

双级喷嘴内流体闪蒸过程的数值研究

李世瑞¹, 韩东¹, 高斯杰¹, 王瑾程¹, 何纬峰¹, 郑明瑞¹, 汪胜¹, 周天昊¹, 彭涛²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 江苏乐科节能科技股份有限公司, 江苏 靖江 214500)

摘要:使用多相流混合模型进行数值模拟来研究闪蒸流动特性,结合实验对仿真结果进行验证,探究通流面积与喉道孔径对闪蒸现象和两相混合物质量流量的影响。研究表明:水在喉道出口大量气化,并于喷嘴的中间段形成一个闪蒸区域;随着喉道孔径的减小与挡板高度的增加,流通的面积会变窄,致使喷嘴出口流量减小,但因流动的压损增大,使得相变过热度更高,更利于闪蒸的发生。

关键词:双级喷嘴;闪蒸流动;多相流;气相体积分数;结构尺寸

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0020-05

Numerical Reserch of Flash Evaporation for Fluid in Two-stage Nozzle

LI Shirui¹, HAN Dong¹, GAO Sijie¹, WANG Jincheng¹, HE Weifeng¹, ZHENG Mingrui¹, WANG Sheng¹,
ZHOU Tianhao¹, PENG Tao²

(1. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Leke Energy-saving Technology Co., Ltd., Jingjiang 214500, China)

Abstract: The numerical simulation of multi-phase mixture model is carried out to explain the flashing flow behavior, and verify the simulation results by experiments. The effects of flow area and throat diameter on flashing phenomenon and two-phase mixture mass flow are investigated. The research shows that a large amount of water is gasified at the throat outlet, forming a flash region in the middle section of the nozzle. With the decrease of throat diameter and the increase of baffle height, the flow area narrows down, leading to the decrease of nozzle outlet flow. However, due to the increase of flow pressure loss, the phase change superheat is higher, which is more conducive to the occurrence of flash.

Keywords: two-stage nozzle; flashing flow; multiphase flow; vapor volume fraction; constructional dimension

0 引言

蒸汽作为一种重要的能源,通过管道运输到使用地,广泛地应用在各行各业。在运输过程中,由于蒸汽会与环境换热,无法避免一部分蒸汽被冷凝成饱和液态水,由此形成气液两相混合物在管道中流动。流动过程中会遇到喷嘴、阀门、文丘里管和孔板,当饱和水流经这些截面突然变化的结构时,会出现突然的压降,饱和温度随着下降,导致剧烈的沸腾,这个过程称之为闪蒸^[1-2]。在管道或者储罐存在裂缝发生泄漏时,流体流出也会观察到这一现象。为了保证运输过程的安全和可操作性,需要准确地揭示闪蒸传热相变机理,而闪蒸流动复杂的物理特性,也导致了仿真模型的复杂性。

由于闪蒸现象的重要性,在近几十年来出现了许多理论^[3-5]和实验方法^[6-7]。在众多的理论模型中,HEM(the homogeneous equilibrium model)是最经典的模型,它假定相间的滑移速度为0,认为闪蒸是平衡状态下的伪单相流^[8]。HEM模型适用于相间能平滑过渡的长喷嘴中,若

应用在尺寸较小的喷嘴会产生较大的误差。当HEM不适用的情况下,需要增加经验修正系数或相间滑移速度方程以修正模型^[9-10]。DANGLE Q A等^[5]使用考虑了非平衡效应的闪蒸流动模型,是通过使用沸腾延迟效应解释的。假设两相混合物的相变取决于气化压力与蒸汽分压的差值,其仿真结果与现有实验数据具有良好的一致性。传统的雾化喷嘴是通过气与液的冲击混合,利用速度差将液膜破碎成雾滴,而在喷嘴结构优化过程中并未涉及相变^[11]。现有学者将流体的闪蒸作用应用于雾化喷嘴,并研究了双孔喷嘴之间的膨胀室尺寸和几何形状对雾化的影响^[12-14]。在喷嘴结构的两相流研究中,主要集中于出口处产生喷雾效果的研究,忽略了多级喷嘴内部的闪蒸流动特性研究,较少提及到结构尺寸对闪蒸流动的影响,对流经多级喷嘴流量变化规律的探究也并未涉及。

本文的主要目的是分析喷嘴的结构尺寸对流经它的水汽混合物流量的影响,并使用了双级通道,分析喷嘴内部通道闪蒸流的流动特性。为了进行分析,采用两相流混合模型来考虑相变,建立闪蒸流动模型,对喷嘴的喉道直径和挡板处通流面积进行分析。

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金立项资助项目(kfj20200214;kfj20200205)

第一作者简介:李世瑞(1997—),男,广西玉林人,硕士研究生,研究方向为多相流动的数值模拟与实验。

1 研究对象

本文所研究的喷嘴几何模型如图 1 所示。喷嘴由入口段、喉道孔、挡板和出口段组成。喷嘴的几何尺寸为 $D_1 = 15 \text{ mm}$; $L_1 = 98.5 \text{ mm}$; D_2 、 L_2 和 D_3 的尺寸为本研究中的变量,探究这些变量对水汽混合物流量的影响。喷嘴结构为轴对称的,计算时可以将喷嘴简化为二维对称模型,从而减少计算耗时。以入口段中心为原点,使用 Icem 软件进行结构网格划分,并在壁面处进行网格加密,使用 Fluent 软件模拟其流场分布与闪蒸相变过程。

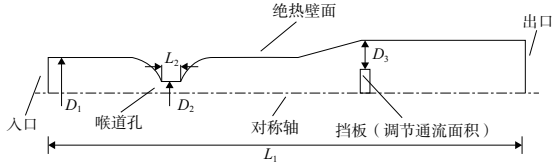


图 1 喷嘴几何模型示意图

2 计算方法

2.1 闪蒸相变数学模型

闪蒸相变是一个复杂的多相流过程,至今尚无普适的非平衡方程进行数值模拟。由于闪蒸过程中难于确定气泡直径与成核速率等参数,本研究使用蒸发冷凝模型进行扩展,采用耦合混合模型 (mixture model) 进行仿真研究。混合模型假设两相为连续相,相互间可以穿插,相间允许存在较小的滑移速度。其基本的控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k) = +S_m - \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k}) \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p +$$

$$\nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} - \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \quad (4)$$

能量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + S_E = \frac{\partial}{\partial t} \sum_k (\alpha_k \rho_k E_k) +$$

$$\nabla \cdot \sum_k [\alpha_k \mathbf{v}_k (\rho_k E_k + p)] \quad (5)$$

式中: α_k 为相 k 体积分数; \mathbf{v}_m 为质量平均速度; ρ_m 为混合物的密度; μ_m 为混合物的黏度; $\mathbf{v}_{dr,k}$ 为次相 k 的滑移速度; λ_{eff} 为有效热导率。其中:

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (7)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (8)$$

$$\lambda_{eff} = \sum \alpha_k (k_k + k_l) \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m \quad (10)$$

$$E_k = h_k - \frac{P}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (11)$$

除了动量和热量的交换外,还存在相变,液态水和蒸汽之间也有质量交换。需要添加液态水相变产生的质量和能量传递方程,计算式如下:

$$S_m = \frac{-\gamma \rho_1 \alpha_1 (T_1 - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (12)$$

$$S_E = S_m g h_{sat} \quad (13)$$

式中: γ 为时间迭代系数; T_{sat} 为沸点温度; h_{sat} 为汽化潜热。

2.2 计算条件

计算区域用二维轴对称方法表示,并建立了结构化单元网格。表 1 展示的是仿真的边界条件。在模拟中,喷嘴入口采用了压力入口边界条件,入口流体为饱和液态水,入口温度为入口压力下对应的饱和温度,出口为大气压,在壁面处使用无滑移边界条件,湍流模型选择 RNG $k-\epsilon$ 模型和标准壁面函数。为了保证计算的准确性和迭代的收敛速度,所有物理量均采用二阶迎风格式进行离散,并已进行网格独立性研究,以确保准确性。

表 1 边界条件

区域名称	流动边界	湍流
入口	总压	湍流强度和水利直径
出口	表压	湍流强度和水利直径
壁面	固定壁面	壁面函数

2.3 实验系统

为了验证模型的准确性,搭建了测试实验台,实验系统如图 2 所示,系统分为测试回路与冷凝回路。测试回路中,高温饱和水由蒸汽流经换热器后产生,流经视镜后进入测试喷嘴,出口通入水罐中。水罐配备有温度计和液位计,可根据水罐实验前后的液位变化与温度变化来计算流量,所用公式如下:

$$m = \rho H S \quad (14)$$

$$Q = \frac{m_2 - m_1}{\Delta t} \quad (15)$$

式中: H 为水罐的液位高度; S 为水罐的底面积; Δt 为实验的时间, m_1 、 m_2 为水罐实验前后的质量。

循环回路主要负责将蒸汽冷凝成液态水,冷凝水经过水泵的驱动进入换热器,为了保证蒸汽能完全冷凝成饱和水,在换热器侧面开设了 6 个旁路,可利用阀门的开启与关闭,通过控制循环液位来控制蒸汽与冷凝水的接触面积,从而控制冷凝负荷。

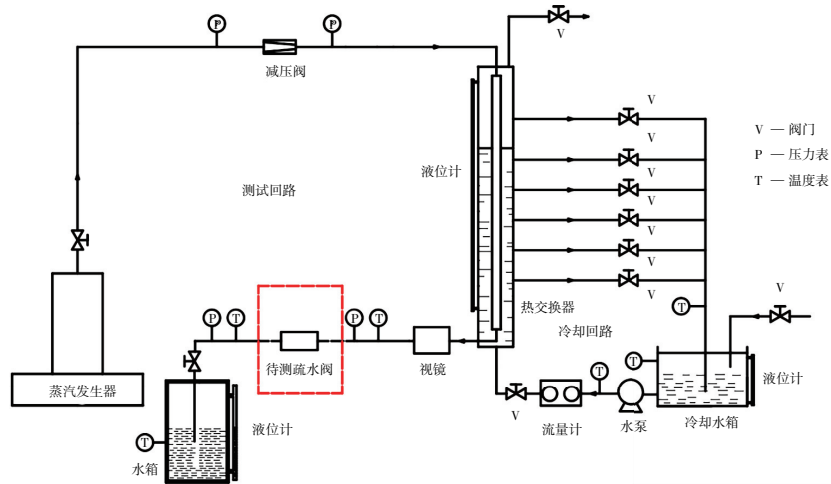


图2 实验系统图

3 结果与讨论

3.1 闪蒸相变模型验证

为了验证闪蒸相变模型的准确性,选取 $D_2 = 5\text{ mm}$ 、 $D_3 = 2\text{ mm}$ 、 $L_2 = 4\text{ mm}$ 的模型进行实验与仿真。出于安全考虑,实验的压力控制在 0.4 MPa 以下,并与仿真结果进行对比。图3为实验与仿真的流量对比图。通过对比发现,实验与仿真的结果较吻合,误差在 10% 以下,验证了闪蒸相变模型的准确性。

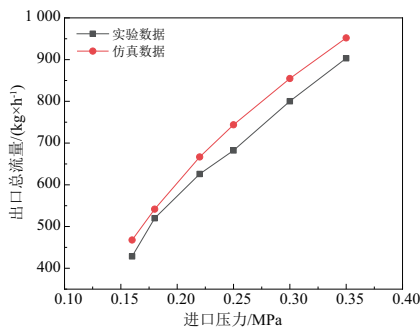


图3 实验与仿真的流量对比

3.2 喷嘴内闪蒸流场分析

为了更好地研究喷嘴闪蒸两相流的流动状态,建立 $D_2 = 5\text{ mm}$ 、 $D_3 = 6\text{ mm}$ 、 $L_2 = 4\text{ mm}$ 的 CFD 模型进行仿真计算,分别研究了该模型在不同进口压力和出口压力下的出口流量情况。从图4可以看出,随着进口饱和压力的升高,出口总流量呈现逐步增加的趋势。若出口处背压降低,出口总流量也呈现增加的趋势,即喷嘴的流量与进出口两端压差有关,压差越大,出口流量越大。

图5为喷嘴内的压力与速度分布图。可以看到流体流经喉道孔时,由于流通面积的突然减小,流体突然加速,沿轴向上产生一个较大的速度,并伴随着流体的压力下降。由于该过程的流动存在局部损失,流过喉道孔后的流体无法恢复到之前的压力,存在着较大压降。在挡板前方,由于阻挡了流体的流动,在挡板的正前方存在着一个

滞止区,该区域的压力明显高于周边。由于阻挡,流体会朝着挡板两边流动,而下游的流道截面积比上游的大,流体减速,压力回升,即在挡板后方呈现压力上升现象。

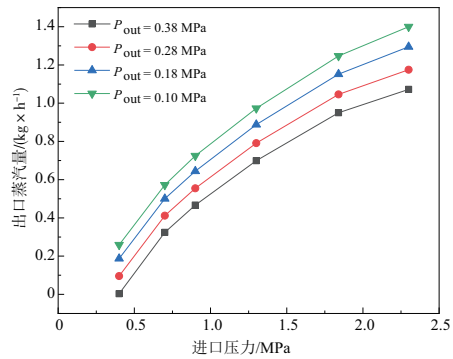


图4 不同压力下出口流量的变化

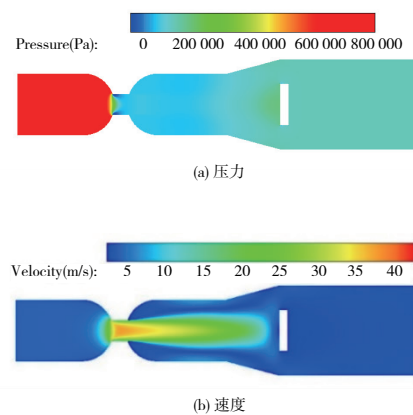


图5 喷嘴压力与速度云图

图6为喷嘴内气、液相体积分数分布图,通过分布图能很好地观察到流体的流动特性。可以看到流体流经喉道时,压力降低,当压力低于该温度下水对应的饱和压力而发生闪蒸现象。液态水从挡板两侧流出,而闪蒸产生的蒸汽大量滞留于中间腔体中,并在喷嘴的中间段形成一个闪蒸区域。

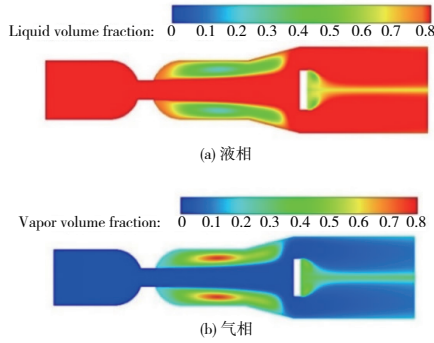


图6 喷嘴内气、液体积分数分布图

图7为喷嘴对称轴 $L = 34.4\text{ mm}$ 、 $L = 42.8\text{ mm}$ 和 $L = 57.8\text{ mm}$ 处的径向体积分数分布图, 可以看到在径向位置上的蒸汽体积分数在靠近对称轴与壁面时都呈现急剧下降的情况, 而在对称轴与壁面之间气相体积分数存在一个峰值, 这是由于蒸汽在近壁面的回流引起的。

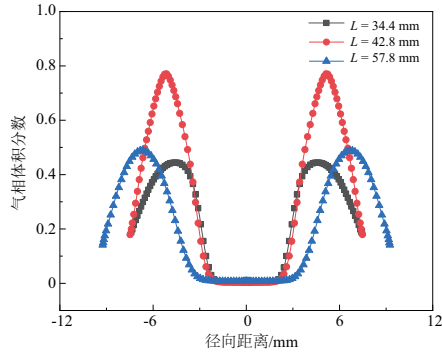


图7 对称轴方向上径向气体体积分数分布图

3.3 喷嘴的结构尺寸对闪蒸流动的影响

1) 挡板处通流面积分析

本节讨论通流面积对闪蒸流动的影响, 通过改变挡板的高度, 来调整流通通道 D_3 的尺寸, 实现流道通流面积的改变, 从而获得不同通流面积对流量特性影响。图8为喷嘴出口流量随 D_3 大小的变化图。可以看到随着通流面积的增大, 出口水流量显现增加趋势, 但出口流量增加的速度变缓。这是由于在喷嘴两端的压差已经确定的条件下, 出口流量存在一个最大值, 不会随着流通面积的增大而无限增加。

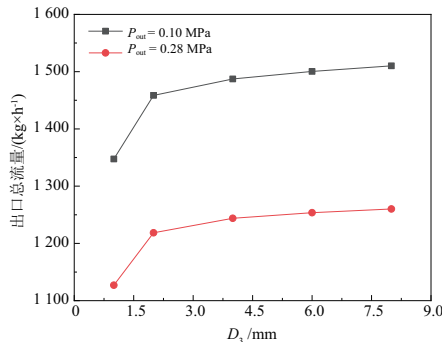


图8 喷嘴挡板处不同 D_3 尺寸的出口流量

图9为不同 D_3 尺寸下的喷嘴气体体积分数与其流线图。由于挡板的存在, 液态水与闪蒸形成的蒸汽只能通过挡板两侧流出, 闪蒸后产生的蒸汽大量滞留在中间腔体中, 并于流体在的主流区与壁面之间形成了涡。由于涡的存在, 使得蒸汽聚集于涡的内部, 出现高气相体积分数区域。在挡板后方的区域也会形成涡, 并随着 D_3 的减小, 挡板后的涡越大, 出口处气相体积分数越大, 并也出现高气相体积分数的区域。回流涡的出现, 是使该区域的气相体积分数比周围大的主要原因。

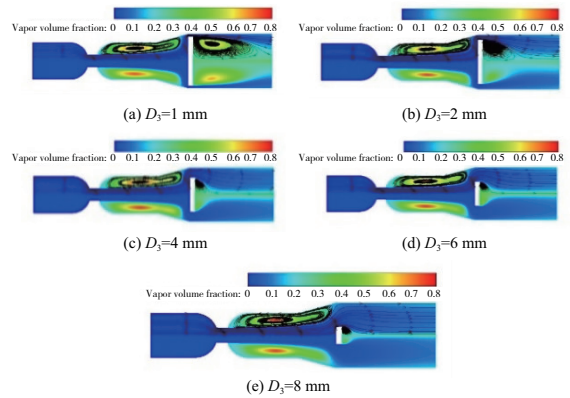


图9 不同 D_3 下的喷嘴内部气体体积分数与流线图

2) 喉道孔径大小分析

本节讨论喉道孔径 D_2 对闪蒸流道的影响。喉部作为喷嘴最重要的结构, 决定着整个结构的流动状态。在模拟中, 仅改变喉部孔径 D_2 , 其他结构参数保持不变, 获得孔径对流量特性影响。图10为出口流量随喉道孔径变化图, 可以看到通过喷嘴的流量随着喉道孔径的增加而逐渐增加。喉部直径越小, 管道的流通面积越小, 即流量越小, 这是合理且理想的。

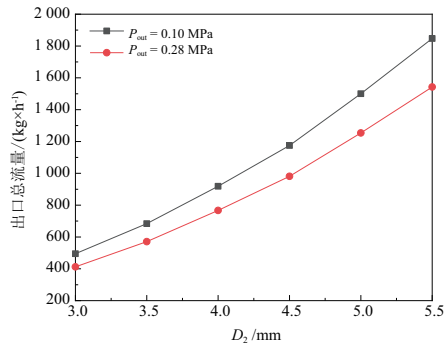


图10 不同 D_2 下喷嘴的出口流量

图11为不同 D_2 尺寸下喷嘴内的气相体积分数分布图与流线图。可以看出闪蒸形成的蒸汽仍聚集在喷嘴的中间段, 高气相体积分数区域仍出现在喷嘴主流与壁面之间的区域。不同的是, 随着喉道孔径的减小, 喷嘴中间段高气相体积分数区域越广, 3 mm 孔径的喷嘴高气相体积分数区域越接近于充满喷嘴的整个中间段。喉道孔径减小, 流动的压损增大, 使得相变过热度更高, 更有利于闪蒸的发生, 这还体现在喷嘴下游出口附近, 3 mm 孔径的气相体积分数最大。

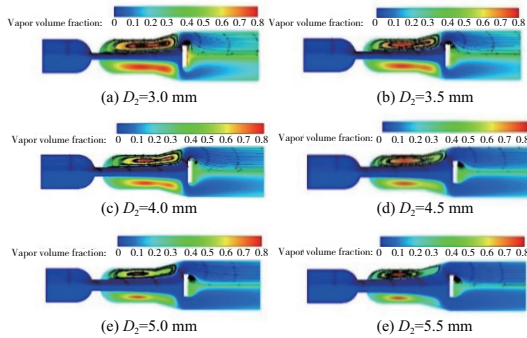


图 11 不同 D_2 下的喷嘴内部气体体积分数与流线图

图 12 为轴向方向上 $L=57.8$ mm 处的径向气相体积分数,可以观察到不同喉道孔径的喷嘴在中间主流区域的气相体积分数都较低,并且在壁面与主流间存在一个峰值。不同喉道孔径的喷嘴,峰值也不同,喉道孔径 $D_2=3.0$ mm 时,峰值气相体积分数为 0.74,喉道孔径为 $D_2=5.5$ mm 时,峰值气相体积分数为 0.25。峰值随喉道孔径的减小而增大。喉道孔径越小,越容易发生闪蒸,这体现在气相体积分数的增大上。

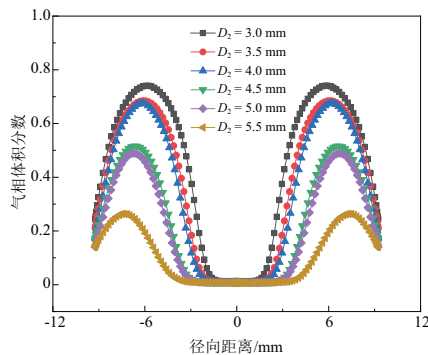


图 12 轴向 $L=57.8$ mm 处不同 D_2 下径向气体体积分数

4 结语

本文建立了闪蒸流动模型,基于 mixture 模型,在 Ansys fluent 软件中使用 2D 轴对称几何尺寸,大大简化了计算。分析了喷嘴的结构尺寸对流经它的水汽混合物的流量的影响,并使用了双级通道,分析喷嘴内部通道闪蒸流的流动特性。

1) 闪蒸相变是复杂的非平衡过程,利用压降闪蒸原理建立了闪蒸相变模型,计算双级喷嘴的相变过程,模拟的流量与实验较为吻合,验证了模型的准确性。

2) 利用 fluent 模拟了双级喷嘴的闪蒸相变流动,水在喉道出口大量汽化,但由于下游挡板的存在,蒸汽聚集在喷嘴的中间段形成一个闪蒸区域,该区域内各处的气相体积分数各不相同。因为涡的存在,使得一小块区域呈现较高的体积分数。

3) 调节挡板处的流通面积可改变闪蒸流动的流量,流通面积越大,出口流量就越大。挡板的高度越高,流通面积变窄,而喷嘴在出口处的气相体积分数越大。对于喉

道孔径,作为喷嘴中最重要的结构,喷嘴的流量随着喉道孔径的减小而逐渐减小。而喉道孔径的减小,喷嘴中间段高气相体积分数区域会变广。喉道孔径减小,流动的压损增大,使得相变过热度更高,更有利于闪蒸的发生。

参考文献:

- [1] YIN S T, WANG N N, WANG H J. Nucleation and flashing inception in flashing flows; a review and model comparison [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 146: 118898.
- [2] JIN M S, HA C T, PARK W G. Numerical study on heat transfer effects of cavitating and flashing flows based on homogeneous mixture model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 1068-1083.
- [3] XI X, LIU H, JIA M, et al. A new flash boiling model for single droplet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 107: 1129-1137.
- [4] BHATIA B, DE A. Flash boiling in sprays: recent developments and modeling [J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2019, 99(1): 93-104.
- [5] DANGLE Q A, MEREU R, BESAGNI G, et al. Computational fluid dynamics modeling of flashing flow in convergent-divergent nozzle [J]. Journal of Fluids Engineering, 2018, 140(10): 101102.
- [6] ARANEO L, DONDE R. Flash boiling in a multihole G-DI injector - Effects of the fuel distillation curve [J]. Fuel, 2017, 191: 500-510.
- [7] BERTOLDI D, DALLALBA C C S, BARBOSA J R Jr. Experimental investigation of two-phase flashing flows of a binary mixture of infinite relative volatility in a venturi tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 64: 152-163.
- [8] RICHTER H J. Separated two-phase flow model: application to critical two-phase flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1983, 9(5): 511-530.
- [9] SALVADOR F J, JARAMILLO D, ROMERO J V, et al. Using a homogeneous equilibrium model for the study of the inner nozzle flow and cavitation pattern in convergent-divergent nozzles of diesel injectors [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2017, 309: 630-641.
- [10] VENETSANOS A G. Homogeneous non-equilibrium two-phase choked flow modeling [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(50): 22715-22726.
- [11] 张奎. 内混式空气雾化喷嘴雾化特性与结构优化研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.
- [12] MIAO J J, FAN Y X, WU W Q. Effects of nozzle configuration on flash boiling fuel sprays of twin-orifice nozzle with aviation kerosene [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 174: 121335.
- [13] JU D H, HUANG Z, JIA X X, et al. Macroscopic characteristics and internal flow pattern of dimethyl ether flash-boiling spray discharged through a vertical twin-orifice injector [J]. Energy, 2016, 114: 1240-1250.
- [14] MIAO J J, FAN Y X, WU W Q. Characteristics of flash boiling spray of aviation kerosene in the twin-orifice nozzle [J]. Fuel, 2021, 297: 120771.

收稿日期: 2021-08-27