

文章编号:1000-8055(2015)02-0465-07

以 N_2O 为工质的汽蚀文氏管流场仿真

史 刚, 梁国柱

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为得到 N_2O 在汽蚀文氏管中的汽蚀流场分布, 以实际气体状态方程和完全汽穴模型为基础, 求解两相混合物流动的控制方程组. 针对 N_2O 的特点, 对三种不同工况下文氏管的汽蚀流场分别考虑汽化热和不考虑汽化热进行了仿真, 并对两种计算结果进行了对比分析. 考虑汽化热计算得到的汽蚀区比不考虑汽化热计算得到的要小, 而且汽蚀区及周边温度有明显的变化, 计算结果更加真实合理, 说明了考虑汽化热计算的必要性和正确性, 对汽蚀文氏管的设计有一定的指导作用.

关 键 词: N_2O ; 汽蚀文氏管; 流场仿真; 汽化热; 汽蚀区

中图分类号: V434⁺. 23

文献标志码: A

Flow field simulation of N_2O cavitation Venturi

SHI Gang, LIANG Guo-zhu

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to get the distribution of cavitation flow field of N_2O in cavitation Venturi, governing equations of two-phase mixture flow were solved based on state equation for real gas and full cavitation model. According to the special properties of N_2O , numerical simulation was performed on a cavitation Venturi under three experimental states. Two different methods: with and without the influences of latent heat were used respectively and comparison and analysis of two different results were made. The cavitation area calculated by the method considering the influences of latent heat was smaller and obvious change of temperature in and around the cavitation area was found. The results indicate that the necessity and correctness of calculation considering the influences of latent heat, which can be a certain guide for the design of Venturi.

Key words: N_2O ; cavitation Venturi; flow field simulation; latent heat; cavitation zone

N_2O 是一种应用前景良好的无毒推进剂, 受到了人们越来越多的广泛关注. 但 N_2O 具有比较复杂的热力学性质, 物性参数随温度和压力变化较大. 其液相不符合不可压流假设, 气相不符合理想气体假设, 因此给流动的仿真研究带来了很多困难^[1]. 同时与传统的液体推进剂不同的是, 由于其汽化热比较大, 汽化会导致自身温度的显著下降.

汽蚀文氏管是液体火箭发动机输送系统中常用的流量控制元件, 通过在喉部产生稳定的汽蚀区来隔断下游压力波动对液体工质流量的影响. 目前国内外关于文氏管的汽蚀流场仿真研究多以传统液体推进剂或水为工质, 如浙江大学的张小斌等采用完全汽穴模型考虑汽化热的影响对液氧文氏管的汽蚀进行了数值模拟, 总结了文氏管进出口压比对汽蚀特性的影响, 但没有进行实验验

收稿日期:2011-03-05; 修订日期:2011-09-08

作者简介:史刚(1987—), 男, 河北邢台人, 硕士生, 主要从事液体火箭发动机研究.

证^[2]. 大连理工大学的王智勇等基于 Fluent 软件采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和空化泡动力学模型, 以水为工质不考虑汽化热的影响计算了文氏管内压力和汽蚀数的分布, 并将理论计算的汽蚀区与实验拍摄的云雾图像进行了比较, 两者较为符合^[3]. 这些研究成果在一定程度上揭示了汽蚀文氏管的汽蚀特性和机理, 但由于 N_2O 的特殊性质, 有必要对其流经文氏管的汽蚀流场进行专门的仿真研究, 为 N_2O 文氏管的设计和实验提供帮助.

本文使用 Fluent 软件, 针对一种固定形状的文氏管, 分别在考虑汽化热和不考虑汽化热的情况下采用完全汽蚀模型对 N_2O 工质流经文氏管的汽蚀流场进行数值仿真, 并进行了对比和分析.

1 N_2O 的特殊性质

1.1 主要物性参数随温度的变化

N_2O 是一种无色无味的物质, 其临界温度为 36.52°C , 临界压力为 7.245 MPa , 临界密度为 452.0115 kg/m^3 . 其饱和蒸汽压、液体密度和汽化热随温度的变化较大, 分别如图 1 和图 2 所示^[4]. 从图中可以看出温度每升高 1°C 液体密度减小约 5 kg/m^3 , 饱和蒸汽压升高约 0.08 MPa , 汽化热减小约 0.12 kJ/mol .

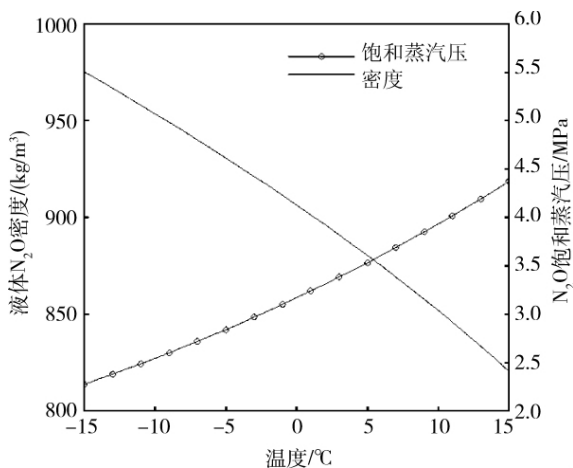


图 1 密度和饱和蒸汽压随温度的变化

Fig. 1 Density and saturated vapor pressure's changing with temperature of liquid N_2O

1.2 实际气体状态方程

在汽蚀区域内 N_2O 的状态为湿饱和蒸汽, 即饱和液态 N_2O 和干饱和 N_2O 蒸汽共存的状态. 对于干饱和蒸汽, 其压力为当地温度下的饱和蒸

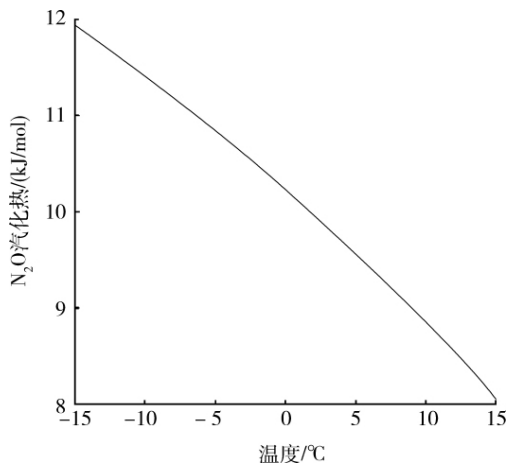


图 2 汽化热随温度的变化

Fig. 2 Latent heat's changing with temperature of N_2O

汽压, 因此只要温度确定, 其密度就是确定的^[5], 即汽蚀区域内 N_2O 蒸汽的密度仅与当地温度有关. 但 N_2O 蒸汽不满足完全气体假设, 需采用实际气体状态方程计算其密度.

实际气体状态方程以立方型方程应用最为广泛, 例如范德瓦尔斯方程、Peng-Robinson 方程等, 但它们在应用于高饱和蒸汽压流体时并不准确. 分别应用不同方程计算得到的密度与实际测量值的比较表明, 斯潘-瓦格纳 (Span-Wagner) 方程较为准确.

斯潘-瓦格纳方程应用于 N_2O 的表达式如下^[6]:

$$\frac{p}{\rho RT} = 1 + \delta \frac{\partial \alpha^\gamma}{\partial \delta} \quad (1)$$

$$\alpha^\gamma = \sum_{i=1}^5 n_i \tau^i \delta^{d_i} + \sum_{i=6}^{12} n_i \tau^i \delta^{d_i} \exp(-\gamma \delta^2) \quad (2)$$

其中 δ 为当低密度与临界密度的比值, τ 为当地温度与临界温度的比值, α^γ 为亥姆霍兹能, n_i 为经验系数, 具体数值见文献^[6].

2 数学模型和计算策略

2.1 两相流模型

两相流模型采用不考虑相间速度滑移的混合物 (mixture) 模型, 它适合于分散相体积分数超过 10% 同时分布较广的情形^[7-9]. 不考虑体积力的绝能流动的控制方程为

连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (3)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla [\mu_m (\nabla \cdot \mathbf{v}_m + \nabla \cdot \mathbf{v}_m^T)] \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^n (\alpha_j \rho_j E_j) + \nabla \cdot \sum_{j=1}^n [\alpha_j \mathbf{v}_j (\rho_j E_j + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_e \quad (5)$$

其中下角标 j 表示第 j 相, n 表示相的总数取为

2; α_j 为第 j 相的体积分数; $\mathbf{v}_m = (\sum_{j=1}^n \alpha_j \rho_j \mathbf{v}_j) / \rho_m$

为混合物速度, $\rho_m = \sum_{j=1}^n \alpha_j \rho_j$ 为混合物密度; k_{eff}

为有效导热系数; $\mu_m = \sum_{j=1}^n \alpha_j \mu_j$ 为混合物黏度; S_e

为可以自行添加的单位体积的热源。

2.2 汽蚀模型

本文采用完全汽穴(cavitation)模型,适用于两相均为可压缩流体的情况。该模型假设工质流体由液相、汽相和不可凝气体即汽核组成,三相分别由下标 l, v 和 g 代表^[10-11],以 f 表示各相的质量分数, f_g 取为 1×10^{-5} 。

2.2.1 质量传递

汽蚀发生时,液相和汽相之间要发生质量传递,汽蚀区内的汽相质量分数由蒸汽输运方程、连续方程和动量方程联合求解,其中蒸汽输运方程为^[12]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f_v) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_v f_v) = R_e - R_c \quad (6)$$

其中 $\mathbf{v}_v$ 为蒸汽相的速度; R_e 和 R_c 分别表示气泡的产生和溃灭速率,即相变率。两者可从描述气泡在液体中运动特性的 Rayleigh-Plesset 方程得到。

当 $p < p_{sat}$ 时

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left(\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - f_v - f_g) \quad (7)$$

当 $p > p_{sat}$ 时

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} f_v \quad (8)$$

其中 k 表示湍动能, σ 为表面张力系数, C_e 和 C_c 为相变率系数,是从大量实验中总结得到的经验系数,分别取 0.02 和 0.01。 p_v 为相变的临界压力,考虑到湍流效应对汽蚀流动的影响, p_v 取

的值比饱和蒸汽压 p_{sat} 高一些,即为

$$p_v = p_{sat} + p_{turb}/2$$

其中

$$p_{turb} = 0.39 \rho_m k \quad (9)$$

2.2.2 能量传递

Fluent 软件中的汽穴模型并未考虑相变时热量的传递,但实际上在相变发生时,伴随着质量的传递还有能量的传递,这会影响到汽蚀区中的温度分布。而 N_2O 的性质受到温度的影响很大,所以为了得到真实合理的模拟结果,需要在模型中考虑汽化热的影响。本文在能量方程(5)中自行添加了能量源项 S_e 以体现汽化热的作用,这个能量源项的值为净相变率(气泡的产生和溃灭速率之和)与工质的汽化热 H_1 的乘积,即

$$S_e = (R_e - R_c) \cdot H_1 \quad (10)$$

2.2.3 计算策略

采用基于有限体积法的 CFD 软件 Fluent,以包含 cavitation 模块的 mixture 模型模拟两相流动,以标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和标准壁面函数法模拟湍流的影响,采用“压力进口”和“压力出口”边界条件。 N_2O 工质的所有热力学参数均认为是温度的单值函数,计算时考虑汽化热在能量方程中添加源项 S_e ,用 C 语言编写 UDF 并编译链接到 Fluent 软件。

由于轴对称性,只选取文氏管轴向截面的一半作为研究对象。建模采用分区划分的四边形结构化网格,易于收敛和显示流场的细微结构。

3 数值仿真结果与分析

3.1 研究对象

本文所研究的汽蚀文氏管结构尺寸如图 3 所示。为减少温度测量误差造成的影响,根据汽蚀时文氏管喉部压力等于工质饱和蒸汽压的特点,在该文氏管的喉部设计了压力测点。三种典型实验工况的测量参数如表 1 所示,计算时即以测到的温度和压力作为边界条件。

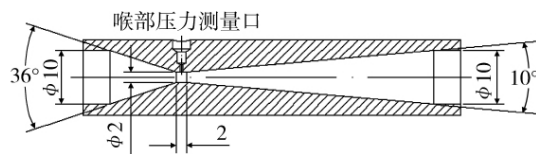


图3 文氏管结构尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Structure size of venturi (unit:mm)

表 1 测量数据

Table1 Measured parameters

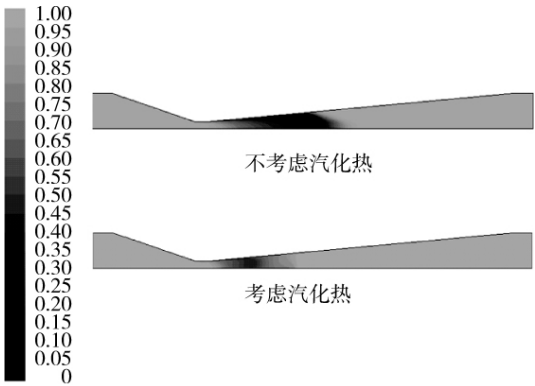
工况	入口压力/ MPa	入口温度/ ℃	出口压力/ MPa	喉部压力/ MPa
1	5.31	-4.2	3.71	2.89
2	5.13	-5.0	3.65	2.84
3	4.88	-6.4	3.52	2.75

3.2 仿真结果与分析

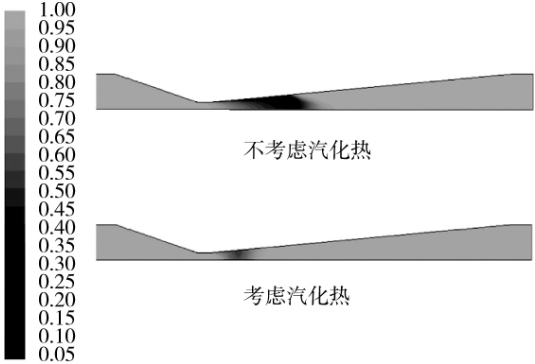
分为考虑汽化热的影响(添加能量源项)和不考虑汽化热的影响(不添加能量源项)两种情况计算并进行对比分析.

3.2.1 两种计算结果对比

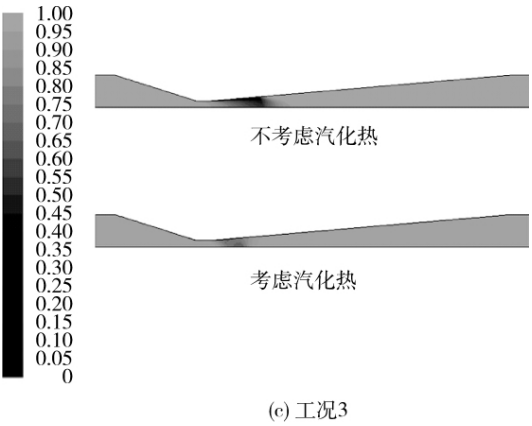
两种方法计算所得的液相体积分数在整个文氏管内的分布对比如图 4 所示,沿文氏管管壁的分布对比如图 5 所示.图 5 的横坐标为管壁上的点距离文氏管入口平面的距离,纵坐标表示液相体积分数,纵坐标值越大表示汽相体积分数越低.从图 4 可以看出相同工况下考虑汽化热计算所得到的汽蚀区域比不考虑汽化热的计算结果要小,从图 5 可以看出考虑汽化热计算所得到的液相体



(a) 工况1



(b) 工况2



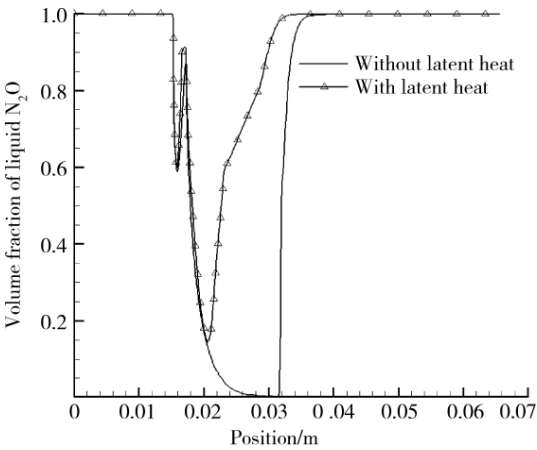
(c) 工况3

图 4 N₂O 液相体积分数分布

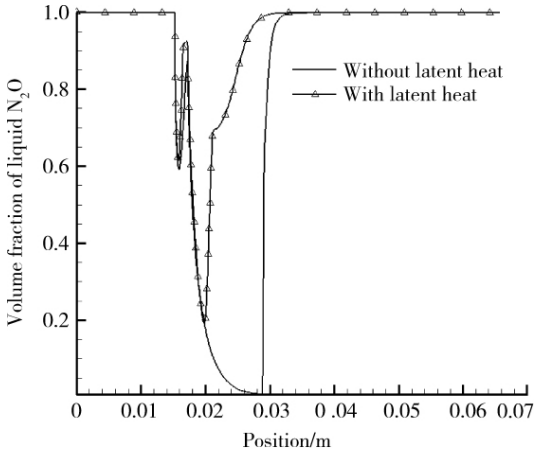
Fig. 4 Distribution of volume fraction of liquid N₂O in Venturi

积分数的最小值也高于不考虑汽化热的结果,考虑汽化热计算的汽蚀程度相对较低.

液体 N₂O 在汽蚀时会吸收大量的热量,导致当地和周围的液体温度降低,进而导致周围液体的饱和蒸汽压显著下降,自然汽蚀程度会减弱.在扩压区压力恢复的过程中,压力高于饱和蒸汽压



(a) 工况1



(b) 工况2

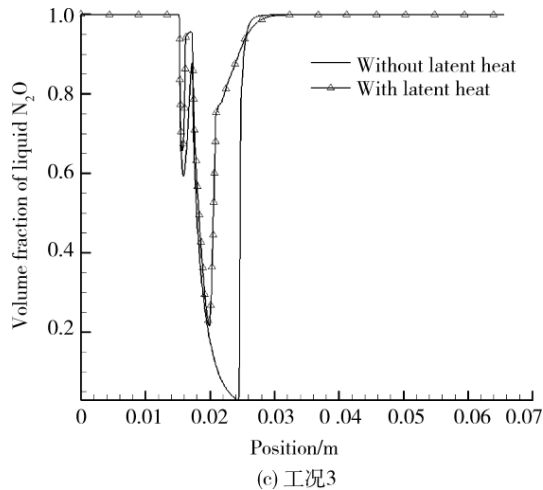
图 5 N_2O 液相体积分分数沿管壁的轴向分布

Fig. 5 Axial distribution of volume fraction of liquid N_2O on the wall surface of Venturi

的区域也就会相对较大,因此导致汽蚀区域相对较小.图 6 所示即为考虑和不考虑汽化热计算得到的温度沿文氏管壁面的分布情况对比.由图中可以看出在考虑汽化热计算时,未发生汽蚀的区域温度几乎保持为常数,而在汽蚀区域附近出现了比较明显的温度下降,最低温度比入口温度低 $2\sim 3^\circ C$ 左右.当 N_2O 进入文氏管的扩压段之后,由于压力的升高气泡溃灭, N_2O 完成了由汽相到液相的转变,并伴随着热量的释放,导致温度重新回升至入口温度.在不考虑汽化热计算时,整个文氏管内温度基本不变,这显然是不合理的.

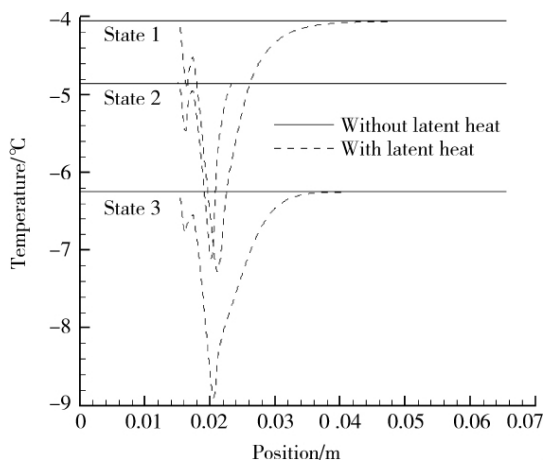


图 6 温度沿管壁的轴向分布

Fig. 6 Axial distribution of temperature along the wall surface of Venturi

上述分析可以得出,是否考虑汽化热对计算结果有较大的影响,考虑汽化热的计算方法显然更为真实合理,更能体现 N_2O 的真实汽蚀特性,

本文接下来的分析将只针对考虑汽化热的计算.

3.2.2 静压分布

三种工况下整个文氏管内的静压分布如图 7 所示,静压沿文氏管壁面的轴向分布和沿文氏管轴线的分布分别如图 8、图 9 所示.从图 8、图 9 中可以看出,在文氏管的收缩段静压逐渐降低,当压力小至液体饱和蒸汽压时即发生汽蚀,并且在汽蚀区内越靠近管壁处压力越低.

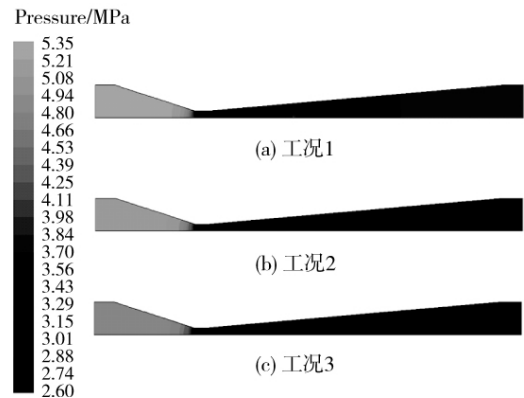


图 7 文氏管内静压分布

Fig. 7 Distribution of static pressure in Venturi

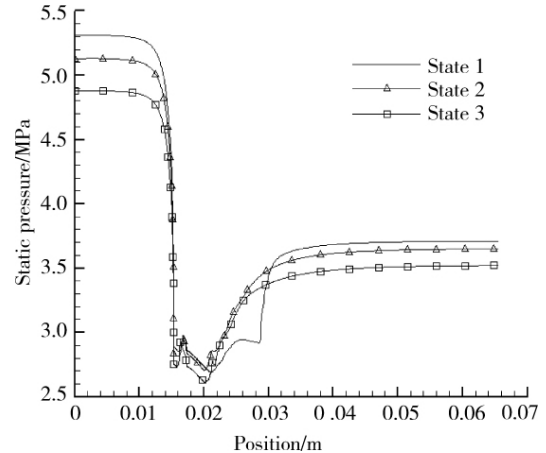


图 8 静压沿文氏管壁的轴向分布

Fig. 8 Axial distribution of static pressure along the wall surface of Venturi

由图 8、图 9 中还可看出压力的最低点并不在喉部,而是在喉部之后一段距离.在扩张段经过汽蚀区后压力逐渐升高,但最终的恢复压力小于初始压力,这主要是由于气泡的产生和溃灭所造成的阻力损失.

3.2.3 液相体积分分数及温度分布

三种工况下液相体积分数和温度沿管壁的分布如图 10 所示.

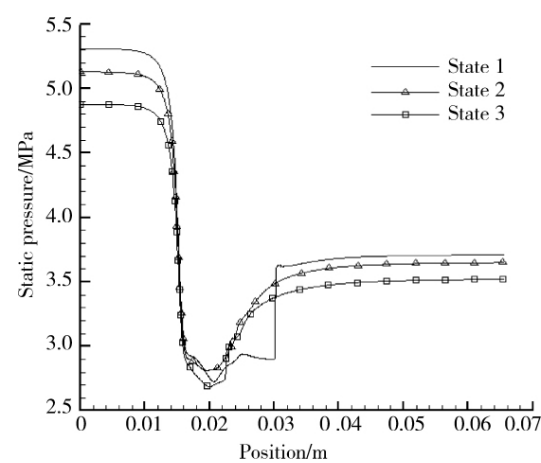


图 9 静压沿轴线分布

Fig. 9 Distribution of static pressure along axis

从图 10 中可以看出在文氏管喉部圆柱段的前端液相体积分数开始下降,而后又增加,直到喉部后端又开始降低.即汽蚀初生是发生在文氏管喉部的前端.喉部的前端有一个较小的汽蚀区域,从后端汽蚀区域开始扩大并发展.

同时还可看出文氏管内温度的分布与液相体积分数的变化趋势大体对应.当汽蚀发生时,液相

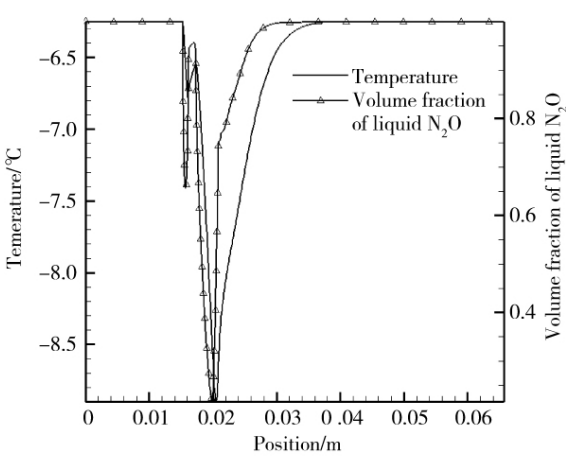


图 10 温度和液相体积分数沿管壁分布

Fig. 10 Distribution of temperature and volume fraction of liquid N_2O along the wall surface of Venturi

向汽相转变要吸热,这时在能量方程中所添加的能量源项 S_e 为负值,计算得到的温度会降低;而当气泡溃灭时要放热, S_e 为正值,计算得到的温度要升高直至回升到入口温度.由此也可以得出结论,能量方程中添加能量源项的方法可以有效地模拟出汽化热的影响.

3.2.4 与实验结果对比

如前所述在文氏管实验中测量了文氏管喉部的压力,表 2 即表示了在相同位置处三种工况下仿真得到的喉部压力与实测喉部压力的对比,从表中可以看出仿真值与实测值较为符合.

表 2 仿真与测量结果对比

Table 2 Comparison of simulation and measurement

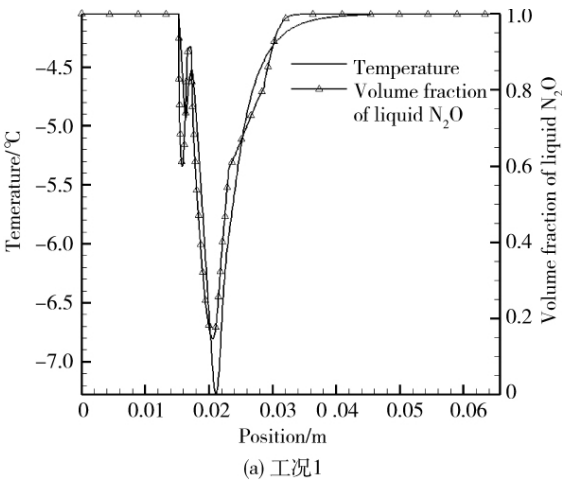
工况	仿真喉部 压力/MPa	实测喉部 压力/MPa	相对 误差/%
1	2.86	2.89	-1.04
2	2.83	2.84	-0.35
3	2.86	2.75	4.01

4 结 论

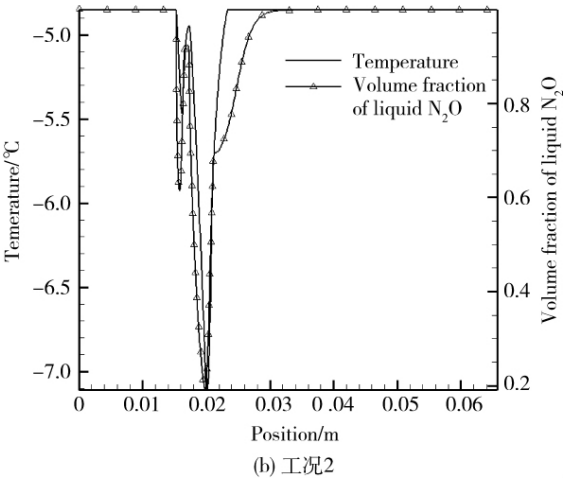
本文分别在考虑和不考虑汽化热影响的条件下计算了文氏管内的汽蚀流场,结论如下:

1) 由于 N_2O 汽化热较大而且热力学性质受温度影响较大,在对其汽蚀流场的仿真中必须考虑汽化热的影响.

2) 考虑汽化热计算得到的汽蚀区比不考虑



(a) 工况1



(b) 工况2

汽化热计算得到的要小,且温度有明显的变化,文氏管喉部有与汽蚀区相对应的低温区。

3) 汽蚀主要发生在文氏管喉部圆柱段的后端,而汽蚀区域内压力的最低点出现在喉部之后一段距离。

4) 在能量方程中添加能量源项的方法可以有效地模拟 N_2O 汽蚀发生时汽化热对流场分布的影响,使得仿真结果更加真实合理。

参考文献:

- [1] Dyer J, Doran E, Dunn Z, et al. Modeling feed system flow physics for self-pressurizing propellants[R]. AIAA-2007-5702, 2007.
- [2] 张小斌,曹潇丽,邱利民,等.液氧文氏管汽蚀特性计算流体力学研究[J].化工学报,2009,60(7):1638-1643.
ZHANG Xiaobin, CAO Xiaoli, QIU Limin, et al. CFD study on cavitaiton of liquid oxygen in Venturi[J]. CIESC Journal, 2009, 60(7):1638-1643. (in Chinese)
- [3] 王智勇,张晓冬,杨会中.文丘里管中空化流场的数值模拟[J].计算机与应用化学,2006,23(10):939-942.
WANG Zhiyong, ZHANG Xiaodong, YANG Huizhong. Numerical simulation of cavitation flow field in the Venturi [J]. Computers and Applied Chemistry, 2006, 23(10):939-942. (in Chinese)
- [4] 黄建彬.工业气体手册[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [5] 朱明善,刘颖,林兆庄,等.工程热力学[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [6] Span R, Wagner W. Equations of state for technical applications; I simultaneously optimized functional forms for nonpolar and polar fluids [J]. International Journal of Thermophysics, 2003, 24(1):1-39.
- [7] Dabiri S, Sirignano S A, Joseph D D. Cavitation in an orifice flow[R]. AIAA-2007-1118, 2007.
- [8] Hosangadi A, Ahuja V. Numerical study of cavitation in cryogenic fluids[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(2):267-281.
- [9] XU Changhai, Heister S D, Collicott S H, et al. Modeling cavitating Venturi flows[R]. AIAA-2002-3699, 2002.
- [10] Bunnell R A, Heister S D, Yen C, et al. Cavitating injector flows; validation of numerical models and simulation of pressure atomizers[J]. Atomization and Sprays, 1999, 9(5):445-465.
- [11] Tamaki N, Shimizu M, Nishida K, et al. Effects of cavitation and internal flow on atomization of a liquid jet[J]. Atomization and Sprays, 1998, 8(2):179-197.
- [12] Zhang X B, Qiu L M, Gao Y, et al. Computational fluid dynamic study on cavitation in liquid nitrogen[J]. Cryogenics, 2008, 48(9-10):432-438.