

湍流模型在低温流体空化数值模拟中的影响及适用性研究

冯健¹, 张德胜^{1*}, 施卫东², 高雄发¹, 沈熙¹, 金永鑫¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江, 212013, 2. 南通大学机械学院, 南通, 226019, *Email: zds@ujs.edu.cn)

摘要: 为研究湍流模型在低温流体空化数值计算中的影响, 本研究以 Hord 翼型为研究对象, 采用基于密度修正 (Density Corrected Model, DCM) 的 RNG k - ϵ 湍流模型和滤波器 (Filter-based Model, FBM) RNG k - ϵ 湍流模型, 计算液氮绕翼型的空化流动, 获得了两种湍流模型计算得到的压力、空穴区域及相间质量传输的分布规律, 通过与实验结果比较对两种湍流模型进行了评价。结果表明, 与 DCM 模型相比, FBM 模型计算得到的空化区域压降更大, 空穴长度更小, 蒸发质量梯度与凝结质量梯度更大, 计算结果更接近实验值, 说明 FBM 模型在低温流体空化模拟计算中适用性更好。

关键词: 湍流模型; 翼型; 热力学效应; 数值计算; 空化流动

1 引言

近年来, 随着我国能源需求的不断增长, 高效清洁的液化天然气得到了大力发展^[1]。由于液化天然气的温度为 -160°C 左右, 属于低温液体, 运用低温潜液泵输运时极易发生空化, 严重影响泵的运行稳定性和使用寿命。空化包含湍流、相变、可压缩等多种复杂流动现象^[2], 而且低温流体的物质属性受温度影响较大, 在空化过程中具有较强的热力学效应。由于低温流体的实验研究难度大, 成本高, 且具有危险性, 运用数值方法准确模拟低温流体的空化特性便尤为重要。

目前, Standard k - ϵ 、RNG k - ϵ 模型、SST k - ω 模型等被广泛应用于空化流动计算^[3-4], 但是上述湍流模型对空穴尾部的涡黏度预测值过高, 产生高于实际的黏滞力, 导致无法准确模拟空化流场, 故部分学者将大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 引入空化流场的计算, 张德胜等^[5]运用大涡模拟求解轴流泵的空化流场, 分析了叶顶间隙泄漏流的瞬态特性, 揭示了叶顶区的涡系类型及叶顶泄漏涡带的演变规律。Yamanishi N 等^[6]采用大涡模拟分析诱导轮进口处的回流涡结构, 计算得到的回流涡形态特征及尺寸与实验结果符合性较好。可

见, 与 RANS 方程模型相比, 大涡模拟具有更高的求解精度, 但是大涡模拟对网格精度较高, 计算资源需求大。为解决该问题, Johansen^[7]提出一种基于 Standard $k-\varepsilon$ 模型的滤波器模型 (FBM), Coutier-Delgosha^[8]提出基于密度修正的湍流模型 (DCM), 余志毅等^[9]采用 FBM 模型数值研究了栅中翼型的空化流动特性, Chen 等^[10]采用 DCM 模型研究了不同水温下的空化流动特征, 均取得了较好的效果。

通过 CFX 二次开发, 分别采用基于密度修正 (DCM) 的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及滤波器 (FBM) RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 数值计算液氮绕翼型的空化流场, 并与实验结果对比分析, 评价了两种湍流模型在低温流体空化中的影响和适用性。

2 控制方程和数学方法

2.1 控制方程

假定汽液两相为均相流动, 同时由于计算时考虑了热效应, 控制方程在连续方程和动量方程的基础上加入能量方程, 依次为

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_m (h + f_v L)] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho_m u_j (h + f_v L)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{P_{T_L}} + \frac{\mu_t}{P_{T_t}} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

2.2 空化模型的修正

本文采用文献[11]提出的一种混合空化模型并加以修正, 该空化模型由蒸发凝结的机理推导得来, 并且与其他空化模型相比, 考虑了多种影响空化过程的因素, 例如湍流, 表面张力等。空化模型方程如下所示

$$m^+ = C_c \frac{3\alpha_v}{r_b} \left(\frac{M}{2\pi R} \right)^{(1/2)} \left(\frac{p_v^* - p^*}{\sqrt{T}} \right) \quad (4)$$

$$m^- = C_e \frac{3(1-\alpha_v)}{r_b} \left(\frac{M}{2\pi R} \right)^{(1/2)} \left(\frac{p_v^* - p^*}{\sqrt{T}} \right) \quad (5)$$

$$P^* = P + \frac{2S}{r_b} \quad (6)$$

式中: C_{cond} 为凝结系数, C_{vap} 为蒸发系数, α_v 为蒸汽体积分数, r_b 为空泡半径, M 为摩尔

质量, R 为气体常数, P_v^* 为饱和蒸气压, T 为当地温度

为描述纯物质的饱和蒸气压, 国内外化工行业普遍采用三参数 Antoine 方程, 如下所示

$$\lg P_{sat} = A - \frac{B}{T + C} \quad (7)$$

式中, A 、 B 、 C 为 Antoine 常数, P_{sat} 为液相的饱和蒸汽压

同时, 实验研究表明, 湍动能对空化具有重要影响, 因此采用文献[14]提出的方法计算湍动能对当地饱和蒸汽压的影响, 公式为

$$\Delta P_{tur} = 0.195 \rho_m k \quad (8)$$

式中 ΔP_{tur} 为当地饱和蒸汽压的变化 k 为湍动能 ρ_m 为混合密度

综合上述考虑热力学效应以及湍动能对饱和蒸气压的影响, 对原空化模型中的 P_v^* 进行修正, 如下所示

$$P_v^* = P_{sat} + \Delta P_{tur} \quad (9)$$

考虑到液氮强烈的热力学效应, 根据图 1, 修正后的空化模型蒸发和凝结系数分别取: $C_e=0.033$, $C_c=0.01$ 。

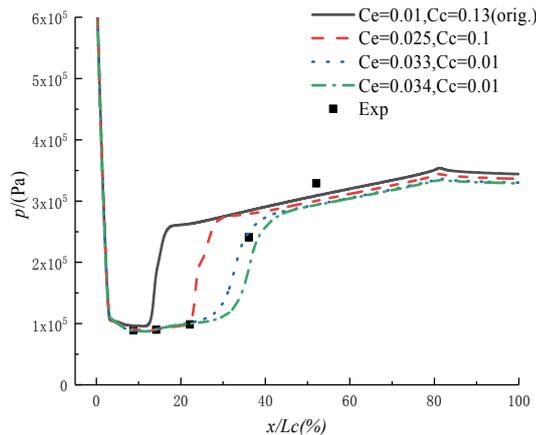


图 1 液氮中空化模型不同蒸发和凝结系数的计算结果

2.3 湍流模型的修正

RNG $k-\varepsilon$ 模型是由 N-S 方程重整化群分析得到的。其输运方程中的湍流产生项和耗散项与标准 $k-\varepsilon$ 模型中的一致, 只是两种模型的系数不同, 标准 $k-\varepsilon$ 模型中的系数 $C_{\varepsilon 1}$ 被替换成函数 $C_{\varepsilon 1RNG}$ 。其涡黏度为

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho_m k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

式中, $C_\mu = 0.085$, ε 为湍动能耗散率。

2.3.1 滤波器湍流模型 (FBM)

$$\mu_{t_FBM} = \frac{C_\mu \rho_m k^2}{\varepsilon} f_{FBM} \quad (11)$$

$$f_{FBM} = \min\left(1, C_3 \frac{\Delta \cdot \varepsilon}{k^{3/2}}\right) \quad (12)$$

式中, Δ 为滤波尺寸 $C_3 = 1.0$ 滤波尺寸由网格尺寸 $L = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$ 决定, 根据文献[9], 滤波尺寸取值略大于网格尺寸 $\Delta = 1.05L$

2.3.2 基于密度修正的湍流模型 (DCM)

$$\mu_{t_DCM} = \frac{C_\mu \rho_m k^2}{\varepsilon} f_{DCM} \quad (13)$$

$$f_{DCM} = \frac{\rho_v + (\alpha_l)^n (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v + \alpha_l (\rho_l - \rho_v)} \quad (14)$$

式中: ρ_v 为汽相密度, ρ_l 为液相密度, α_l 为液相体积分数

Chen 等^[10]发现 n 的取值对空化流动的计算有较大的影响。由于本研究使用液氮进行数值模拟计算, 液氮与室温水物性参数有较大不同, 故对系数 n 重新标定, 由图 2 可得, 当 $n=4$ 时与实验值更接近, 说明 $n=4$ 更适合当前工况。

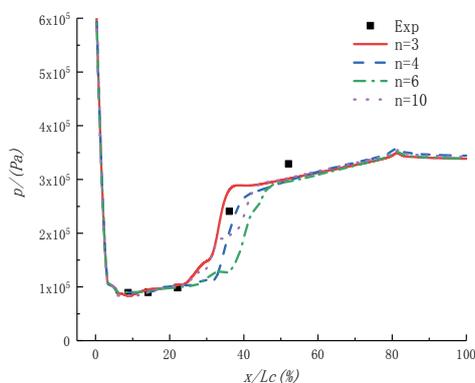


图 2 DCM 模型中不同 n 取值下的翼型表面压力分布

2.4 计算网格及边界条件

本研究的数值计算根据 Hord^[12]实验进行, Hord 针对液氮绕翼型空化进行了一系列系统的低温空化研究, 其实验模型和翼型结构分别如图 3 所示。

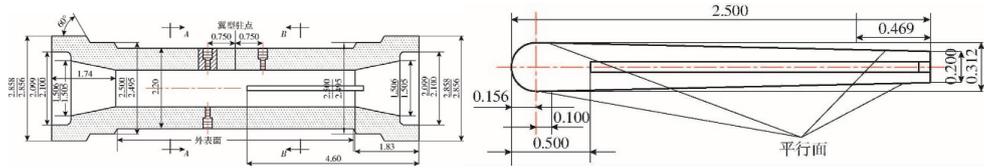


图3 实验模型和翼型结构

考虑到计算的经济性，对实验模型进行一定简化，采用对称性结构进行数值模拟，设置对称边界条件。三维对称水体模型如图4所示。

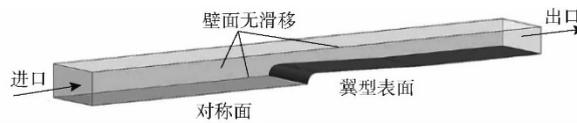


图4 计算域及边界条件

计算采用的边界条件按照 Hord 实验进行设置：入口边界采用压力入口，所设压力值与实验值保持一致，来流温度根据实验进口测得的温度进行设置，出口边界采用速度出口，计算域出口速度大小与实验一致。翼型表面及四周壁面均设置为绝热无滑移壁面条件。具体边界条件如表1所示。

表1 液氮空化数值模拟边界条件

介质	工况	温度 T_∞ (K)	进口压力 p_∞ (kPa)	出口速度 U_∞ (m/s)
液氮	293A	77.64	513.75	29.97

为准确模拟空化流场，使用 ICEM 软件对计算域划分了六面体结构网格（图5）所示。为消除网格数量对模拟造成的误差，共划分了3套不同尺寸的网格，验证网格的无关性，网格节点数分别为1982450、3171920、4757880。通过试算并与实验结果比较，最终取节点数为3171920的网格。

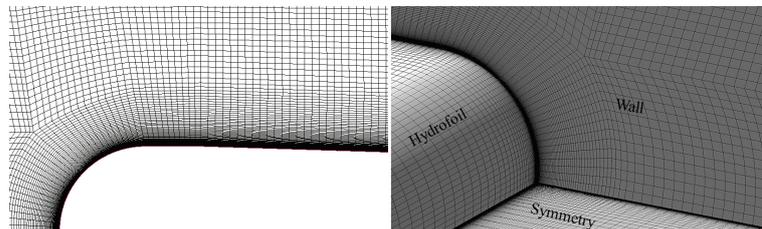


图5 Hord 翼型网格划分

3 计算结果与讨论

3.1 不同湍流模型对压力分布的影响

图 6 给出了分别采用 DCM 模型和 FBM 滤波器模型模拟得到的液氮绕翼型空化的压力分布云图。其中，压力分布由压差表示，表达式为 $\Delta P = P - P_v(T_\infty)$ ，对比分析图 6(a)与图 6(b) 可得，两种湍流模型计算得到的压差最小值均位于空化核心区，即该处流场的压力下降幅度最大。空化区域的压差源于考虑热力学效应后，介质汽化时吸收热量，导致空化区域温度下降，从而使空化区域的饱和蒸汽压小于远场的饱和蒸气压，因此，表现为空化区域的压差 ΔP 均为负值。

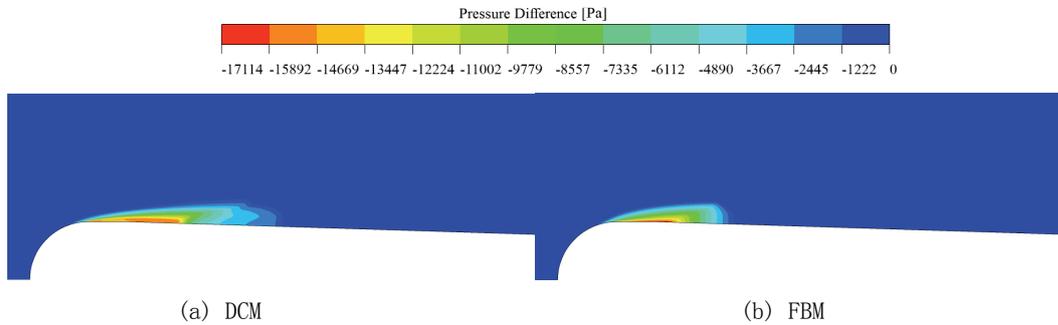


图 6 翼型表面压力分布云图

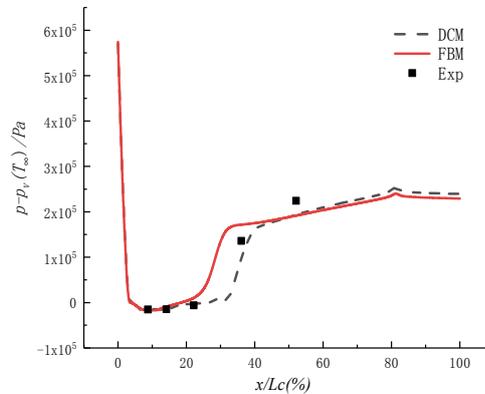


图 7 翼型表面压力分布

结合图 7 的翼型表面压降变化，发现两种湍流模型计算得到的压降分布有所差别，FBM 模型的饱和蒸气压下降幅度比 DCM 模型的大，其中 DCM 模型的最大压降为 16239Pa，而 FBM 模型的最大压降为 17114Pa，对应压力云图中最小的 ΔP 。此外，FBM 模型的压降负值区与 DCM 模型的相比较，范围较小，负值区域末端的压力梯度较大，即 FBM 模型计算得到的空穴区域尾端的压力恢复至远场压力的速度更快。

3.2 不同湍流模型对空穴形态的影响

图 8 给出了两种湍流模型计算所得空穴形态及翼型表面蒸汽体积分数变化。其中，空穴形态由蒸汽体积分数表征，红色区域表示高含汽率，蓝色区域则相反。

对比图 8(a)和图 8(b)可见，蒸汽体积分数高值区均位于翼型的头部空化区，与上文描述的压降最大值区域相符。相比 DCM 模型，FBM 模型得到的空穴区域较小，其空穴长度明显较短，但是其空穴尾部蒸汽体积分数变化梯度较大，空穴区域变化程度较大，这与其压降负值区域的变化一致。而 DCM 模型得到空化区域较大，空穴区域形态变化程度较小，其空穴末端与 FBM 模型相比较为平滑。由图 9 可得，DCM 模型与 FBM 模型的蒸汽体积分数的高值区范围较大。

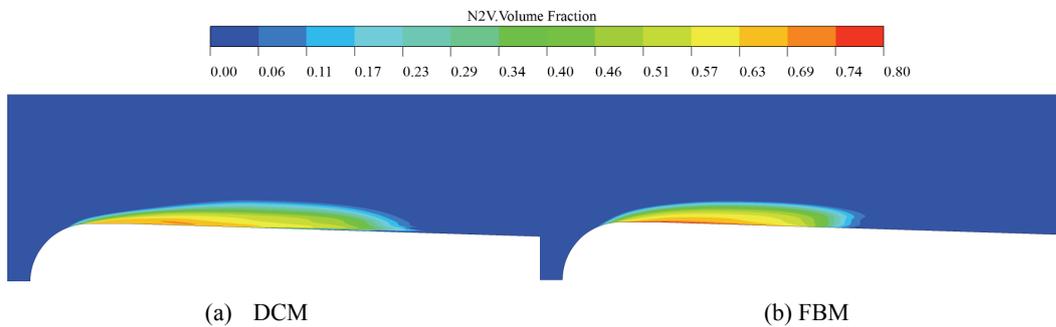


图 8 翼型空穴形态

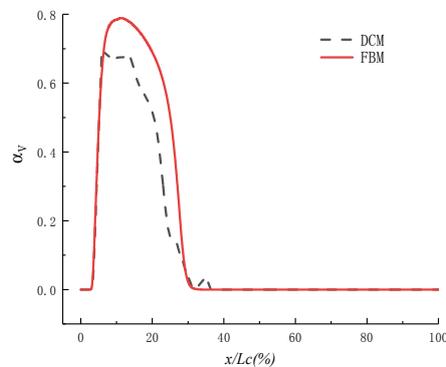


图 9 翼型表面蒸汽体积分数

比较两个模型计算得到的压降分布和蒸汽体积分数分布，可以发现，FBM 模型所得的压降较大，空化区域较小，这表明，在考虑热力学效应的计算中，FBM 模型的效果较为显著，能较好的反映热敏感介质空化的特征。

3.3 不同湍流模型对相间质量传输的影响

为进一步解释湍流模型在考虑热力学效应的空化计算中的作用，图 10 给出了采用 DCM 模型和 FBM 模型在考虑热力学效应的空化模拟中得到的液汽相间质量传输速率分布

图。图 10 中，正值表示蒸发速率，负值表示凝结速率。

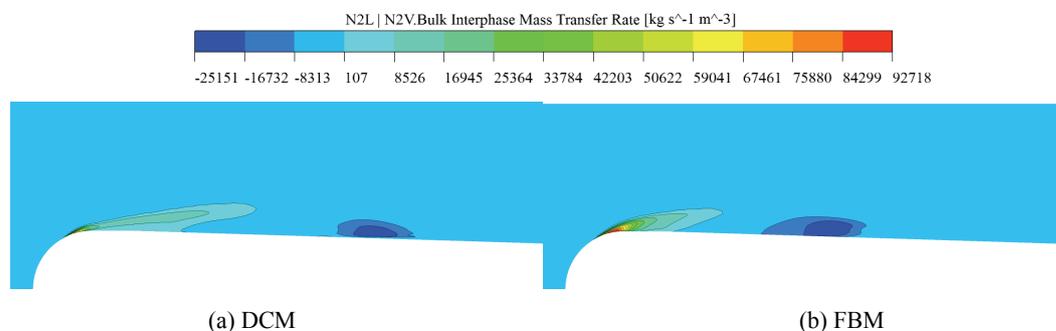


图 10 相间质量传输速率云图

图 10 可见，两个湍流模型对应的蒸发和凝结程度差异较大。对比图 10(a)和图 10(b)，DCM 模型计算所得的蒸发区域较大，蒸发质量梯度较小，而 FBM 模型计算所得的凝结区域和凝结质量均较大，其在翼型头部的空化区域的蒸发质量高值区范围比 DCM 模型的略大，蒸发质量较大，表明在该区域空化强度较大，这与图 9 所表现的高蒸汽体积分数相对应。在空穴尾部区域，FBM 模型计算所得的凝结质量较大，对应图 7 中较高的压力梯度，以及图 9 中较高的空穴尾部蒸汽体积分数梯度，即凝结质量越大，压力恢复至远场压力的速度越大，空穴长度越小。

4 结论

本研究以 Hord 的液氮实验数据为基础，在考虑热力学效应的情况下，计算了液氮绕翼型的空化流动，并通过对比分析两种湍流模型的计算结果，得到如下结论。

(1) 基于 Antoine 方程及湍动能对当地饱和压强的影响修正了空化模型，同时基于密度修正及滤波器模型修正了 RNGk- ϵ 模型，并通过与 Hord 的实验数据对比分析，表明修正后的模型有较好的适用性。

(2) FBM 模型与 DCM 模型相比较，计算得到的空化区域较小，最大压降值较大，与实验结果符合性较好，说明其在低温液体的模拟计算中的适用性更好。

(3) 在相同的工况下，FBM 模型计算得到的蒸发质量梯度和凝结质量梯度较大，空穴尾部压力恢复至远场压力的速度更快。

致谢

本研究得到国家重点研发计划 (2017YFC0404201)；江苏省六大人才高峰项目；江苏省青蓝工程中青年学术带头人和江苏省“333”工程资助项目。基金项目：国家自然科学基金

面上资助项目 (51579118); 江苏省六大人才高峰项目; 江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目资助。

参 考 文 献

- 1 曾燕丽. 浅析中国 LNG 应用技术发展现状及前景[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012, 33(16): 242-242.
- 2 Brennen C E. Hydrodynamics and Cavitation of Pumps[M]// Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps. 2007.
- 3 Zhou L,Wang Z.Numerical Simulation of Cavitation Around a Hydrofoil and Evaluation of a RNG $\kappa\text{-}\epsilon$ Model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(1):011302-011308.
- 4 张德胜,施卫东,张华,等.不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 66-71.
- 5 张德胜,石磊,陈健,等. 基于大涡模拟的轴流泵叶顶泄漏涡瞬态特性分析[J]. 农业工程报,2015,31(11): 74-80.
- 6 Yamanishi N, Fukao S, Qiao X, et al. LES Simulation of Backflow Vortex Structure at the Inlet of an Inducer[J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(5):587.
- 7 Johansen S T, Wu J, Shyy W. Filter-based unsteady RANS computations[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2004, 25(1):10-21.
- 8 Coutierdelghosa O, Régiane Fortes Patella, Reboud J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulation of unsteady cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 125(1):38-45.
- 9 余志毅,时素果,黄彪,等.FBM 模型在栅中翼形空化流动计算中的应用[J].工程热物理学报,2010, V31(5):777-780.
- 10 Chen T, Huang B, Wang G, 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, 101:886-900.
- 11 Liu S, Li S, Liang Z, et al. A mixture model with modified mass transfer expression for cavitating turbulent flow simulation[J]. Engineering Computations: Int J for Computer-Aided Engineering, 2008, 25(4):290-304.
- 12 Hord J. Cavitation in liquid cryogenes. 2: Hydrofoil[J]. 1973.
- 13 LINSTROM, Peter J, William G. The NIST Chemistry WebBook : A chemical data resource on the internet[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2001, 46(5):1059-1063.
- 14 Singhal A. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. J Fluid Eng 2002;124(3):617-624.

The influence and applicability of turbulence model in numerical simulation of cavitation in cryogenic fluid

FENG Jian¹, ZHANG De-sheng^{1*}, SHI Wei-dong², GAO Xiong-fa¹, SHEN Xi¹, JIN Yong-xin¹

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China.

2. Department of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China.

*Email: zds@ujs.edu.cn)

Abstract: To study the effect of turbulence model in cryogenic fluid cavitation, turbulent cavitation flows of liquid nitrogen over the three-dimension Hord hydrofoil were numerically investigated based on two turbulence models, i.e. the RNG $k-\varepsilon$ Model with local density correction and Filter-based RNG $k-\varepsilon$ Model, respectively. The distributions of pressure, cavity region and interphase mass transfer were obtained based on two turbulence models and the two turbulence models were evaluated by comparing the calculation results with the experimental data. The results show that, compared with DCM model, the calculation results of FBM model is closer to the experimental results, with larger pressure drop in cavity region, smaller length of cavity and larger gradient of evaporation mass and condensation which indicates the better applicability of FBM model in numerical simulation of cryogenic fluids.

Key words: Turbulence model; Hydrofoil; Thermal effect; Numerical simulation; Cavitating flows.