 1 Computation domain

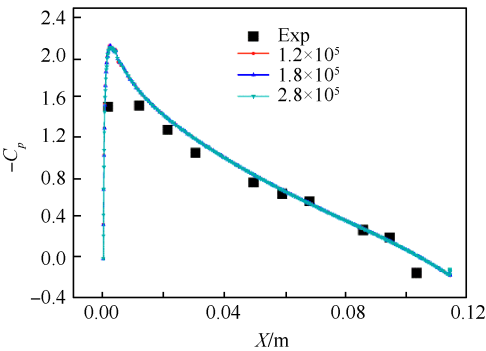


Fig. 2 Pressure coefficients distribution with different mesh at non-cavitation condition

3 结果与讨论

3.1 不同空化模型计算结果比较

图 4 给出了常温下不同空化模型计算得到的空

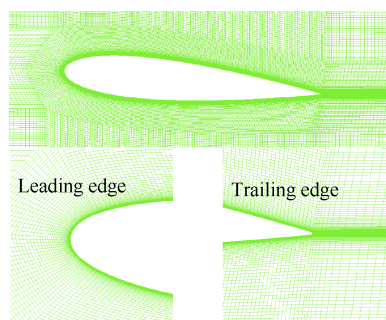


Fig. 3 Grids distribution near the hydrofoil wall

化区形状对比,其中 Zwart, Schner, Singhal 和 Liu 模型中的经验系数均为默认的推荐值,而 Merkle 和 Kunz 模型中的经验系数则有所调整,而且本节给出的计算结果均没有考虑热力学效应,相关物性参数均为常数且没有添加能量源项。空化数定义为

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{0.5\rho_l U_{\infty}^2} \quad (13)$$

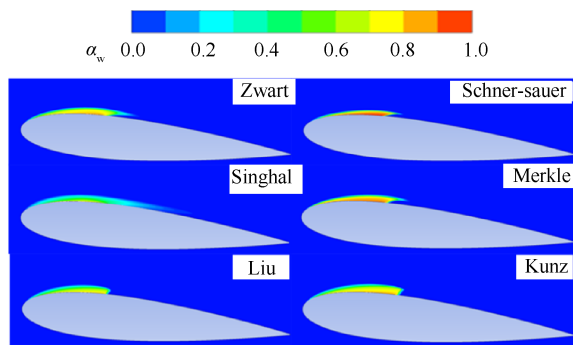


Fig. 4 Comparison of cavitation area with different cavitation model ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$, $T=298\text{K}$)

从图4可以看出,六种模型预测的空化区面积相近,而空化区内部气相体积分数和尾部闭合形式有所区别。Zwart, Schner, Merkle 预测的空化区形状较接近,其中 Schner 内部的气相体积分数最高;Liu 和 Kunz 预测的空化区形状较为接近,内部气相体积分数分布也较相似。值得一提的是, Singhal 模型预测的空化区形态与其他模型均不同,其空化区尾部没有清晰可分辨的气液交界面,这可能是由于 Singhal 模型表达式中含有湍动能 k , 因此空化区发展与湍流脉动时均效果有关。

图5为不同模型预测的压力系数分布对比,各模型预测的空化区与翼型后半部分的压力系数几乎均是完全重合的,且与实验结果符合较好,主要区别集中于空化区的尾部。这里空化区压力系数略高于实验结果,可能是由于实验数据是在复杂三维环境下

测得,结果与实验装置特性有关,二维的数值仿真难以捕捉真实复杂的三维实验工况,但是这里的仿真结果与大部分研究者的结果^[26-27]是一致的。由于空化区尾部缺乏实验测点,难以较好评判不同模型预测结果的准确性,从分布趋势来看, Singhal 和 Zwart 模型预测结果较好,其它模型均存在空化区下游压力恢复较快等问题。

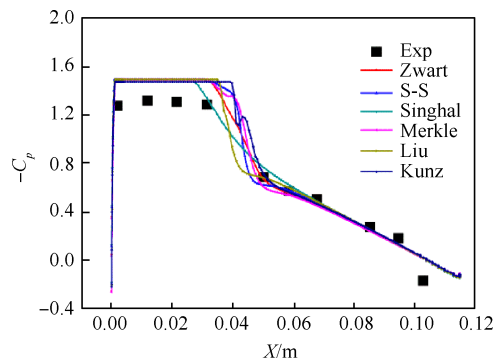


Fig. 5 Pressure coefficients distribution with different cavitation models ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$, $T=298\text{K}$)

本节的计算虽然没有考虑热力学效应,但是在计算过程中开启了能量方程,通过求解能量方程可以获取流场中的温度分布,图6为不同模型预测的翼型吸力面温度分布。根据 Yamaguchi 等^[9]的研究,常温水空化区内温降非常小,约为 0.01K 量级。从计算结果来看,只有 Singhal 模型预测的温降量级合理,其中 Singhal 预测最大温降 $\Delta T_{\max}=0.02\text{K}$ 。而其它 5 种模型均显著高估了空化区的温降,可以看出其最大温降依次为 Schner ($\Delta T_{\max}=9\text{K}$) > Merkle ($\Delta T_{\max}=4.2\text{K}$) > Zwart ($\Delta T_{\max}=3\text{K}$) > Kunz ($\Delta T_{\max}=2.4\text{K}$) > Liu ($\Delta T_{\max}=1.7\text{K}$)。进一步结合图4可知,这一趋势与不同模型预测的空化区内部气相体积分数大小关系是一一对应的。根据 B 因子理论^[3]

$$B = \frac{T_{\infty} - T}{\rho_v L / (\rho_l \lambda_{pl})} = \frac{\Delta T}{\Delta T^*} \quad (14)$$

式中 T_{∞} 为来流温度, ΔT^* 为特征温降。Franc 等^[31]基于空化区由气液混合组成等假设条件提出了计算 B 因子的表达式,将其与空化区的气相体积分数 α_v 联系起来,得到 $B = \alpha_v / (1 - \alpha_v)$ 。因此可看出空化区的温降与其内部 α_v 分布和特征温降 ΔT^* 有关,而 ΔT^* 取决于介质的物性参数。当介质一定时,空化区温降 ΔT 跟 α_v 相关,即 α_v 越大,则温降 ΔT 也越大,这与图4和图6反映的趋势是一致的,因此这 5 种模型过高预测空化区温降原因在于其空化区内部气相体积分数分布预测不合理。

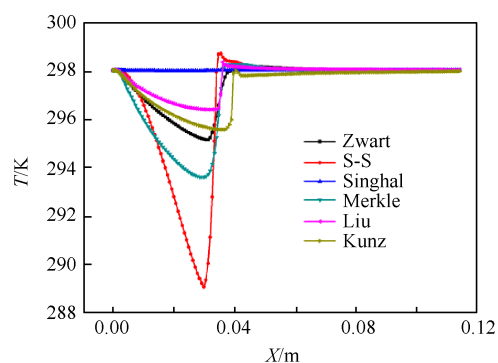


Fig. 6 Temperature distribution with different cavitation models ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$, $T=298\text{K}$)

针对考虑热力学效应的空化流动数值模拟,由于饱和蒸汽压、密度等物性参数在计算过程中直接根据

当地温度进行更新迭代,准确预测空化区的温降就显得尤为重要。由图6可知,只有Singhal模型预测的温降比较合理,且其经验系数则不需要调整,具有较好的普适性,因此下文中的分析均基于Singhal模型。

3.2 考虑热力学效应前后计算结果对比

本节通过对文献[10]的三种温度下的实验工况进行计算,分析考虑热力学效应(TE, thermodynamic effect)与否对计算结果的影响。图7为三种温度下数值计算得到的压力系数和温度分布,可以看出,预测的压力分布均与实验结果吻合较好, $T=298\text{K}$ 和 $T=343\text{K}$ 时空化区压力分布与实验结果有一定差异,可能与实验数据中空化区压力分布不均有关。考虑热力学效应前后的压力分布几乎重合,表明在此工况

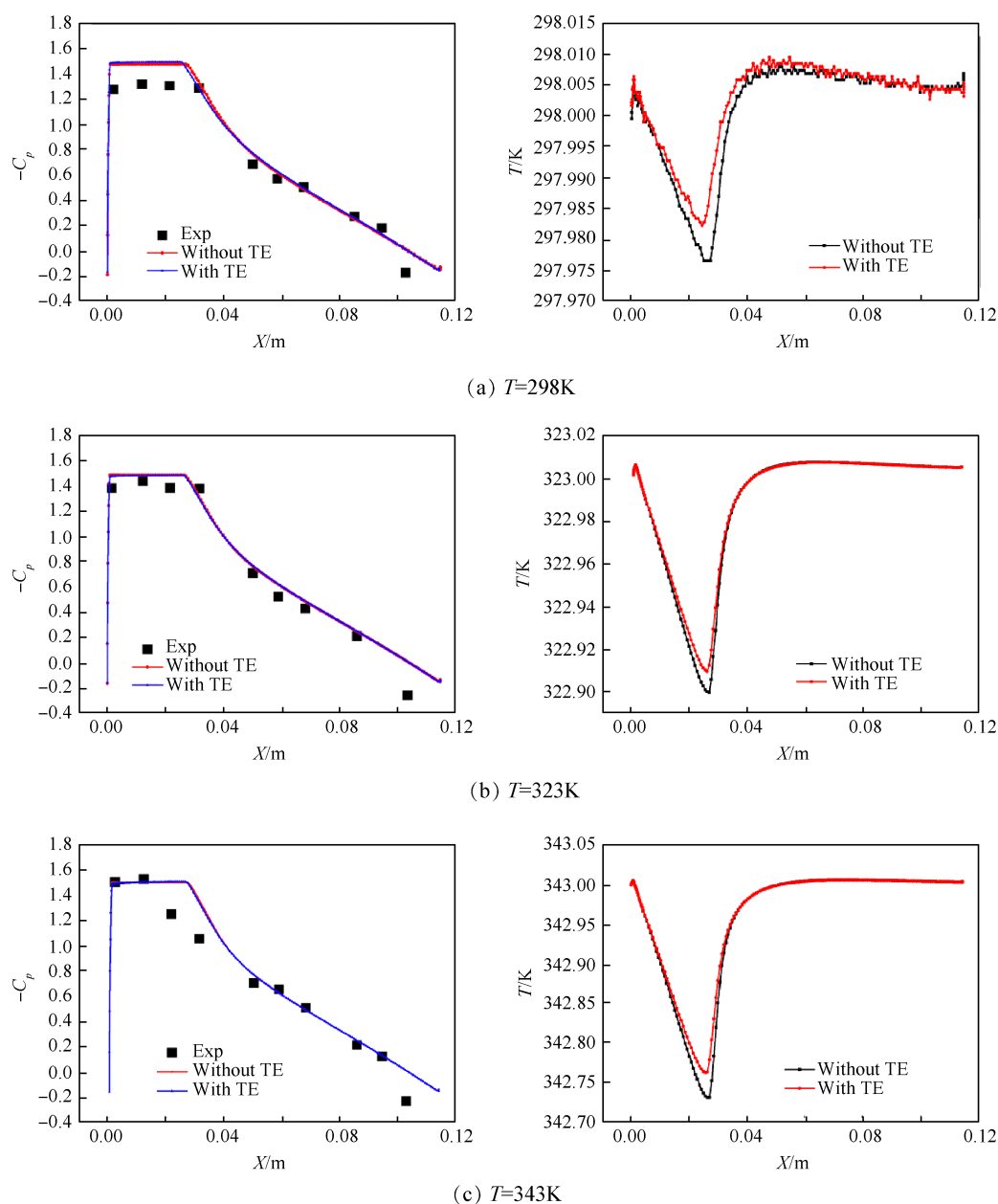


Fig. 7 Pressure coefficients and temperature distributions ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$)

下,热力学效应对压力分布影响较小。

但是从温度分布来看,考虑热力学效应后,空化区最大温降有所下降,三种温度下 $\Delta T_{\max}$ 分别下降 14%, 11%, 15%, 这是由于考虑热力学效应后,水的饱和蒸汽压随空化区温度减小而降低,空化模型中蒸发源项和凝结源项均有所减小,如图 8 所示,进一步的空化发展受到抑制。一般认为 $T=343\text{K}$ 温度范围以内,水的空化热力学效应比较弱,对空化发展的影响很有限,但从图 7 反映出的温度分布来看,本文采用的数值仿真方法能够较准确捕捉温度变化对空化发展的影响。

同时注意到,随着温度升高空化区的 $\Delta T_{\max}$ 也在逐渐增大,考虑热力学效应后,三种温度下的最大温降分别为 0.0175K, 0.09K 和 0.235K。这一趋势与 Yamaguchi 等^[9]的实验结果一致,将在下文进一步分析,下文中的分析均基于考虑热力学效应之后的计算结果。

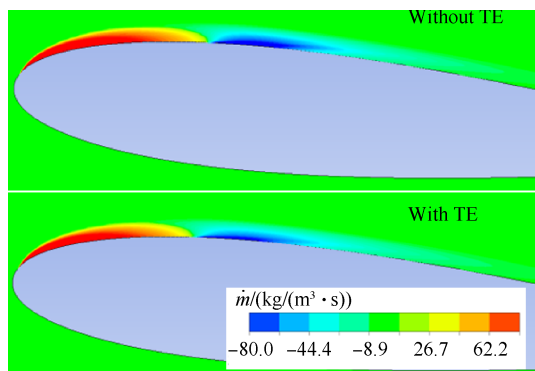


Fig. 8 Distribution of cavitation source term
($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$, $T=343\text{K}$)

3.3 不同温度下计算结果对比

本节将基于前文建立的考虑热力学效应的数值仿真方法,扩大拟研究的温度范围,进一步探讨温度变化对空化发展的影响。图 9 为不同温度下计算得到的 α_v 和温降 ΔT 分布。从图 9(a) 可看出,不同温度下空化区 α_v 分布有所不同,当温度较高时 ($T>353\text{K}$),最大气相体积分数 $\alpha_{v,\max}$ 随着温度升高而降低,同时空化区范围也随着温度升高而显著减小,明显体现了高温下热力学效应对空化发展的抑制效果,而且随着温度升高,热力学效应逐渐增强;但是温度较低时 ($T\leq 353\text{K}$),情况有所不同, $\alpha_{v,\max}$ 随着温度升高而增大,在 $T=343\text{K}$ 时达到最大,而空化区范围也随温度升高而增大,在 $T=353\text{K}$ 时达到最高,体现出较明显的反热力学效应现象,其形成原因将在下一节做进一步分析。

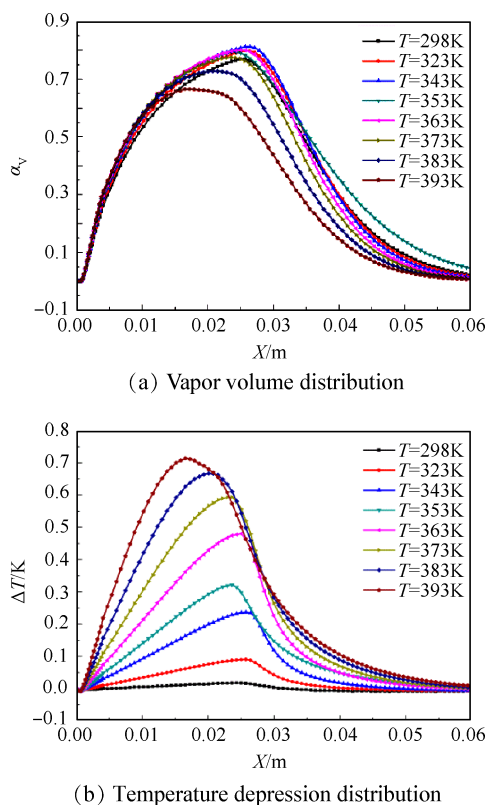


Fig. 9 Distributions of vapor volume fraction and temperature depression ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$)

为了更清晰展示图 9(a) 中的现象,图 10 给出了无量纲空化区面积随温度变化之间的关系,这里空化区面积 s_{cav} 为 α_v 在二维平面上做面积分所得, A_c 为翼型横截面积。从图 10 可看出,空化区面积随温度变化在 $T=353\text{K}$ 时存在明显拐点,当 $T<353\text{K}$ 时,空化区面积随温度升高而增大,在 $T=353\text{K}$ 达到最大;而温度超过 $T=353\text{K}$ 时,空化区面积随温度升高而显著减小,同时对比 $T=353\text{K}$ 和 $T=393\text{K}$ 的空化区形状可知,空化区有厚度增大、气相体积分数减小等趋势,根据文献[19-20, 24],这是典型的热力学效应的影响,进一步证实了高温下存在较明显的热力学效应。

从图 9(b) 中的温降分布可看出,温降 ΔT 随着温度升高而显著增大,图 11 给出了最大温降随温度变化的关系,同时给出了来自文献[9, 21]的实验数据以及特征温降 ΔT^* ,可看出本文计算结果与实验结果吻合较好,计算结果略高于实验结果和 ΔT^* ,但量级相当且分布趋势一致,进一步证实了数值仿真方法的可靠性。由 ΔT^* 表达式可知,随着温度升高,水的气液密度比逐渐增大,形成相同体积空化区需要蒸汽质量更多,空化区与主流之间的换热量也更大,相应的汽化潜热与比热容等随之改变,导致空化区与主流之间形成更大的温差,因此温降随温度升高而增大。

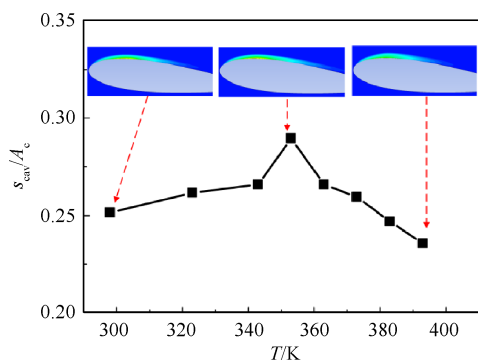


Fig. 10 Cavitation areas versus temperatures ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$)

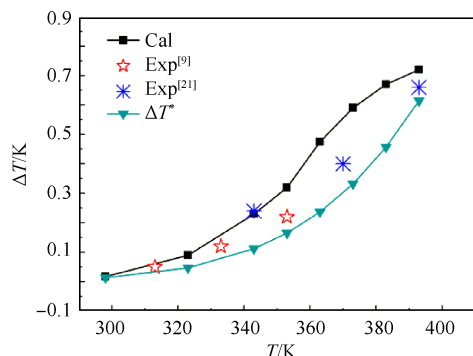


Fig. 11 Temperature depression versus temperatures ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$)

从图9还可以看出,当 $T>353\text{K}$ 后,随着温度升高, ΔT_{max} 和 $\alpha_{v,\text{max}}$ 发生位置是逐渐往上游移动的,证实了温降和 α_v 之间的相关性。该现象是由空化区内质量传输源项 $\dot{m}$ 分布特性决定的,由图8可知,在空化区前半部分,源项为正值,表明此时主要是蒸发源项发挥作用,蒸汽不断形成, α_v 不断增长;空化区后半部分源项为负值,即凝结源项在发挥作用,蒸汽不断凝结, α_v 不断减小;由方程(4)可知,在源项为0的位置,气相体积分数达到最大值,相应的温降也最大。图8中还反映出热效应的存在导致质量传输源项有所减小,即源项为0的位置逐渐往上游移动,从而导致图9中 ΔT_{max} 和 $\alpha_{v,\text{max}}$ 发生位置也逐渐往上游移动。

3.4 “反热力学效应”形成原因

由上一节分析可知,空化区内温降随着温度升高一直在增大,根据常规热力学效应理论,空化的发展应该是被抑制的,然而在 $T<353\text{K}$ 温度范围内,空化区面积反而是增大的,即空化区的发展受到促进作用,这一“反热力学效应”现象也已被部分研究者通过实验捕捉到^[4,10],但是其形成机理尚不清晰。本节将试图基于数值仿真结果,探索该现象的产生原因。

本文计算过程中,来流速度、湍流度、空化数及攻角等因素均保持一致,唯一的变量是温度以及与之相对应的物性参数,这里引入Brennen提出的参数

Σ 作为热力学效应的衡量参数,表达式为^[32]

$$\Sigma = \frac{\rho_v^2 L^2}{\rho_l^2 \lambda_{pl} T_\infty \gamma_l^{1/2}} \quad (15)$$

式中 γ_l 为热扩散率。

可以看出, Σ 中包含了绝大部分物性参数,但是没有考虑到介质粘度 μ 的变化,介质粘度会影响流动状态,进而可能对空化发展产生影响。在流体力学中,讨论介质粘性作用的无量纲参数为雷诺数 Re ,于是很自然地联想到 Re 可能对空化发展产生的影响。

图12给出本文研究的温度范围内 Re 和 Σ 的变化趋势,可看出两者都随温度升高而显著增大,其中 Σ 值在 $T=393\text{K}$ 时相较常温 $T=298\text{K}$ 增大了3个数量级, Re 也增大了3倍,通常 Σ 更高意味着热力学效应更强,但是温度升高带来的 Re 增大的影响过去很少被讨论。前文分析了在来流速度一定的条件下, Σ 增大导致热力学效应对空化有较明显的抑制效果,本节将通过调节来流速度改变雷诺数 Re ,分析 Re 变化对空化发展的影响。

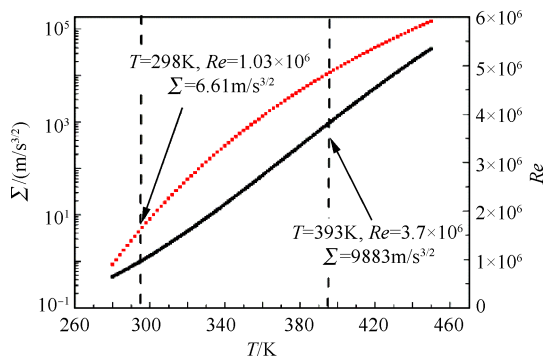
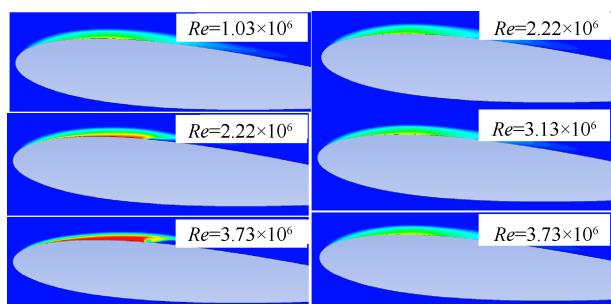


Fig. 12 Variation of Re and Σ with temperatures

图13为 $T=298\text{K}$ 和 $T=373\text{K}$ 两种温度下不同雷诺数计算结果,可以看出不同温度下, Re 的影响有所不同。 $T=298\text{K}$ 时, Re 增大对空化发展有明显的促进作用,主要体现在空化区内的 α_v 显著增大,空化区长度不变,但是厚度有变小的趋势,而且由于 α_v 增大,空化区尾部气液界面逐渐清晰;而 $T=373\text{K}$ 时,可以看到雷诺数的变化并没有造成显著的影响,表明在高温下雷诺数的影响似乎较小,或者其对空化发展的促进作用被热力学效应的抑制作用抵消。

上述分析证实了在温度不高时雷诺数增大对空化发展的促进作用,图14给出相同来流速度和雷诺数下空化区面积随温度变化关系,可以看出,在不同温度下雷诺数增大时,一定程度导致空化区面积也增大。但是在 $T\geq 353\text{K}$ 时,两条曲线几乎重合,表明雷诺数的影响很小,这一阶段空化的发展主要受热力学效应控制;而当 $T<353\text{K}$,两条曲线变化趋势有所



(a) $T=298\text{K}$, $\Sigma=6.61\text{m/s}^{3/2}$ (b) $T=373\text{K}$, $\Sigma=3051\text{m/s}^{3/2}$

Fig. 13 Comparison of cavitation areas at different Re and Σ ($\sigma=1.5$, $\alpha=5^\circ$)

不同,当来流速度一定时,雷诺数随温度升高而增大,结合图 13 的分析可知,在该温度范围内,空化发展受到 Re 增大的促进作用;而当调整来流速度保证 Re 一致时,一定程度上对 Re 的促进作用进行了控制,可以看出空化区面积随温度升高整体呈下降趋势,表明在该条件下温度升高依然对空化发展有显著的抑制作用,即在该温度范围内热力学效应的抑制作用与雷诺数升高的促进作用是共存的,但是前者远小于后者,空化区整体发展主要受促进作用,因而呈现出反热力学效应特征。而当温度超过 353K 后,由图 12 可知, Σ 急剧增大,表明热效应急剧增强,其带来的抑制效果超过 Re 增大的促进效果,因而空化区的发展整体是受抑制。需指出的是,从 $T=343\text{K}$ 到 $T=353\text{K}$ 这一温度区间内两种工况下,空化区面积均显著增大,这一现象的原因目前尚不清楚,有待进一步澄清。

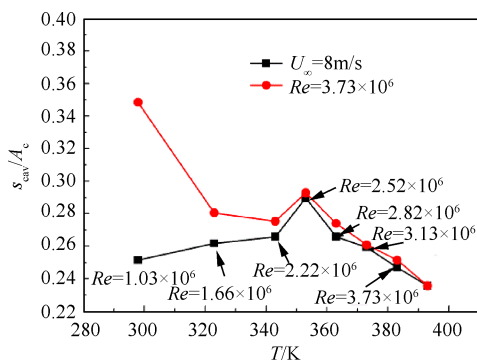


Fig. 14 Comparison of cavitation areas at constant U_∞ and constant Re

4 结 论

通过本文研究,得到结论如下:

(1)对六种现有空化模型对空化流动特征的预测能力进行了对比验证,发现它们均能较好预测空化区的形状以及压力分布,但普遍高估了空化区的温降,只有 Singhal 模型比较准确预测了空化区的温度分布。考虑到普适性等问题,本文认为 Singhal 模

型比较适合应用于热水介质的空化流动模拟。

(2)采用添加能量方程源项、基于温度场更新介质物性参数等方式考虑了热力学效应的影响,发现考虑热力学效应后,压力分布几乎不受影响,而空化区内温降下降 10% 左右,更加接近实验结果。

(3)基于考虑热力学效应的数值仿真方法,对 298K~393K 温度范围内的空化流动进行了研究,发现空化区温降随温度升高而显著增大;但是空化区面积随温度变化在 $T=353\text{K}$ 时存在拐点,即 $T<353\text{K}$ 时,空化区面积随温度升高而增大,而 $T\geq 353\text{K}$ 时,空化区面积随温度升高显著下降。

(4)本文提出了从雷诺数变化的角度来解释上述反热力学效应出现的原因,基于本文的数值仿真结果发现雷诺数增大对空化发展有一定促进作用,而温度升高同时会导致热力学效应增强(抑制空化)和雷诺数增大(促进空化),因此空化发展同时受这一对相反作用的影响。当 $T<353\text{K}$ 时,热力学效应较弱,而雷诺数增大的促进作用较强,因而空化发展随温度升高而增强;而当 $T\geq 353\text{K}$ 时,热力学效应急剧增强,从而掩盖了雷诺数增大的促进作用,空化发展随温度升高显著下降。

受篇幅以及研究周期等因素限制,本文研究局限于二维翼型表面附着空化的定常数值仿真,温度变化如何影响云状空化及其脱落等非定常特性则有待进一步揭示,这是本文下一步的研究计划。

致 谢:感谢国家重大基础研究项目的资助。

参考文献

- [1] 谭永华. 大推力液体火箭发动机研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(10): 1303-1308.
- [2] 项 乐, 陈 晖, 谭永华, 等. 诱导轮空化热力学效应实验研究进展[C]. 北京: 第 11 届全国水力机械及其系统学术年会, 2018.
- [3] Hord J. Cavitation in Liquid Cryogen II[R]. NASA-CR-2156, 1974.
- [4] 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(1): 618-630.
- [5] 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(1): 63-76.
- [6] 朱佳凯. 低温空化非稳态特性和机理研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.

- [7] 姜映福, 刘中祥, 褚宝鑫. 低温流体汽蚀的数值计算及可视化实验研究[J]. 推进技术, 2017, 38(12): 2771–2777. (JIANG Ying-fu, LIU Zhong-xiang, CHU Bao-xin, et al. Numerical Simulation and Visualized Experimental Study on Cavitating of Cryogenic Fluids[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(12): 2771–2777.)
- [8] Petkovsek M, Dular M. IR Measurements of the Thermodynamic Effects in Cavitating Flow [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44(1): 756–763.
- [9] Yamaguchi Y, Iga Y. Thermodynamic Effect on Cavitation in High Temperature Water[C]. *Chicago: Proceeding of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting*, 2014.
- [10] Cervone A, Bramanti C, Rapposelli E, et al. Thermal Cavitation Experiments on a NACA0015 Hydrofoil [J] *Journal of Fluids Engineering*, 2006, 128(2): 326–331.
- [11] 张皓晨, 左志刚, 刘树红, 等. 热敏感条件下含气率对文丘里空化特性的影响研究[C]. 西安: 中国工程热物理学会热机气动热力学和流体机械学术会议, 2019.
- [12] 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.
- [13] Zwart P J, Gerber G, Belamari T, A Two-Phase Flow Model for Prediction Cavitation Dynamics [C]. *Yokohama: Proceeding of 5th International Conference of Multiphase Flow*, 2004.
- [14] Schnerr G H, Sauer J. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics[C]. *New Orleans: Proceeding of 4th International Conference of Multiphase Flow*, 2001.
- [15] Merkle C L, Feng J, Buelow P E O. Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitations[C]. *Grenoble: Proceeding of 3rd International Symposium of Cavitation*, 1998.
- [16] Kunz R F, Boger D A, Stinebring D R, et al. A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction[J]. *Computer & Fluids*, 2000, 29(1): 849–875.
- [17] Liu S H, Li S C, Zhang L, et al. A Mixture Model with Modified Mass Transfer Expression for Cavitating Turbulent Flow Simulation [J]. *Engineering Computations*, 2008, 25(4): 290–304.
- [18] Saito Y, Takami R, Nakamori I, et al. Numerical Analysis of Unsteady Behavior of Cloud Cavitation Around a NACA0015 Foil[J]. *Computational Mechanical*, 2007, 40(1): 85–96.
- [19] Hosangadi A, Ahuja V. Numerical Study of Cavitation in Cryogenic Fluids [J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2005, 127(3): 267–281.
- [20] Cao X L, Zhang X B, Qiu L M, et al. Validation of Full Cavitation Model in Cryogenic Fluids [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(10): 1633–1640.
- [21] Chen T R, Huang B, Wang G Y, et al. Numerical Study of Cavitating Flows in a Wide Range of Water Temperatures with Special Emphasis on Two Typical Cavitation Dynamics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101(1): 886–900.
- [22] 项乐, 谭永华, 陈晖, 等. 基于对流换热的低温空化流动数值模拟研究[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1314–1323. (XIANG Le, TAN Yong-hua, CHEN Hui, et al. Numerical Study of Cryogenic Cavitation Based on Convection Heat Transfer[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(6): 1314–1323.)
- [23] Zhu J K, Chen Y, Zhao D F, et al. Extension of the Schnerr-Sauer Model for Cryogenic Cavitation[J]. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2015, 52(1): 1–10.
- [24] 时素果, 王国玉, 胡常莉, 等. 热力学效应对液氮空化流动的影响[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 484–534.
- [25] Le A D, Iga Y. A Simplified Thermodynamic Effect Model for Cavitation Flow in Hot Water [C]. *Washington: 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 240, 2019.
- [26] 王巍, 林茵, 王晓放, 等. 高温条件下热力学效应对空化的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 835–839.
- [27] 张德胜, 万福来, 许彬, 等. 考虑热力学效应的空化模型修正及其适用性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 138–146.
- [28] 张瑶, 罗先武, 许洪元, 等. 热力学空化模型的改进及数值应用[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1671–1674.
- [29] Coutier-Delgosha O, Fortes-Patella R, Rebound J L. Evaluation of the Turbulence Model Influence on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation [J]. *Journal of Engineering*, 2003, 125(1): 38–45.
- [30] Le A D, Okajima J, Iga Y. Modification of Energy Equation for Homogeneous Cavitation Simulation with Thermodynamic Effect [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2019, 141(8).
- [31] Franc J P, Rebattet C, Coulon A. An Experimental Investigation of Thermal Effects in a Cavitating Inducer[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2004, 126(5): 716–723.
- [32] 潘中永, 袁寿其. 泵空化基础[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2013.