

研究论文

水蒸气超音速非平衡流动的变压凝结特性

沈胜强, 杨 勇, 张 琨, 宋 煜

(大连理工大学海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对水蒸气超音速非平衡凝结流动进行了数值模拟, 研究了水蒸气超音速流动过程中的非平衡相变及凝结激波现象, 揭示了激波与核化凝结流动之间相互作用的非平衡流动规律。着重研究了水蒸气超音速非平衡凝结相变的变压凝结特性, 归纳了压力对核化凝结、激波形态的影响规律, 给出了进口蒸汽压力变化对蒸汽过饱和度和、蒸汽核化率等凝结参数的作用规律。

关键词: 水蒸气; 超音速流动; 凝结; 激波

中图分类号: O 354

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 04-0820-05

Condensation characteristics of supersonic non-equilibrium steam flow under different pressures

SHEN Shengqiang, YANG Yong, ZHANG Kun, SONG Yu

(Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The supersonic non-equilibrium steam flow with spontaneous condensation was studied numerically. Based on the numerical simulation, the non-equilibrium thermodynamic phenomena such as the homogenous nucleation and the condensation shock were investigated, and the interaction between the homogenous condensation and the shock was revealed. The research focused on the condensation characteristics of non-equilibrium phase change under different pressures. The influence of inlet steam pressure on the homogenous nucleation and the condensation shock and the impact of pressure change on the thermodynamic characteristic such as super saturation ratio and nucleation rate were investigated.

Key words: steam; supersonic flow; condensation; shock

引 言

超音速流动在航空航天、电力、化工、制冷、核工业中有着极为广泛的应用, 尤其喷射器装置在该领域内已经成熟应用, 并且在动力推进、流体升压、真空抽吸等方面体现出很好的应用价值, 近年来随着利用低温、低压热源的喷射式热泵的普及以及现代核电站安全工程中蒸汽喷射泵显现出来的良

好的应用前景, 推动了人们对于蒸汽超音速喷射以及超音速气液两相流的能量交换与相变过程的深入研究^[1-5]。

在蒸汽喷射过程中, 相变现象的发生对流动参数有着重要影响^[6-7], 流动工况的变化会引起喷射器性能的变化^[8], 因此发生在超音速喷管中的核化凝结和激波现象引发了学者的研究兴趣^[9-10]。研究表明, 在水蒸气从亚音速到超音速的膨胀加速过程

2009-09-03 收到初稿, 2010-01-15 收到修改稿。

联系人及第一作者: 沈胜强 (1961—), 男, 博士, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50576007)。

Received date: 2009-09-03.

Corresponding author: Prof. SHEN Shengqiang, zzbshen@dlut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50576007).

中，水蒸气膨胀越过饱和线时，受自由能障的束缚并不立即发生凝结，而是继续膨胀，使得蒸汽的温度继续降低，蒸汽偏离饱和平衡态。当这种热力学不平衡态发展到一定程度，会瞬间产生大量微小的凝结核心，蒸汽发生急剧凝结，从而产生凝结激波^[11]。

本文建立了水蒸气二维可压缩守恒型模型，对水蒸气超音速凝结流动进行了数值模拟，揭示了水蒸气超音速流动过程中发生的核化凝结和凝结激波等热力学现象，分析了水蒸气超音速非平衡流动的凝结特性随压力的变化规律，归纳了蒸汽压力变化对核化凝结、激波形态的影响规律。

1 数值计算模型

数值计算模型中忽略了液态体积以及小液滴与气流间的速度差与摩擦力，把气液两相按照组合在一起的混合蒸汽考虑，在模型中假定与外界绝热且壁面无摩擦。文献[12]中给出了数值模型的详细信息和数值校验结果，本文仅给出描述气液两相流动的主要控制方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ (\rho E + P)u \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ (\rho E + P)v \end{bmatrix}$$

式中 $\rho = \rho_g / (1 - \beta)$ 为混合流体密度， ρ_g 为汽相密度， β 代表液体的质量分数。

计算中采用了 Young 对经典成核理论修正后得到的成核率^[13]和液滴增长率^[14]模型。

$$I = \frac{q_c}{1 + \theta} \left(\frac{\rho_v^2}{\rho_l} \right) \sqrt{\frac{2\pi RT}{M_m^3 \pi}} \exp\left(-\frac{4\pi r_*^2 \sigma}{3K_b T}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} = \frac{P}{h_{lv} \rho_l} \frac{\gamma + 1}{\sqrt{2\pi RT}} \frac{1}{2\gamma} c_p (T_0 - T) \quad (3)$$

式中 I 为成核率， q_c 为凝结系数， h_{lv} 为凝结潜热， r_* 为临界成核半径， \bar{r} 为液滴平均半径， $\partial \bar{r} / \partial t$ 代表液滴半径增长速率， T_0 为液滴温度， θ 为非等温修正系数。

2 超音速非平衡凝结流动的压力分布

在文献[12]给出了对模型进行数值校验结果的基础上，本文对 Moore 等^[15]采用的实验喷管（图 1）进行了数值模拟，着重研究水蒸气非平衡流动过程中的压力特性，图 2、图 3 分别给出了进口蒸汽参数 $P_m = 25 \text{ kPa}$ ， $T_m = 357.6 \text{ K}$ 时两相模型与等熵模型的压力分布。对比发现，采用等熵模型计算所得的压力分布是沿轴线均匀平滑地向喷管出口单调递减；考虑了水蒸气的凝结相变之后，压力分布在凝结发生以前与等熵模型的计算结果基本一致，而在水蒸气发生凝结相变的区域，产生了压力突升，压力变化由边界向喷管中心发展。这是由于凝结发生时，随着大量凝结核心的突然出现，巨大的凝结潜热得到释放，蒸汽温度快速升高，引起蒸汽压力的激增，而形成凝结激波。

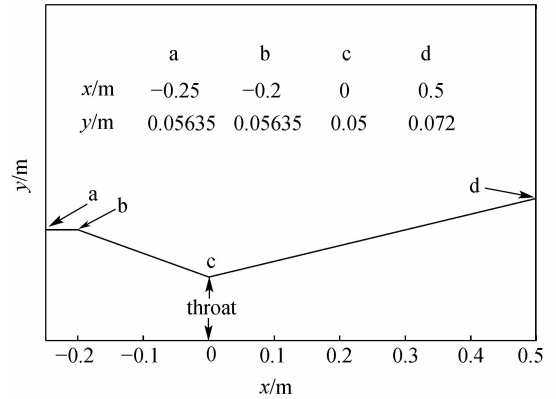


图 1 缩放喷管的几何结构数据

Fig. 1 Geometry of converging-diverging nozzle

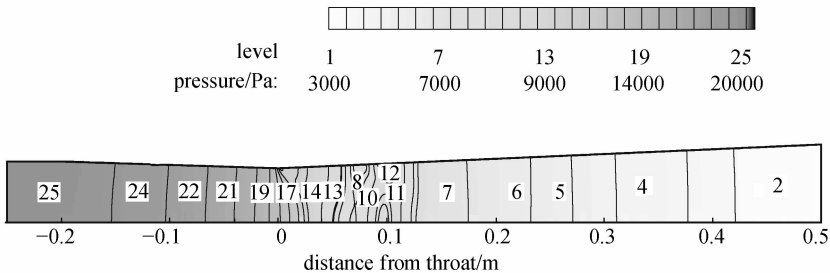


图 2 两相模型模拟时喷管内的等压线分布

Fig. 2 Isogram of pressure computed by two-phase model

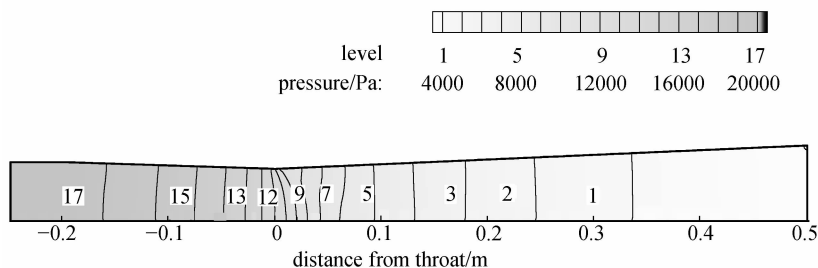


图 3 等熵模型模拟时喷管内的等压线分布

Fig. 3 Isogram of pressure computed by isentropic model

3 凝结激波的变压凝结特性

在蒸汽喷射器中，蒸汽压力是影响喷射器性能的关键参数，因此探究压力变化对于喷射器及喷管内蒸汽流动和相变特性的影响显得尤为关键。本文进而探讨了凝结激波的变压特性。文中对相同进口温度 ($T_{in}=363.1\text{ K}$) 的水蒸气采用了变压力工况数值模拟，采用的进口压力按照 $P_{in}=20、25、30、35、40、45\text{ kPa}$ 依次增大，从而对压力升高过程中凝结激波的热力学特性进行了系统的研究。

图 4 给出了计算得到的喷嘴内部轴线上蒸汽温度分布。由图可以看出，在喷嘴的喉口之前，对于入口温度相同的水蒸气，进口蒸汽压力对温度分布基本没有影响，并且该温度分布与等熵流动的温度分布几乎一致。在喉口位置之后的超音速流动，蒸汽的状态开始偏离等熵线，且不论入口压力高低，蒸汽温度都低于等熵温度。此时正处于凝结核形成阶段（参见图 5），每一个凝结核成为一个“汇”，使得周围的蒸汽在沿轴向膨胀的同时，形成向“汇”的局部膨胀，从而引起蒸汽温度的进一步降

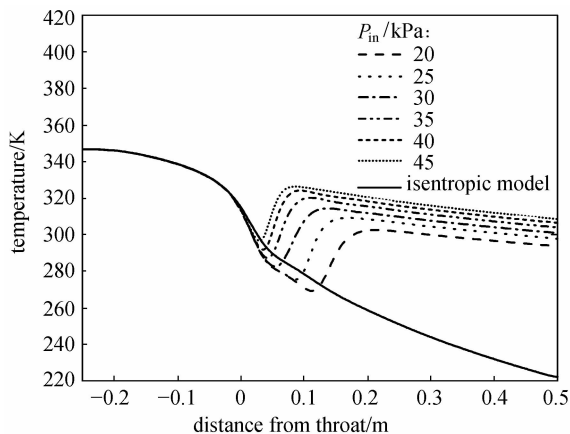


图 4 不同进口压力下喷嘴轴线处的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along nozzle centerline for various inlet pressure

低。随着凝结核形成阶段的结束，此时蒸汽中的凝结核数量已经相当庞大，且蒸汽处于较大的过冷状态，大量的蒸汽开始快速凝结，凝结核迅速长大，这时凝结潜热的释放对蒸汽产生的温升效应远大于蒸汽膨胀引起的温度降低，蒸汽温度开始迅速升高。由于进口压力越高，凝结核形成的速度越快，且形成点前移，因此，进口压力升高，蒸汽的温度跃升点提前，且达到的温度也更高。当蒸汽温度接近对应压力下的饱和温度时，蒸汽温度开始沿着饱和线变化，此时蒸汽进入热力学平衡态。

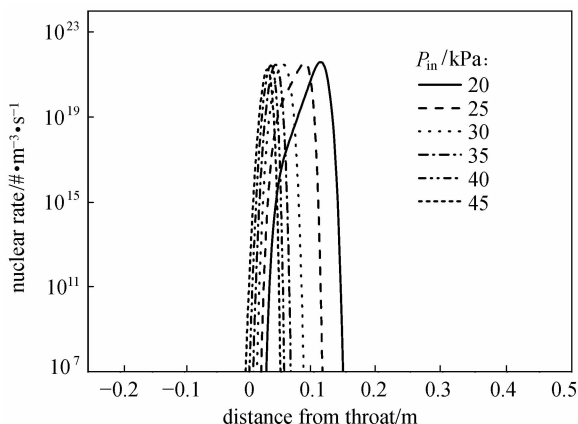


图 5 不同进口压力下喷嘴轴线处的成核率分布

Fig. 5 Nucleation rate distribution along nozzle centerline for various inlet pressure

图 6 是沿着喷嘴轴线的压力分布曲线。在凝结发生以前，不同进口压力下蒸汽压力变化规律与等熵流动的压力变化基本一致。当凝结核已经形成并开始长大时，大量蒸汽凝结热的快速释放形成凝结激波，使得蒸汽压力开始高于等熵流动压力。蒸汽凝结激波出现的位置与蒸汽温度升高的位置相对应。图 7~图 9 分别给出了不同进口压力下，轴线处过饱和度、平均粒径、湿度的分布曲线。对比图 6 可知，进口蒸汽压力越高，压力升高速率越大，使得凝结发生越迅疾，液滴平均粒径越大，形成的

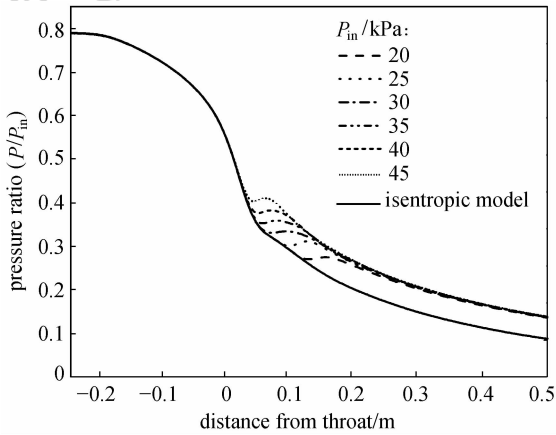


图 6 不同进口压力下喷管轴线处的压力分布
Fig. 6 Pressure distribution along nozzle centerline for various inlet pressure

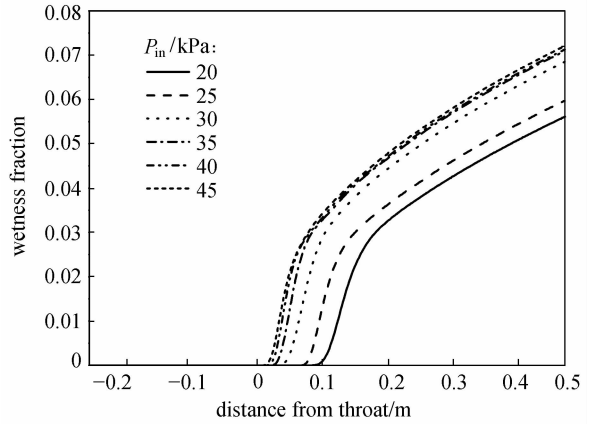


图 9 不同进口压力下喷管轴线处的湿度分布
Fig. 9 Wetness fraction distribution along nozzle centerline for various inlet pressure

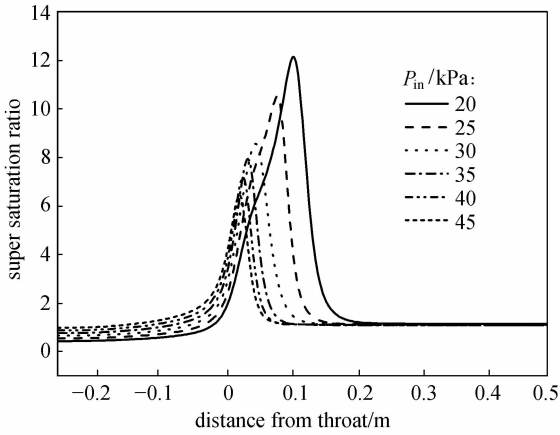


图 7 不同进口压力下喷管轴线处的过饱和度分布
Fig. 7 Super saturation ratio distribution along nozzle centerline for various inlet pressure

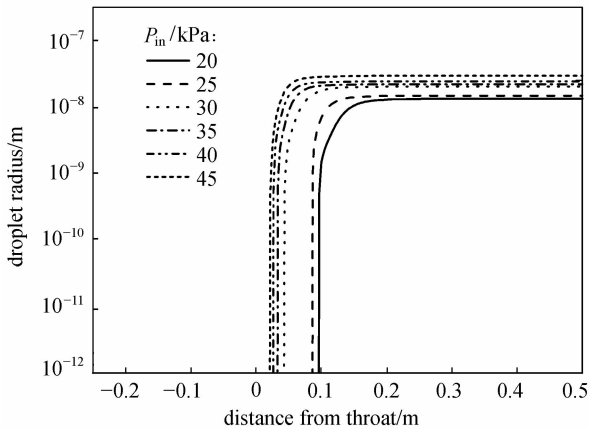


图 8 不同进口压力下喷管轴线处的液滴粒径分布
Fig. 8 Droplet radius distribution along nozzle centerline for various inlet pressure

液相质量分数越高，即凝结激波的强度也越大。凝结激波的出现，使得喷嘴出口的压力高于等熵膨胀的压力，造成膨胀比的减小。凝结激波之后蒸汽达到低度过冷的近饱和状态，蒸汽沿喷管继续膨胀，其压力变化规律与等熵流动过程近似一致。

4 结 论

本文在比较分析水蒸气等熵流动和两相凝结流动的基础上得到了凝结激波发生时的热力学特性，得到了凝结激波的压力变化规律，归纳了凝结激波的变压力特性，获得以下结论：

- (1) 在水蒸气的超音速流动过程中会发生凝结激波现象，其压力、温度等流动特征参数的变化规律与等熵流动过程有很大区别；
- (2) 当喷管进口温度保持不变时，随着进口压力的降低，凝结激波向着喷管出口推移，并使得凝结激波的强度有所减弱，这在蒸汽压力、温度、成核率、液滴半径等具体凝结参数的变化规律上有明显体现。

References

[1] Cattadori G, Galbiati L, Mazzocchi L, et al. A single-stage high pressure steam injector for next generation reactors: test results and analysis. *Int. J. Multiphase Flow*, 1995, **21** (4): 591-606

[2] Zhang Bo, Shen Shengqiang. A theoretical study on a novel bi-ejector refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2006, **26** (5/6): 622-626

[3] Sokolov M, Hearshegal D. Solar-powered compression enhanced ejector air conditioning. *Solar Energy*, 1993, **51** (3): 183-194

- [4] Xu Haitao (徐海涛), Sang Zhifu (桑芝富). Thermodynamic models for calculating entrainment ratio of steam-jet ejector. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, **55** (5): 704-710
- [5] Nicolas Deberne, Jean-francois Leone, Andre Lallemand. Local measurements in the flow of a steam injector and visualization. *Int. J. Therm. Sci.*, 2000, **39** (9/10/11): 1056-1065
- [6] Li Haijun (李海军), Shen Shengqiang (沈胜强). Study on special phenomena in the ejector used in a steam ejector refrigeration system. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2006, **27** (3): 454-456
- [7] Philippe Desevaux. A method for visualizing the mixing zone between two co-axial flows in an ejector. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**: 317-323
- [8] Ji Jiangang (季建刚), Ni Hai (倪海), Li Lixin (黎立新), Wang Ruzhu (王如竹). Performance simulation and analysis of steam ejector under different operating condition. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (3): 557-561
- [9] Li Liang (李亮), Feng Zhenping (丰镇平), Li Guojun (李国君). One-dimensional numerical investigation on the unsteady condensing flow caused by ultra-critical heating in wet steam. *Progress in Natural Science* (自然科学进展), 2003, **13** (2): 210-213
- [10] Yang Yong, Shen Shengqiang. Numerical simulation on non-equilibrium spontaneous condensation in supersonic steam flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, **36** (9): 902-907
- [11] Simpson D A, White A J. Viscous and unsteady flow calculations of condensing steam in nozzles. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2005, **26**: 71-79
- [12] Yang Yong (杨勇), Shen Shengqiang (沈胜强), Kong Taewoo (孔泰佑). Numerical simulation on spontaneous condensation in supersonic steam flow. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2008, **29** (8): 1393-1396
- [13] Young J B. Two-dimensional, nonequilibrium, wet-steam calculations for nozzles and turbine cascades. *Journal of Turbomachinery*, 1992, **114**: 569-579
- [14] Young J B. The spontaneous condensation of steam in supersonic nozzles. *Physico Chemical Hydrodynamics*, 1982, **3** (2): 57-82
- [15] Moore M J, Walters P T, *et al.* Predicting the fog drop size in wet steam turbines//Wet Steam 4 Conference. UK: Institute of Mechanical Engineers, 1975