http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0074

# 基于凝结实验平台的音速喷嘴凝结现象研究

王超[1,2], 林大炬[1,2], 丁红兵[1,2,*], 王刚[1,2], 安海骄[3]

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 天津市过程检测与控制重点实验室, 天津 300072;
3. 天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

**摘 要**: 音速喷嘴中流动的蒸汽或含湿气体由于自身的温降而发生凝结现象,对音速喷嘴的计量会产生一定的影响。针对音速喷嘴凝结现象和自激振荡的复杂变化情况,利用一套凝结实验平台研究了音速喷嘴内湿空气凝结现象,得到了不同条件的喷嘴沿程压力,并建立了凝结流动 Eulerian 两相模型,对凝结现象的影响因素进行了数值分析,使实验结果得到了验证和补充。结果表明,载气的压力、温度、湿度会对凝结产生比较大的影响。凝结发生位置伴随载气温度、湿度的提高而前移,强度有所增大。随着载气压力的增大,凝结发生位置前移,但是强度相对减弱。自激振荡的频率与载气湿度、温度呈正相关,与载气压力呈负相关,振幅与载气的压力、温度、湿度均呈正相关。

**关 键 词**: 音速喷嘴; 超音速流动; 凝结现象; 数值模型; 自激振荡
**中图分类号**: TH814
**文献标识码**: A **文章编号**: 1001-5965(2017)11-2232-08

音速喷嘴因具有构造简单、性能稳定、精确度高等优点,被普遍应用于能源、化工、制药、航天等诸多领域[1]。由于喷嘴的测量对象多数含有水蒸气,而喷嘴内超音速流动会产生凝结、热阻塞以及激波现象[2],其变化规律以及对喷嘴流量计量精度的影响一直未得到很好的解释。

针对音速喷嘴凝结现象的问题,已有一些专家学者进行了探究。Aschenbrenner[3]针对该问题首先提出了不考虑凝结的混合气体湿度修正公式。在此研究基础上,多个国家研究人员各自提出了湿度修正公式,但无法形成统一标准[4-6]。Lim[7]、Chahine[8]等实验发现,湿度对流量的影响不容忽视,有可能是凝结现象造成的。Mickan 和李春辉[9]曾研究音速喷嘴后方凝结对流量计量的影响,但并未涉及喷嘴内部的凝结流动。因此,凝结现象对喷嘴计量带来的影响值得加以重视并进行深入细致研究。Young[10]、Kane 等[11]提出了水蒸气凝结液滴成核率模型。Wegener 和 Pouring[12]、蔡颐年和王乃宁[13]提出了液滴生长率模型。由于计算流体力学(CFD)的快速发展,数值仿真实验成为该领域复杂现象研究的技术手段。马庆芬[14]、Avetissian[15]、Dykas[16]、Wang[17]等分别建立了各自二维或三维 CFD 数值模型。凝结现象复杂多变,Wegener 和 Cagliostro[18]、Skilling[19]从实验中观察到存在非稳态的自激振荡现象。Adam[20]、吴晓明[21]等从实验角度研究自激振荡现象,并将其分为不同振荡模式进行分析。

以上成果为音速喷嘴凝结现象的研究提供了一定的参考和指导,但并未有较为成熟的实验和仿真数据。本文针对音速喷嘴的凝结特性展开研究,搭建一个凝结实验平台,并利用凝结流动 Eulerian 两相模型,通过大量实验研究,辅以数值模

**收稿日期**: 2017-02-16; **录用日期**: 2017-05-19; **网络出版时间**: 2017-07-11 11:46
**网络出版地址**: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170711.1146.005.html
**基金项目**: 国家自然科学基金(61627803, 51506148, 61673291); 天津市自然科学基金(16JCQNJC03700); 天津市重点实验室基金(TKLPMC-201611)

* **通讯作者**: E-mail: hbding@tju.edu.cn

**引用格式**: *王超, 林大炬, 丁红兵, 等. 基于凝结实验平台的音速喷嘴凝结现象研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(11): 2232-2239. WANG C, LIN D X, DING H B, et al. Study on condensation in sonic nozzle based on experimental condensation apparatus[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(11): 2232-2239 (in Chinese).*

http://bhxb.buaa.edu.cn

型的仿真实验,获得一定的凝结现象规律。

# 1　音速喷嘴凝结现象基本原理

## 1.1　音速喷嘴测量原理

音速喷嘴的常用结构如图 1 所示。喷嘴的背压比表示为出口压力 $p_1$ 与入口滞止压力 $p_0$ 的比值[22]。随着背压比的减小,喉部气体流速不断增大,流速最大时对应的背压比称为临界背压比 $b_{cr}$,此时喉部的气体速度为当地音速。

$$b_{cr}=\frac{p_1}{p_0}=\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{1}$$

式中:$\gamma$ 为比热容比。

此时通过喷嘴的质量流量为

$$q_m=C_d\frac{A_*C_*p_0}{\sqrt{(R_g/M)T_0}} \tag{2}$$

式中:$C_d$ 为喷嘴流出系数;$A_*$ 为喷嘴喉部截面积,$m^2$;$C_*$ 为临界流函数;$R_g$ 为通用气体常数,约为 8.314 41 J/(mol·K);$M$ 为摩尔质量,kg/mol;$T_0$ 为滞止温度,K。

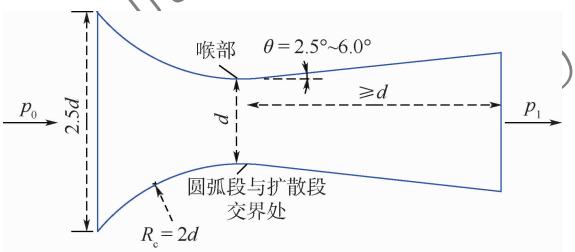



图 1　音速喷嘴结构

Fig. 1　Sonic nozzle structure

## 1.2　高速气体自发凝结理论

蒸汽或含湿气体在音速喷嘴内部是一个加速、降温膨胀流动的过程,当达到饱和状态后继续加速流动,气体会发生凝结现象。但当流过的是纯净的气体,且不与冷壁接触,则气体即使达到饱和状态也不会立即凝结,而是越过一个临界极限后才开始产生凝结。该临界极限称之为 Wilson 点,所有工况下的 Wilson 点连在一起称为 Wilson 线,如图 2 所示。气体在喷嘴中降温膨胀的流动过程如图 3 所示,随着喷嘴内部流动进行,温度和压力逐渐下降,在喉部之后达到饱和。此时气体并没有立即发生凝结现象,而是继续膨胀为过饱和气体,达到 Wilson 点时才开始突然产生凝结核,之后继续生长为液滴。

凝结过程中,由于释放了大量的潜热,对于凝结稳态流动的气体,突然间的膨胀过程导致一个压力突跃,即产生了凝结激波。气体在突跃之后继续膨胀,只要有够低的背压比,气体压力还会不

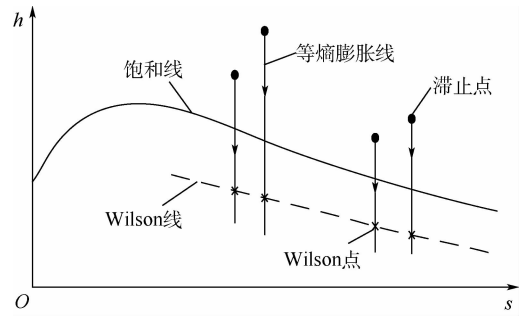



图 2　Wilson 线在焓熵($h$-$s$)图中的走势

Fig. 2　Tendency of Wilson line in an enthalpy-entropy($h$-$s$) map

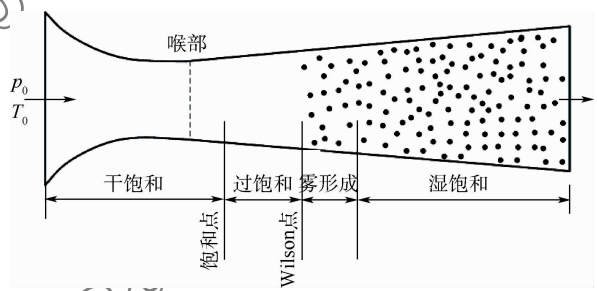



图 3　音速喷嘴中膨胀凝结过程

Fig. 3　Expansion and condensation process in sonic nozzle

断降低[23-24]。2014 年,丁红兵[25]在其博士学位论文中提出了音速喷嘴在低压和高压条件下自发凝结流动的 Wilson 点解析表达式,只需知道喷嘴的几何尺寸、入口的温度、压力以及相对湿度,即可快速精确地计算出 Wilson 点位置及相应的状态。

## 1.3　非稳态自激振荡流动

由于凝结会释放大量的潜热,加上气动激波的影响,可能会产生非稳态的自激振荡现象。凝结释放的潜热越来越大,气动激波的位置随之向前移动,甚至可能越过喉部,到达上游,从而导致凝结强度相应减弱。进而潜热释放量相应减小,激波减弱甚至消失,这样凝结发生区域的前方温度又变回低温状态,凝结再次增强,继而产生了新的激波。自激振荡按此周期循环往复进行。根据 Wegener 和 Pouring[12]相关研究,湿空气在喷嘴中凝结自激振荡频率 $f$ 与载气入口压力、温度、轴向梯度特征长度等参数有关。

# 2　实验平台与 CFD 模型

## 2.1　温湿度调节装置

凝结实验平台如图 4 所示,其核心在于温度、湿度的调节,主要组成是管道加热器、微雾发生装置和蒸发器。管道加热器设计功率为 25 kW,运行压力为 1.6 MPa,内嵌 12 根均匀分布的电加热丝,由可控硅的通断进行加热控制。

为了达到更均匀的雾化效果,采用高压雾化

http://bhxb.buaa.edu.cn

的加湿方式。如图 5 所示,本模块主要由变频器、液压隔膜计量泵、高压电磁阀组、单向止回阀组以及高压超微雾化喷嘴组成。利用稳定性高达 0.32% 的液压隔膜计量泵将水压提高到 3 ~ 8 MPa,然后将加压后的水经高压管路输送至高压超微雾化喷嘴[26]将其雾化,以 1 ~ 15 μm 的超微雾粒喷射到蒸发器中,雾粒在空气中吸收热量,汽化、蒸发,从而改变环境的湿度。系统采用旋流式喷嘴和撞针式喷嘴组合使用的形式。旋流式喷嘴采用德国 Lechler 喷嘴,其喷嘴孔径为 0.1 mm,喷雾角度为 45°,流量为 1.02 ~ 2.46 L/h(40 ~ 100 bar)。撞针式喷嘴采用意大利 PNR 喷嘴,其喷嘴孔径为 0.18 mm,喷雾角度为 50°,流量为 3.3 ~ 8.7 L/h(10 ~ 70 bar)。蒸发器由整流器和气体分布器组成,可以有效增加水雾跟随气流上升的时间,促进气体与水雾的接触,提高蒸发的效率。

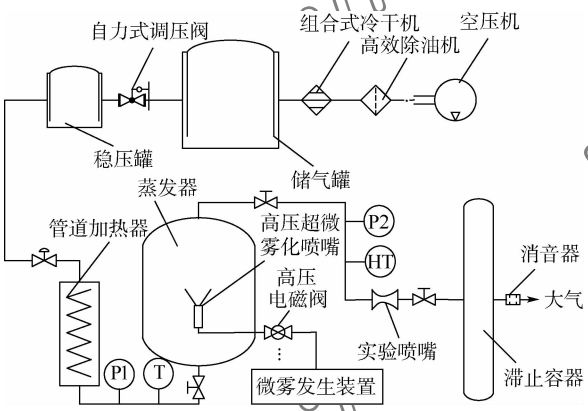



图 4 凝结实验平台结构

Fig. 4 Structure of experimental condensation apparatus

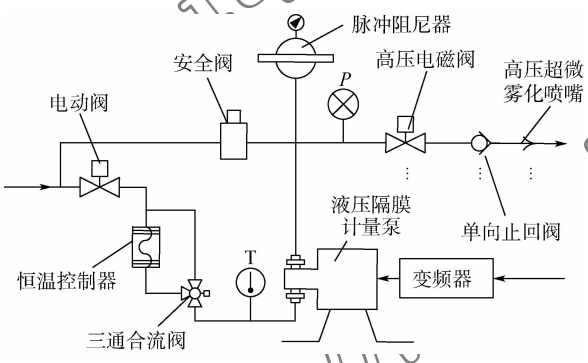



图 5 高压雾化装置

Fig. 5 High-pressure atomization generator

## 2.2 喷嘴沿程压力传感器

为了测试实验平台的效果以及进一步展开分析音速喷嘴的凝结现象,采用轴对称喷嘴,如图 6 所示,其喉部直径为 10 mm。设计了一套沿程压力采集系统,如图 7 所示。沿着喷嘴壁面分布设置 13 个直径 1 mm 的微型引压孔[27],用于测量时均压力和动态压力信号。时均压力传感器精度为0.2%,量程范围为0 ~ 800 kPa,测量频率范围

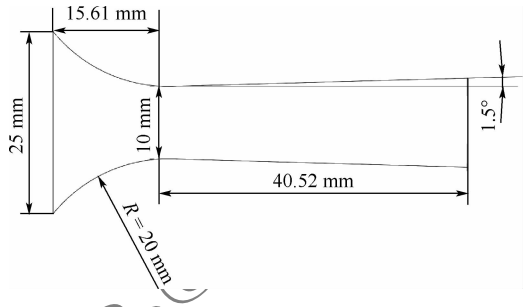



图 6 实验喷嘴结构和尺寸

Fig. 6 Structure and size of experimental nozzle

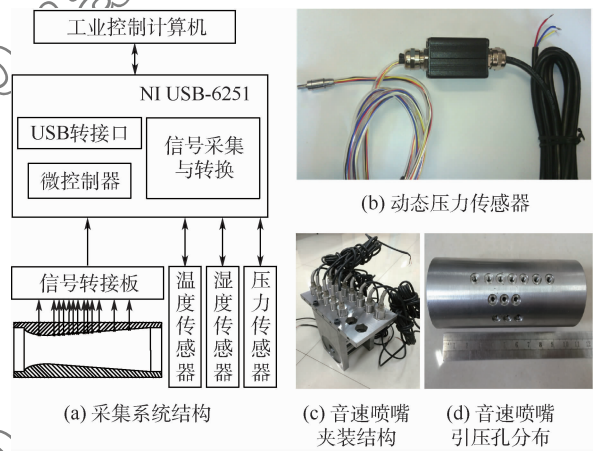



图 7 沿程压力采集系统

Fig. 7 Acquisition system of pressure distribution at nozzle wall

为 0 ~ 20 kHz。动态压力传感器采用 Kulite MEMS 压力传感器,可实现快速响应,其精度为 0.2% FS,固有频率为 100 kHz,用于测量凝结自激振荡的动态压力。

## 2.3 凝结流动 Eulerian 两相模型

建立适用于无外凝结核的自发凝结流动 Eulerian 两相模型[28],其质量、动量、能量守恒方程为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho_g}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_j) = S_m \\ \dfrac{\partial}{\partial t}(\rho_g u_i) + \dfrac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_j u_i) = -\dfrac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \qquad \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{\text{eff}}\left(\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i} + \dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} - \dfrac{2}{3}\cdot\dfrac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\right] + \Delta\rho_g g_i + S_{ui} \\ \dfrac{\partial}{\partial t}(\rho_g E) + \dfrac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_j E) = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(\Lambda_{\text{eff}}\dfrac{\partial T}{\partial x_j}\right) + S_E \end{cases} \tag{3}$$

式中:$\rho_g$ 为气体密度;$u$ 为速度;$p$ 为总压;$\Delta\rho_g$ 为气体密度变化值;$g_i$ 为 $i$ 方向上的重力加速度;$E$ 为总能量;$T$ 为温度;$\mu_{\text{eff}}$ 为等效动力黏度;$\Lambda_{\text{eff}}$ 为导热系数;$S_E = -\rho_w m_v (E + p_g/\rho_g - h_{fg})$,$S_m = -\rho_w m_v$,$S_{ui} = -\rho_w m_v u_i$ 为方程的源项,$\rho_w$ 为水的密度,$m_v$ 为凝结速率,$p_g$ 为气体压力;$h_{fg}$ 为水蒸气潜热。

混合气体中,组分 $s$ 的组分质量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g c_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_j c_s) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D_s \rho_g \frac{\partial c_s}{\partial x_j}\right) + S_{c_s} \quad (4)$$

式中：$c_s$ 为组分 $s$ 的体积浓度；$D_s$ 为组分扩散系数；当组分为水蒸气时，源项 $S_{c_s} = -\rho_w m_v$。

忽略气液两相间的速度滑移，液相只需给出水滴数密度、统计水滴半径以及蒸汽湿度的控制方程。式(5)～式(7)为自发凝结状态下的液相控制方程：

$$\frac{\partial \rho_w N_{hom}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_w N_{hom} u_j) = \rho_v I \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w N_{hom} r) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_w N_{hom} r u_j) = \rho_w N_{hom} \frac{dr}{dt} + \rho_v I r_c \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_w y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_w y u_j) = \rho_w m_v \quad (7)$$

式中：$\rho_v$ 为水蒸气密度；$I$ 为成核率；$N_{hom}$ 为均质的液滴密度；$r$ 为水滴半径；$r_c$ 为临界成核半径。

## 3　实验结果与 CFD 分析

### 3.1　凝结稳态特性

为了研究不同入口载气条件对凝结位置和强度的影响，进行了稳态压力实验。由时均压力传感器测量出音速喷嘴的沿程时均压力，记录气体压力 $p_0$、温度 $T_0$、相对湿度 $\Phi_0$ 发生变化时的音速喷嘴沿程压力情况，以此分析凝结位置和强度的变化。

建立凝结稳态数值模型，采用标准 $k$-$\varepsilon$ 模型和壁面函数法相结合的形式对二维旋转轴对称喷嘴进行模拟。数值方案方面，气液两相控制方程使用有限体积法三阶 MUSCL 格式进行离散化。时间离散化方法采用基于密度基的隐式格式。边界条件方面，使用压力入口和压力出口，且将喷嘴背压比控制在 0.1 以防止出现气动激波。网格方面，采用结构化四面体网格。经过网格独立性测试，结果如表 1 所示，$N_1$ 为轴向方向网格数，$N_2$ 为径向方向网格数，独立性测试结果为 900×120。

基于正压法音速喷嘴标准装置，由于实验条件限制，实验过程中喷嘴背压比均小于 0.337。对实验平台的可靠性进行了测试，结果如图 8 所示，其中实线表示 CFD 仿真的曲线，虚线表示气体在喷嘴内部等熵流动，散点表示不同条件下实验所得喷嘴壁面处沿程压力变化。结果表明，CFD 仿真结果与实验数据较接近，实验平台是可靠的。

分别改变气体湿度、温度以及入口压力，进行 3 组对照实验，实验记录如图 9～图 11 所示。可知，凝结发生的位置会随着载气压力、湿度、温度的增大而向喉部方向移动，凝结的强度随着载气湿度和温度的增大而增强，但却随载气压力

**表 1　网格独立性测试结果**

**Table 1　Grid independence test results**

| 参数 | 网格 ($N_1 \times N_2$) | 质量流量/(kg·s$^{-1}$) | 相对变化量/% |
|---|---|---|---|
| $N_1$ 变化 $N_2 = 120$ | 850×120 | 0.053 020 379 | |
| | 900×120 | 0.053 027 642 | 0.013 7 |
| | 950×120 | 0.053 028 746 | 0.002 1 |
| $N_1 = 900$ $N_2$ 变化 | 900×100 | 0.053 035 973 | |
| | 900×120 | 0.053 027 642 | 0.015 7 |
| | 900×140 | 0.053 026 096 | 0.002 9 |

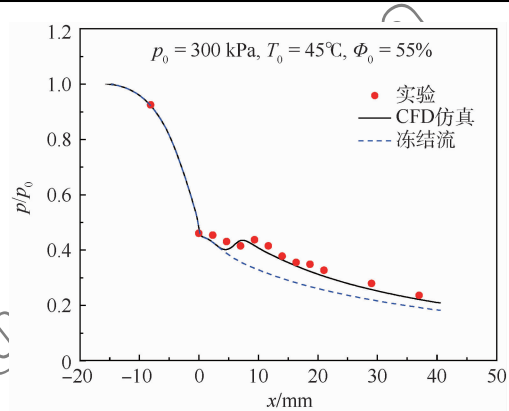
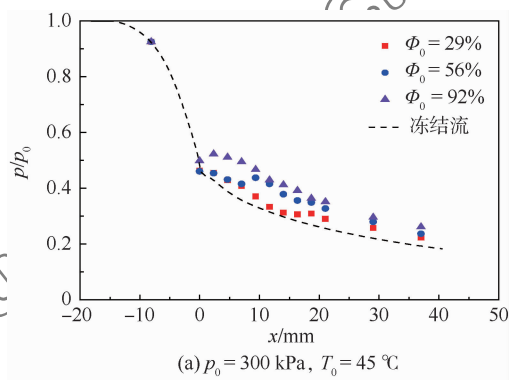
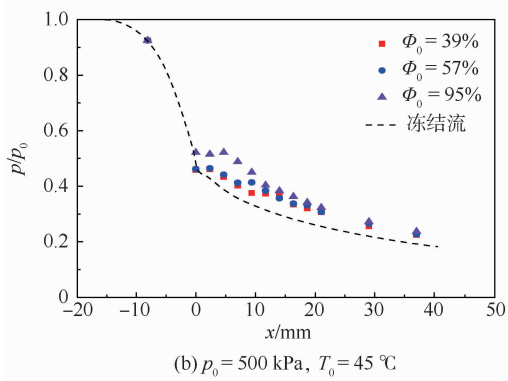



图 8　CFD 仿真与实验数据对比

Fig. 8　Comparison between CFD simulation and experimental data




(a) $p_0$ = 300 kPa, $T_0$ = 45 ℃

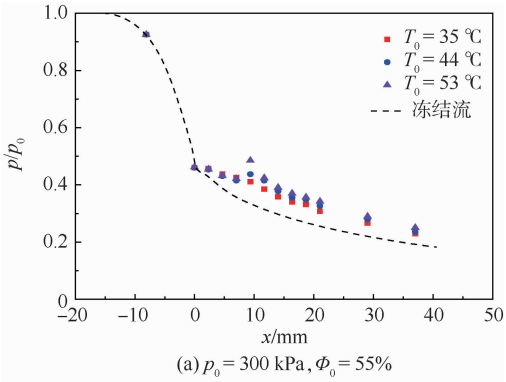



(b) $p_0$ = 500 kPa, $T_0$ = 45 ℃

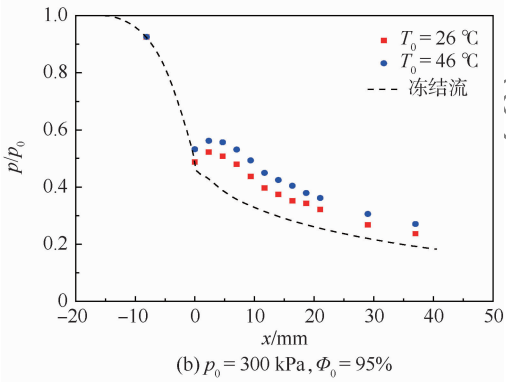
图 9　不同入口湿度下喷嘴壁面压力分布

Fig. 9　Pressure distribution at nozzle wall with different inlet humidity

http://bhxb.buaa.edu.cn



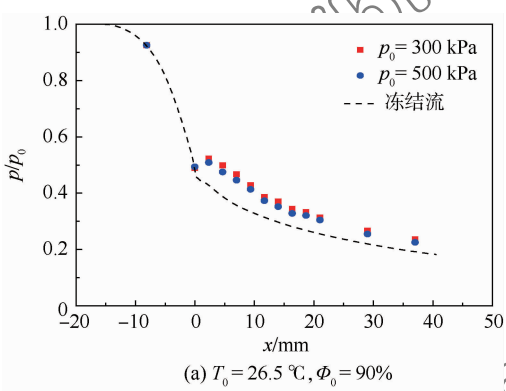

(a) $p_0$ = 300 kPa, $\Phi_0$ = 55%



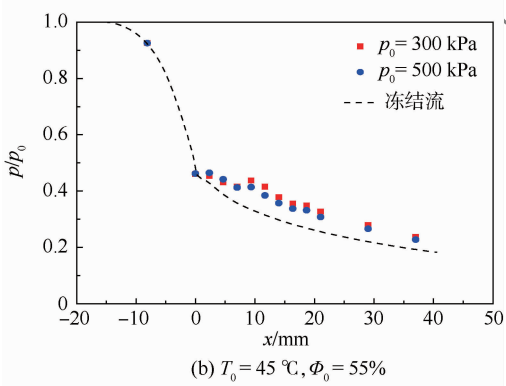

(b) $p_0$ = 300 kPa, $\Phi_0$ = 95%

图 10 不同入口温度下喷嘴壁面压力分布

Fig. 10 Pressure distribution at nozzle wall with different inlet temperatures




(a) $T_0$ = 26.5 ℃, $\Phi_0$ = 90%




(b) $T_0$ = 45 ℃, $\Phi_0$ = 55%

图 11 不同入口压力下喷嘴壁面压力分布

Fig. 11 Pressure distribution at nozzle wall with different inlet pressure

的增大而减弱。

利用本文所述数学模型，对图 6 所示喷嘴的凝结现象进行了 CFD 仿真研究。载气温度维持在 45 ℃，相对湿度为 55%，改变载气压力，喷嘴壁面处沿程压力分布如图 12 所示。结果表明，随着载气压力的增大，凝结的位置向上游喉部靠近，而凝结强度先增大后有所降低。载气压力 300 kPa、相对湿度 55% 维持不变，改变载气温度，则喷嘴壁面处沿程压力分布如图 13 所示。结果表明，随着载气温度的增大，凝结的位置向上游喉部靠近，而凝结强度也有所增强，与实验结果一致。

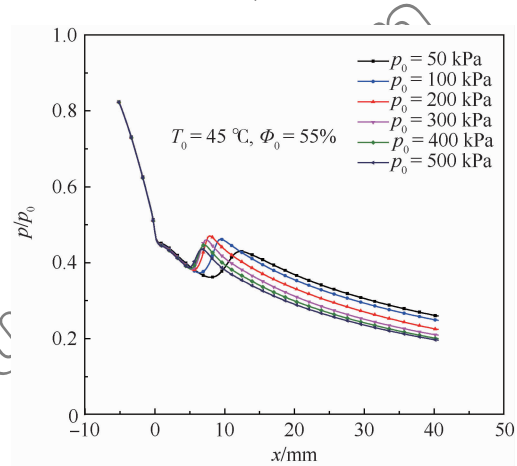



图 12 不同入口压力下喷嘴壁面压力分布(CFD)

Fig. 12 Pressure distribution at nozzle wall with different inlet pressure (CFD)

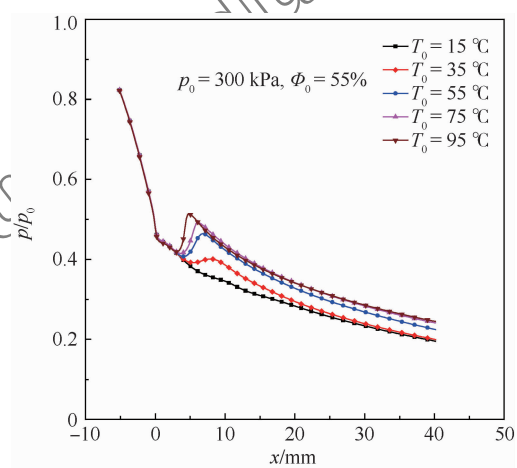
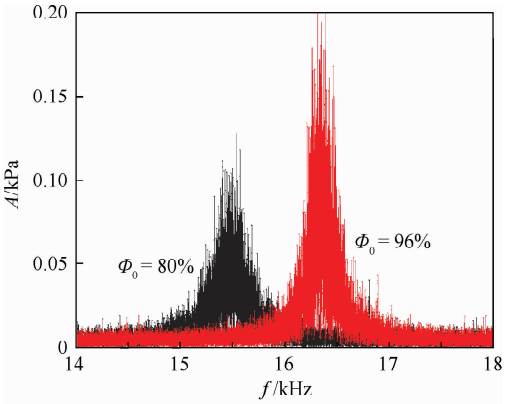



图 13 不同入口温度下喷嘴壁面压力分布(CFD)

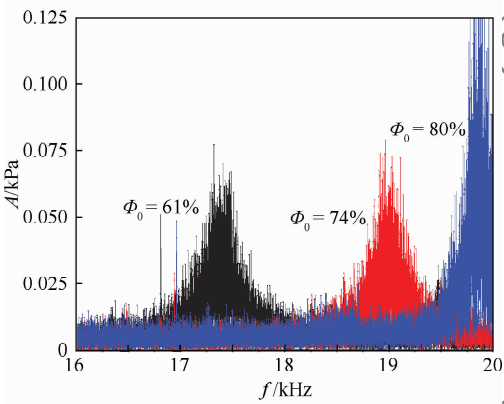
Fig. 13 Pressure distribution at nozzle wall with different inlet temperatures (CFD)

### 3.2 非稳态自激振荡规律

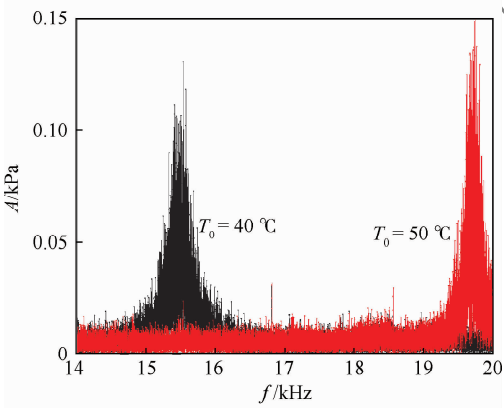
针对音速喷嘴凝结自激振荡现象，进行了动态压力的测量。分别改变入口载气湿度、温度、压力，记录自激振荡的频率 $f$ 与幅度 $A$ 的变化，将所测时域信号通过 FFT 变换转到频域分析，其结果如图 14 所示。



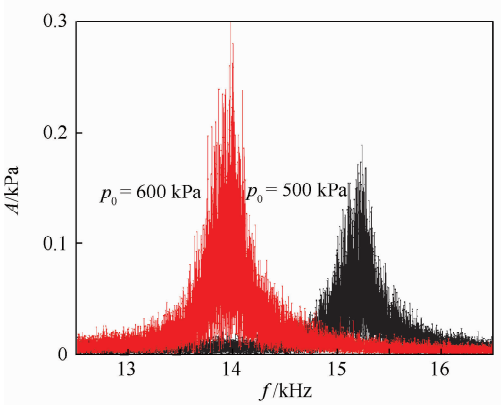
(a) $p_0$ = 400 kPa, $T_0$ = 40 ℃



(b) $p_0$ = 400 kPa, $T_0$ = 50 ℃



(c) $p_0$ = 400 kPa, $\Phi_0$ = 80%



(d) $T_0$ = 44 ℃, $\Phi_0$ = 65%

图 14　动态压力测试

Fig. 14　Dynamic pressure test

由图 14(a)～(c)可知，当只改变湿度 $\Phi_0$ 或者温度 $T_0$ 时，振荡频率 $f$ 和振幅 $A$ 与其呈正相关。图 14(d)表示，随着载气压力 $p_0$ 的增大，振幅 $A$ 增大，振荡频率 $f$ 却相应的降低了，这是由于音速喷嘴内部凝结的复杂性无法用单一的模型概括。此外，针对凝结自激振荡现象，在之前的研究中[29]，获得了水蒸气下自激振荡频率、幅值与入口过冷度 $\Delta T_0$ 的关系，如图 15 所示。可知，在模式Ⅰ中，波动幅值 $A$ 随 $\Delta T_0$($\Phi_0$)增大而先升高后降低，波动频率 $f$ 则一直增大，实验数据与之吻合。后续将进一步深入研究音速喷嘴含湿气体凝结产生的自激振荡现象。

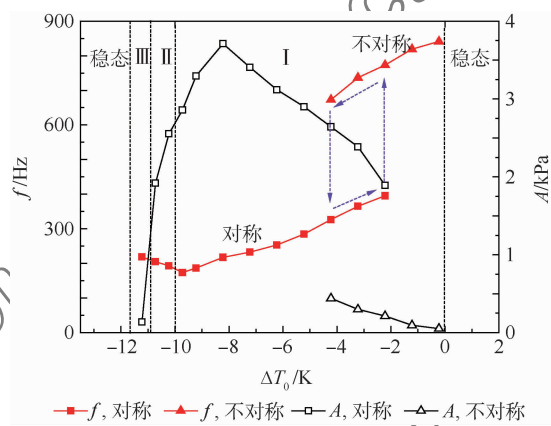



图 15　不同自激振荡模式下频率和幅值与过冷度关系

Fig. 15　Relationship between frequency and amplitude and degree of supercooling under different self-oscillation modes

## 4　结　论

本文针对音速喷嘴内部凝结现象的影响规律进行了探究，建立了凝结流动的 Eulerian 两相模型，对音速喷嘴凝结现象进行了数值研究。并建立了参数可调节的凝结实验平台，准确捕获了凝结压力突跃现象。

1）载气压力、温度以及相对湿度对凝结会产生较大影响。

2）对于凝结稳态特性，在一定范围内，随着载气压力的增大，凝结位置向喉部方向移动，但凝结强度相对减弱；随着载气温度和相对湿度的增大，凝结位置均向前移并且强度也有所提高。

3）对于凝结自激振荡压力波动特性，其波动频率与入口湿度、入口温度呈正相关，与入口压力呈负相关；凝结自激振荡的振幅与入口湿度、入口温度和入口压力呈正相关。

此外,本文仅对音速喷嘴内部凝结现象规律做了初步探究,凝结流动中还存在复杂的变化,包括流动分歧等现象,值得继续深入探究。

## 参考文献(References)


[1] 汪欢欢. 基于音速喷嘴的气体流量标准装置的研制[D]. 广州:华南理工大学,2013.
WANG H H. The development of gas flow standard device based on sonic nozzle[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2013(in Chinese).

[2] 代钦,魏润杰,黄湛,等. 超音速喷流 DPIV 瞬时速度场实验测量[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(6):666-669.
DAI Q,WEI R J,HUANG Z, et al. Experimental study of supersonic jet flow using DPIV[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2001,27(6):666-669(in Chinese).

[3] ASCHENBRENNER A. The influence of humidity on the flow-rate of air through critical flow nozzles[C]// Proceedings of the International Conference on Flow Measurement, 1983:71-74.

[4] 李春辉,王池. 通过音速喷嘴气体流量的湿度修正方法研究[J]. 计量学报, 2007,28(3A): 160-164.
LI C H,WANG C. The humidity correction on the flow through sonic nozzle[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007,28(3A):160-164(in Chinese).

[5] BRITTON C L,CAZON R W,KEGEL K. The critical flow function,C,for humid air[C]// ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York:ASME,1998:No. 5309.

[6] STEWART D G,WATSON J T R,VAIDYA A M. The effect of using atmospheric air in critical flow nozzles[C]//4th International Symposium on Fluid Flow Measurement,1999:27-30.

[7] LIM J M,YOON B H,OH Y K,et al. The humidity effect on air flow rates in a critical flow venture nozzle[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2011,22(5):402-405.

[8] CHAHINE K,BALLICO M. Evaluation of the effect of relative humidity of air on the coefficients of critical flow venturi nozzles[C]//16th International Flow Measurement Conference,2013:24-26.

[9] LI C H,MICKAN B. The humidity effect on the calibration of discharge coefficient of sonic nozzle by means of pVTt facility[C]// Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement,2012:No. 302.

[10] YOUNG J B. The spontaneous condensation of steam in supersonic nozzles[J]. Physico Chemical Hydrodynamics, 1982, 3(1):57-82.

[11] KANE D,FISENKO S P,RUSYNIAK M. The effect of carrier gas pressure on vapor phase nucleation experiments using a thermal diffusion cloud chamber[J]. Journal of Chemical Physics,1999,111(18): 8496-8502.

[12] WEGENER P P,POURING A A. Experiments on condensation of water vapor by homogeneous nucleation in nozzles[J]. The Physics of Fluids,1964,7(3):352-361.

[13] 蔡颐年,王乃宁. 湿蒸汽两相流[M]. 西安:西安交通大学出版社,1985.
CAI Y N,WANG N N. Wet steam two-phase flow[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,1985(in Chinese).

[14] 马庆芬. 旋转超音速凝结流动及应用技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
MA Q F. Study on the rotating supersonic condensing flow and application technology[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2009(in Chinese).

[15] AVETISSIAN A R,PHILIPPOV G A,ZAICHIK L I. Effects of turbulence and inlet moisture on two-phase spontaneously condensing flows in transonic nozzles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008,51(17):4195-4203.

[16] DYKAS S,WROBLEWSKI W. Numerical modelling of steam condensing flow in low and high-pressure nozzles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21): 6191-6199.

[17] WANG C,WANG L, ZHAO H X,et al. Effects of superheated steam on non-equilibrium condensation in ejector primary nozzle[J]. International Journal of Refrigeration,2016,67:214-226.

[18] WEGENER P P,CAGLIOSTRO D J. Periodic nozzle flow with heat addition[J]. Combustion Science and Technology,1973,6(5):269-277.

[19] SKILLING S A. An analysis of the condensation phenomena occurring in wet steam turbine[D]. Birmingham: University of Birmingham,1987.

[20] ADAM S,SCHNERR G. Instabilities and bifurcation of non-equilibrium two-phase flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997,348(1):1-28.

[21] 吴晓明,李国君,李亮,等. 湿蒸汽凝结流中自激振荡模式的数值模拟[J]. 动力工程,2009,29(8):747-751.
WU X M,LI G J,LI L,et al. Numerical simulation of self-excited oscillation patterns in wet steam flow with condensation[J]. Journal of Power Engineering,2009,29(8): 747-751(in Chinese).

[22] International Standard Organization. Measurement of gas flow by means of critical flow venturi nozzles:ISO9300—2005[S]. Geneva: International Standard Organization,2005.

[23] WANG C,DING H B,ZHAO Y K,et al. Sensor system for unsteady flow characteristics in a sonic nozzle with vapor condensation[C]// 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press,2014,5:772-775.

[24] DING H B,WANG C,CHEN C. Experimental and numerical studies on self-excited periodic oscillation of vapor condensation in a sonic nozzle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015,68:288-299.

[25] 丁红兵. 音速喷嘴边界层发展及凝结现象研究[D]. 天津:天津大学,2014.
DING H B. Boundary layer development and vapor condensation in sonic nozzle[D]. Tianjin: Tianjin University,2014(in Chinese).

[26] 金如山. 喷嘴雾化研究[J]. 北京航空航天大学学报,1989(3):69-78.
JIN R S. Atomization study[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,1989(3):69-78(in Chinese).

[27] WANG C,DING H B,LIU Q,et al. The dynamic compensation of temperature sensors in sonic nozzle airflow standard facilities


http://bhxb.buaa.edu.cn

based on method of positive pressure[C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway,NJ:IEEE Press,2012:2005-2009.

[28] 孙铁志,魏英杰,王聪,等.通气位置对潜射航行流体动力特性影响分析[J].北京航空航天大学学报,2013,39(10):1303-1308.
SUN T Z,WEI Y J,WANG C,et al. Analysis of the effect of ventilation positions on hydrodynamic characteristics of submarine-launched vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2013,39(10):1303-1308(in Chinese).

[29] 王超,王刚,丁红兵.音速喷嘴内水蒸汽自发凝结流动自激振荡和分歧现象研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(11):1113-1120.
WANG C,WANG G,DING H B. Research of spontaneous condensation steam flow with self-excited oscillation and bifurcation phenomenon in sonic nozzles[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2016,49(11):1113-1120(in Chinese).

**作者简介:**

**王超**　男,博士,教授。主要研究方向:电学层析成像、多相流测量和生物阻抗检测。

**丁红兵**　男,博士,讲师。主要研究方向:多相流测量、气体流量传感器。

# Study on condensation in sonic nozzle based on experimental condensation apparatus

WANG Chao[1,2], LIN Daxuan[1,2], DING Hongbing[1,2,*], WANG Gang[1,2], AN Haijiao[3]

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China;
3. Tianjin Institute of Metrological Supervision and Testing, Tianjin 300192, China)

**Abstract**: The temperature of water vapor and moist gas will drop greatly in the sonic nozzle, which leads to the condensation and will have a great effect on the measurements. Aimed at the phenomenon of condensation and self-oscillation of sonic nozzle, an experimental condensation apparatus was set up to observe the condensation of moist air in sonic nozzle, and the pressure distribution under different conditions was obtained. To validate and supplement the experimental data, a gas-liquid two-phase flow Eulerian model was established through numerical analysis of influence factors on condensation. The results show that the inlet pressure, humidity and temperature have a great influence on condensation phenomenon. With the increase of humidity and temperature, the location of condensation moves forward and the intensity also increases. With the increase of the inlet pressure, the location of condensation moves forward, while the intensity weakens. The frequency of self-oscillation is positively related to the humidity and temperature, and negatively related to the inlet pressure. The amplitude is positively related to the inlet pressure, humidity and temperature.

**Keywords**: sonic nozzle; supersonic flow; condensation; numerical model; self-oscillation

http://bhxb.buaa.edu.cn

**Received**: 2017-02-16; **Accepted**: 2017-05-19; **Published online**: 2017-07-11 11:46

**URL**: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170711.1146.005.html

**Foundation items**: National Natural Science Foundation of China (61627803, 51506148, 61673291); Natural Science Foundation of Tianjin (16JCQNJC03700); Research Fund of Tianjin Key Laboratory (TKLPMC-201611)

* **Corresponding author**. E-mail: hbding@tju.edu.cn