

【文章编号】 1004-1540(2010)02-0108-05

# 柱塞式校准器检定临界流喷嘴的实验研究

冯 洁<sup>1</sup>, 程 佳<sup>2</sup>, 梁国伟<sup>1</sup>

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310013)

**【摘要】** 介绍了一种采用标准柱塞结构的临界流喷嘴校准器的原理和组成. 根据临界流喷嘴的流量特性建立了检定数学模型, 同时建立工作腔气体状态方程, 并进行分析. 对该校准器工作腔的压力和温度进行了大量实验研究, 结果表明, 工作腔内气体的压力和温度在检定过程中能够保持稳定, 有益于提高检定的精度和效率. 利用该校准器进行临界流喷嘴背压比试验, 调节被测喷嘴背压比, 检测其实际流量, 得到与理论曲线相一致的流量特性曲线, 从而为临界流喷嘴的特性研究提供了一个良好的手段.

**【关键词】** 校准器; 临界流喷嘴; 柱塞; 背压比

**【中图分类号】** TB937

**【文献标识码】** A

## Experimental study on plunger calibration devices of critical flow nozzles

FENG Jie<sup>1</sup>, CHENG Jia<sup>2</sup>, LIANG Guo-wei<sup>1</sup>

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310013, China)

**Abstract:** The principle and composition of critical flow nozzle calibration devices with ideal plunger structure were introduced. According to the flow characteristic of critical flow nozzles, the measurement model was established. Besides, the state equation of gas in the working cylinder was founded and analyzed. Plenty of experiments were carried out to study the pressure and temperature in the working cylinder. Experimental results indicated that the pressure and temperature can remain steady during the process of certification which is useful to increase the accuracy and efficiency of calibration. The test of back pressure ratio of critical flow nozzles was carried out with this calibration device to adjust the back pressure ratio of the nozzle to measure the actual flow and to plot the flow characteristic curves which were consistent with the theoretical curves. The device provides a good research method for the characteristics of critical flow nozzles.

**Key words:** calibration device; critical flow nozzle; plunger; back-pressure ratio

临界流喷嘴具有良好的稳定性, 常用作流量标准装置中的传递标准件, 用以对其他类型的流量计

进行量值传递<sup>[1]</sup>. 临界流喷嘴的结构和流量特性如图 1<sup>[2]</sup>, 保持喷嘴入口处压力  $P_0$  和温度  $T_0$  不变,

**【收稿日期】** 2010-03-05

**【基金项目】** 浙江省科技厅重大专项重点项目(No. 2009C11008)

**【作者简介】** 冯 洁(1985-), 女, 浙江诸暨人, 硕士研究生. 主要研究方向为流量计量测试与智能化仪表的研制.

逐渐减小出口压力  $P_2$ , 即减小背压比, 通过喷嘴的流量  $q_m$  先是不断增加, 当背压比小到临界压力比时, 通过喷嘴的流量达到最大值  $q_{\max}$ , 若继续减小背压比, 流量将保持不变. 随着化工、医药、航空等领域内微小气体流量测量精度要求的提高, 临界流喷嘴以其独特的优越性受到越来越多的关注<sup>[3]</sup>. 因此, 临界流喷嘴检定和校准的准确性不仅关系到企业的经济利益, 而且对经济的发展也有重要的效益<sup>[4,5]</sup>.

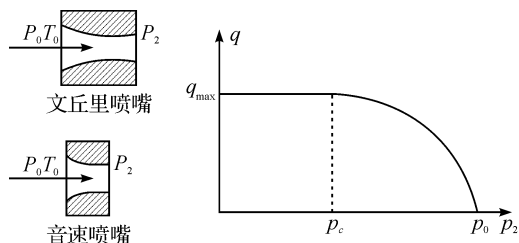


图1 临界流喷嘴的结构和流量特性

Figure 1 Structure and flow characteristic of the critical flow nozzle

目前临界流喷嘴的主要校准装置是 PVTt 法气体流量标准装置, 其工作原理是: 在某一个时间间隔  $t$  内, 气体流入或流出容积为  $V$  的标准容器, 根据标准容器内气体绝对压力  $P$  和热力学温度  $T$  的变化, 可以求得气体质量流量<sup>[6]</sup>. PVTt 法装置在检定临界流喷嘴时需要长时间的压力和温度的稳定过程, 因而检定效率偏低. 针对上述问题, 我们研制了一种新型柱塞式气体流量校准器<sup>[7,8]</sup>, 适用于小喉径临界流喷嘴的快速检定.

## 1 校准器的结构和原理

校准器流量范围为  $0.016 \sim 0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ , 扩展不确定度为  $0.05\%$  ( $k=2$ ). 并与 PVTt 法气体流量标准装置进行了比对, 采用两种标准装置得到的结果一致性良好. 该校准器采用标准柱塞结构, 主要由机架、电机、丝杠、柱塞、缸体和控制系统等组成, 如图 2. 丝杠驱动柱塞向上运动, 柱塞作为计量标准提供标准体积. 若入口处阀门关闭, 则柱塞、缸体和上盖板之间形成一个密封的工作腔. 腔体顶部安装有温度、压力传感器, 用来测量腔体内气体的温度和压力. 控制系统由上位机和下位机组成, 可控制柱塞运动速度、时间、位置, 并实时记录压力、温度等参数.

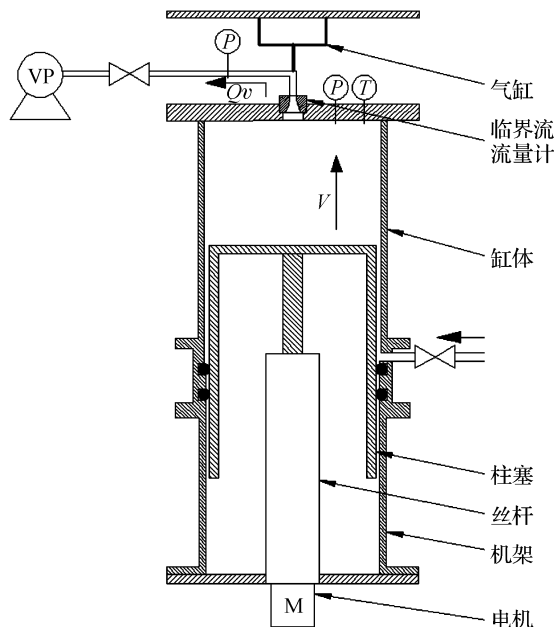


图2 校准器结构示意图

Figure 2 Installation structure of the calibration device

该校准器工作时, 缸体顶部设有临界流喷嘴安装口, 利用气缸活塞杆将喷嘴固定. 气体入口处阀门打开, 开启真空泵, 气体经入口处阀门流入缸体, 流经被测喷嘴从真空泵回到大气. 由于临界流喷嘴入口处的气压保持为大气压, 而出口处气压不断减小, 当临界流喷嘴前后的背压比小于临界背压比时, 临界流喷嘴处于临界流状态, 此时流过喷嘴的质量流量将保持最大值不变. 计算机以喷嘴的名义流量为依据, 控制电机以某一速度驱动丝杠旋转, 带动柱塞向上运动. 运动数秒后, 入口处阀门关闭, 控制系统开始计时, 并实时记录柱塞位置、温度、压力、湿度等参数, 计时完成后打开入口处阀门, 计算机根据测得的参数, 按照数学模型就可以求出临界流喷嘴的流出系数. 检定过程中, 柱塞向上运动, 以柱塞的体积来置换工作腔内减少的体积, 使工作腔内的压力保持不变.

## 2 数学模型

### 2.1 临界流喷嘴流出系数的计算

由理想气体的一维、等熵流动理论可得, 临界流喷嘴的临界质量流量为<sup>[9]</sup>:

$$q_m = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot C_d \cdot C_* \cdot \frac{P}{\sqrt{\frac{R}{M} T}} \quad (1)$$

式(1)中: $q_m$ —通过临界喷嘴的质量流量; $d$ —临界流喷嘴喉部直径; $C_d$ —临界流喷嘴的流出系数; $C_s$ —临界流函数; $P$ 、 $T$ —临界流喷嘴入口处的滞止压力和滞止温度; $R$ —通用气体常数(8.314 J/mol \* K); $M$ —气体的摩尔质量(28.97 g/mol).

根据流体动力学方程,工作腔内减少的气体质量  $M_s$  等于流过临界流喷嘴的气体质量  $M_m$ :

$$M_s = M_m \quad (2)$$

设测量时间为  $t$ ,  $L$  为  $t$  时间内柱塞运动的位移, 柱塞作匀速运动,  $v = L/t$  为柱塞的运动速度;  $V_g$  为柱塞运动前缸体的体积,  $S$  为柱塞的外径,  $H$  为计时开始时刻柱塞的位置,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为计时初始时刻和计时停止时刻的缸内的气体密度, 则柱塞向上运动  $t$  时间排出的气体质量流量为:

$$q_s = \frac{m_s}{t} = \frac{(V_g - S \cdot L)\rho_1 - (V_g - S \cdot L - S \cdot H)\rho_2}{t} \quad (3)$$

根据理想气体状态方程可得气体的密度为:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{T \cdot R \cdot Z} \quad (4)$$

式(4)中: $Z$ —气体压缩因子. 联立式(1~4), 可求得临界流喷嘴的流出系数  $C_d$ :

$$C_d = \frac{\left[ \frac{(V_g - S \cdot L)(P_1/T_1 - P_2/T_2)}{t} + v \cdot S \cdot P_2/T_2 \right] \sqrt{\frac{M}{R} \cdot T_0}}{0.25\pi d^2 \cdot C_s \cdot P_0 \cdot Z} \quad (5)$$

式(5)中: $P_1$ 、 $T_1$ —计时开始时刻缸内气体绝对压力和绝对温度; $P_2$ 、 $T_2$ —计时停止时刻缸内气体绝对压力和绝对温度; $P_0$ 、 $T_0$ —检测过程中压力和温度的平均值.

## 2.2 工作腔的气体状态方程

校准器工作时, 工作腔内的气体通过真空泵排出到大气中, 是一个变容腔的放气过程<sup>[10]</sup>. 随着柱塞的向上运动, 工作腔体的体积  $V$  和腔体内气体的质量  $M$  都会发生变化. 设  $M_0$ 、 $V_0$  分别为柱塞运动前缸体内气体的质量和体积. 根据气体状态方程式  $PV = MRT$  以及能量方程式, 可得:

$$V = V_0 - v \cdot t \cdot S \quad (6)$$

$$M = M_0 - q_m \cdot t \quad (7)$$

对气体状态方程式进行时间微分, 可得:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P}{T} \frac{dT}{dt} + \frac{RT}{V} \frac{dm}{dt} - \frac{P}{V} \frac{dV}{dt} =$$

$$\frac{P}{T} \frac{dT}{dt} + \frac{RT}{V} q_m - \frac{P}{V} v \cdot S \quad (8)$$

腔体内空气的状态变化取决于其与外界的热交换程度. 热交换充分的时候是等温过程, 完全没有热交换的时候是绝热过程. 两者都可按多变过程来处理. 腔体内的状态变化可用下式表示:

$$T \cdot P^{\frac{1-n}{n}} = \text{const} \quad (9)$$

式(9)中: $n$ —多变指数, 等温过程时,  $n = 1$ ; 绝热过程时,  $n = 1.4$ . 在实际的工作过程中,  $n$  并不是一个固定的值, 但由于气体运动过程很快, 可近似地按照绝热过程处理. 对上式进行微分可得:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{n-1}{n} \frac{T}{P} \frac{dP}{dt} \quad (10)$$

联立式(6)~(10)可得, 工作腔的体积  $V$ 、腔内气体质量  $M$ 、腔体内气体的压力  $P$  和温度  $T$  是变化, 但又相互关联的量, 给出四个变化量的初值, 即可求解出工作腔体内气体压力和温度的变化过程.

## 3 实验数据分析

### 3.1 工作腔的压力试验

由该校准器的检定原理可以看出, 检定过程中, 工作腔内气体压力的稳定是检定成功的关键. 以计时开始时的腔体内滞止压力作为参照, 实时测量腔体内压力, 与初始压力进行比较. 若检定过程中的当前压力始终小于初始压力, 则说明柱塞运动的速度过慢; 若当前压力始终大于初始压力, 则说明柱塞速度过快. 计算机即可根据压力的反馈修正柱塞运动速度.

根据喷嘴流出系数的计算模型, 若运行过程中压力波动控制在 20 Pa 以内, 所引入的测量不确定度很小, 则可以为检定所接受. 我们选取了名义流量为 0.016 m<sup>3</sup>/h、0.025 m<sup>3</sup>/h、0.04 m<sup>3</sup>/h、0.1 m<sup>3</sup>/h 和 0.25 m<sup>3</sup>/h 的 5 个临界流喷嘴进行检定, 其压力波动如表 1.

从表 1 中可以看出, 临界流喷嘴的流量越大, 工作腔内的压力波动越小; 反之流量越小, 压力波动越大. 除此之外, 系统测得的压力还与压力传感器的安装位置有关, 正确的安装才能使压力的测量实时、准确.

表 1 工作腔内的压力波动试验

Table 1 Pressure fluctuation in working cylinder

名义流量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	实测流量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	初始压力 /Pa	终止压力 /Pa	最大压力 波动/Pa
0.016	0.015 6	102 759	102 748	12.0
0.025	0.024 6	102 818	102 818	10.5
0.04	0.039 2	102 986	102 989	7.5
0.1	0.097 8	102 973	102 974	6.0
0.250	0.248 2	102 980	102 984	6.8

3.2 工作腔的温度试验

根据对工作腔气体状态的分析可以得出,若能保持腔体内压力的稳定,则温度也将维持不变.但是温度对检定结果影响很大,我们在建立该临界流喷嘴的流出系数计算模型的时候,发现温度的变化,尤其是初始时刻与终止时刻的温度差异所引入不确定度不容忽视.校准器是否能在检定过程中实现温度的平稳是衡量校准精度的重要因素,因此我们选取了几个典型流量的临界流喷嘴,在常温下对工作腔内的温度变化过程进行了测试,实验结果如图 3.

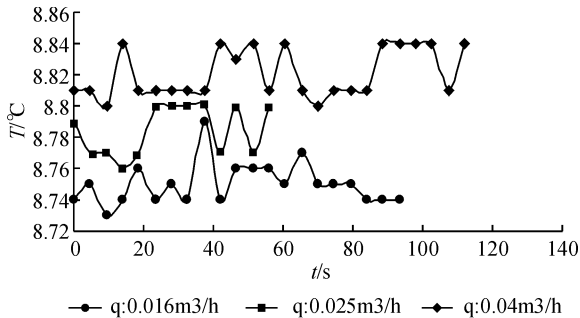


图 3 工作腔内的温度波动曲线

Figure 3 Temperature fluctuation in working cylinder

从试验的结果可以看出,工作腔体的温度可以在检定工作时间内保持稳定,其变化都不超过 0.05 °C. 保证温度的平稳是检定的一个关键,除了校准器本身和传感器的影响外,检定的环境尤为重要,只有在恒温环境中,才能保证检定的准确性.

3.3 临界流喷嘴背压比试验

目前负压式 PVTt 装置由于背压比难以稳定,致使进行临界流喷嘴的背压比试验较困难;而利用该柱塞式校准器,可以简单、方便地进行背压比试验.该校准器在进行背压比试验时,工作腔内的压力可维持稳定,通过调节喷嘴出口压力,即可改变

背压比.我们分别随机选取 3 个喉径均为 0.222 mm 和 3 个喉径分别为 0.178、0.222、0.689 mm 的临界流喷嘴进行实验.实验结果与临界流喷嘴的理论曲线相符,如图 4、5.

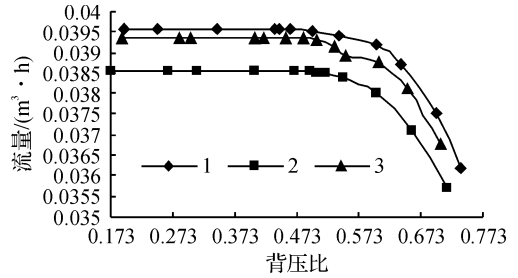


图 4 相同喉径的临界流喷嘴的流量特性比较

Figure 4 Flow characteristic comparisons of the nozzles with the same throat diameter

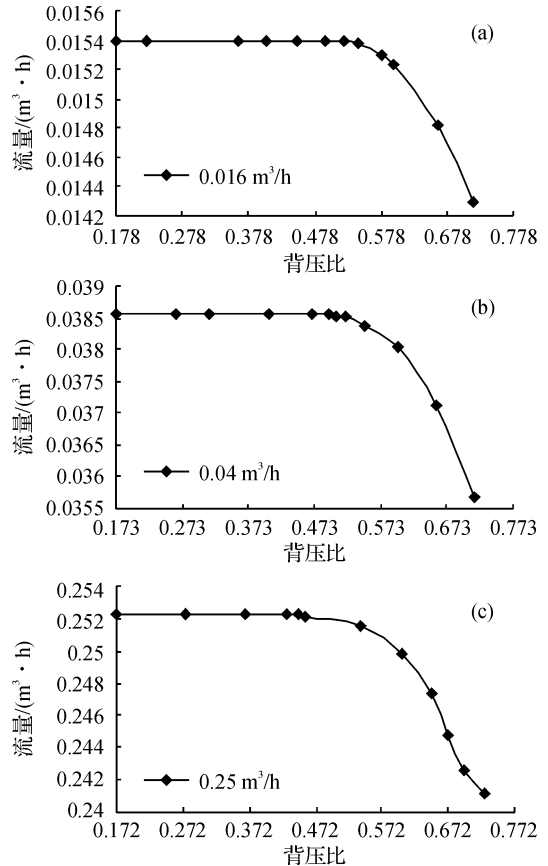


图 5 不同喉径的临界喷嘴的流量特性比较

Figure 5 Flow characteristic comparisons of the nozzles with the different throat diameters

图 4 显示了 3 个相同喉径的临界流喷嘴的背压比与实际流量之间的关系;图 5 显示了 3 个不

同喉径的临界流喷嘴的背压比与实际流量之间的关系,其中(a)、(b)、(c)分别是喉径为0.178、0.222、0.689 mm的临界流喷嘴的流量特性曲线。

从图4可以看出,三个同一喉径的喷嘴的临界背压比分别为0.464、0.456和0.485;图5中三个喉径为0.178、0.222、0.689 mm的喷嘴的临界背压比分别为0.493、0.485和0.440。该结果说明相同喉径的喷嘴的临界背压比也存在着一定的差异,而对于不同喉径的临界流喷嘴来说,小喉径喷嘴的临界背压比较大。实验中所测得的临界背压比与设计值有所出入,这与喷嘴的加工工艺有关,尤其是小喉径喷嘴的加工工艺尤为重要,加工过程中尺寸、粗糙度的微小差异都会导致临界背压比的变化。

## 4 结 语

本文介绍了一种新型柱塞式气体流量校准器,并对临界流喷嘴的数学模型和工作腔的状态方程进行了分析。实验表明,校准器工作腔内的气体状态能够维持稳定,从而提高了检定效率和精度。同时利用该校准器可以方便地进行临界流喷嘴的背压比试验。

活塞式校准器具有精度高、重复性好、效率高等众多优点,正在被越来越多的企业和计量部门所使用,势必将成为流量标准装置领域的新主流。

## 【参 考 文 献】

- [1] 王 池. 气体流量量值溯源体系探讨[J]. 中国计量学院学报, 2003, 14(3): 170-173.
- [2] 梁国伟, 周宁宁, 李长武. 临界流文丘里喷嘴流量计的原理与应用[J]. 中国计量学院学报, 2004, 15(3): 186-190.
- [3] 李春辉, 彭晓峰, 李启明, 等. 微小流量测量音速喷嘴的流动特性[J]. 热科学与技术, 2008, 7(3): 236-240.
- [4] 张钟华. 现代计量测试技术的进展[J]. 中国计量学院学报, 2004, 15(3): 186-190.
- [5] 张钟华. 计量测试技术的新动态[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(1): 1-7.
- [6] JJG 619-2005(E) p. V. T. t 法气体流量标准装置[S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [7] WANG C, LI X, DUAN H, et al: Establishment of piston devices[C] // The 12th International Flow Measurement Conference. China: Flomeko, 2004: 14-17.
- [8] 苏彦勋, 梁国伟, 盛 健. 流量计量与测试[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007, 216-227.
- [9] 徐英华, 王自和. JJG 620-2008 临界流文丘里喷嘴[S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [10] 蔡茂林. 现代气动技术理论与实践第二讲: 固定容腔的充放气[J]. 液压气动与密封, 2007(3): 43-47.