

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2017.06.002

# 温度对音速喷嘴式燃气流量标准装置的特性影响

□ 自贡燃气有限责任公司 ( 643000 ) 刘 帆

**摘 要:** 依据音速喷嘴独特的临界流测量原理, 本文通过一种流体力学的计算方法, 用临界流函数表征音速喷嘴喉部流体特性, 计算出不同温度条件下喷嘴的流出系数, 以此研究温度对喷嘴特性的影响。

**关 键 词:** 音速喷嘴 流出系数 温度 燃气

## The Influence of Temperature on the Sonic Nozzle Properties of Gas Calibration Device

Liu Fan Zigong Gas Co., Ltd.

**Abstract:** In this paper, we choose a kind of fluid mechanics calculation method. Used the critical flow function to charact the sonic nozzle throat flow characteristics, and to calculate the nozzle flow coefficient under different temperature conditions, In order to study the effect of temperature on the nozzle characteristic.

**Keywords:** sonic nozzle outflow coefficient temperature gas

### 1 前言

音速喷嘴又称为临界流文丘里喷嘴<sup>[1]</sup>, 具有原理简单易懂, 操作简便, 结构简单, 坚固耐用, 且维护保养及检验成本低廉等优点, 作为一种气体流量装置的标准表, 被广泛适用于天然气行业<sup>[2]</sup>。音速喷嘴性能的好坏, 将直接影响被检测仪表的准确度。

我司购置MJ2210-01A型音速喷嘴, 专用于商用膜式气体流量计的检定, 通过几年的运行, 发现喷嘴性能随温度变化会产生细微偏差, 为消除系统误差, 本文对温度和喷嘴流体性能进行了数据统计和研究。

### 2 流出系数的计算

相较于理想气体, 真实气体有粘滞性, 当气流通过喷嘴时会有能量损失, 使实际流量低于理想流量。此时, 用流出系数<sup>[3]</sup>表示实际流量与相同滞止条件下理想流量间的差异。

$$C_d = \frac{q_m}{q_{mi}} \quad (1)$$

$C_d$ 为流出系数,  $q_m$ 为实际流过喷嘴的气体流量;  $q_{mi}$ 为相同滞止条件下的气体一维、等熵流过的理想流量<sup>[2]</sup>。

$$q_{mi} = \frac{AC_{sj}P_0}{\sqrt{(R/M)T_0}} \quad (2)$$

A为音速喷嘴喉部截面积；R为气体常数；M为气体摩尔质量；P<sub>0</sub>和T<sub>0</sub>分别为音速喷嘴气体滞止压力和滞止温度；C<sub>sj</sub>为临界流函数

$$C_{sj} = \sqrt{\gamma \left[ \frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

γ为绝热指数，在理想状态下，γ=1.4。

按照公式（1）（2）和（3）可计算出各温度下的理论流量如表1所示。

### 3 温度对音速喷嘴流出系数的影响

#### 3.1 喷嘴与被测膜式流量计的温度相等，流出系数与温度的关系

以20℃为标准温度，设20℃下测得的流出系数为标准值，同时改变喷嘴与被测膜式流量计的温度，测量该温度下音速喷嘴的实际流量，带入公式（1）和（2），计算出流出系数C<sub>di</sub>及平均流出系数C<sub>d</sub>。

实验共选取8个温度点，控温精度为±0.1℃，每个温度点取样本数6，如表2所示。

作C<sub>d</sub>随温度T的变化曲线如图1所示，以20℃下的C<sub>d</sub>为标准，记为C<sub>d0</sub>，按公式（4）计算C<sub>di</sub>的标准偏差S并作图（如图2所示）。

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{C}_{di} - \bar{C}_{d0})^2}{n-1}} \quad (4)$$

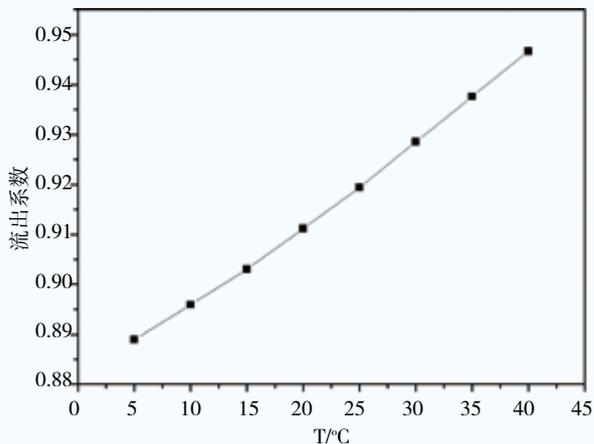


图1 流出系数与温度的关系

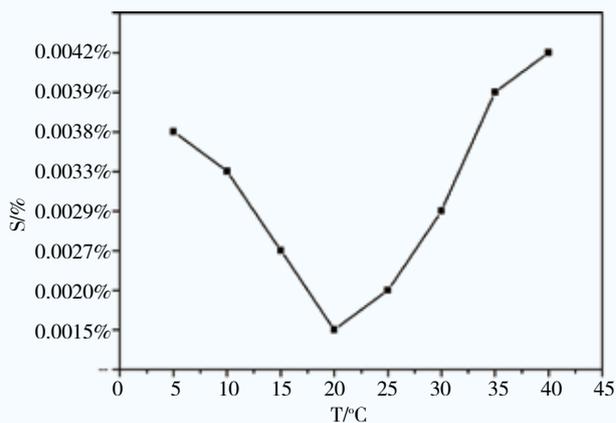


图2 标准偏差与温度的关系

表1 不同温度下音速喷嘴的理论流量

温度T/°C	5	10	15	20	25	30	35	40
qm / ( 10 <sup>-6</sup> · kg · s <sup>-1</sup> )	129.071	128.047	127.031	126.022	125.022	124.030	123.046	122.069

表2 不同温度下因素喷嘴的流出系数

T/°C	C <sub>d1</sub>	C <sub>d2</sub>	C <sub>d3</sub>	C <sub>d4</sub>	C <sub>d5</sub>	C <sub>d6</sub>	C <sub>d</sub>
5	0.88894	0.88891	0.88891	0.88899	0.88901	0.88896	0.888953
10	0.89593	0.89596	0.89589	0.89591	0.89593	0.89599	0.895935
15	0.90304	0.90299	0.90303	0.90304	0.90308	0.90305	0.903038
20	0.91117	0.91115	0.91114	0.91116	0.91118	0.91118	0.911163
25	0.91937	0.91941	0.91937	0.91941	0.91936	0.91937	0.919382
30	0.92848	0.92848	0.92854	0.92847	0.92846	0.92852	0.928492
35	0.93759	0.93755	0.93762	0.93768	0.93762	0.9376	0.937610
40	0.94671	0.94677	0.94673	0.94663	0.94672	0.94672	0.946713

由图1和图2可知：流出系数随着温度升高增大，标准偏差以20℃为最低点，与20℃差值越大标准偏差越大。究其原因，音速喷嘴喉部材料为不锈钢304L，当温度变化时，喉部截面径向直径会以约  $1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的线膨胀速率增大或减小<sup>[5]</sup>，即喉部截面积与温度呈线性关系。在喉部直径变化的同时，喷嘴内部粗糙度也随之发生变化，气体流经喷嘴时的损耗能量收到影响，导致数据收敛性变差，直接反映为标准偏差S增大。

### 3.2 流出系数与被测膜式流量计温度的关系

保持音速喷嘴的温度 ( $T_V$ ) 20℃不变，为被测膜式流量计选取7个均匀温度点 ( $T_c$ )，控温精度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，每个温度点取样本数为6，按照与3.1相同的方法测量和计算流出系数  $\bar{C}_{di}$  及标准偏差S，如表3所示。

按与3.1相同的计算方法，作  $\bar{C}_{di}$  随温度T的变化曲线如图3所示，计算出  $\bar{C}_{di}$  的标准偏差S并作图，如图4所示。

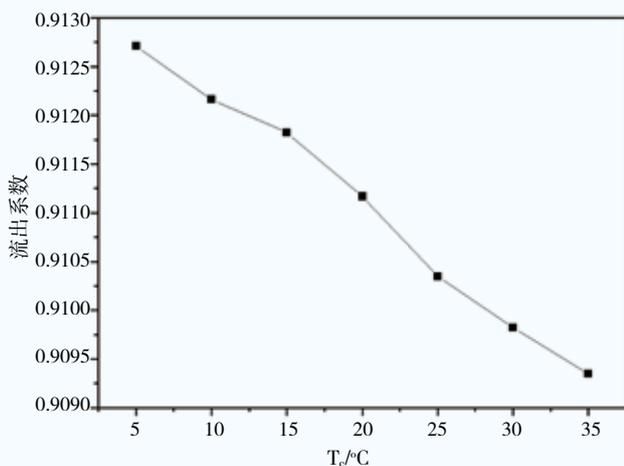


图3 流出系数与膜式表温度的关系

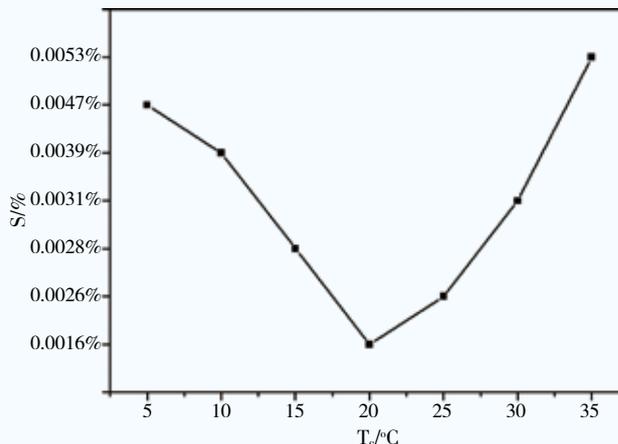


图4 标准偏差与膜式表温度的关系

由图3和图4可知：标准偏差的变化趋势与3.1相同，说明膜式表温度的改变仍影响了音速喷嘴内部粗糙度系数。流出系数与膜式表温度成反比，究其原因，音速喷嘴处温度不变，说明喷嘴喉部截面积不变，但待检膜式表温度升高或降低，会直接改变喷嘴前端输送空气的密度及流态，使之与流经喉部的气体状态不同，使能量损耗发生差异。从而影响喷嘴的实际流量。

### 3.3 流出系数与音速喷嘴温度的关系

保持被测膜式流量计的温度20℃不变，为音速喷嘴选取7个均匀温度点，控温精度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，每个温度点取样本数为6，按照与3.1相同的方法测量和计算流出系数  $\bar{C}_{di}$  及标准偏差S，如表3所示。

按与3.1相同的计算方法，作  $\bar{C}_{di}$  随温度T的变化曲线如图5所示，计算出  $\bar{C}_{di}$  的标准偏差S并作图（如图6所示）。

由图5、图6可知：流出系数与膜式表温度成正比。与3.1中环境温度改变的情况类似。温度的升高

表3 膜式流量计不同温度下因素喷嘴的流出系数

$T_V / ^{\circ}\text{C}$	$T_c / ^{\circ}\text{C}$	$C_{d1}$	$C_{d2}$	$C_{d3}$	$C_{d4}$	$C_{d5}$	$C_{d6}$	$\bar{C}_d$
20	5	0.91271	0.91275	0.91272	0.91267	0.91264	0.91278	0.912712
20	10	0.91217	0.91212	0.91213	0.91219	0.91223	0.91213	0.912162
20	15	0.91181	0.91184	0.91185	0.91186	0.91179	0.91179	0.911823
20	20	0.91117	0.91119	0.91115	0.91115	0.91117	0.91119	0.911170
20	25	0.91035	0.91039	0.91037	0.91033	0.91031	0.91035	0.910350
20	30	0.90982	0.90989	0.90980	0.90980	0.90982	0.90981	0.909823
20	35	0.90935	0.90929	0.90939	0.90939	0.90927	0.90941	0.909350

表3 音速喷嘴不同温度下因素喷嘴的流出系数

$T_v/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$	$C_{d1}$	$C_{d2}$	$C_{d3}$	$C_{d4}$	$C_{d5}$	$C_{d6}$	$\bar{C}_d$
5	20	0.88807	0.88820	0.88804	0.88801	0.88803	0.88811	0.888077
10	20	0.89330	0.89336	0.89324	0.89334	0.89334	0.89324	0.893303
15	20	0.90125	0.90121	0.90119	0.90129	0.90129	0.90127	0.901250
20	20	0.91117	0.91119	0.91115	0.91115	0.91117	0.91119	0.911170
25	20	0.92210	0.92215	0.92206	0.92208	0.92214	0.92211	0.922107
30	20	0.93030	0.93033	0.93026	0.93024	0.93036	0.93035	0.930307
35	20	0.93759	0.93756	0.93746	0.93766	0.93764	0.93763	0.937590

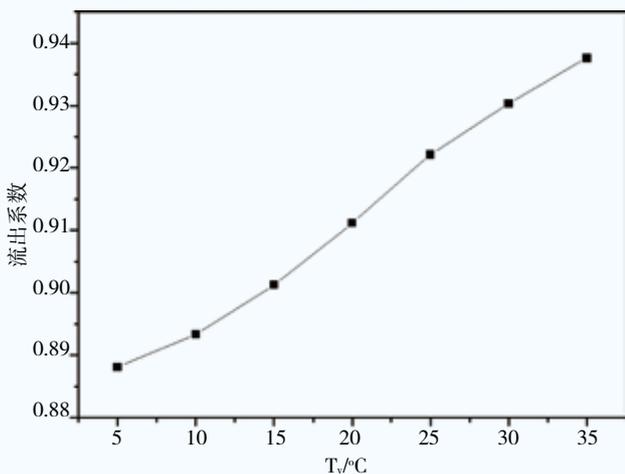


图5 流出系数与音速喷嘴温度的关系

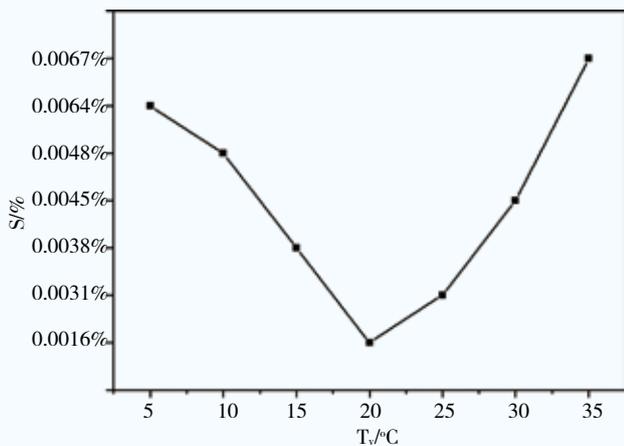


图6 标准偏差与音速喷嘴温度的关系

和降低直接改变了音速喷嘴处的喉部截面积与粗糙度,使实际流量增大,标准偏差增大。尽管膜式表处温度不变,但流经喷嘴喉部的气体状态仍发生了改变,进而影响喷嘴的实际流量。

### 3.4 变化率与温度的关系

以20 °C下的 $\bar{C}_d$ 为标准,记为 $\bar{C}_{d0}$ ,定义变化率 $\delta$ 为: $\bar{C}_d$ 相对于 $\bar{C}_{d0}$ 的变化趋势。

$$\sigma = \frac{\bar{C}_d - \bar{C}_{d0}}{\bar{C}_{d0}} \times 100\% \quad (5)$$

根据公式(5)计算不同温度下的变化率 $\delta$ 如图7、图8、图9所示。

由图可知:由于以20 °C下的 $\bar{C}_d$ 为标准,因此20 °C下的变化率均为0,与20 °C温度点偏离越大,变化率绝对值越大。对图7、图8、图9的变化率曲线作线性拟合,拟合方程为 $Y=B+Kx$ ,拟合的结果如表4所示。

$K$ 为拟合直线的斜率, $B$ 为截距, $R^2$ 为拟合度。 $R^2$ 均大于0.99,说明变化率与温度的关系近似线性, $K_a > 0$ , $K_c > 0$ ,说明变化率与音速喷嘴处的温度成正比, $K_b < 0$ ,说明变化率与待检膜式表处温度成反比。 $|K_c| > |K_a| > |K_b|$ ,说明音速喷嘴处的温度是影响流出

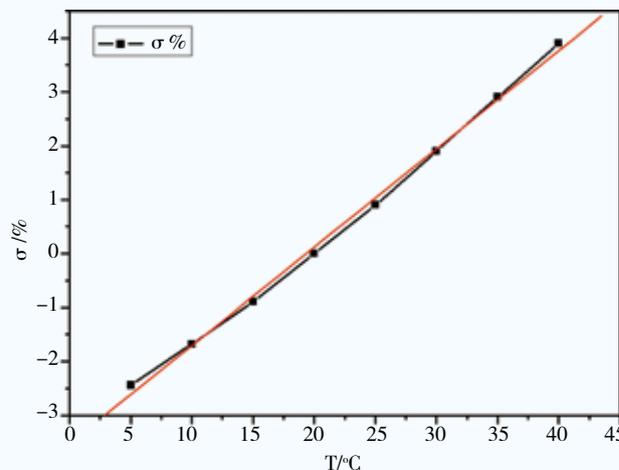


图7 T对 $\delta$ 的影响

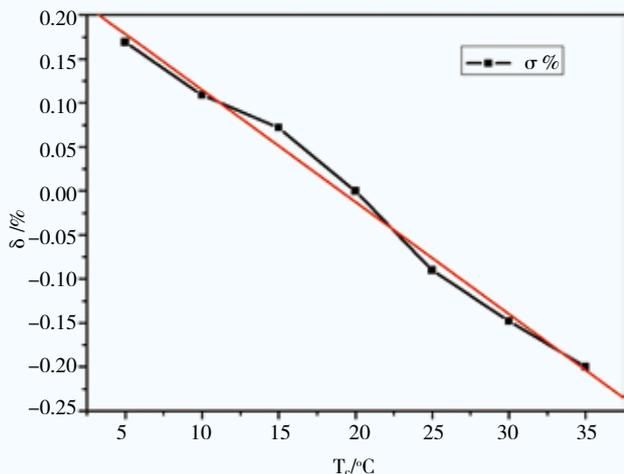


图8 T<sub>c</sub>对δ的影响

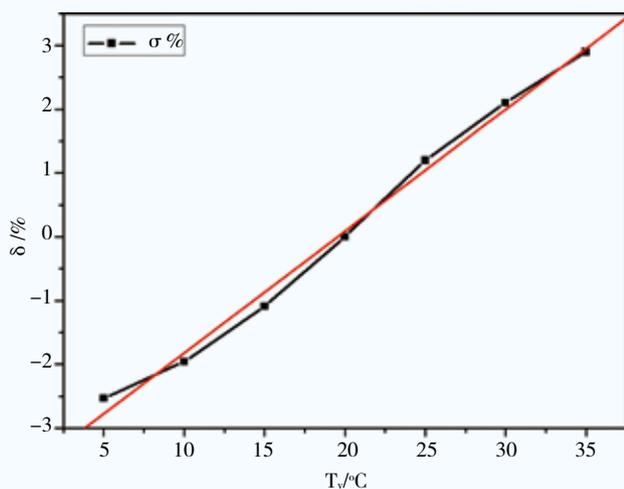


图9 T<sub>v</sub>对δ的影响

表4 变化率δ的线性拟合结果

	拟合公式	K	B	R <sup>2</sup>
a	$Y=-3.524+0.182x$	0.182	-3.524	0.99863
b	$Y=0.9134-0.0016x$	-0.0016	0.9134	0.99569
c	$Y=-3.728+0.191x$	0.191	-3.728	0.9962

系数的主要原因，若音速喷嘴与待检膜式表的温度不同，流出系数的偏差更大。

#### 4 结论

(1) 20℃为音速喷嘴的最佳使用环境温度。以

20℃为标准，温度偏离越大，标准偏差越大，数据重现性越差。

(2) 流出系数与音速喷嘴处的温度成正比，与待检测膜式表处的温度成反比。

(3) 流出系数的变化率与温度的关系近似线性，与音速喷嘴处的温度成正比，与待检膜式表处温度成反比，且音速喷嘴处的温度是影响流出系数的主要原因。

因此，温度对音速喷嘴的标准检定有非常重要的作用。在实际操作中，不仅要严格控制操作环境温度，也要严格把控喷嘴与待检表间的温差，尽量做到等温操作。

#### 参考文献

- 1 王新辉, 张晖, 孙烈鹏. 浅析空气湿度对音速喷嘴计量性能影响[J]. 石油化工自动化, 2016; 02: 66-68
- 2 成鹏, 李清廉, 张新桥等. 线性可调音速喷嘴工作特性仿真[J]. 国防科技大学学报, 2015; 06: 48-53
- 3 赵雅坤. 壁面粗糙度对临界流音速喷嘴流动特性的影响[D]. 天津大学, 2014
- 4 汪欢欢. 基于音速喷嘴的气体流量标准装置的研制[D]. 华南理工大学, 2013
- 5 孟金龙. 微小气体流量标准装置中音速喷嘴的数值模拟研究[D]. 中国计量学院, 2013
- 6 张相山, 罗艺青. 音速喷嘴气体流量标准装置应用的试验研究[J]. 中国测试, 2012; 06: 60-63
- 7 葛颖奇. 基于音速喷嘴的气体流量计自动检定系统[D]. 中国计量学院, 2012
- 8 纪建英, 陈杰. 平均值-极差控制图在音速喷嘴式气体流量标准装置测量过程中的应用[J]. 计测技术, 2010; 01: 55-57
- 9 陈宇航. 湿度对音速喷嘴流出系数影响的研究[D]. 北京化工大学, 2009
- 10 朱永宏, 师恩洁, 暴冰. 音速喷嘴气体流量标准装置校准方法的研究[J]. 计量学报, 2008; 05: 416-419
- 11 许铃, 汪斌. 音速喷嘴气体流量标准装置测量不确定度评定[J]. 中国测试技术, 2007; 03: 63-64+116
- 12 黄立中. 采用音速喷嘴的气体流量标准装置[J]. 中国测试技术, 2005; 03: 50-52