

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002900

不同结构微小音速喷嘴的数值模拟与特性对比

马馨玥 谢代梁 徐志鹏 徐雅 刘铁军 曹松晓

(中国计量大学 浙江省流量计量技术重点实验室 杭州 310018)

摘要:为了降低加工水平对微小音速喷嘴性能的限制,提出了收缩喷嘴、扩散喷嘴和圆锥形文丘里喷嘴3种非标准音速喷嘴结构,并分析形状结构对3种喷嘴流动特性的影响。选取喷嘴喉径为0.03~0.12 mm,分别对其内部流场进行数值仿真,并分析收缩段、喉部和扩散段的几何结构对喷嘴流动特性的影响,最后对比了喷嘴的流动特性。研究发现,扩散喷嘴的流出系数和临界背压比较优,且该类喷嘴加工难度最小。此外,喉径和喉部长度对喷嘴流动特性的影响最大,喉径越大,喉部长度越小,喷嘴流动特性越好。这为后续微小喷嘴的研制提供一定的借鉴。

关键词:音速喷嘴;模拟仿真;几何结构;流出系数

中图分类号: TB937 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Numerical simulation and characteristic comparison of micro-sonic nozzles in different structures

Ma Xinyue Xie Dailiang Xu Zhipeng Xu Ya Liu Tiejun Cao Songxiao

(Key Laboratory of Flow Measurement Technology of Zhejiang Province, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to reduce the limitation of the processing level on the performance of micro-sonic nozzles, three non-standard sonic nozzle structures including the shrink nozzle, the diffusion nozzle, and the conical Venturi nozzle are proposed. It was also analyzed respectively that how the geometry and shape of the nozzle affects flow characteristics. Numerical simulation was used to analyze the internal flow field of the nozzle whose diameter is selected from 0.03mm to 0.12mm. Not only the influence of the geometry of the constricted section, the throat and the diffusing section on the nozzle flow characteristics were analyzed, but also the flow characteristics of them were compared. It is found that the discharge coefficient and critical back pressure of the diffusion nozzle are superior, and the processing difficulty of this type of nozzle is the smallest. In addition, throat diameter and throat length have the greatest influence on nozzle flow characteristics. In addition, it is found that the throat diameter and the throat length have the greatest influence on the nozzle flow characteristics. The larger the throat diameter and the smaller the throat length, the larger the nozzle discharge coefficient and the critical back pressure ratio. These studies provide some reference for the development of subsequent micro-nozzles.

Keywords: sonic nozzle; simulation; geometry structure; discharge coefficient

0 引言

流量计量作为计量学的重要分支,在能源计量、贸易结算、过程控制等方面扮演着重要的角色。为了实现快速精确地达到流量计量,各类流量计得到研发,流量技术得到不断更新^[1-4]。音速喷嘴(即临界流喷嘴)作为国际通用的流量计,在航空航天、石油化工、生物医疗等领域都有广泛的运用^[5]。近年来,工业技术的发展对音速喷

嘴的性能提出了更高的要求,微小尺度下的音速喷嘴得进一步研究。众多学者研究发现,音速喷嘴的壁面粗糙度^[6-7]、几何尺寸^[8-13]、边界层^[14-15]、热效应^[16-18]等因素对其流动特性有很大的影响。此外,由于机械加工的局限性,小于0.1 mm尺寸下的标准音速喷嘴难以加工,因此涌现了一些对于非标准临界流喷嘴的研究^[19-20]。

为了解决微小尺度下音速喷嘴的加工难度与精度要求之间的矛盾,本文提出了3种非标准结构临界流喷嘴,分别为收缩喷嘴、扩散喷嘴和圆锥形文丘里喷嘴,其喉径

范围在 0.03~0.12 mm。其中,收缩喷嘴由锥形收缩段与圆柱形喉部组成;扩散喷嘴包括圆柱形喉部和锥形扩散段,其形状本质上与收缩喷嘴相同,区别为流体流动方向相反;圆锥形文丘里喷嘴在收缩喷嘴的基础上,加入了锥形扩散段。

同时,本文研究新结构下喷嘴的几何结构参数对喷嘴流动特性的影响。影响因子包括喷嘴的入口角、扩散角、入口段长度、扩散段长度、喉径和喉部长度,采用控制变量法,进行数值模拟试验。根据实验结果,对几种喷嘴在微小尺度上的特性进行对比分析。此外,为了更好的对比几种喷嘴的特性,本文以圆环形 ISO 喷嘴作为对照结构,分析 4 种结构的优劣势。

1 临界流理论

理想状态下,气体在音速喷嘴中的流动可以看做一维定常等熵绝能流。当喷嘴前后背压比不断增大时,管中会出现限制流量的声速截面,即使背压再降低,流量也不再增大。此时,喷嘴内流动达到临界状态,理想的质量流量为:

$$q_{mi} = A_t \cdot \sqrt{P_T \rho_T} \cdot \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (1)$$

式中: q_{mi} 为理想质量流量; A_t 为喷嘴喉部面积; P_T 为滞止压力; ρ_T 为滞止密度; γ 为绝热指数。

流出系数与临界背压比是研究喷嘴流动特性的主要参数依据,本文将以此两个参数作为评价喷嘴优劣的主要依据。

1.1 流出系数

由于实际工况中粘度、压缩性等因素都会对流动产生影响,实际质量流量与理想有所差距。流出系数作为表征该差距的参数,其公式如下:

$$C_d = \frac{q_m}{q_{mi}} \quad (2)$$

式中: C_d 为流出系数; q_m 为实际质量流量; q_{mi} 为理论质量流量。流出系数越大,表示喷嘴的实际流动与理论越接近,喷嘴的流动特性越好。

大量实验表明,流出系数还与雷诺数有关。一些学者基于实验数据,提出了流出系数关于雷诺数的经验公式。

ISO9300 中对于精确加工的喷嘴有明确的规定,其流出系数的经验公式为:

$$C_d = 0.9985 - \frac{3.412}{\sqrt{Re_{nt}}} \quad (3)$$

式(3)的适用范围为 $2.1 \times 10^4 < Re_{nt} < 1.4 \times 10^6$, 其中 Re_{nt} 为音速喷嘴喉部雷诺数。

Wendt 研究了低雷诺数下喷嘴的流动特性,当 $10^3 < Re_{nt} < 10^6$, 流出系数的经验公式为:

$$C_d = 0.9982 - \frac{3.448}{\sqrt{Re_{nt}}} \quad (4)$$

Tang 及 Fenn 对低雷诺数下的粘性流出系数进行理论分析,得到流出系数的公式为:

$$C_d = 1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{3}{4}} \left[\frac{8(9 - 4\sqrt{6})}{3(\gamma + 1)} + \frac{4\sqrt{6}}{3} \right] \sqrt{Re} + \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{(\gamma - 1)(\gamma + 2)}{Re \sqrt{\gamma + 1}} \quad (5)$$

$$\text{其中, } \overline{Re} = \sqrt{\frac{d}{2R}} Re.$$

Ishibashi 精密加工了一批误差在 1 μm 内的喷嘴,并利用作为日本国家标准的 pVTt 法气体流量标准装置对其进行实验验证,实验数据拟合公式为:

$$C_d = 0.99864 - \frac{3.447}{\sqrt{Re_{nt}}} \quad (6)$$

理论流出系数与实验流出系数在测量范围内的误差小于 0.04%,且随着雷诺数的增大,误差逐渐减小。

1.2 临界背压比

管流在临界截面达到临界流时,即使背压比 β 再降低,流量也不再增大,这个背压与滞止压力的比值,即临界背压比(CBPR):

$$CBPR = \frac{p_c}{p_0} \quad (7)$$

式中: p_c 为临界状态喷嘴下游压力; p_0 为喷嘴滞止压力。喷嘴的临界背压越大,表明使达到临界状态的要求越低,认为其流动特性越好。

2 数值模拟

2.1 几何结构设计

为了研究结构对临界流喷嘴的影响,同时考虑到实际加工的可行性,本文设计了 3 种圆锥形入口的音速喷嘴,并且设计了与其喉径相同且满足 ISO 标准的喷嘴作为对比。4 种喷嘴的结构如图 1 所示。

如图 1(a)~(c)所示,收缩段和扩散段均为锥形,喉部为圆柱。其中,图 1(a)和(b)两种喷嘴的形状一致,但流体的流动方向相反。图 1(d)为标准圆环形 ISO 喷嘴。在本文的研究中,相关几何参数的具体取值如表 1 所示。

2.2 模型建立

本文采用 ICEM 软件进行网格划分,这 4 种喷嘴的结构均为回旋体,因此将模型简化为二维旋转轴对称模型,取每种喷嘴的 1/4,采用精度较高的结构型网格,

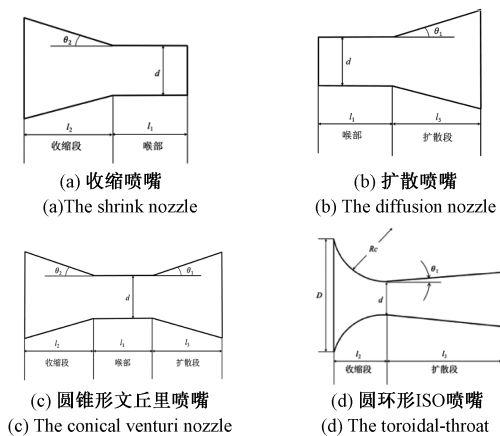


图 1 音速喷嘴结构示意图

Fig. 1 Sonic nozzle structure diagram

计算中对壁面网格进行了加密处理,如图 2 所示。

表 1 音速喷嘴的几何结构影响因子及其取值

Table 1 Influencing factors and values of geometric structure of sonic nozzle

	影响因子	符号	取值
喉部	喉径/mm	d	0.03、0.05、0.08、0.1、0.12
	喉部长度	l_1	$0.5d, d$
收缩段	入口直径/mm	D	$2.5d$
	曲率半径/mm	Re	$2d$
	收缩段长度/mm	l_2	$d, 1.5d, 2d$
	入口角/(°)	θ_2	17°
扩散段	扩散段长度/mm	l_3	$d, 1.5d$
	扩散角/(°)	θ_1	$2\sim 6$

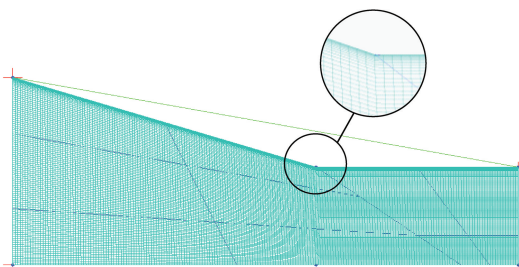


图 2 音速喷嘴网格绘制示意图

Fig. 2 Grid structure of sonic nozzle

其他 3 种喷嘴的网格绘制与收缩喷嘴类似。在验证网格无关性基础上,选择网格数 20 000~40 000 的模型。

2.3 仿真参数设置

本文在 ANSYS16.0 的 Fluent 中进行数值模拟实验。如表 1 所示,喷嘴的喉径皆小于 0.12 mm,其喉部雷诺数皆小于 2 000,因此流动模型选择为层流模型;临界流喷嘴内的流动属于高速可压流动,采用密度求解器;德国 PTB 的 Wendt 通过实验发现,当喷嘴的绝对粗糙度范围在 0.1~1 且雷诺数低于 1.5×10^5 时,壁面粗糙度对流出

系数影响很小。因此,仿真实验中壁面采用绝热条件,粗糙度忽略不计。流体介质选择为可压缩理想气体;入口条件设为压力入口,数值为标准大气压(101 325 Pa);出口条件设置为压力出口,分别设为 0.1~0.9 倍大气压;出入口温度皆设定为 293.15 K。

此外,本文对扩散喷嘴的仿真实验做了简化处理。由于收缩喷嘴与扩散喷嘴的形状一致,区别只在与流体的流动方向,因此在扩散喷嘴的仿真实验中,采用了收缩喷嘴的网格模型,改变了出入口的边界条件,将收缩喷嘴设置中的入口条件设为压力出口,出口条件设置为压力入口,即改变了喷嘴的流动方向,大大简化了实验过程,加快运算速度。

2.4 模拟验证

为了验证数值仿真实验的可靠性,本文采用负压法对喉径分别为 0.108 1、0.094 7、0.084 9、0.056 7 和 0.032 2 mm 的收缩喷嘴(扩散喷嘴)进行流量测量实验。

实验系统如图 3 所示,在下流真空发生器的作用下,外界气体依次流经干燥器、过滤器、标准流量计、滞止容器、微小喷嘴、汇合容器,通过真空发生器 and 消音器排出。当微小喷嘴达到临界状态,质量流量不再发生改变,此时以标准流量计示值作为喷嘴的实际流量。干燥器和过滤器可以提高气源质量。电磁阀组分别控制 5 个气控阀,使得每次测量只有一个喷嘴处于工作状态,气控阀接入高压气罐。PC 为上位机,利用 LabVIEW 程序建立人机界面,控制下位机 PLC 进行数据采集。实验中选择 Brooks SLA5860 为标准流量计测量微小喷嘴的实际流量,其基本参数如表 2 所示。

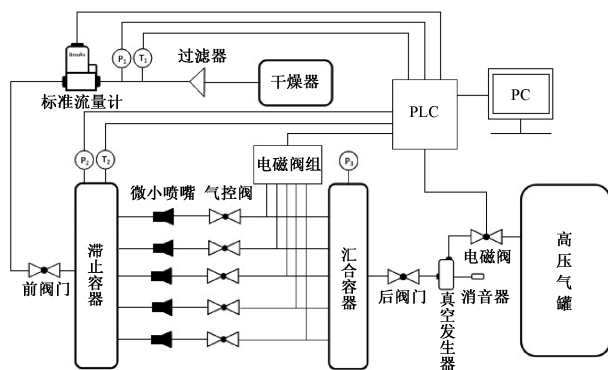


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Experimental system for measuring sonic nozzles

表 2 标准流量计工作参数表

Table 2 Parameters of standard flowmeter

特性	内容	特性	内容
型号	Brooks SLA 5860		
工作温度范围	-14 °C ~ 65 °C	精度	$\pm 0.18\%$ (2%~20%F.S.);
工作压力范围	1~1500 psi	精度	$\pm 0.18\%$ (1%~20%F.S.)
检测范围	0.003 lpm~50 lpm		(1~50 lpm)

通过气密性测试得到实验装置的泄漏量为 6.26×10^{-10} kg/s,远小于最小质量流量。入口压力为大气压,入

口温度控制在 20 ± 1 °C,下游压力控制在 10 kPa 以下,确保喷嘴达到临界状态。最终实验结果如表 3 所示。

表 3 两种微小喷嘴的实际流量

Table 3 Actual mass flow of two types of micro-nozzles

喉径/mm	收缩喷嘴			扩散喷嘴		
	滞止压力/Pa	滞止温度/°C	实际流量/(kg·s ⁻¹)	滞止压力/Pa	滞止温度/°C	实际流量/(kg·s ⁻¹)
0.108 1	100 254.6	19.45	1.966×10^{-6}	100 535.2	19.46	1.988×10^{-6}
0.094 7	100 783.2	19.43	1.490×10^{-6}	100 668.4	19.46	1.504×10^{-6}
0.084 9	100 942.3	19.42	1.186×10^{-6}	100 873.6	19.45	1.192×10^{-6}
0.056 7	101 118.7	19.39	5.289×10^{-7}	101 093.8	19.43	5.174×10^{-7}
0.032 2	101 226.8	19.37	1.537×10^{-7}	101 187.4	19.40	1.562×10^{-7}

注:滞止压力和滞止温度分别由压力表 P_2 和温度表 T_2 得到

采用相同几何结构参数和工况条件进行数值仿真实验,并将仿真结果、实验结果和经验公式计算结果进行对比,如图 4 所示。

4) 实验结果与其余两类结果有一定差别,其中喉径为 30 μm 处的 3 类结果差距较大,但两种结构下喷嘴的结果都小于 5%。其余情况下,实验结果与仿真结果的误差在 2% 之内。实验结果与仿真结果的之间的误差可能主要来自于加工工艺的限制。超微小喉径下,相对于喷嘴口径来说,喷嘴内部喉部长度,扩散段(收缩段)长度的加工精度难以控制。因此实际喷嘴的喉部长度和扩散段(收缩段)长度可能于设计尺寸相差较大。其次,标准流量计存在测量误差,上游的测量数值不能十分准确地反映喷嘴流量。

综合上述结果,通过 3 类方法得到的不同喉径下微小音速喷嘴的流出系数差距较小,证明利用数值仿真分析微小音速喷嘴流动特性是必要且可行的。

3 仿真结果

根据表 1 可将每一个影响因素分为不同水平,对各个几何因素组合下的喷嘴进行数值模拟,分析各个因素与流出系数以及临界背压比的关系。如图 5 所示,以喉径为 30 μm 的喷嘴为例(其余参数如表 1 所示),分析喷嘴内部流动状态。

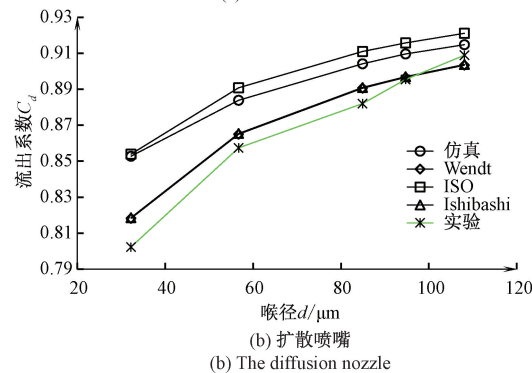
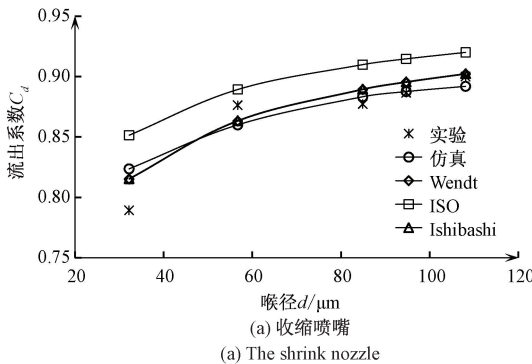


图 4 流出系数结果对比

Fig. 4 Comparison of discharge coefficient results

由图 4 可以看出,在微小尺度下,3 类结果大体变化趋势相同,但又存在如下区别。

1) 从总体上看,随着喷嘴喉径的增大,流出系数也增大。

2) 从经验公式的计算结果来看,Wendt 公式与 Ishibashi 公式的结果基本一致,ISO 经验公式的结果与前者差距较大,说明在低雷诺数情况下 ISO 经验公式不再适用。

3) 仿真结果与经验公式的求解结果有一定差距,但误差小于 3%。

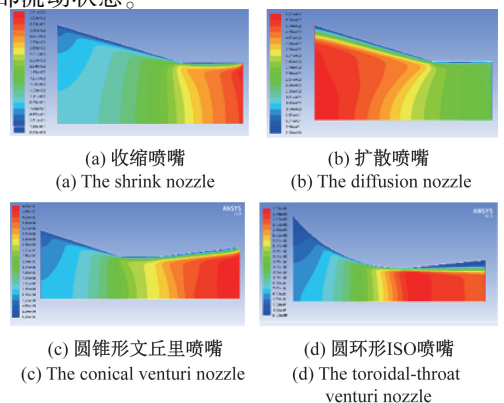


图 5 Fluent 仿真结果——速度云图

Fig. 5 Simulation results-velocity cloud diagram

从图 5 可以明显观察到,喷嘴内部出现明显的速度与压力梯度;流域靠近壁面的部分出现边界层,速度速降至 0;临界流并非恰好出现在理论喉部。

进一步对比马赫数结果可以发现,收缩喷嘴和扩散喷嘴的临界流出现在喉部前,圆锥形文丘里喷嘴和圆环形 ISO 喷嘴的临界流出现在喉部之后。

4 特性分析与比较

4.1 收缩喷嘴与扩散喷嘴

在保持入口压力为 1 标准大气压时,将出口压力调整为 0.1~0.9 个大气压,得到 9 组质量流量。当喷嘴的质量流量与前后 2 组质量流量值的变化率小于 0.05% 时,认为喷嘴的质量流量不再变化,管内流动已经达到临界状态。在实验过程中,为了进一步提高临界背压比的实验精度,当变化率在 0.05%~0.08% 时,以 0.05 的背压比为步长,增加一组仿真实验。由于背压比在 0.7~0.9 时,喷嘴内部速度显然未达到音速,因此图中只显示背压比为 0.1~0.6 时的流动情况。以喉径为 120 μm 的收缩喷嘴为例,如图 6 所示。

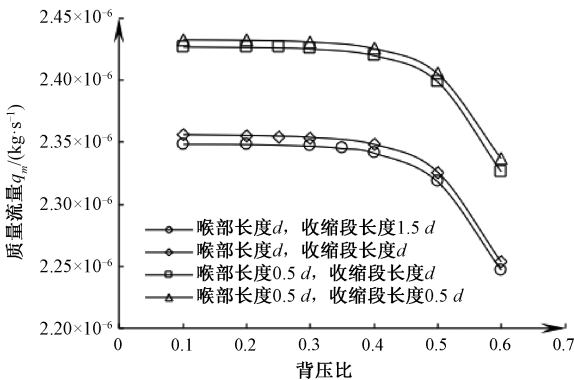


图 6 $d=120\ \mu\text{m}$ 质量流量与背压比的关系

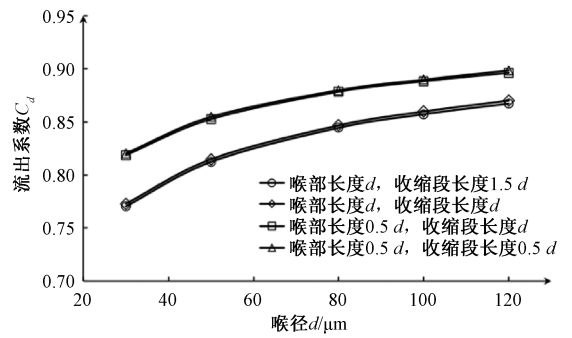
Fig. 6 Relationship between mass flow rate and back pressure ratio ($d=120\ \mu\text{m}$)

如图 6 所示,喷嘴在小背压比时质量流量趋于稳定,说明喷嘴已经达到临界状态。而且,喉部长度越小,质量流量越大,收缩段长度对质量流量的影响较小。通过大量数据对比发现,其余喉径的喷嘴特性与此类似。

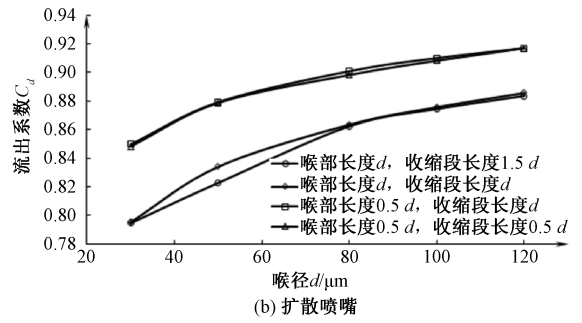
1) 流出系数

图 7 所示为收缩喷嘴与扩散喷嘴的流出系数与喉径、收缩段长度和喉部长度的关系。结果显示,随着喉径的增大,喷嘴流出系数越大;喉部长度越小,流出系数越大;而收缩段长度对流出系数虽有一定影响,但影响较小。

就收缩喷嘴而言,收缩段长度的增加对流出系数产



(a) 收缩喷嘴
(a) The shrink nozzle



(b) 扩散喷嘴
(b) The diffusion nozzle

图 7 几何参量对喷嘴流出系数的影响

Fig. 7 Influence of geometric parameters on nozzle discharge coefficient

生了很细微的影响,原因可能是由于随着收缩段长度的增长,收缩段对流体的阻力也会有所增大,从而导致流出系数的减小。进一步研究发现,由于收缩段长度的变化而产生的流出系数变化小于 0.2%,因此收缩段长度的影响可以忽略不计。

此外,对比图 7(a) 与 (b) 可以发现,相同情况下,扩散喷嘴的流出系数大于收缩喷嘴。

2) 临界背压比

如图 6 所示,喉径为 120 μm 时不同结构尺寸的收缩喷嘴几乎在同一背压比进入临界状态,其余结构尺寸的喷嘴也有类似的规律。这说明几何尺寸对喷嘴的临界背压比影响较细微,难以从图中直观地得到。因此,以表格的形式列出几何尺寸对收缩喷嘴和扩散喷嘴临界背压比的影响,如表 4 和 5 所示。

表 4 不同几何尺寸下收缩喷嘴的临界背压比
Table 4 Critical back pressure ratio of shrink nozzles in different geometries

喉径/ μm	30	50	80	100	120
喉部长度 d , 收缩段长度 $1.5d$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
喉部长度 d , 收缩段长度 d	0.2	0.2	0.25	0.3	0.3
喉部长度 $0.5d$, 收缩段长度 d	0.2	0.2	0.25	0.35	0.35
喉部长度 $0.5d$, 收缩段长度 $0.5d$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3

表5 不同几何尺寸下扩散喷嘴的临界背压比

Table 5 Critical back pressure ratio of diffusion nozzles in different geometries

喉径 $d/\mu\text{m}$	30	50	80	100	120
喉部长度 d , 扩散段长度 $1.5d$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
喉部长度 d , 扩散段长度 d	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
喉部长度 $0.5d$, 扩散段长度 d	0.4	0.4	0.45	0.45	0.45
喉部长度 $0.5d$, 扩散段长度 $0.5d$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.45

根据表4和5可知,在喉径为0.03和0.05 mm时,喉部长度和收缩段长度(扩散段长度)的改变对临界背压比没有影响。除扩散喷嘴在喉部长度为 d 时临界背压比无变化,其他几何尺寸下随着喉径的增大,临界背压比都呈上升趋势。当结构为喉部长度 $0.5d$,收缩段长度 d 时,两种喷嘴的临界背压比结果都最大。

这说明在微小尺寸下,收缩喷嘴与扩散喷嘴的临界背压比受几何尺寸的影响较小,但主要还是由喉径决定。

4.2 圆锥形文丘里喷嘴

与收缩喷嘴相比,圆锥形喷嘴增加了扩散段。由于之前的研究已经得到当喉部长度 $0.5d$,收缩段长度 d 时,喷嘴的流动特性较好,本文在研究圆锥形文丘里喷嘴时,喉部与收缩段直接采用这一结构,仅分析扩散段长度与扩散角的影响。

1) 流出系数

如图8所示,流出系数与喉径、喉部长度和扩散段长度皆有关系。

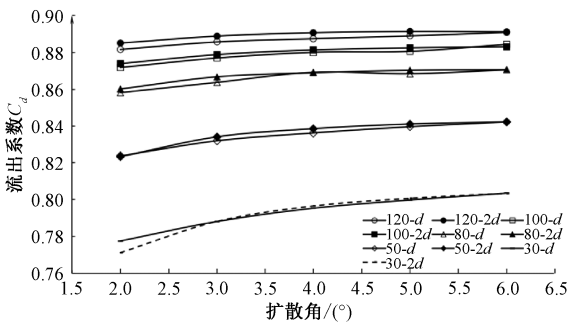


图8 几何参量对圆锥形文丘里喷嘴流出系数的影响

Fig. 8 Influence of geometric parameters on discharge coefficient of conical venturi nozzle

其中,喉径对流出系数的影响最大,喉径越小,流出系数越小。扩散角越大,流出系数越大,扩散角从 2° 变为 4° 时,流出系数增大较为明显,当扩散角达到 4° 时,继续增大扩散角,对流出系数的影响越来越不明显。从图8还可以发现,扩散段长度增加,流出系数增加,但与喉径相比,影响较小。

2) 临界背压比

如图9所示,圆锥形文丘里喷嘴的临界背压比受扩

散角、扩散段长度和喉径三者影响。由于不同尺寸下临界背压比的结果相差不大,图示中存在曲线重合,其中“ $120-2d$ ”与“ $100-2d$ ”所指示的曲线重合,“ $100-d$ ”和“ $80-d$ ”所指示的曲线重合。从图9可以看出,喉径越大,临界背压比越大;扩散角越大,临界背压比越大,但是当扩散角增大至 5° 时,临界背压比不再增大;大部分情况下,扩散段长度较大的喷嘴,其临界背压比大于等于扩散段较小的喷嘴。

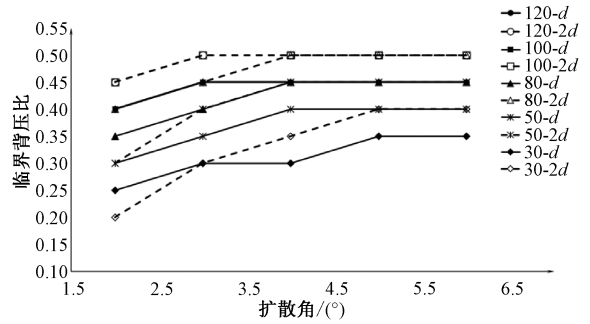


图9 几何参量对圆锥形文丘里喷嘴临界背压比的影响

Fig. 9 Influence of geometric parameters on critical back pressure ratio of conical venturi nozzle

图8和9的图例代表了喉径和扩散段长度,例如“ $120-d$ ”表示喉径为 $120 \mu\text{m}$,扩散段长度为 d 时的情况。

4.3 圆环形 ISO 喷嘴

本文圆环形 ISO 喷嘴是上述3种喷嘴的对照结构,因此不对其流动特性展开单独分析。为了形成对比,其喉部与扩散段的几何参数取值与圆锥形文丘里取值相同,收缩段的入口直径 $D=2.5d$,曲率半径 $R_c=2d$ 。

5 对比

对比4种结构的喷嘴,既有相似之处也有不同的特点。

1) 在微小尺度下,喉径可以有效影响这几种临界流喷嘴的流动特性,喉径越小,流出系数和临界背压比越小。喉部长度对流出系数影响较为明显,喉部长度越短,流出系数越大。

2) 收缩段长度对喷嘴流出系数和背压比的影响都较小

3) 对于收缩喷嘴和扩散喷嘴,喉径相同时,流动特性最好的结构是喉部长度为 $0.5d$ 、收缩段(扩散段)长度为 d 。

如图10所示,以喉部长度 $0.5d$,圆锥段长度 d 为例,对比分析4种喷嘴的流动特性。

如图10(a)所示,在喉径相同的情况下,扩散喷嘴的流出系数最优,圆环形 ISO 喷嘴次之,圆锥形文丘里喷嘴

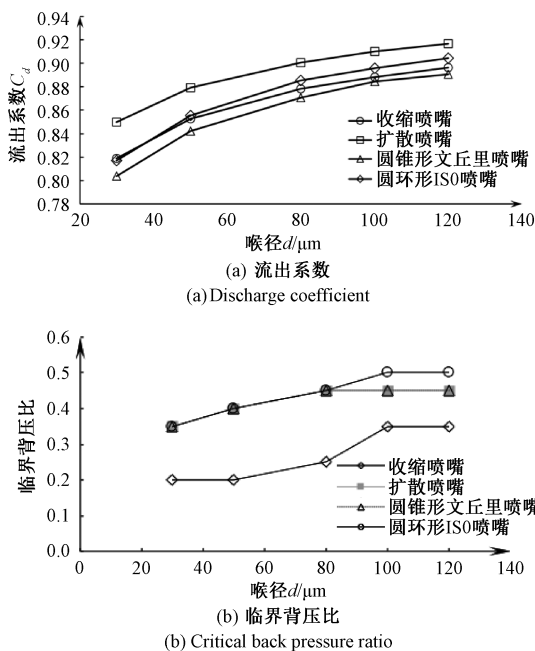


图 10 喷嘴喉径对流动特性的影响

Fig. 10 Influence of nozzle throat diameter on flow characteristics

最差。随着喉径的增大,喷嘴的流出系数增大。因此在流出系数方面,扩散喷嘴是较优的结构。

如图 10(b) 所示,在喉径相同的情况下,圆环形 ISO 喷嘴的临界背压比最优,扩散喷嘴和圆锥形文丘里喷嘴次之,收缩喷嘴最差。随着喉径的增大,喷嘴的临界背压比增大。综合考虑加工难度和流动特性,扩散喷嘴依然是较优结构。

6 结论

本文通过数值模拟,分析了喉径在 0.03~0.12 mm 时非标准音速喷嘴的流动特性。发现当喉径很小且雷诺数小于 1.2×10^4 时,ISO 流出系数经验公式不再适用于喷嘴的流动特性计算。

为了验证仿真实验的可行性,本文将仿真得到的流出系数结果与经验公式的结果进行了对比,发现二者有一定差距,误差在 3% 以内,但总体趋势相当。这可能是由结构不同,喷嘴的理论质量流量与 ISO 标准喷嘴相比不同,导致后续流出系数计算时出现偏差。要想进一步求证,需要更深入的结构分析和实验。

对比收缩喷嘴与扩散喷嘴,本文通过改变喷嘴流动方向的方式,在不改变喷嘴结构的情况下提高了喷嘴的流动特性。

本文对于 3 种结构的微小喉径音速喷嘴的几何特性对流量特性的影响进行了分析,并与圆环形 ISO 喷嘴进

行对比。在微小尺寸下,喉径是影响音速喷嘴流动特性的主要因素,其余几何尺寸对流出系数影响较大,对临界背压比的影响较小。在符合精度要求的情况下,几何形状的误差对喷嘴流动特性影响较小,减轻加工压力。综合考虑流出系数与临界背压比两参数,扩散喷嘴和圆环形 ISO 喷嘴的特性较好,但考虑到加工成本和加工难度,在微小尺度下,扩散喷嘴是比较好的选择。

参考文献

- [1] 黎翱, 徐科军, 熊伟. 频率方差与幅值相结合的涡街流量计抗振方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 161-169.
LI AO, XU K J, XIONG W. Anti-pipeline vibration method combining frequency variance and amplitude for vortex flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 161-169.
- [2] 刘文, 徐科军, 乐静, 等. 科氏流量计幅值控制中两类关键参数的确定[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 183-189.
LIU W, XU K J, LE J, et al. Determination of two types of key parameters in coriolis flowmeter amplitude control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10): 183-189.
- [3] 汪春畅, 徐科军, 许伟, 等. 电磁式涡街流量计测量含气导电液体流量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 174-180.
WANG CH CH, XU K J, XU W, et al. Study on measuring conducting liquid flow with gas by electromagnetic vortex flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 174-180.
- [4] 杨辉跃, 涂亚庆, 毛育文. 科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(05): 118-123.
YANG H Y, TU Y Q, MAO Y W. Human-simulated intelligent control method for vibration amplitude of Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(05): 118-123.
- [5] 汪欢欢. 基于音速喷嘴的气体流量标准装置研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
WANG H H. The development of flow standard device based on sonic nozzle [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [6] DING H B, WANG C, WANG G. Approximate solution for discharge coefficient of the sonic nozzle with surface roughness[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016(52): 227-232.
- [7] LI C H, PENG X F, WANG C. Influence of diffuser

- angle on discharge coefficient of sonic nozzles for flow rate measurements [J]. *Flow Measurement Instrumentation*, 2010, 21: 531-537.
- [8] KIM J H, KIM H D, SETOGUCHI T. The effect of diffuser angle on the discharge coefficient of a miniature critical nozzle [J]. *Journal of Thermal Science*, 2010, 19(3): 222-227.
- [9] 胡鹤鸣, 崔骊水, 王池, 等. 低雷诺数音速喷嘴临界背压比的实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(4): 737-742.
- HU H M, CUI L SH, WANG CH, et al. Experimental study on critical back-pressure ratio of sonic nozzle at low Reynold number [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 737-742.
- [10] DING H B, WANG C, ZHAO Y K. Influence of divergent section on flow fields and discharge coefficient of ISO 9300 toroidal-throat sonic nozzle [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 40: 19-27.
- [11] 戚珊珊, 徐志鹏, 谢代梁. 圆锥形入口小喉径临界流喷嘴数值模拟与设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(12): 159-162.
- QI SH SH, XU ZH P, XIE D L. Numerical simulation and design of small diameter critical venturi nozzles with conical inlet [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(12): 159-162.
- [12] 周立媛, 李春辉, 谢代梁. 微小音速喷嘴临界背压比测试装置 [J]. *计量学报*, 2020, 41(1): 43-47.
- ZHOU L Y, LI CH H, XIE D L. The test facility of the critical back-pressure ratio for small sonic nozzle [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(1): 43-47.
- [13] NAOKI T, MASAHIRO I, TOSHIHIRO M. Experimental study on improving the critical back-pressure ratio using a step in a critical-flow venturi nozzle [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 71: 101682.
- [14] MASAHIRO I. Discharge coefficient equation for critical-flow toroidal-throat venturi nozzles covering the boundary-layer transition regime [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015(44): 107-121.
- [15] WANG C, CAO P J, LI C H, et al. Influence of wall roughness on boundary layer transition position of the sonic nozzles [J]. *Measurement*, 2019, 139: 196-204.
- [16] 王超, 王刚, 丁红兵. 音速喷嘴内水蒸气自发凝结流动自激振荡和分歧现象 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(11): 1113-1120.
- WANG CH, WANG G, DING H B. 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.
- [17] 王超, 张哲晓, 丁红兵, 等. 湿空气超音速凝结实验平台设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 173-181.
- WANG CH, ZHANG ZH X, DING H B, et al. Design of an experimental platform for the moist gas supersonic condensation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 173-181.
- [18] 王超, 王孝通, 丁红兵, 等. 基于音速喷嘴固体内部温度分布的“热效应”分析 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(8): 777-785.
- WANG CH, WANG X T, DING H B, et al. Analysis of thermal effects on body temperature distribution of sonic nozzles [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(8): 777-785.
- [19] LI C H, MICKAN B. Flow characteristics and entrance length effect for MEMS nozzles [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, 33: 212-217.
- [20] HU C C, LIN W T, SU C M. Flow characteristics of pyramidal shaped small sonic nozzles [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22(1): 64-70.

作者简介



马馨玥, 2017 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为小流量气体检定。

E-mail: 443727885@163.com

Ma Xingyue received B. Sc. from China Jiliang University in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. Her main research interest is verification of small flow gas.



谢代梁(通信作者), 1998 年于浙江大学获学士学位, 2005 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学现代科技学院副院长, 教授, 主要研究方向为复杂信号处理、流量计量及流量仪表校准技术、多相流测试技术和微尺度流量测量技术等。

E-mail: dlxie@cjlu.edu.cn

Xie Dailiang (Corresponding author) received B. Sc. from Zhejiang University in 1998, Ph. D. from Zhejiang University in 2005. Now he is the dean and professor of the School of Modern Science and Technology of China Jiliang University. His main research directions include complex signal processing, flow measurement and flow meter calibration technology, multi-phase flow test technology and micro-scale flow measurement technology.

是德科技推出业界首个基于原生云测试网络性能及安全性一体解决方案

新款 CyPerf 软件既能保证良好的数字用户体验,又能确保网络安全,有助于加速 SD-WAN 和云迁移

是德科技公司日前发布了一款原生云的分布式网络性能和安全性测试软件——CyPerf。该软件可以帮助机构明确用户体验特征以及验证混合网络、安全设备和服务的性能极限,使他们更自信地推出新产品。是德科技是一家领先的技术公司,致力于帮助企业、服务提供商和政府客户加速创新,创造一个安全互联的世界。

许多新技术,譬如 SD-WAN、多云体系结构和软件即服务(SaaS)应用等,正在促使网络和安全体系结构朝着分布式的混合模型发展。随着越来越多的用户、设备、应用、服务和数据部署在企业或机构外部,IT 团队也需要评测网络和应用服务的性能和安全性。因此,网络和安全运营团队就有了一个共同的目标——确保网络性能良好而且安全可靠。

CyPerf 基于网页的图形用户界面使用户可以查看各种网元并与之进行交互,这些网元对于仿真网络行为至关重要

Keysight CyPerf 软件采用基于软件代理的轻量级体系结构,易于在实验室、沙箱环境和混合生产网络中进行部署和操作。CyPerf 具有以下特点:

采用全面的测试方法,可以在分布式环境中进行部署前和部署后的实际测试。

能够在可控制的真实业务的条件下,对最终用户体验、安全状况和性能瓶颈进行深入分析。

通过在复杂的分布式网络中——包含代理、软件定义的广域网(SD-WAN)、传输层安全性(TLS)检查、弹性负载均衡(ELB)和 Web 应用程序防火墙(WAF)——生成合法和恶意活动的混合流量,获得真实环境下的测试

结果。

IT 网络运营商可以采用主动和持续的数据驱动方法,来验证和分析用户体验、性能和安全性,并与以往建立的基准进行比较。

网络和安全运营团队能够在企业或机构内部找到数字用户体验与安全性之间的平衡点。

网络安全工具供应商能够逼真地仿真客户环境,从而更快地将解决方案和服务推向市场。

是德科技副总裁兼网络应用与安全事业部总经理 Ram Periakaruppan 表示:“随着越来越多的用户、设备、应用、服务和数据迁移至网络边缘,企业或机构需要采用新的方法来验证性能和安全性。CyPerf 可以由企业和网络安全供应商进行部署,从而在动态混合环境中(包括第三方云提供商和网络连接)优化数字用户体验与安全性之间的平衡。性能和安全性是决定网络成功与否的关键,CyPerf 通过查看混合网络中完整的应用交付路径,可以发现其中的薄弱点。”

关于是德科技

是德科技(NYSE:KEYS)是一家领先的技术公司,致力于帮助企业、服务提供商和政府客户加速创新,创造一个安全互联的世界。从设计仿真、原型验证、生产测试到网络和云环境的优化,是德科技提供了全方位的测试与分析解决方案,帮助客户深入优化网络,进而将其电子产品以更低的成本、更快地推向市场。我们的客户遍及全球通信生态系统、航空航天与国防、汽车、能源、半导体和通用电子终端市场。2019 财年,是德科技收入达 43 亿美元。更多信息,请访问 www.keysight.com。