



中华人民共和国国家标准

GB/T 21188—2007/ISO 9300:2005

用临界流文丘里喷嘴测量气体流量

Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles

(ISO 9300:2005, IDT)

2007-09-12 发布

2008-05-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 术语和定义	1
3 符号	4
4 基本方程	5
4.1 状态方程	5
4.2 理想条件下的流量	5
4.3 实际条件下的流量	5
4.4 临界质量通量	5
5 适用的场合	5
6 标准临界流文丘里喷嘴	6
6.1 一般要求	6
6.2 结构	6
7 安装要求	8
7.1 总则	8
7.2 上游管线	9
7.3 上游大空间	9
7.4 下游要求	9
7.5 压力测量	9
7.6 排泄孔	10
7.7 温度测量	10
7.8 密度测量	10
7.9 计算出的气体密度	11
8 计算方法	11
8.1 质量流量	11
8.2 流出系数 C_d	11
8.3 临界流函数 C_c 和实际气体的临界流系数 C_R	12
8.4 实测压力和温度与滞止条件的换算	12
8.5 最大允许下游压力	12
9 流量测量的不确定度	13
9.1 总则	13
9.2 不确定度的实际计算	13
附录 A (规范性附录) 临界流文丘里喷嘴的流出系数	15
附录 B (规范性附录) 各种气体临界流函数 C_c 的数值表	17
附录 C (规范性附录) 天然气混合物临界质量通量的计算	24
附录 D (规范性附录) 大气空气的质量流量修正因子	28

附录 E (规范性附录) 喷嘴喉部与上游管道直径之比 $\beta > 0.25$ 的临界流喷嘴临界质量 通量的计算	29
附录 NA (资料性附录) 检验规则	32
附录 NB (资料性附录) 临界流喷嘴	34
参考文献	35

前 言

本标准等同采用 ISO 9300:2005《用临界流文丘里喷嘴测量气体流量》。

本标准等同翻译 ISO 9300:2005(英文版)。

本标准在制定时按 GB/T 1.1—2000《标准化工作导则 第1部分:标准的结构和编写规则》和 GB/T 20000.2—2001《标准化工作指南 第2部分:采用国际标准的规则》的有关规定做了如下编辑性修改:

- 删除了 ISO 9300:2005 国际标准的前言;
- 将“本国际标准”改成“本标准”;
- 将 ISO 9300:2005 国际标准中作为小数点的逗号“,”改为小数点“.”;
- 第5章中的“(见 9.5)”更正为“(见 7.5)”;
- 原文 E.2“修正因子”一节中第三小段“……(β 在 0.15~0.5 之间)”更正为“……(β 值在 0.25~0.5 之间)”;
- 本标准根据国内的具体情况,增加了附录 NA“检验规则”和附录 NB“临界流喷嘴”。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 为规范性附录,附录 NA 和附录 NB 为资料性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国工业过程测量和控制标准化技术委员会第一分技术委员会归口。

本标准负责起草单位:中国计量科学研究院。

本标准参加起草单位:国家水大流量计量站、北京市计量测试所、浙江余姚市银环流量仪表有限公司、天津市润泰自动化仪表有限公司、哈尔滨第一工具有限公司油田工具分公司。

本标准主要起草人:徐英华、王自和、王东伟。

本标准参加起草人:杨有涛、朱家顺、童复来、王耀庭。

本标准为首次发布。

用临界流文丘里喷嘴测量气体流量

1 范围

本标准规定了测量气体质量流量的临界流文丘里喷嘴(CFVN)的几何尺寸和使用方法(系统中的安装和工作条件),并给出了计算流量及其不确定度所需的资料。

本标准适用于气流在喉部加速到临界速度(等于局部音速)、且仅在喉部存在单相气体定常流的文丘里喷嘴。在临界速度下,流过文丘里喷嘴的气体质量流量是实际上游条件下可能达到的最大流量。临界流文丘里喷嘴只能在规定的喷嘴喉部对入口直径之比和喉部雷诺数的限值范围内使用。本标准所涉及的临界流文丘里喷嘴已做过大量的直接校准试验,能保证给出的临界流文丘里喷嘴流出系数在某个可预测的不确定度限值内。

本标准给出的资料适合于下述情况:临界流文丘里喷嘴的上游管线为圆形横截面的管线;或者临界流文丘里喷嘴的上游,或成组安装的一套临界流文丘里喷嘴的上游可以看成是一个大空间。这种成组配置为临界流文丘里喷嘴的并联安装提供了可能性,因此可以得到更大的流量。

对于高准确度测量,本标准论述了用于低雷诺数下的精确加工临界流文丘里喷嘴。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

2.1 压力测量

2.1.1

管壁取压口 wall pressure tapping

管壁上钻成的孔,其边缘与管道内表面平齐。

注:应使取压口中的压力为管道在这一点上的静压。

2.1.2

气体静压 static pressure of a gas

用连接在管壁取压口上的压力表所测量到的流动气体的实际压力。

注:本标准中所使用的均为绝对静压值。

2.1.3

滞止压力 stagnation pressure

流动气体以等熵过程达到静止状态时所存在的气体压力。

注:本标准中所使用的均为绝对滞止压力值。

2.2 温度测量

2.2.1

静态温度 static temperature

流动气体的实际温度。

注:本标准中所使用的均为绝对静态温度值。

2.2.2

滞止温度 stagnation temperature

流动气体以等熵过程达到静止状态时所存在的气体温度。

注:本标准中所使用的均为绝对滞止温度值。

2.3 文丘里喷嘴

2.3.1

文丘里喷嘴 Venturi nozzle

安装在系统中用于测量流量的收缩/扩散节流件。

2.3.2

普通加工文丘里喷嘴 normally machined Venturi nozzle

由车床加工并经表面抛光达到所需光滑度的文丘里喷嘴。

2.3.3

精确加工文丘里喷嘴 accurately machined Venturi nozzle

由超精密车床加工,无需抛光即可达到镜面粗糙度的文丘里喷嘴。

2.3.4

喉部 throat

文丘里喷嘴中直径最小的部分。

2.3.5

临界流文丘里喷嘴 critical flow Venturi nozzle

CFVN

喷嘴的几何形状和使用条件使其喉部流量达到临界值的文丘里喷嘴。

2.4 流量

2.4.1

质量流量 mass flow-rate

q_m

单位时间内流过文丘里喷嘴的气体质量。

注:本标准中术语“流量”始终指的是“质量流量”。

2.4.2

喉部雷诺数 throat Reynolds number

Re_{nt}

根据气体流量和喷嘴入口滞止条件下的气体动力黏度计算出的无量纲参数。

注:取滞止条件下的喉部直径作为特性尺寸参数。喉部雷诺数以下式表示:

$$Re_{nt} = \frac{4q_m}{\pi d \mu_0}$$

2.4.3

等熵指数 isentropic exponent

κ

在基本可逆绝热(等熵)变换条件下,压力的相对变化与密度的相对变化之比:

注1:等熵指数由下式给出:

$$\kappa = \frac{p}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_s = \frac{\rho c^2}{p}$$

式中:

p ——气体的绝对静压力;

ρ ——气体的密度;

c ——局部音速;

S ——表示“等熵条件下”。

注2:对于理想气体, κ 等于比热容比 γ ,并且对于单原子气体等于5/3;对于双原子气体等于7/5;对于三原子气体等于9/7等。

注3:在实际气体中,分子之间的作用力以及分子所占据的体积对气体的特性具有不可忽略的影响;在理想气体中,分子之间的作用力和分子所占据的体积可略去不计。

2.4.4

流出系数 discharge coefficient

 C_d

实际流量对无黏性气体理想流量的无量纲比值。该理想流量是在相同的上游滞止条件下按一维等熵流动而获得的。

注：该系数是对黏性和流场曲率影响的修正。对于本标准中所规定的各种喷嘴结构和安装条件，它仅是喉部雷诺数的函数。

2.4.5

临界流 critical flow

在给定上游条件下可能存在的特定文丘里喷嘴的最大流量。

注：当存在临界流时，喉部流速等于局部声速值（音速），小的压力扰动以此速度传播。

2.4.6

临界流函数 critical flow function

 C

表征文丘里喷嘴的入口与喉部之间等熵和一维流的热力学流动特性的无量纲函数。

注：它是气体特性和滞止条件的函数（见 4.2）。

2.4.7

实际气体临界流系数 real gas critical flow coefficient

 C_R

临界流函数的另一种形式，对气体混合物更为实用。

注：它与临界流函数的关系为：

$$C_R = C \cdot \sqrt{Z}$$

2.4.8

临界压力比 critical pressure ratio

 r

流经喷嘴的气体质量流量为最大值时，喷嘴喉部处静压与滞止压力之比。

注：此比值按 8.5 给出的公式计算。

2.4.9

背压比 back-pressure ratio

喷嘴出口静压与喷嘴上游滞止压力之比。

2.4.10

马赫数 Mach number

 Ma

在喷嘴上游静态条件下，流体平均轴向速度与上游取压口处的音速之比。

2.4.11

压缩系数 compressibility factor

 Z

用数字表示在给定的压力和温度条件下实际气体的性质与理想气体定律不一致的修正系数。

注：它由下式确定：

$$Z = \frac{pM}{\rho RT}$$

其中， R 是通用气体常数，等于 $8.314\ 51\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

2.5

不确定度 uncertainty

与测量结果相关，表征被测量合理赋值的离散度的参数。

3 符号

符号	说 明	量纲	SI 单位
A_2	文丘里喷嘴出口的横截面积	L^2	m^2
A_{nt}	文丘里喷嘴喉部的横截面积	L^2	m^2
$C_{d'}$	流出系数	无量纲	
C_R	实际气体一维流的临界流系数	无量纲	
C_*	实际气体一维流的临界流函数	无量纲	
$C_{*,i}$	理想气体一维等熵流的临界流函数	无量纲	
D	上游管道的直径	L	m
d	文丘里喷嘴喉部的直径	L	m
M	摩尔质量	M	$kg \cdot mol^{-1}$
Ma_1	上游取压口处的马赫数	无量纲	
p_1	喷嘴入口处气体的绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_2	喷嘴出口处气体的绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_0	喷嘴入口处气体的绝对滞止压力	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_{nt}	喷嘴喉部处气体的绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
$p_{*,i}$	理想气体一维等熵流的喷嘴喉部处气体的绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
$(p_2/p_0)_i$	理想气体一维等熵流的喷嘴出口静压对喷嘴入口滞止压力之比	无量纲	
q_m	质量流量	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
q_{mi}	非粘性气体一维等熵流的质量流量	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
R	通用气体常数	$ML^2T^{-2}\Theta^{-1}$	$J \cdot mol^{-1}K^{-1}$
Re_{nt}	喷嘴喉部雷诺数	无量纲	
r_c	喷嘴入口的曲率半径	L	m
r_*	临界压力比 p_{nt}/p_0	无量纲	
U'	相对不确定度	无量纲	
T_1	喷嘴入口处气体的绝对温度	Θ	K
T_0	喷嘴入口处气体的绝对滞止温度	Θ	K
T_{nt}	喷嘴喉部处气体的绝对静态温度	Θ	K
ν_{nt}	喉部音速;喷嘴喉部临界流速度	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
Z	压缩系数	无量纲	
β	直径比 d/D	无量纲	
γ	比热容比	无量纲	
δ	绝对不确定度	.	.
κ	等熵指数	无量纲	
μ_0	滞止条件下气体的动力黏度	$ML^{-1}T^{-1}$	$Pa \cdot s$
μ_{nt}	喷嘴喉部处气体的动力黏度	$ML^{-1}T^{-1}$	$Pa \cdot s$
ρ_0	喷嘴入口处滞止条件下的气体密度	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{nt}	喷嘴喉部的气体密度	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$
M=质量; L=长度; T=时间; Θ =温度。 ^a 与相应的量相同。			

4 基本方程

4.1 状态方程

实际气体的特性可用下式表述：

$$\frac{p}{\rho} = \left(\frac{R}{M}\right)TZ \quad \dots\dots\dots(1)$$

4.2 理想条件下的流量

要使理想临界流量存在，必须具备 3 个主要条件：

- a) 流动必须是一维的；
- b) 流动必须是等熵的；
- c) 气体必须是理想的（即 $Z=1$ 和 $\kappa=\gamma$ ）。

在这些条件下，由下式得到临界流量：

$$q_{mi} = \frac{A_{nt} C_{*i} p_0}{\sqrt{\left(\frac{R}{M}\right)T_0}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

或

$$q_{mi} = A_{nt} C_{*i} \sqrt{p_0 \rho_0} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中，

$$C_{*i} = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

4.3 实际条件下的流量

在实际条件下，临界流量的公式为：

$$q_m = \frac{A_{nt} C_{d'} C_* p_0}{\sqrt{\frac{R}{M} T_0}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

或

$$q_m = A_{nt} C_{d'} C_R \sqrt{p_0 \rho_0} \quad \dots\dots\dots(6)$$

因为

$$C_R = C_* \sqrt{Z_0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中， Z_0 为上游滞止条件下的压缩系数值：

$$Z_0 = \frac{p_0 M}{\rho_0 R T_0} \quad \dots\dots\dots(8)$$

应当注意， C_* 和 C_R 并不等于 C_{*i} ，因为气体并不是理想的。由于流动不是一维的而且由于黏性效应而存在一个边界层，所以 $C_{d'}$ 小于 1。

4.4 临界质量通量

对于理想条件下的流量，临界质量通量等于 $\frac{q_{mi}}{A_{nt}}$ 。

对于实际条件下的流量，临界质量通量等于 $\frac{q_m}{A_{nt} C_{d'}}$ 。

5 适用的场合

应对每种应用场合进行评估，以确定临界流文丘里喷嘴或某些其他装置是否最为适用。一个重要的考虑因素是流过文丘里喷嘴的流量与下游压力无关（见 7.5），但下游压力应在文丘里喷嘴可用于临界流测量的压力范围内。

其他需要考虑的因素如下：

对于临界流文丘里喷嘴，只需测量临界流文丘里喷嘴上游的气体压力和温度或密度，因为喉部条件可根据热力学因素进行计算。

对于给定的上游滞止条件，临界流文丘里喷嘴喉部中的速度为最大可能值，因此除了临界流文丘里喷嘴入口部分不应存在的旋涡以外，对其他安装影响的敏感性减为最小。

把临界流文丘里喷嘴与亚音速差压式流量计相比较，可以发现就临界流文丘里喷嘴而言，流量与喷嘴上游滞止压力成正比，并不像亚音速流量计那样是与实测的差压值的平方根成正比。

给定临界流文丘里喷嘴所能达到的最大流量范围通常是由入口压力范围所限定，该入口压力范围要高于流动成为临界状态时的入口压力。

迄今为止临界流文丘里喷嘴最为普遍的应用场合是测试、校准和流量控制。

6 标准临界流文丘里喷嘴

6.1 一般要求

6.1.1 材料

应根据预定用途采用合适的材料制造临界流文丘里喷嘴。需要考虑的因素有：

- a) 材料应能按规定条件精加工(如 6.1.2 和 6.1.3 所规定的那样)。不宜采用含有凹痕、气孔和夹有杂质的材料。
- b) 材料及其表面处理应不受预定使用气体的腐蚀。
- c) 材料的尺寸应稳定，并具有确定的可复现热膨胀特性(假如使用时的温度不同于测量喉部直径时的温度)，以便能对喉部直径作适当修正。

6.1.2 喉部和入口表面精加工

临界流文丘里喷嘴的喉部和喇叭形入口至锥形扩散段应进行光面精加工，以使普通加工和精确加工临界流文丘里喷嘴的算术平均粗糙度 R_a 分别不超过 $15 \times 10^{-6}d$ 和 $0.04 \mu\text{m}$ 。

临界流文丘里喷嘴的喉部和喇叭形入口至锥形扩散段应无污垢或其他任何污染物。

对于普通加工临界流文丘里喷嘴，允许使用喉部有直径台阶的喇叭形喉部临界流文丘里喷嘴，该直径台阶应不大于喉部直径的 10%。

6.1.3 锥形扩散段

应检验临界流文丘里喷嘴锥形扩散段的形状，以保证任何台阶、不连续性、不规则性和不同轴度都不超过该处直径的 1%。锥形扩散段的算术平均粗糙度 R_a 应不超过 $10^{-4}d$ 。

6.2 结构

6.2.1 总则

标准临界流文丘里喷嘴有两种结构，亦即喇叭形喉部文丘里喷嘴和圆筒形喉部文丘里喷嘴。精确加工文丘里喷嘴应采用喇叭形结构。

6.2.2 喇叭形喉部文丘里喷嘴

6.2.2.1 喇叭形喉部临界流文丘里喷嘴应符合图 1 的规定。

6.2.2.2 为了确定临界流文丘里喷嘴测量系统其他元件的位置，临界流文丘里喷嘴的入口平面定义为：垂直于对称轴线、在直径等于 $2.5d \pm 0.1d$ 的入口处横切的平面。

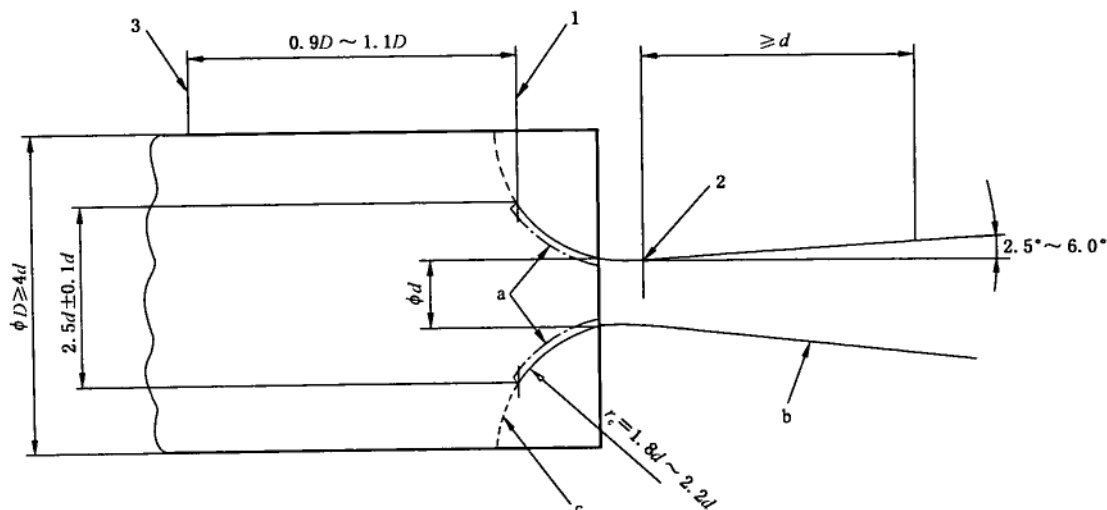
6.2.2.3 临界流文丘里喷嘴的收缩段(入口)应是一段圆环面，它从入口平面一直延伸到最小面积的横截面处(喉部)与扩散段相切。入口平面(见 6.2.2.2)上游的入口廓形，除了要求每个轴向位置所对应的内表面直径大于或等于喇叭形廓形延伸部分的直径外，无其他规定。

6.2.2.4 位于入口平面和扩散段之间的临界流文丘里喷嘴的喇叭形表面(见图 1)与圆环面形状的偏

差应不超过 $\pm 0.001d$ 。在对称轴所处平面内,该喇叭形表面的曲率半径 r_c 应为 $1.8d \sim 2.2d$ 。

6.2.2.5 临界流文丘里喷嘴下游与圆环面相切的扩散段是一个具有 $2.5^\circ \sim 6^\circ$ 半角的平截头圆锥体。扩散段的长度应不小于喉部直径。

6.2.2.6 使用按本标准制造的临界流文丘里喷嘴测量流量,其不确定度主要取决于喉部横截面积的不确定度。喇叭形喉部临界流文丘里喷嘴的喉部直径难以精确测量,尤其是小口径临界流文丘里喷嘴,因此应特别小心。



图中:

1——入口平面;

2——喇叭形表面和扩散段的结合处;

3——压力仪表的位置。

a 在此区间,普通加工和精确加工文丘里喷嘴的算术平均粗糙度 Ra 应分别不超过 $15 \times 10^{-6}d$ 和 $0.04 \mu m$,并且廓形与喇叭形状的偏差应不超过 $\pm 0.001d$ 。

b 在此区间的算术平均粗糙度 Ra 应不超过 $10^{-4}d$ 。

c 入口曲面应在此廓形外。

图 1 喇叭形喉部文丘里喷嘴

6.2.3 圆筒形喉部文丘里喷嘴

6.2.3.1 圆筒形喉部临界流文丘里喷嘴应符合图 2 的规定。

6.2.3.2 入口平面定义为:与临界流文丘里喷嘴入口廓形相切并垂直于喷嘴中心线的平面。

6.2.3.3 临界流文丘里喷嘴的收缩段(入口)应是一个 $1/4$ 圆环面,其一端与入口平面(见 6.2.3.2)相切,另一端与圆筒形喉部相切。圆筒形喉部的长度和 $1/4$ 圆环面的曲率半径 r_c 都应等于喉部直径。

6.2.3.4 临界流文丘里喷嘴的入口喇叭形表面与圆环面形状的曲面偏差应不超过 $\pm 0.001d$ 。

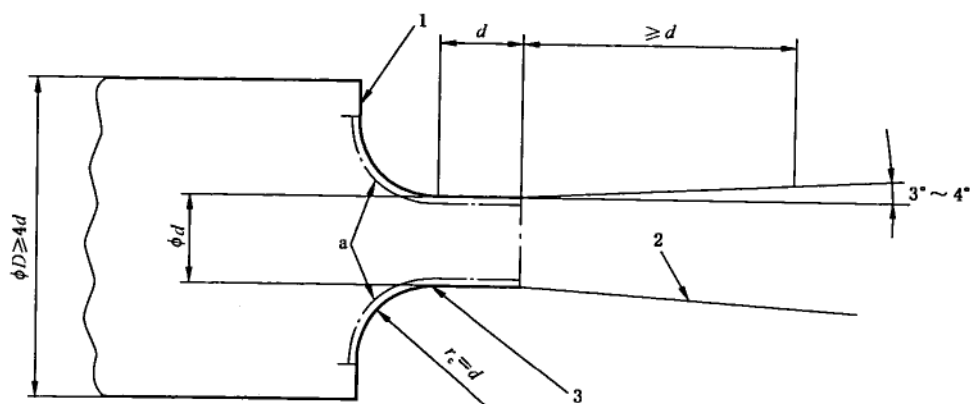
6.2.3.5 应根据圆筒形喉部出口段截面的平均直径计算流量。确定平均直径时应测量圆筒形喉部出口至少 4 个等角分布的直径。喉部长度内任何一个直径与平均直径的偏差均应不超过 $\pm 0.001d$ 。

喉部长度与喉部直径的偏差应不超过 $0.05d$ 。目检 $1/4$ 圆环面与圆筒形喉部之间的连接处应无缺陷。如果观察到连接处有缺陷,应检查整个入口表面($1/4$ 圆环面和圆筒形喉部),对称轴所处平面中的局部曲率半径决不能小于 $0.5d$ 。图 3 说明了这项要求。

入口和喉部的全部表面都应适当抛光,使算术平均粗糙度 Ra 不超过 $15 \times 10^{-6}d$ 。

圆筒形喉部和扩散段之间的连接处亦应目检而观察不到缺陷。

6.2.3.6 临界流文丘里喷嘴的扩散段由半角在 $3^\circ \sim 4^\circ$ 之间的平截头圆锥体构成。扩散段的长度应不小于喉部直径。



图中:

1——入口平面;

2——锥形扩散段内表面相对粗糙度的算术平均值 Ra 应不超过 $10^{-4}d$;

3——过渡区。

^a 在此区间,算术平均粗糙度 Ra 应不超过 $15 \times 10^{-6}d$,廓形与喇叭形和圆筒形的偏差应不超过 $\pm 0.001d$ 。

图 2 圆筒形喉部文丘里喷嘴

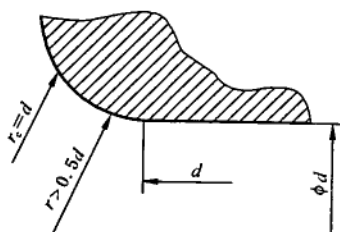


图 3 1/4 圆环面与圆筒形喉部之间过渡区的连接详图

7 安装要求

7.1 总则

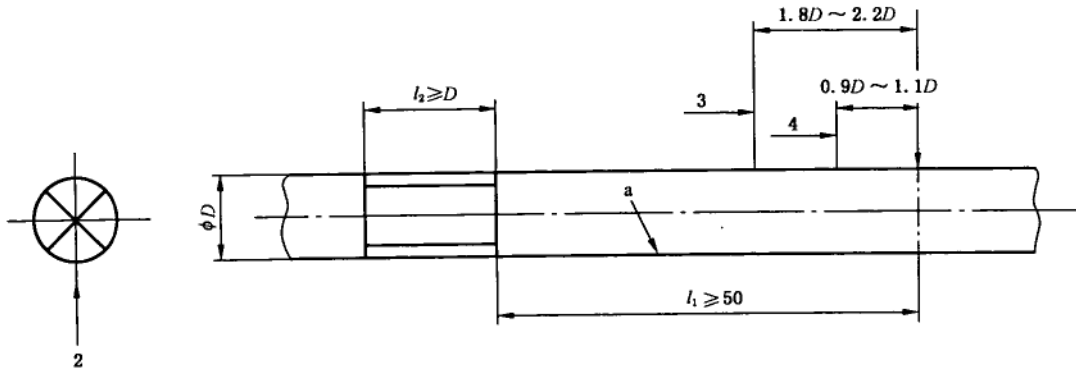
本标准适用于在下列两种情况下安装临界流文丘里喷嘴:

- 临界流文丘里喷嘴的上游管线为圆形横截面管线;
- 可以认为临界流文丘里喷嘴或成组安装的一套临界流文丘里喷嘴的上游是一个大空间。

在 a) 的情况下,临界流文丘里喷嘴应安装在符合 7.2 要求的系统中。

在 b) 的情况下,临界流文丘里喷嘴应安装在符合 7.3 要求的系统中。

在这两种情况中,临界流文丘里喷嘴的上游都不应存在旋涡。在喷嘴上游存在管线的场合下,可在喷嘴入口平面上游 $l_1 > 5D$ 距离处安装如图 4 所示的整直器,以确保无旋涡的条件。也可采用已获型式批准、具有同等或更佳性能的任何其他类型的流动调整器(见参考文献[1]和[2])。



图中:

- 1——入口平面;
- 2——叶片厚度足以防止弯曲的星形整流器;
- 3——温度检测元件的位置;
- 4——取压口的位置。

^a 此区间的表面粗糙度应不超过 $10^{-4}D$ 。

图 4 上游管道配置的安装要求

7.2 上游管线

一次装置可安装在圆形直管道中,圆形管道与临界流文丘里喷嘴中心线的同轴度应保持在 $\pm 0.02D$ 之内。临界流文丘里喷嘴上游 $3D$ 以内入口管道的圆度偏差应不超过 $0.01D$,且其算术平均粗糙度 Ra 应不超过 $10^{-4}D$ 。入口管道的直径最小应为 $4d$ ($\beta \leq 0.25$)。

当上游安装条件受到限制不能满足上述要求时,建议进行专门的测试,以了解安装条件对流量测量不确定度的影响,和(或)安装条件对首次校准确定流出系数 C_d 的影响。本标准给出了在 $\beta > 0.25$ 条件下计算质量流量的修正方法。

7.3 上游大空间

如果距一次装置轴线或一次装置入口平面(如 6.2.2.2 或 6.2.3.2 的定义) $5d$ 之内无管壁存在,则可以认为一次装置的上游是一个大空间。

在上游大空间情况下或对于大流量,可以使用多个临界流文丘里喷嘴。

7.4 下游要求

除了应不妨碍临界流文丘里喷嘴达到临界流外,对出口管道并无其他要求。

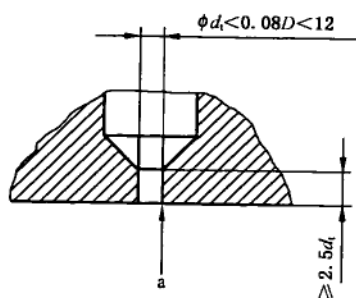
7.5 压力测量

7.5.1 当一次装置的上游采用圆形管道时,最好在距文丘里喷嘴入口平面 $0.9D \sim 1.1D$ 处的管壁取压口测量上游静压(见图 1 和图 4)。只要能证明所测得的压力确实能用于给出喷嘴入口的滞止压力,管壁取压口可设置在该位置的上游或下游。

7.5.2 当可以认为一次装置的上游是一个大空间时,上游管壁取压口最好设置在距一次装置入口平面 $10d \pm 1d$ 且垂直于入口平面的管壁上。只要能证明所测得的压力确实能用于给出喷嘴入口的滞止压力,管壁取压口可设置在该位置的上游或下游。

7.5.3 对于 7.5.1 提到的管壁取压口,其中心线应与一次装置的中心线直角相交。7.5.2 提到的管壁取压口也应符合此要求。在孔的穿透处,洞孔应为圆形,边缘应无毛刺,并呈直角或稍加倒圆,其倒圆半径应不超过管壁取压口直径的 0.1 倍。应通过目检确定管壁取压口是否符合这些要求。当采用上游管线时,管壁取压口的直径应小于 $0.08D$ 并应小于 12 mm 。管壁取压口至少 2.5 倍于取压口直径的长度应呈圆筒形(见图 5)。

单位为毫米



^a 孔的边缘应与管道内表面平齐、无毛刺和呈直角,其倒圆半径应不超过 $0.1d_t$ 。

图 5 采用上游管线时管壁取压口的构造详图

7.5.4 应测量下游压力以保证达到临界流动。该压力应由一个管壁取压口来测量,该取压口设置在距扩散段出口平面下游 0.5 倍管道直径以内。

也可以通过测量紧邻喷嘴喉部下游的台阶处的管壁压力来检查临界流。采用此方法时,需要对临界流文丘里喷嘴进行特殊加工(详见 6.1.3)。

7.5.5 在某些应用场合,无需采用管壁取压口就可以确定出口压力。例如,临界流文丘里喷嘴直接排向大气或其他已知压力的区域。在这些应用场合中,不需测量出口压力。

7.6 排泄孔

管道可配备必要的排泄孔,以排泄某些应用场合中可能集聚的冷凝水或其他杂质。在测量流量时,应无流体通过这些排泄孔。如果有排泄孔,它们应设置在喷嘴上游管壁取压口的上游。排泄孔的直径宜小于 $0.06D$ 。排泄孔到上游管壁取压口平面的轴向距离应大于 D ,而且排泄孔应设置在不同于管壁取压口轴向平面的另一轴向平面上。

测量时,上游和喉部的流动应为单相流且无冷凝,所有内表面必须保持清洁从而保持其表面光洁度。如不能保证这些要求,则该测量就不符合本标准。

7.7 温度测量

应采用设置在临界流文丘里喷嘴上游的一个或多个温度检测元件测量入口温度。当采用上游管线时,建议将这些检测元件设置在距文丘里喷嘴入口平面 $1.8D \sim 2.2D$ 的位置。检测元件的直径应不大于 $0.04D$,而且在流动方向上应不与管壁取压口排成一行。如果不能采用直径小于 $0.04D$ 的检测元件,则检测元件应安装在能证明其不会影响压力测量的位置。只要能证明所测得的温度确实能用于给出喷嘴入口滞止温度,检测元件可以设置在上游更远的位置。

如果流动气体的滞止温度与管线周围介质的温度相差 5 K 以上,在选择温度检测元件和管道绝热材料时必须特别谨慎。在这种情况下,所选的检测元件应不受辐射误差的影响,同时管道外应包有良好的隔热外套,以使流动气体与周围介质之间的热传递降至最低。如果流动气体与管壁的温度相差非常大,则要准确地测量气体温度就非常困难。

7.8 密度测量

对于某些应用场合,例如,当已知气体的摩尔质量不够准确时,可能需要直接测量喷嘴入口处的气体密度。

当采用密度计时,应将其安装在喷嘴的上游并且在上游压力和温度测量孔的上游。为了准确地测量喷嘴入口处的气体密度,应特别注意以下几点:

- 密度计的安装应不干扰压力和温度的测量。
- 当密度计安装在上游主管道之外时,应进行检查以保证密度计内的气体与主管道内的气体是相同的。
- 密度计处的压力和温度条件应尽可能接近喷嘴入口处的条件,以避免修正。如有必要,应采用

下列状态方程根据所测得的密度来计算入口密度：

$$\rho_0 = \rho_{\text{den}} \frac{p_0 T_{\text{den}} Z_{\text{den}}}{p_{\text{den}} T_0 Z_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

den——表示“与密度计有关”的脚标；

T_{den} ——应测量的温度；

p_{den} ——应通过测量与 p_0 的压力差来确定的压力；

Z_{den}/Z_0 ——按 7.9 计算。 Z_{den} 为气体在 T_{den} 、 p_{den} 状态下的压缩系数； Z_0 为气体在 T_0 、 p_0 状态下的压缩系数。

7.9 计算出的气体密度

可利用由气相色谱法确定的气体组分，结合公认的方程式，特别是 ISO 6976:1995^[3] 建议的方程式，以计算气体密度代替测量密度。这种方法的不确定度与用密度计测量的不确定度基本相同。

8 计算方法

8.1 质量流量

应采用下列方程之一计算实际质量流量：

$$q_m = \frac{A_{\text{nt}} C_d C_R p_0}{\sqrt{\left(\frac{R}{M}\right) T_0}}$$

或

$$q_m = A_{\text{nt}} C_d C_R \sqrt{p_0 \rho_0}$$

式中， A_{nt} 是通过 d 值计算出来的。

8.2 流出系数 C_d

8.2.1 流出系数主要取决于临界流文丘里喷嘴的形状，同时应注意，喉部直径较小时，喷嘴的几何形状是很难控制和测量的（见 6.2.2.6）。

8.2.2 临界流文丘里喷嘴的流出系数可由下式取得：

$$C_d = a - b Re_{\text{nt}}^{-n} \quad \dots\dots\dots (10)$$

表 1 给出各种型式临界流文丘里喷嘴可用喉部雷诺数范围内的系数 a 、 b 和 n 。

表 1 a 、 b 和 n 系数表

喇叭形喉部文丘里喷嘴	
$2.1 \times 10^4 < Re_{\text{nt}} < 3.2 \times 10^7$	$a = 0.9959$ $b = 2.720$ $n = +0.5$
精确加工喇叭形喉部文丘里喷嘴	
$2.1 \times 10^4 < Re_{\text{nt}} < 1.4 \times 10^6$	$a = 0.9985$ $b = 3.412$ $n = +0.5$
圆筒形喉部文丘里喷嘴	
$3.5 \times 10^5 < Re_{\text{nt}} < 1.1 \times 10^7$	$a = 0.9976$ $b = 0.1388$ $n = +0.2$

8.2.3 对于喇叭形喉部文丘里喷嘴和圆筒形喉部文丘里喷嘴，根据公式(10)所得到的流出系数其相对不确定度在 95% 置信水平下为 0.3%。对于精确加工喇叭形喉部文丘里喷嘴，其流出系数的相对不确

定度在 95% 置信水平下为 0.2%。

流出系数的数值见附录 A。

8.3 临界流函数 C_c 和实际气体的临界流系数 C_R

用于计算气体质量流量的 C_c 值,可采用任何一种可证明其准确度的方法来计算。

附录 B 给出了各种气体的 C_c 值。从附录 B 取得的 C_c ,其相对不确定度在 95% 置信水平下为 0.1%。

有一种计算 C_c 和天然气 C_R 的方法是用 AGA8 号报告(1992)^[4]作为状态方程。这种方法可确保 C_c 的相对不确定度在 95% 置信水平下为 0.05%。另外,也可采用不确定度与此相当的其他任何状态方程。

附录 C 给出了计算天然气混合物 C_c 的方法,这种方法是通过计算临界质量通量进行计算的。根据附录 C 取得的临界质量通量 $q_m/(A_{nt}C_d)$ 的相对不确定度在 95% 置信水平下为 0.1%。

8.4 实测压力和温度与滞止条件的换算

可由下式确定入口滞止压力 p_0 :

$$\frac{p_0}{p_1} = \left[1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)Ma_1^2 \right]^{\kappa/(\kappa-1)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

可由下式确定入口滞止温度 T_0 :

$$\frac{T_0}{T_1} = 1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)Ma_1^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

只要 d/D 之比小于或等于 0.25 (见 7.2),假定测量温度等于滞止温度所带来的误差可以忽略不计。

8.5 最大允许下游压力

对于喉部雷诺数大于 2×10^5 并且出口圆锥长度大于 d 的临界流文丘里喷嘴,最大允许下游压力由下式确定:

$$\left(\frac{p_2}{p_0} \right)_{\max} = 0.8 \left[\left(\frac{p_2}{p_0} \right)_i - r_* \right] + r_* \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$$r_* = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\kappa/(\kappa-1)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

应根据适当的状态方程来确定 κ 。

$(p_2/p_0)_i$ 值是作为扩散段面积比的函数按等熵理想气体关系来确定的。 $(p_2/p_0)_{\max}$ 值可按图 6 来确定。只要能证明流动是临界流,可以采用比图示背压比更高的背压比。延长锥体的长度,使出口面积大于 4 倍喉部面积,也就是半角为 4° 的锥体其扩散段长度超过 7 倍直径,不会显著影响压力比 $(p_2/p_0)_{\max}$ 。

使用非常仔细加工的喉部和扩散段可得到 0.95 的压力比。

对于喉部雷诺数小于 2×10^5 的临界流文丘里喷嘴,建议用户保持 0.25 的背压比,或者对临界流文丘里喷嘴进行一次简单的非阻塞测试。^[5]

图 6 适用于喉部雷诺数大于 2×10^5 的临界流文丘里喷嘴。

面积比 A_2/A_{nt} 与临界流文丘里喷嘴尺寸的关系由下列公式确定:

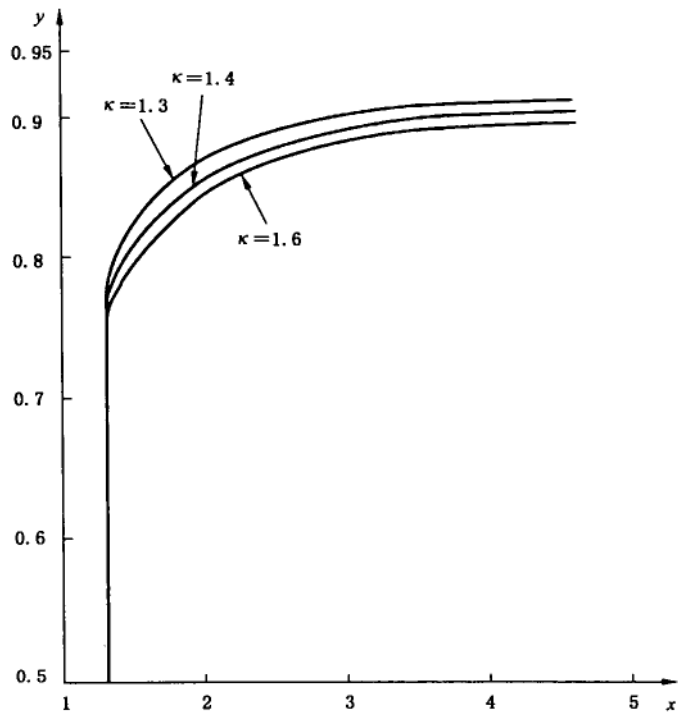
——对于喇叭形喉部文丘里喷嘴:

$$\frac{A_2}{A_{nt}} = \left[\frac{2l \tan \theta}{d} + \frac{2r_c}{d}(1 - \cos \theta) + 1 \right]^2$$

——对于圆筒形喉部文丘里喷嘴:

$$\frac{A_2}{A_{nt}} = \left(\frac{2l \tan \theta}{d} + 1 \right)^2$$

式中：
 l ——扩散段长度；
 θ ——扩散段的半角。



图中：
 x ——扩散锥体面积比 A_2/A_{nt} ；
 y ——最大允许背压比 $(p_2/p_0)_{max}$ 。

图 6 临界流文丘里喷嘴的最大允许背压比

9 流量测量的不确定度

9.1 总则

- 9.1.1 有关流量测量不确定度的说明由 ISO 5168^[6] 给出。
- 9.1.2 凡是声称符合本标准的测量都应计算流量测量的不确定度,并给出流量测量不确定度的报告。
- 9.1.3 可用绝对不确定度或相对不确定度来表达不确定度,并且以如下形式之一表示流量测量结果：
- 流量 = $q_m \pm \delta q_m$ ；
 - 流量 = $q_m [1 \pm U'(q_m)]$ ；
 - 流量 = q_m 在 $[100U'(q_m)]\%$ 范围内。

其中绝对不确定度 δq_m 的量纲应与 q_m 相同,而相对不确定度 $U'(q_m) = \delta q_m / q_m$ 是无量纲的。

9.1.4 流量测量的不确定度相当于两倍标准偏差。就标准偏差而言,不确定度是通过组合计算流量时采用的各个单独变量的不确定度分量后获得的——假定这些单独变量的不确定度分量较小、为数众多且互不相关。对于某台测量仪表和某次测试所使用的系数,虽然其中一些不确定度实际上是系统误差(只知道它们的最大绝对估计值),但允许将他们当作随机不确定度进行组合。

9.2 不确定度的实际计算

9.2.1 质量流量 q_m 的基本计算公式为：

$$q_m = \frac{A_{nt} C_d' C \cdot p_0}{\sqrt{\left(\frac{R}{M}\right) T_0}}$$

或

$$q_m = A_{nt} C_d C_R \sqrt{p_0 \rho_0}$$

事实上,上述公式右边的各个变量并非是独立的,所以直接从这些变量的不确定度计算 q_m 的不确定度并非绝对正确(例如, C_d 和 C_R 是 p_0 和 T_0 的函数, C_d 是 d 、 μ_0 和 q_m 的函数)。

然而,对大多数实用目的来说,可以假定方程式右边各项的不确定度是互不相关的。

9.2.2 计算质量流量 q_m 相对不确定度的实用公式为:

$$U'(q_m) = \sqrt{U'^2(C_d) + U'^2(C_R) + U'^2(A_{nt}) + U'^2(p_0) + \frac{1}{4}U'^2(M) + \frac{1}{4}U'^2(T_0)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

或

$$U'(q_m) = \sqrt{U'^2(C_d) + U'^2(C_R) + U'^2(A_{nt}) + \frac{1}{4}U'^2(\rho_0) + \frac{1}{4}U'^2(p_0)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

当入口气体密度不是直接测量而是由公式(9)计算得出时, ρ_0 的不确定度由下式计算:

$$U'(\rho_0) = \left\{ \begin{aligned} &U'^2(\rho_{nt}) + \left[1 - \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_{nt} \left(\frac{p_{nt}}{Z_{nt}} \right) \right]^2 U'^2(p_{nt}) \\ &+ \left[1 - \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_0 \left(\frac{p_0}{Z_0} \right) \right]^2 U'^2(p_0) \\ &+ \left[1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_0 \left(\frac{T_0}{Z_0} \right) \right]^2 U'^2(T_0) \\ &+ \left[1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_{nt} \left(\frac{T_{nt}}{Z_{nt}} \right) \right]^2 U'^2(T_{nt}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

此式常简化成:

$$U'(\rho_0) = \sqrt{U'^2(\rho_{nt}) + U'^2(p_{nt}) + U'^2(p_0) + U'^2(T_0) + U'^2(T_{nt})} \quad \dots\dots\dots(18)$$

附录 A

(规范性附录)

临界流文丘里喷嘴的流出系数

表 A.1 给出了喇叭形喉部文丘里喷嘴不同喉部雷诺数下的流出系数。

表 A.1 喇叭形喉部文丘里喷嘴的流出系数

雷诺数 Re_{nt}	流出系数 C_d
2.1×10^4	0.977 1
3×10^4	0.980 2
5×10^4	0.983 7
7×10^4	0.985 6
1×10^5	0.987 3
2×10^5	0.989 8
3×10^5	0.990 9
5×10^5	0.992 1
7×10^5	0.992 6
1×10^6	0.993 2
3×10^6	0.994 3
7×10^6	0.994 9
1×10^7	0.995 0
3.2×10^7	0.995 4

表 A.2 给出了精确加工喇叭形喉部文丘里喷嘴不同喉部雷诺数下的流出系数。

表 A.2 精确加工喇叭形喉部文丘里喷嘴的流出系数

雷诺数 Re_{nt}	流出系数 C_d
2.1×10^4	0.975 0
3×10^4	0.978 8
5×10^4	0.983 2
7×10^4	0.985 6
1×10^5	0.987 7
2×10^5	0.990 9
3×10^5	0.992 3
5×10^5	0.993 7
7×10^5	0.994 4
1.4×10^6	0.995 6

表 A.3 给出了圆筒形喉部文丘里喷嘴不同喉部雷诺数下的流出系数。

表 A.3 圆筒形喉部文丘里喷嘴的流出系数

雷诺数 Re_{at}	流出系数 C_d'
3.5×10^5	0.989 8
5×10^5	0.990 9
7×10^5	0.992 1
1×10^6	0.992 6
3×10^6	0.993 2
7×10^6	0.994 3
1.1×10^7	0.995 4

附录 B (规范性附录)

各种气体临界流函数 C_* 的数值表

B.1 总则

本附录提供了计算几种纯气体和干燥空气临界流函数所需的资料。为了能够使用最新的参考级状态方程,前一版 ISO 9300 中的数值能够更新的都做了更新,没有做过新的研究工作的资料都保持不变。对于某些气体,获得 C_* 值的方法有两种:一种是数值表,另一种是经验方程。本附录给出的所有资料都可追溯到相应编号的参考文献。

B.2 数值表

表 B.1、表 B.3、表 B.5、表 B.7、表 B.9、表 B.10 和表 B.11 分别列出了氮、氩、不含 CO_2 的干燥空气、甲烷、二氧化碳、氧气和蒸汽的 C_* 值。这些值都是以每一种气体的现有最佳热力学数据为依据。温度(K)和压力(MPa)是按滞止值而取的。

B.3 经验方程

为了精确地表示 C_* 的数值而无需进行内插,已导出一个经验方程,它适用于除二氧化碳、氧气和蒸汽以外的其余气体^[7]。该方程适用于限定的温度范围。该方程如下式所示:

$$C_* = \sum_i a_i \pi^{b_i} \tau^{c_i} \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

$$\text{式中: } \pi = \frac{p_0}{p_c}, \tau = \frac{T_0}{T_c}$$

在各种气体的相关数值表下分别给出了此方程的系数和相应的临界参数。在临界流计算中,使用此方程不会引入任何明显的附加不确定度。在表下给出的适用温度范围内,推荐使用此方程,而不要查数值表进行内插。

B.4 大气空气

表 B.5 给出的干空气的 C_* 值(或者利用表 B.6 给出的干空气的系数,用方程 B.1 计算出的 C_* 值)只对不含 CO_2 的干空气才有效。当使用喷嘴测量未经干燥的大气空气时,其质量流量会受到不可忽略的影响,在这种情况下,用户宜使用附录 D 给出的质量流量修正因子。

B.5 喷嘴喉部与管道内径之比 β

本附录提供的数值仅适用于 $\beta < 0.25$ 的情况。如果不能满足这一条件,上游测量点会有一个虽小却不可忽略的气体流速。在这种情况下,用户宜使用附录 E 给出的质量流量修正因子。

B.6 C_* 值和方程(B.1)的系数

氮气的 C_* 值见表 B.1,方程(B.1)的系数见表 B.2。

表 B.1 C_i 值(氮气)

T_0/K	p_0/MPa										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.685 61	0.703 67	0.724 97	0.748 45	0.773 43	0.798 56	0.822 04	0.842 30	0.858 42	0.870 23	0.878 09
220	0.685 38	0.698 67	0.713 60	0.729 28	0.745 30	0.761 09	0.775 99	0.789 38	0.800 81	0.810 06	0.817 10
240	0.685 22	0.695 21	0.706 08	0.717 14	0.728 16	0.738 84	0.748 89	0.758 03	0.766 04	0.772 80	0.778 25
260	0.685 10	0.692 72	0.700 83	0.708 90	0.716 79	0.724 34	0.731 40	0.737 82	0.743 52	0.748 40	0.752 44
280	0.685 00	0.690 88	0.697 02	0.703 03	0.708 82	0.714 30	0.719 38	0.723 99	0.728 08	0.731 60	0.734 55
300	0.684 92	0.689 48	0.694 17	0.698 70	0.703 00	0.707 03	0.710 74	0.714 08	0.717 03	0.719 56	0.721 68
320	0.684 85	0.688 39	0.691 98	0.695 40	0.698 62	0.701 60	0.704 31	0.706 73	0.708 85	0.710 65	0.712 13
340	0.684 78	0.687 52	0.690 26	0.692 85	0.695 24	0.697 44	0.699 41	0.701 14	0.702 63	0.703 87	0.704 86
360	0.684 70	0.686 81	0.688 89	0.690 82	0.692 58	0.694 17	0.695 58	0.696 79	0.697 80	0.698 61	0.699 22
380	0.684 62	0.686 21	0.687 76	0.689 18	0.690 45	0.691 57	0.692 53	0.693 33	0.693 97	0.694 44	0.694 75
400	0.684 52	0.685 70	0.686 82	0.687 83	0.688 71	0.689 45	0.690 07	0.690 54	0.690 88	0.691 09	0.691 16
420	0.684 41	0.685 25	0.686 03	0.686 70	0.687 26	0.687 71	0.688 04	0.688 26	0.688 36	0.688 35	0.688 24
440	0.684 28	0.684 84	0.685 33	0.685 73	0.686 04	0.686 24	0.686 35	0.686 36	0.686 27	0.686 09	0.685 82
460	0.684 13	0.684 45	0.684 71	0.684 89	0.684 98	0.684 99	0.684 91	0.684 75	0.684 51	0.684 19	0.683 79
480	0.683 95	0.684 09	0.684 15	0.684 15	0.684 07	0.683 91	0.683 68	0.683 38	0.683 01	0.682 58	0.682 07
500	0.683 76	0.683 73	0.683 64	0.683 48	0.683 25	0.682 96	0.682 61	0.682 20	0.681 72	0.681 19	0.680 60
520	0.683 55	0.683 38	0.683 15	0.682 86	0.682 52	0.682 12	0.681 66	0.681 15	0.680 59	0.679 98	0.679 32
540	0.683 31	0.683 03	0.682 69	0.682 29	0.681 85	0.681 35	0.680 81	0.680 22	0.679 59	0.678 92	0.678 20
560	0.683 05	0.682 68	0.682 24	0.681 75	0.681 22	0.680 65	0.680 04	0.679 39	0.678 70	0.677 97	0.677 21
580	0.682 78	0.682 32	0.681 80	0.681 24	0.680 64	0.680 01	0.679 34	0.678 63	0.677 89	0.677 12	0.676 32
600	0.682 49	0.681 96	0.681 38	0.680 75	0.680 10	0.679 41	0.678 68	0.677 93	0.677 15	0.676 35	0.675 51

表 B.2 方程(B.1)的系数(氮气)

i	a_i	b_i	c_i
1	$5.205\ 142\ 20 \times 10^{-3}$	0	-4
2	$6.814\ 027\ 97 \times 10^{-1}$	0	0
3	$2.377\ 461\ 61 \times 10^{-3}$	0	1
4	$-4.519\ 510\ 40 \times 10^{-4}$	0	2
5	$-4.519\ 510\ 40 \times 10^{-1}$	1	-7
6	$1.499\ 853\ 26 \times 10^{-1}$	1	-3
7	$-2.290\ 164\ 23 \times 10^{-3}$	1	0
8	$3.299\ 637\ 65 \times 10^{-8}$	1	5
9	$-2.026\ 516\ 12 \times 10^{-3}$	1.5	-1
10	$3.024\ 106\ 16 \times 10^{-4}$	1.5	0
11	$2.837\ 231\ 67 \times 10^{-1}$	2.5	-8
12	$-1.129\ 149\ 85 \times 10^{-1}$	3	-8
13	$-2.531\ 933\ 90 \times 10^{-3}$	3	-4
14	$2.222\ 006\ 17 \times 10^{-5}$	3.5	-2
15	$1.190\ 308\ 45 \times 10^{-3}$	4	-6
临界参数: $p_c = 3.395\ 8\ \text{MPa}$; $T_c = 126.192\ \text{K}$. 对于氮气,压力在 20 MPa 以下、温度在 250 K~600 K 范围内时,方程(B.1)有效。见[7]和[8]。			

氩气的 C_c 值见表 B.3, 方程(B.1)的系数见表 B.4。

表 B.3 C_c 值(氩气)

T_0/K	p_0/MPa										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
220	0.727 19	0.747 57	0.771 78	0.799 09	0.829 51	0.862 53	0.896 82	0.930 35	0.960 92	0.986 87	1.007 46
240	0.726 98	0.742 75	0.760 74	0.780 16	0.800 86	0.822 48	0.844 48	0.866 12	0.886 59	0.905 15	0.921 29
260	0.726 82	0.739 26	0.753 08	0.767 56	0.782 56	0.797 87	0.813 20	0.828 21	0.842 53	0.855 83	0.867 83
280	0.726 70	0.736 67	0.747 52	0.758 66	0.769 98	0.781 35	0.792 61	0.803 55	0.814 01	0.823 82	0.832 81
300	0.726 60	0.734 69	0.743 35	0.752 11	0.760 90	0.769 61	0.778 16	0.786 43	0.794 32	0.801 74	0.808 60
320	0.726 53	0.733 14	0.740 15	0.747 15	0.754 09	0.760 92	0.767 57	0.773 97	0.780 06	0.785 79	0.791 11
340	0.726 47	0.731 92	0.737 64	0.743 30	0.748 86	0.754 30	0.759 55	0.764 59	0.769 37	0.773 87	0.778 04
360	0.726 42	0.730 94	0.735 63	0.740 25	0.744 76	0.749 13	0.753 33	0.757 34	0.761 14	0.764 70	0.768 01
380	0.726 38	0.730 14	0.734 02	0.737 80	0.741 48	0.745 02	0.748 41	0.751 63	0.754 67	0.757 51	0.760 14
400	0.726 35	0.729 48	0.732 69	0.735 81	0.738 82	0.741 70	0.744 45	0.747 04	0.749 48	0.751 76	0.753 85
420	0.726 32	0.728 93	0.731 60	0.734 17	0.736 64	0.738 99	0.741 22	0.743 31	0.745 27	0.747 09	0.748 76
440	0.726 30	0.728 48	0.730 69	0.732 81	0.734 83	0.736 74	0.738 55	0.740 24	0.741 81	0.743 26	0.744 59
460	0.726 28	0.728 09	0.729 92	0.731 66	0.733 32	0.734 88	0.736 33	0.737 69	0.738 94	0.740 09	0.741 12
480	0.726 27	0.727 77	0.729 27	0.730 70	0.732 04	0.733 30	0.734 47	0.735 55	0.736 54	0.737 43	0.738 23
500	0.726 25	0.727 49	0.728 72	0.729 88	0.730 97	0.731 97	0.732 90	0.733 74	0.734 51	0.735 19	0.735 79
520	0.726 24	0.727 25	0.728 25	0.729 18	0.730 04	0.730 84	0.731 56	0.732 21	0.732 79	0.733 29	0.733 72
540	0.726 23	0.727 04	0.727 84	0.728 58	0.729 25	0.729 87	0.730 41	0.730 89	0.731 31	0.731 67	0.731 96
560	0.726 22	0.726 87	0.727 49	0.728 06	0.728 57	0.729 03	0.729 43	0.729 77	0.730 05	0.730 27	0.730 44
580	0.726 21	0.726 71	0.727 19	0.727 61	0.727 99	0.728 31	0.728 57	0.728 79	0.728 96	0.729 07	0.729 13
600	0.726 21	0.726 58	0.726 92	0.727 22	0.727 47	0.727 68	0.727 84	0.727 95	0.728 01	0.728 03	0.728 00

表 B.4 方程(B.1)的系数(氩气)

i	a_i	b_i	c_i
1	$7.261\ 844\ 00 \times 10^{-1}$	0	0
2	$-1.173\ 389\ 76 \times 10^{-1}$	1	-4
3	$2.334\ 785\ 17 \times 10^{-1}$	1	-3
4	$-2.250\ 904\ 86 \times 10^{-3}$	1	0
5	$3.571\ 311\ 67 \times 10^{-2}$	1.5	-4
6	$9.236\ 691\ 04 \times 10^{-2}$	2	-9
7	$-7.882\ 951\ 14 \times 10^{-3}$	2	-3
8	$-4.050\ 612\ 00 \times 10^{-3}$	2	-2
9	$9.893\ 033\ 93 \times 10^{-5}$	2	0
10	$-1.502\ 565\ 89 \times 10^{-1}$	2.5	-8
11	$3.551\ 149\ 94 \times 10^{-1}$	3	-8
12	$1.400\ 857\ 98 \times 10^{-2}$	3	-4
13	$-1.511\ 223\ 06 \times 10^{-1}$	3.5	-8
14	$-2.569\ 959\ 78 \times 10^{-2}$	3.5	-5
15	$1.570\ 106\ 43 \times 10^{-2}$	4	-6
临界参数: $p_c = 4.863\ MPa$; $T_c = 150.687\ K$. 对于氩气, 压力在 20 MPa 以下, 温度在 250 K~600 K 范围内时, 方程(B.1)有效。见[7]和[9]。			

干空气的 C 值由表 B.5 给出, 方程(B.1)的系数由表 B.6 给出。

表 B.5 C 值(干空气)

T_0/K	p_0/MPa										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.685 90	0.705 14	0.728 11	0.754 14	0.782 77	0.812 51	0.841 06	0.866 13	0.886 30	0.901 24	0.911 32
220	0.685 66	0.699 86	0.715 94	0.733 15	0.751 19	0.769 46	0.787 13	0.803 37	0.817 52	0.829 20	0.838 33
240	0.685 48	0.696 22	0.707 95	0.720 05	0.732 36	0.744 59	0.756 36	0.767 32	0.777 16	0.785 65	0.792 71
260	0.685 34	0.693 60	0.702 38	0.711 22	0.720 02	0.728 63	0.736 88	0.744 57	0.751 55	0.757 70	0.762 96
280	0.685 21	0.691 64	0.698 34	0.704 95	0.711 43	0.717 69	0.723 64	0.729 18	0.734 23	0.738 72	0.742 61
300	0.685 09	0.690 13	0.695 29	0.700 32	0.705 17	0.709 81	0.714 19	0.718 25	0.721 94	0.725 24	0.728 10
320	0.684 97	0.688 93	0.692 94	0.696 79	0.700 46	0.703 93	0.707 18	0.710 18	0.712 89	0.715 31	0.717 40
340	0.684 85	0.687 96	0.691 08	0.694 03	0.696 81	0.699 42	0.701 84	0.704 04	0.706 03	0.707 78	0.709 29
360	0.684 71	0.687 15	0.689 57	0.691 83	0.693 93	0.695 87	0.697 66	0.699 27	0.700 70	0.701 94	0.702 99
380	0.684 55	0.686 46	0.688 31	0.690 02	0.691 59	0.693 03	0.694 32	0.695 46	0.696 46	0.697 31	0.698 00
400	0.684 38	0.685 85	0.687 25	0.688 52	0.689 67	0.690 70	0.691 60	0.692 38	0.693 04	0.693 57	0.693 98
420	0.684 19	0.685 29	0.686 33	0.687 25	0.688 06	0.688 76	0.689 35	0.689 84	0.690 23	0.690 51	0.690 69
440	0.683 97	0.684 78	0.685 52	0.686 15	0.686 68	0.687 12	0.687 46	0.687 72	0.687 89	0.687 97	0.687 96
460	0.683 74	0.684 30	0.684 79	0.685 18	0.685 49	0.685 71	0.685 85	0.685 91	0.685 90	0.685 82	0.685 66
480	0.683 49	0.683 84	0.684 12	0.684 32	0.684 43	0.684 48	0.684 45	0.684 36	0.684 21	0.683 99	0.683 70
500	0.683 22	0.683 39	0.683 50	0.683 53	0.683 49	0.683 39	0.683 23	0.683 01	0.682 73	0.682 40	0.682 02
520	0.682 93	0.682 96	0.682 92	0.682 81	0.682 65	0.682 42	0.682 15	0.681 82	0.681 44	0.681 02	0.680 55
540	0.682 62	0.682 53	0.682 37	0.682 15	0.681 87	0.681 54	0.681 17	0.680 76	0.680 30	0.679 80	0.679 26
560	0.682 30	0.682 10	0.681 84	0.681 52	0.681 15	0.680 74	0.680 29	0.679 80	0.679 27	0.678 71	0.678 11
580	0.681 97	0.681 68	0.681 33	0.680 93	0.680 49	0.680 00	0.679 48	0.678 93	0.678 35	0.677 73	0.677 09
600	0.681 63	0.681 27	0.680 84	0.680 37	0.679 86	0.679 32	0.678 74	0.678 14	0.677 51	0.676 85	0.676 16

表 B.6 方程(B.1)的系数(干空气)

i	a_i	b_i	c_i
1	$1.967\ 947\ 91 \times 10^{-2}$	0	-3
2	$-2.774\ 414\ 35 \times 10^{-2}$	0	-1
3	$7.031\ 906\ 83 \times 10^{-1}$	0	0
4	$-3.448\ 411\ 43 \times 10^{-3}$	0	1
5	$-1.135\ 939\ 77 \times 10^{-1}$	1	-7
6	$1.507\ 325\ 95 \times 10^{-1}$	1	-3
7	$-2.403\ 454\ 97 \times 10^{-3}$	1	0
8	$1.224\ 631\ 76 \times 10^{-6}$	1	3
9	$-3.064\ 388\ 30 \times 10^{-3}$	2	-2
10	$2.116\ 285\ 54 \times 10^{-1}$	2.5	-8
11	$5.128\ 802\ 07 \times 10^{-5}$	2.5	0
12	$-1.666\ 687\ 29 \times 10^{-6}$	3	1
13	$-6.554\ 052\ 14 \times 10^{-1}$	3.5	-8
14	$1.390\ 831\ 40 \times 10^{-2}$	4	-8

临界参数:

$p_c = 3.786\ \text{MPa}$;

$T_c = 132.530\ 6\ \text{K}$ 。

对于干空气, 压力在 20 MPa 以下、温度在 250 K~600 K 范围内时, 方程(B.1)有效。见[7]和[10]。

甲烷的 C_i 值由表 B.7 给出, 方程(B.1)的系数由表 B.8 给出。

表 B.7 C_i 值(甲烷)

T_0/K	p_0/MPa										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
220	0.674 04	0.707 10	0.757 33	0.840 96	0.992 20	1.163 38	—	—	—	—	—
240	0.673 23	0.697 96	0.731 18	0.775 54	0.835 85	0.912 11	0.989 36	1.049 30	1.088 02	1.109 75	1.119 53
260	0.672 29	0.691 35	0.715 15	0.743 81	0.778 22	0.818 18	0.861 09	0.902 06	0.936 53	0.962 60	0.980 60
280	0.671 19	0.686 19	0.704 03	0.724 26	0.747 03	0.772 03	0.798 39	0.824 59	0.848 87	0.869 83	0.886 78
300	0.669 92	0.681 89	0.695 66	0.710 68	0.726 91	0.744 13	0.761 92	0.779 64	0.796 56	0.812 00	0.825 46
320	0.668 50	0.678 15	0.688 98	0.700 49	0.712 59	0.725 13	0.737 88	0.750 51	0.762 68	0.774 03	0.784 30
340	0.666 96	0.674 80	0.683 44	0.692 43	0.701 72	0.711 18	0.720 67	0.730 02	0.739 04	0.747 54	0.755 36
360	0.665 32	0.671 73	0.678 69	0.685 82	0.693 08	0.700 39	0.707 64	0.714 75	0.721 59	0.728 06	0.734 06
380	0.663 63	0.668 89	0.674 54	0.680 25	0.686 00	0.691 73	0.697 37	0.702 87	0.708 15	0.713 14	0.717 79
400	0.661 93	0.666 26	0.670 85	0.675 46	0.680 05	0.684 59	0.689 03	0.693 33	0.697 45	0.701 34	0.704 97
420	0.660 25	0.663 81	0.667 56	0.671 29	0.674 97	0.678 59	0.682 11	0.685 50	0.688 73	0.691 78	0.694 63
440	0.658 60	0.661 53	0.664 59	0.667 61	0.670 58	0.673 47	0.676 27	0.678 95	0.681 49	0.683 89	0.686 11
460	0.657 00	0.659 40	0.661 90	0.664 35	0.666 73	0.669 05	0.671 27	0.673 39	0.675 39	0.677 27	0.679 00
480	0.655 47	0.657 43	0.659 46	0.661 44	0.663 35	0.665 19	0.666 95	0.668 62	0.670 18	0.671 64	0.672 98
500	0.654 01	0.655 61	0.657 24	0.658 82	0.660 35	0.661 80	0.663 18	0.664 49	0.665 70	0.666 82	0.667 84
520	0.652 62	0.653 91	0.655 21	0.656 47	0.657 67	0.658 81	0.659 88	0.660 88	0.661 80	0.662 64	0.663 39
540	0.651 31	0.652 33	0.653 36	0.654 34	0.655 27	0.656 14	0.656 96	0.657 70	0.658 39	0.659 00	0.659 53
560	0.650 07	0.650 87	0.651 66	0.652 41	0.653 11	0.653 76	0.654 36	0.654 90	0.655 38	0.655 80	0.656 15
580	0.648 91	0.649 51	0.650 10	0.650 66	0.651 16	0.651 63	0.652 04	0.652 40	0.652 71	0.652 97	0.653 18
600	0.647 80	0.648 24	0.648 66	0.649 05	0.649 39	0.649 70	0.649 96	0.650 17	0.650 34	0.650 46	0.650 54

表 B.8 方程(B.1)的系数(甲烷)

i	a_i	b_i	c_i
1	$-4.720\ 546\ 92 \times 10^{-2}$	0	-1
2	$7.648\ 102\ 27 \times 10^{-1}$	0	0
3	$-5.034\ 818\ 10 \times 10^{-2}$	0	1
4	$5.707\ 154\ 95 \times 10^{-3}$	0	2
5	$-8.628\ 216\ 22 \times 10^{-2}$	0.5	-7
6	$2.310\ 287\ 94 \times 10^{-3}$	0.5	-4
7	$7.445\ 647\ 54 \times 10^{-1}$	1	-9
8	$-4.276\ 642\ 05 \times 10^{-1}$	1	-6
9	$3.289\ 116\ 00 \times 10^{-1}$	1	-4
10	$-2.068\ 296\ 47 \times 10^{-3}$	1	0

表 B.8 (续)

i	a_i	b_i	c_i
11	$-8.178\ 634\ 39 \times 10^{-1}$	1.5	-10
12	$1.868\ 520\ 89 \times 10^{-4}$	1.5	-1
13	$3.835\ 357\ 66 \times 10^{-1}$	2	-9
14	$-2.429\ 634\ 03 \times 10^{-3}$	3	-4
15	$2.802\ 359\ 69 \times 10^{-1}$	4	-15
16	$-1.226\ 295\ 45 \times 10^{-1}$	5	-15
17	$1.706\ 268\ 70 \times 10^{-4}$	5	-6
18	$1.582\ 014\ 74 \times 10^{-2}$	6	-14
19	$-3.733\ 935\ 09 \times 10^{-3}$	6	-12
临界参数: $p_c = 4.592\ 2\ \text{MPa}$; $T_c = 190.564\ \text{K}$. 对于甲烷,压力在 20 MPa 以下、温度在 270 K 至 600 K 范围内时,方程(B.1)有效。见[7]和[11]。			

二氧化碳的 C_i 值由表 B.9 给出[12],氧的 C_i 值由表 B.10 给出[13],蒸汽的 C_i 值由表 B.11 给出。

表 B.9 C_i 值(二氧化碳)

T_0/K	p_0/MPa										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
240	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	0.673 18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	0.670 66	0.715 19	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	0.668 43	0.701 88	0.755 14	—	—	—	—	—	—	—	—
320	0.666 46	0.692 45	0.729 20	0.784 19	—	—	—	—	—	—	—
340	0.664 70	0.685 39	0.712 56	0.748 21	0.797 97	—	—	—	—	—	—
360	0.663 13	0.679 89	0.700 83	0.726 33	0.758 13	0.798 64	0.850 46	0.913 90	0.982 71	1.045 85	1.096 34
380	0.661 71	0.675 50	0.692 09	0.711 34	0.733 88	0.760 41	0.791 55	0.827 36	0.866 73	0.907 11	0.945 22
400	0.660 42	0.671 89	0.685 32	0.700 38	0.717 29	0.736 31	0.757 56	0.780 99	0.806 20	0.832 39	0.858 44
420	0.659 26	0.668 89	0.679 93	0.691 99	0.705 18	0.719 54	0.735 11	0.751 79	0.769 39	0.787 55	0.805 80
440	0.658 19	0.666 34	0.675 53	0.685 38	0.695 92	0.707 16	0.719 08	0.731 60	0.744 61	0.757 91	0.771 28
460	0.657 21	0.664 16	0.671 88	0.680 03	0.688 62	0.697 63	0.707 03	0.716 77	0.726 77	0.736 92	0.747 08
480	0.656 31	0.662 26	0.668 80	0.675 62	0.682 72	0.690 07	0.697 65	0.705 42	0.713 32	0.721 28	0.729 22
500	0.655 48	0.660 60	0.666 18	0.671 93	0.677 86	0.683 94	0.690 15	0.696 45	0.702 82	0.709 20	0.715 54
520	0.654 71	0.659 13	0.663 91	0.668 80	0.673 79	0.678 87	0.684 02	0.689 21	0.694 42	0.699 61	0.704 75
540	0.653 99	0.657 82	0.661 93	0.666 11	0.670 34	0.674 62	0.678 92	0.683 24	0.687 55	0.691 83	0.696 05
560	0.653 32	0.656 65	0.660 19	0.663 77	0.667 38	0.671 00	0.674 63	0.678 25	0.681 85	0.685 40	0.688 90
580	0.652 69	0.655 58	0.658 65	0.661 73	0.664 82	0.667 90	0.670 97	0.674 02	0.677 04	0.680 01	0.682 93
600	0.652 10	0.654 62	0.657 28	0.659 93	0.662 58	0.665 21	0.667 82	0.670 40	0.672 95	0.675 45	0.677 89

表 B.10 C₂ 值(氧)

T_0/K	p_0/MPa											
	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
223.15	0.684 6	0.688 6	0.692 7	0.701 3	0.710 4	0.720 1	0.730 4	0.741 3	0.752 8	0.765 0	0.777 9	0.791 4
248.15	0.684 5	0.687 5	0.690 5	0.696 6	0.703 0	0.709 6	0.716 4	0.723 4	0.730 7	0.738 1	0.745 7	0.753 5
273.15	0.684 4	0.686 6	0.688 9	0.693 4	0.698 1	0.702 8	0.707 6	0.712 5	0.717 5	0.722 5	0.727 6	0.732 6
298.15	0.684 2	0.685 9	0.687 6	0.691 1	0.694 6	0.698 1	0.701 6	0.705 2	0.708 7	0.712 3	0.715 9	0.719 4
323.15	0.683 9	0.685 2	0.686 5	0.689 2	0.691 9	0.694 5	0.697 2	0.699 9	0.702 5	0.705 1	0.707 8	0.710 3
348.15	0.683 5	0.684 5	0.685 5	0.687 6	0.689 7	0.691 7	0.693 8	0.695 8	0.697 8	0.699 8	0.701 7	0.703 7
373.15	0.682 9	0.683 7	0.684 5	0.686 1	0.687 7	0.689 3	0.690 9	0.692 5	0.694 0	0.695 5	0.697 0	0.698 4

表 B.11 C₂ 值(蒸汽)(单相气体)

T_0/K	p_0/MPa										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
420	0.673 38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
440	0.672 72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
460	0.672 09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
480	0.671 49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	0.670 91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
520	0.670 35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
540	0.669 82	0.689 77	—	—	—	—	—	—	—	—	—
560	0.669 30	0.686 41	—	—	—	—	—	—	—	—	—
580	0.668 79	0.683 58	0.702 47	—	—	—	—	—	—	—	—
600	0.668 30	0.681 19	0.697 15	0.716 39	—	—	—	—	—	—	—
620	0.667 81	0.679 13	0.692 78	0.708 75	0.727 78	0.751 02	—	—	—	—	—
640	0.667 34	0.677 32	0.689 14	0.702 60	0.718 17	0.736 49	0.758 52	—	—	—	—
660	0.666 87	0.675 73	0.686 04	0.697 57	0.710 57	0.725 41	0.742 60	0.762 88	0.787 38	—	—
680	0.666 42	0.674 31	0.683 38	0.693 35	0.704 40	0.716 73	0.730 61	0.746 42	0.764 67	0.786 09	0.811 77
700	0.665 97	0.673 02	0.681 05	0.689 77	0.699 28	0.709 72	0.721 23	0.734 02	0.748 34	0.764 53	0.783 02
720	0.665 52	0.671 86	0.679 00	0.686 67	0.694 95	0.703 92	0.713 65	0.724 28	0.735 92	0.748 77	0.763 01
740	0.665 08	0.670 79	0.677 17	0.683 97	0.691 24	0.699 02	0.707 38	0.716 37	0.726 09	0.736 61	0.748 04
760	0.664 65	0.669 80	0.675 53	0.681 59	0.688 01	0.694 84	0.702 09	0.709 81	0.718 06	0.726 88	0.736 33
780	0.664 22	0.668 89	0.674 05	0.679 47	0.685 18	0.691 21	0.697 56	0.704 27	0.711 37	0.718 89	0.726 86
800	0.663 80	0.668 04	0.672 70	0.677 57	0.682 68	0.688 03	0.693 64	0.699 52	0.705 70	0.712 19	0.719 02
820	0.663 38	0.667 24	0.671 46	0.675 86	0.680 44	0.685 22	0.690 20	0.695 40	0.700 83	0.706 49	0.712 41
840	0.662 96	0.666 48	0.670 32	0.674 30	0.678 43	0.682 72	0.687 17	0.691 79	0.696 59	0.701 57	0.706 75
860	0.662 55	0.665 77	0.669 27	0.672 88	0.676 61	0.680 48	0.684 47	0.688 60	0.692 87	0.697 29	0.701 85
880	0.662 15	0.665 09	0.668 28	0.671 57	0.674 96	0.678 45	0.682 05	0.685 76	0.689 58	0.693 51	0.697 57
900	0.661 75	0.664 45	0.667 37	0.670 37	0.673 45	0.676 61	0.679 87	0.683 21	0.686 64	0.690 17	0.693 79
920	0.661 35	0.663 83	0.666 51	0.669 25	0.672 06	0.674 94	0.677 89	0.680 91	0.684 01	0.687 18	0.690 43
940	0.660 96	0.663 24	0.665 69	0.668 21	0.670 77	0.673 40	0.676 08	0.678 83	0.681 63	0.684 50	0.687 42
960	0.660 57	0.662 67	0.664 93	0.667 23	0.669 58	0.671 98	0.674 43	0.676 93	0.679 47	0.682 07	0.684 72
980	0.660 19	0.662 13	0.664 20	0.666 32	0.668 48	0.670 67	0.672 91	0.675 19	0.677 51	0.679 87	0.682 27
1 000	0.659 81	0.661 60	0.663 51	0.665 46	0.667 44	0.669 46	0.671 51	0.673 59	0.675 71	0.677 86	0.680 04

附录 C

(规范性附录)

天然气混合物临界质量通量的计算

C.1 总则

本附录提供了计算天然气混合物临界质量通量的必要资料。关系式直接计算质量通量 $q_m/A_{nt}C_d$ ，并且用温度、压力和气体组分表示。

根据所研究的气体混合物中乙烷的摩尔分数含量，该关系式分成 3 个组分范围：

范围 1： 0.010~0.045

范围 2： 0.045~0.080

范围 3： 0.080~0.115

该关系式可适用的摩尔分数推荐限值如表 C.1 所示：

表 C.1 摩尔分数推荐限值

组分	范围 1	范围 2	范围 3
甲烷	0.89~0.98	0.84~0.93	0.79~0.88
乙烷	0.01~0.045	0.045~0.08	0.08~0.115
丙烷	0.002~0.02	0.008~0.03	0.015~0.04
丁烷	0.0~0.005	0.002~0.01	0.003~0.015
戊烷	0.0~0.002	0.0~0.004	0.0~0.005
己烷+	0.0~0.001 5	0.0~0.002	0.0~0.003
氮气	0.0~0.03	0.0~0.03	0.0~0.015
二氧化碳	0.0~0.025	0.0~0.025	0.01~0.025

当压力不超过 12 MPa，温度在 (270~320) K 范围内时，该关系式有效。注意，各摩尔分数相加之和应等于 1。

如果一种天然气混合物不符合上述一种组分范围的摩尔分数限值，则推荐使用乙烷摩尔分数含量最接近的那个组分范围。在这种情况下，临界质量通量 $q_m/A_{nt}C_d$ 的相对不确定度将在 95% 置信水平下由 0.10% 增大到 0.15%。

C.2 关系式

$$\frac{q_m}{A_{nt}C_d} = q_{ref} + S \times f \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

q_{ref} ——参比气体的质量通量；

S ——质量通量对组分变化的敏感度；

f ——与组分有关的因子。

上述各项的通式见方程 (C.2)~(C.4)：

$$q_{ref} = \sum_i a_i \pi^{\alpha_i} \cdot \tau^{\beta_i} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

$$S = \sum_i b_i \pi^{\gamma_i} \cdot \tau^{\delta_i} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

$$f = X_{C_2} + \sum_{i=C_3}^{C_6} A_i X_i + [A_{N_2} - (B_{N_2} - C_{N_2} \tau) \pi] X_{N_2} + [A_{CO_2} - (B_{CO_2} - C_{CO_2} \tau) \pi] X_{CO_2} - A_{ref} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

$$\pi = \frac{p_0}{p_{\text{ref}}}, \text{ 且 } \tau = \frac{T_0}{T_{\text{ref}}}$$

式中, $p_{\text{ref}} = 5 \text{ MPa}$, $T_{\text{ref}} = 200 \text{ K}$ 。

表 C.2~表 C.4 分别给出了 3 种组分范围的 q_{ref} 和 S 系数。表 C.5 给出了 3 种组分范围的 f 系数。参见[14]。

C.3 喷嘴喉部与管道直径之比 β

本附录提供的数值适用于 $\beta < 0.25$ 的情况。如果不能满足这一条件, 上游测量点会存在一个虽小却不可忽略的气体流速。在这种情况下, 用户宜使用附录 E 给出的质量流量修正因子。

表 C.2 方程(C.2)和(C.3)的 q_{ref} 和 S 系数(第 1 组分范围)

k	a	α	ϕ	b	γ	δ
1	$0.108\ 244\ 635 \times 10^5$	1	-0.5	$0.484\ 093\ 947 \times 10^4$	1	-4.5
2	$-0.736\ 494\ 058 \times 10^2$	1	1.5	$-0.136\ 051\ 287 \times 10^5$	1	-2.5
3	$-0.287\ 636\ 821 \times 10^4$	2	-9.5	$0.132\ 819\ 568 \times 10^5$	1	-1.5
4	$0.293\ 505\ 438 \times 10^4$	2	-4.5	$0.124\ 742\ 840 \times 10^3$	1.5	-0.5
5	$0.213\ 321\ 640 \times 10^3$	2.5	-3.5	$0.270\ 400\ 184 \times 10^4$	2	-4.5
6	$0.470\ 680\ 038 \times 10^4$	3.5	-12.5	$0.465\ 931\ 801 \times 10^4$	2.5	-5.5
7	$-0.113\ 603\ 383 \times 10^1$	5	-0.5	$-0.522\ 305\ 671 \times 10^5$	3.5	-15.5
8	$-0.949\ 791\ 998 \times 10^1$	9	-15.5	$0.728\ 305\ 715 \times 10^5$	4	-15.5
9	—	—	—	$0.626\ 536\ 557 \times 10^1$	4	-0.5
10	—	—	—	$0.863\ 837\ 290 \times 10^1$	6	-8.5
11	—	—	—	$-0.218\ 148\ 488 \times 10^1$	6	-0.5
12	—	—	—	$-0.205\ 507\ 321 \times 10^3$	9	-15.5
13	—	—	—	$0.172\ 829\ 796 \times 10^1$	11	-10.5
14	—	—	—	$0.366\ 195\ 951 \times 10^{-2}$	16	-10.5

表 C.3 方程(C.2)和(C.3)的 q_{ref} 和 S 系数(第 2 组分范围)

k	a	α	ϕ	b	γ	δ
1	$0.110\ 966\ 325 \times 10^5$	1	-0.5	$0.598\ 807\ 893 \times 10^0$	0	-0.5
2	$-0.812\ 543\ 416 \times 10^2$	1	1.5	$0.618\ 961\ 744 \times 10^3$	1	-1.5
3	$-0.297\ 016\ 307 \times 10^4$	2	-6.5	$0.302\ 809\ 257 \times 10^4$	1	-0.5
4	$0.433\ 774\ 605 \times 10^4$	2	-4.5	$0.134\ 089\ 681 \times 10^4$	1.5	-3.5
5	$0.148\ 426\ 025 \times 10^4$	3	-7.5	$0.523\ 229\ 697 \times 10^3$	2	-1.5
6	$0.704\ 694\ 512 \times 10^4$	4	-15.5	$-0.862\ 689\ 783 \times 10^4$	3	-8.5
7	$-0.254\ 996\ 358 \times 10^1$	4.5	-0.5	$0.235\ 424\ 200 \times 10^5$	3	-7.5
8	$-0.224\ 612\ 799 \times 10^2$	9	-15.5	$-0.767\ 928\ 108 \times 10^3$	3.5	-3.5
9	—	—	—	$-0.859\ 071\ 767 \times 10^5$	4.5	-12.5
10	—	—	—	$0.724\ 778\ 127 \times 10^4$	4.5	-8.5
11	—	—	—	$0.153\ 097\ 473 \times 10^6$	5	-15.5
12	—	—	—	$-0.135\ 420\ 339 \times 10^4$	6	-10.5
13	—	—	—	$-0.292\ 807\ 154 \times 10^5$	7	-20.5
14	—	—	—	$0.884\ 153\ 806 \times 10^{-1}$	16	-15.5

表 C.4 方程(C.2)和(C.3)的 q_{ref} 和 S 系数(第3组分范围)

k	a	α	ϕ	b	γ	δ
1	$0.115\ 572\ 303 \times 10^5$	1	-0.5	$0.801\ 874\ 088 \times 10^3$	1	-1.5
2	$-0.249\ 894\ 765 \times 10^3$	1	0.5	$0.264\ 127\ 915 \times 10^4$	1	-0.5
3	$-0.240\ 531\ 018 \times 10^4$	2	-7.5	$0.247\ 996\ 282 \times 10^3$	1.25	-0.5
4	$0.404\ 006\ 226 \times 10^4$	2	-4.5	$0.178\ 851\ 521 \times 10^4$	2	-8.5
5	$0.271\ 706\ 092 \times 10^4$	3	-7.5	$0.101\ 397\ 979 \times 10^5$	2.5	-5.5
6	$-0.126\ 049\ 305 \times 10^5$	4	-15.5	$-0.296\ 058\ 326 \times 10^2$	3.5	-0.5
7	$0.553\ 331\ 233 \times 10^5$	5	-18.5	$-0.680\ 911\ 912 \times 10^5$	4	-15.5
8	$-0.115\ 934\ 413 \times 10^3$	5	-7.5	$0.259\ 571\ 626 \times 10^6$	5	-18.5
9	$-0.262\ 586\ 997 \times 10^5$	6	-20.5	$-0.144\ 795\ 597 \times 10^6$	7	-25.5
10	—	—	—	$-0.110\ 728\ 705 \times 10^4$	9	-15.5
11	—	—	—	$0.144\ 085\ 124 \times 10^2$	11	-10.5
12	—	—	—	$0.901\ 740\ 847 \times 10^0$	16	-15.5
13	—	—	—	$-0.132\ 368\ 505 \times 10^0$	16	-10.5

表 C.5 方程(C.4)的 f 系数

系数	范围 1	范围 2	范围 3
A_{C_3}	2.011 3	2.157 5	2.244 0
A_{C_4}	2.751 7	2.803 4	3.123 8
A_{C_5}	3.889 8	4.086 0	4.316 1
A_{C_6}	4.947 8	5.423 0	5.869 3
A_{N_2}	1.014 8	1.041 1	1.107 4
B_{N_2}	1.464 3	1.672 1	2.268 9
C_{N_2}	0.765 0	0.879 4	1.222 4
A_{CO_2}	2.253 3	2.348 8	2.434 7
B_{CO_2}	1.673 3	2.002 4	2.125 0
C_{CO_2}	0.881 9	1.065 9	1.125 1
A_{ref}	0.066 36	0.136 94	0.217 73

C.4 计算机编码验证样本值

表 C.6 和表 C.7 提供了一些样本值,用户可对照这些样本值验证关系式执行情况。

表 C.6 验证关系式执行情况的样本值

组分	测试气体 1	测试气体 2	测试气体 3
甲烷	0.931 7	0.880 5	0.837 5
氮气	0.024 3	0.010 4	0.003 9
二氧化碳	0.009 5	0.020 4	0.019 7
乙烷	0.026 3	0.062 4	0.093 5
丙烷	0.004 9	0.018 4	0.033 1
丁烷	0.002 0	0.006 1	0.009 7
戊烷	0.001 3	0.001 5	0.002 0
己烷	0.000 0	0.000 3	0.000 6

表 C.7 验证关系式执行情况的样本值

	T_0/K	p_0/MPa	q_{ref}	S	f	$q_m/(A_{\text{nt}}C_d)$
测试气体 1	280	2	3 704.50	1 481.33	0.020 94	3 735.52
	310	10	19 007.4	10 716.5	0.007 07	19 083.2
测试气体 2	280	2	3 805.42	1 402.57	0.042 76	3 865.38
	310	10	19 749.8	10 905.8	0.028 04	20 055.5
测试气体 3	280	2	3 913.25	1 325.58	0.039 58	3 965.72
	310	10	20 603.1	11 260.7	0.026 85	20 905.5

附录 D

(规范性附录)

大气空气的质量流量修正因子

D.1 总则

给定上游滞止温度 T_0 (K) 和滞止压力 p_0 (MPa) 下的大气空气质量流量 $q_{m, \text{atmos}}$ 可按式 (D.1) 计算。

$$q_{m, \text{atmos}} = q_{m, \text{dryCO}_2\text{-free}} \left[1 + X_{\text{CO}_2} (0.25 + 0.04732\pi) + \frac{\text{RH}}{100} A \cdot B \right] \quad \text{..... (D.1)}$$

式中:

$q_{m, \text{dryCO}_2\text{-free}}$ ——不含 CO_2 的干燥空气的质量流量;

X_{CO_2} ——空气中 CO_2 的摩尔分数(如果未知,可用 0.0004);

RH——空气的相对湿度(%).

$$A = 0.127828\tau^3 - 0.789422\tau^2 + 1.63166\tau - 1.12818 \quad \text{..... (D.2)}$$

式中:

$$\tau = \frac{T_0}{T_c}$$

$$B = -0.000288749\pi^2 - 0.00191022\pi + 0.00569536 - \frac{0.0719995}{\pi} \quad \text{..... (D.3)}$$

式中:

$$\pi = \frac{p_0}{p_c}$$

其中, $p_c = 3.786 \text{ MPa}$, $T_c = 132.5306 \text{ K}$ 。

D.2 计算机编码验证样本值

表 D.1 提供了一些样本值,用户可对照这些样本值验证关系式执行情况。

表 D.1 验证关系式执行的样本值

T/K	p/MPa	RH/%	$q_{m, \text{dryCO}_2\text{-free}}$	$q_{m, \text{atmos}}$
280	0.1	50	241.663	241.403
280	1	100	2 427.42	2 427.11
305	0.1	75	231.501	229.674
305	2	100	4 662.04	4 660.15

附录 E

(规范性附录)

喷嘴喉部与上游管道直径之比 $\beta > 0.25$ 的临界流喷嘴临界质量通量的计算

E.1 总则

采用附录 B 或附录 C 的方法所得出的气体质量流量值是基于如下的假设,即所测得的上游温度和压力都是真实的滞止值。如果喷嘴喉部直径与上游管道直径之比 $\beta < 0.25$,则这种假设是能成立的。如果实际上 $\beta > 0.25$,则上游测量点会存在一个不可忽略的气体流速,它将对气体质量流量产生不可忽略的影响。

当上游测量点存在一个不可忽略的气体流速时,可由取压口测量静压,即运动气体的压力。然而温度是利用插在流动气体中的温度计测量的。当气体遭遇测温元件的阻碍时,其流速自然会降低,这造成温度计所记录的温度 T_m ,既不是滞止温度 T_0 ,又不是静态温度 T_s ,而是两者之间的某个温度。温度检测元件的恢复因子可给出这些温度之间的关系式:

$$R_f = \frac{T_m - T_s}{T_0 - T_s} \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

如果 R_f 的值为零,则意味着温度检测元件所测量的是静态温度 T_s ,而如果 R_f 的值为 1,则意味着被测温度是滞止温度 T_0 。实际上, R_f 的值一般是在 0.5~0.9 范围内,这意味着与静态温度相比,被测温度更接近于滞止温度。

E.2 修正因子

特别提示:在本标准出版之时,天然气混合物的修正因子尚未确定。如果需要天然气混合物的修正因子,宜采用甲烷的修正因子。

下列修正因子所适用的气体与方程(B.1)相同,即氮、氩、不含 CO_2 的干燥空气和甲烷。有效的温度及压力范围也相同,250 K~600 K(甲烷是 270 K~600 K),压力最高可达 20 MPa。 β 值在 0.25~0.5 时修正有效。

对于给定上游被测温度 T_m (K) 和被测压力 p_m (MPa),具有大 β 比(β 值在 0.25~0.5 之间)文丘里喷嘴的质量流量可按下式计算:

$$q_{m,\beta} = q_{m,stage} [(1 - R_f)F_0 + R_f F_1] \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

$q_{m,stage}$ ——按附录 B 或附录 C 计算的质量流量;

R_f ——温度检测元件的恢复因子。

修正因子 F_0 和 F_1 的计算公式如下:

$$F_i = 1 + B \cdot C_i \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

$$B = 25.879\beta^6 - 32.693\beta^5 + 34.276\beta^4 - 6.0199\beta^3 + 1.1156\beta^2 - 0.1122\beta + 0.0047 \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

$$C_i = \sum_k n_{i,k} \pi^{\rho_{i,k}} \tau^{\tau_{i,k}} \quad \dots\dots\dots (E.5)$$

方程(E.5)的各系数由表 E.1~E.4 给出。取得换算压力 π 和换算温度 τ 所需的临界流参数请参见附录 B。

参见[15]。

表 E.1 氮气的方程(E.5)系数

i	k	$n_{i,k}$	$p_{i,k}$	$t_{i,k}$
0	1	$1.304\ 619 \times 10^{-2}$	0	0
	2	$-3.666\ 323 \times 10^{-5}$	0	1
	3	$-3.668\ 820 \times 10^{-3}$	0.5	-5
	4	$5.024\ 075 \times 10^{-4}$	1	-1
	5	$2.846\ 962 \times 10^{-3}$	2	-6
	6	$-7.569\ 285 \times 10^{-4}$	3	-8
1	1	$1.516\ 890 \times 10^{-2}$	0	0
	2	$-2.433\ 804 \times 10^{-5}$	0	1
	3	$-3.755\ 322 \times 10^{-3}$	1	-3
	4	$4.068\ 331 \times 10^{-3}$	1	-2
	5	$9.540\ 179 \times 10^{-3}$	1.5	-6
	6	$-4.828\ 687 \times 10^{-6}$	5	-6

表 E.2 氩气的方程(E.5)系数

i	k	$n_{i,k}$	$p_{i,k}$	$t_{i,k}$
0	1	$1.359\ 113 \times 10^{-2}$	0	0
	2	$5.072\ 601 \times 10^{-4}$	1	-1
	3	$5.776\ 326 \times 10^{-4}$	2	-4
	4	$4.625\ 040 \times 10^{-4}$	3	-10
	5	$-3.001\ 709 \times 10^{-7}$	6	-4
1	1	$1.702\ 515 \times 10^{-2}$	0	0
	2	$3.255\ 007 \times 10^{-3}$	1	-2
	3	$2.029\ 543 \times 10^{-4}$	1	-1
	4	$6.931\ 127 \times 10^{-3}$	2	-6
	5	$-1.846\ 055 \times 10^{-4}$	4	-6

表 E.3 无 CO₂ 干空气的方程(E.5)系数

i	k	$n_{i,k}$	$p_{i,k}$	$t_{i,k}$
0	1	$1.307\ 864 \times 10^{-2}$	0	0
	2	$-4.752\ 544 \times 10^{-5}$	0	1
	3	$1.760\ 268 \times 10^{-2}$	0.5	-6
	4	$-1.340\ 098 \times 10^{-2}$	0.5	-5
	5	$4.672\ 622 \times 10^{-4}$	1	-1
	6	$1.294\ 203 \times 10^{-3}$	1.5	-4
1	1	$1.522\ 775 \times 10^{-2}$	0	0
	2	$-4.726\ 879 \times 10^{-5}$	0	1
	3	$-5.958\ 875 \times 10^{-3}$	1	-4
	4	$3.445\ 387 \times 10^{-3}$	1	-2
	5	$1.256\ 916 \times 10^{-2}$	1.5	-6
	6	$-4.775\ 091 \times 10^{-5}$	4	-6

表 E.4 甲烷的方程(E.5)系数

i	k	$m_{i,k}$	$p_{i,k}$	$l_{i,k}$
0	1	$1.068\ 826 \times 10^{-3}$	0	-1
	2	$1.199\ 593 \times 10^{-2}$	0	0
	3	$-1.482\ 920 \times 10^{-3}$	0.5	-6
	4	$2.764\ 799 \times 10^{-4}$	1	-1
	5	$7.920\ 711 \times 10^{-5}$	2	-2
	6	$1.111\ 278 \times 10^{-3}$	3	-8
	7	$-6.815\ 626 \times 10^{-5}$	5	-10
	8	$3.862\ 490 \times 10^{-8}$	10	-18
1	1	$-3.463\ 148 \times 10^{-3}$	0	-3
	2	$5.286\ 029 \times 10^{-3}$	0	-1
	3	$1.195\ 016 \times 10^{-2}$	0	0
	4	$1.664\ 232 \times 10^{-3}$	1	-2
	5	$1.159\ 371 \times 10^{-3}$	1.5	-4
	6	$7.260\ 461 \times 10^{-3}$	3	-10
	7	$-7.541\ 933 \times 10^{-4}$	5	-12
	8	$2.613\ 967 \times 10^{-7}$	10	-15

附录 NA

(资料性附录)

检验规则

NA.1 检验方法

NA.1.1 几何尺寸法检验

在保证产品加工质量达到本标准规定的不确定度要求下,对临界流文丘里喷嘴可采用几何尺寸法进行检验。

检验项目包括:

- a) 外观检验,包括材料及表面加工情况;
- b) 入口收缩段的检验;
- c) 临界流文丘里喷嘴喉部的检验;
- d) 锥形扩散段的检验;
- e) 表面粗糙度 R_a 的检验。

NA.1.2 实流检定法检验

实流检定法是在 p 、 V 、 T 、 t 法、 mt 法等气体流量标准装置上进行,通过测量流过临界流文丘里喷嘴的实际气体流量,计算出流出系数的方法。此方法适用于以下几种临界流文丘里喷嘴:

- a) 不按 NA.1.1 进行检验或检验结果不符合要求的临界流文丘里喷嘴。
- b) 需要流出系数准确度优于 0.3% 的喇叭口喉部和圆筒形喉部临界流文丘里喷嘴,以及优于 0.2% 的精确加工的喇叭口喉部临界流文丘里喷嘴。

NA.2 其他设备安装要求

NA.2.1 根据本标准检验临界流文丘里喷嘴的安装情况。

NA.2.2 根据本标准检验上游管道配置及下游管道。

NA.2.3 根据本标准检验上游管道的管壁取压口压力测量、温度测量和密度测量的情况。

NA.2.4 如管道配有排泄孔,应根据本标准的要求进行。

NA.3 型式评价

NA.3.1 产品在下列情况之一时,一般应进行型式检验:

- 产品转厂生产的试制定型鉴定;
- 正式生产后,如结构、工艺、材料有重大改变,可能影响产品性能时;
- 正常生产时,定期或积累一定产量后,应周期性进行检验;
- 产品长期停产后,再恢复生产时;
- 出厂检验结果与上次型式试验有较大差异时;
- 国家质量监督机构提出进行型式检验的要求时。

NA.3.2 型式评价项目

可根据 NA.1.1 所要求的检验项目进行检验。也可根据 NA.1.2 的要求检验流出系数。根据本标准的规定计算临界流文丘里喷嘴的不确定度。

NA.4 标志、包装与贮存

NA.4.1 临界流文丘里喷嘴上应有铭牌。铭牌上应标志出:

- 制造厂名或厂标；
- 名称、型号规格、喉径及其他参数；
- 出厂编号和制造年月。

NA. 4.2 包装

临界流文丘里喷嘴的包装应符合有关国家标准的要求。

随机文件包括：

- 装箱单；
- 临界流文丘里喷嘴出厂合格证；
- 安装使用说明书；
- 计算单；
- 其他有关技术资料。

NA. 4.3 贮存

临界流文丘里喷嘴应存放在温度为 $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不超过85%的通风及无腐蚀性气体的室内。

附 录 NB
(资料性附录)
临界流喷嘴

NB.1 总则

本标准是为临界流文丘里喷嘴制定的,但国内现在还使用着、并且生产着临界流喷嘴。为适应国内目前的实际情况,特制定本附录,作为本标准的补充。

NB.2 临界流喷嘴与临界流文丘里喷嘴的区别

本附录中所述的临界流喷嘴与本标准中的临界流文丘里喷嘴的区别,是在结构上后面不带锥形扩散段。虽然临界流文丘里喷嘴有时也简称临界流喷嘴,但它是带扩散段的。

NB.3 适用于临界流喷嘴的章节

NB.3.1 本标准的第1、2、4、5、8、10章和附录A至附录E都适用于临界流喷嘴。

NB.3.2 本标准中的第3章、第7章以及附录NA除扩散段的规定(如3.3.1、7.1.3、7.2.2.5、7.2.3.6)外,都适用于临界流喷嘴。

NB.4 临界流喷嘴的最大允许下游压力

临界流喷嘴的最大允许下游压力按下式计算:

$$\left[\frac{p_2}{p_0} \right]_{\max} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \dots\dots\dots (\text{NB.1})$$

参 考 文 献

- [1] ISO 5167-1:2003, *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full—Part 1: General principles and requirements*
- [2] ISO 5167-2:2003, *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full—Part 2: Orifice plates*
- [3] ISO 6976:1995, *Natural gas—Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition*
- [4] STARLING, K. E. , SAVIDGE, J. L. *Compressibility factors for natural gas and related hydrocarbon gases*. Second edition, Transmission Measurement Committee Report No. 8. AGA November 1992, also Errata N° 1 issued by AGA June 1993.
- [5] CARON, R. W. , BRITTON, C. L. , KEGEL, T. *Investigation into the premature unchoking phenomena of critical flow venturis*, Proceedings of ASME FEDSM2000-11108, Boston, June 2000.
- [6] ISO/TR 5168 *Measurement of fluid flow—Evaluation of uncertainties*
- [7] STEWART, D. G. , WATSON, J. T. R. and VAIDYA, A. M. Improved critical flow factors and representative equations for four calibration gases. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1999, 10 (1): 27-34.
- [8] SPAN, R. , LEMMON, E. W. , JACOBSEN, R. T. , and WAGNER, W. A Reference Quality Equation of State for Nitrogen. *International Journal of Thermophysics*, 1998; 19 (4): 1121-1132.
- [9] TEGELER, CH. , SPAN, R. , and WAGNER, W. A new equation of state for argon covering the fluid region from the triple-point temperature to 700 K at pressures up to 1 000 MPa. Paper Presented at 13th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, June 1997.
- [10] PANASATI, M. D. , LEMMON, E. W. , PENONCELLO, S. G. , JACOBSEN, R. T. , and FRIEND, D. G. Thermodynamic properties of air from 60 to 2 000 K at pressures up to 2 000 MPa. Paper Presented at 13th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, June 1997.
- [11] SETZMANN, U. and WAGNER, W. A new equation of state and tables of thermodynamic properties for methane covering the range from the melting line to 625 K at pressures up to 1 000 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1991; 20(6): 1061-1116.
- [12] SPAN, R. and WAGNER, W. A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1 100 K at Pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1996; 25(6): 1509-1596.
- [13] MILLER, R. W. *Flow measurement engineering handbook*. McGraw-Hill, 1983.
- [14] STEWART, D. G. , WATSON, J. T. R. , and VAIDYA, A. M. A new correlation for the critical mass flux of natural mixtures. *Flow Measurement and Instrumentation*, 11 (4), December 2000.
- [15] STEWART, D. G. , WATSON, J. T. R. , and VAIDYA, A. M. The effect of high beta

values on mass flow through critical flow nozzles. *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 11 Number 4, December 2000.

- [16] JAESCHKE, M. , AUDIBERT, S. , VAN CANEGHEM, P. , HUMPHREYS, A. E. , JANSSEN-VAN ROSMALEN, R. , PELLEI, Q. , MHICHELS, J. P. J. , SCHOUTEN, J. A. , TEN SELDAM, C. A. High accuracy compressibility factor calculation for natural gases and similar mixtures by use of a truncated virial equation, *GERG Technical Monograph TM2* (1988), and *Fortschritt-Berichte VDI, Series 6, N°231* (1989).
- [17] STEWART, D. G. , WATSON, J. T. R. and VAIDYA, A. M. Uncertainty in the theoretical mass flow-rate of pure gases through critical flow nozzles. *Int. Fluid Flow Measurement Symposium*, Denver, 27-30 June 1999.
- [18] STEWART, D. G. , WATSON, J. T. R. , VAIDYA, A. M. The effect of using atmospheric air in Critical Flow Nozzles. *Int. Fluid Flow Measurement Symposium*, Denver, 27-30 June 1999.
- [19] KEGEL, T. A study of the repeatability and reproducibility of the Critical Flow Nozzle. *Int. Fluid Flow Measurement Symposium*, Denver 27-30 June, 1999.
- [20] CARON, R. W. , BRITTON, C. L. , KEGEL, T. Investigation into the accuracy of multiple Critical Flow Venturis mounted in parallel within a common plenum. *Int. Fluid Flow Measurement Symposium*, Denver 27-30 June, 1999.
- [21] PARK, K. A. , CHOI, Y. M. , CHOI, H. M. , CHA, T. S. , YOON, B. H. The evaluation of critical pressure ratios of sonic nozzle at low Reynolds numbers, released for *Flow. Meas. Instrum.*
- [22] STUDZINSKI, W. , WILLIAMSON, I. D. , JUNGOWSKI, W. , BOTROS, K. K. , SAWCHUK, B. , STROM, V. Nova's gravimetric meter prover and sonic nozzle facility, *CGA Gas Measurement School*, Alberta, Canada, 1994.
- [23] CHOI, Y. M. , PARK, K. A. , PARK S. O. Interference effects between sonic nozzles, *Flow. Meas. Instrum.* 8, page 113-119, 1997.
- [24] CHOI, Y. M. , PARK, K. A. , PARK, J. T. , CHOI, H. M. , PARK S. O. Interference effects of three sonic nozzles of different throat diameters in the same meter tube, *Flow. Meas. Instrum.* 10, page 175-181, 1999.
- [25] ISHIBASHI, M. , TAKAMOTO, M. Theoretical discharge coefficient of a critical circular-arc nozzle with laminar boundary layer and its verification by measurements using super-accurate nozzles, *Flow Measurement and Instrumentation* 11, 305/313, 2000.
- [26] VON LAVANTE, E. , NATH, B. , DIETRICH, H. Effects of instabilities on flow-rates in small sonic nozzles, 9th *Conference on Flow Measurement FLOMEKO '98*, Lund, 1998.

Discharge coefficients for toroidal-throat Venturi nozzles

- [27] BRAIN, T. J. S. and MACDONALD, L. M. Evaluation of the performance of small-scale critical flow venture using the NEL gravimetric gas flow standard test facility. *Fluid Flow Measurement in the Mid 1970s*. Edinburgh: HMSO, 1977, pp. 103-125.
- [28] BRAIN, T. J. S. and REID, J. Primary calibration of critical flow venturis in high-pressure gas. *Flow Measurement of Fluids*, edited by DIJSTELBERGEN, H. H. and SPENCER, E. A. Amsterdam: North Holland Publishing, 1978, pp 54-64.

- [29] SMITH, R. E. and MATZ, R. J. A theoretical method of determining discharge coefficients for Venturis operating at critical flow conditions. *J. Bas. Engng.*, 1962, vol. 84, No. 4, pp. 434-446 [30]. ARNBERG, B. T., BRITTON, C. L. and SEIDL, W. F. Discharge coefficient correlations for circular arc venturi flowmeters at critical (sonic) flow. *Paper No. 73-WA/FM-8*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1973.
- [31] BRAIN, T. J. S. and REID, J. An investigation of the discharge coefficient characteristics and manufacturing specification of toroidal inlet critical flow venturi nozzles proposed as standard ISO flowmeters. *Proceedings of the International Conference on Advances in Flow Measurement, Paper C1*, University of Warwick. Cranfield, Bedford: BHRA Fluid Engineering, 1981.
- [32] SPENCER, E. A., EUJEN, E., DIJSTELBERGEN, H. H. and PEIGNELIN, G. Inter-comparison campaign on high pressure gas flow test facilities. *EEC Document No. EUfR 6662*. Brussels-Luxembourg: ECSC-EECEAEC, 1980.
- [33] KARNIK, U., BOWLES, E. B., BOSIO, J., CALDWELL, S. North American Inter-Laboratory Flow Measurement Testing Program. *North Sea Flow Measurement Workshop 1996*—Peebles, Scotland. Paper No. 3.
- [34] ISHIBASHI, M., TAKAMOTO, M. Very Accurate Analytical Calculation of the Discharge Coefficients of Critical Venturi Nozzles with Laminar Boundary Layer. *FLUCOME'97*, Hayama.
- [35] ISHIBASHI, M., TAKAMOTO, M. Discharge coefficient of superaccurate critical nozzle at pressurized condition. *Int. Fluid Flow Measurement Symposium*, Denver 27-30 June, 1999.
- [36] ARNBERG, B. T. and ISHIBASHI, M. Discharge coefficient equations for critical flow Toroidal-throat Venturi nozzles, *Proceedings of ASME FEDSM'01-18030*, ASME New Orleans, May 2001.
- [37] ISHIBASHI, M., TAKAMOTO, M. Discharge coefficient of superaccurate critical nozzle accompanied with the boundary layer transition measured by reference super-accurate critical nozzles connected in series. *Proceedings of ASME FEDSM'01-18036*, ASME New Orleans, May 2001.

Discharge coefficients for cylindrical throat Venturi nozzles

- [38] GRENIER, P. Discharge coefficients of cylindrical nozzles used in sonic conditions. *NEL fluid Mechanics Silver Jubilee Conference, Paper No. 1. 2*. East Kilbride, Glasgow: National Engineering Laboratory, November 1979.
- [39] PEIGNELIN, G. and BENZONI, A. Utilisation des Venturi tuyères fonctionnant en régime d'écoulement sonique comme étalons de débits de gaz sous pression. *Note de Gaz de France, no 67842*, 1967.
- [40] PEIGNELIN, G. and GRENIER, P. Etude du coefficient de décharge des tuyères fonctionnant en régime d'écoulement sonique au col utilisées comme étalon pour le mesurage de débit de gaz sous pression. *Congrès de l'Association technique du gaz en France*, 1978.
- [41] GRENIER, P. Etude statistique du coefficient de décharge des tuyères a col cylindrique fonctionnant en régime sonique. *Note du Gaz de France, n°81474*, August 1981.

- [42] SPENCER, E. A. , EUJEN, E. , DIJSTELBERGEN, H. H. and PEIGNELIN, G. Inter-comparison campaign on high pressure gas flow test facilities. *EEC Document No. EW 6662*. Brussels-Luxembourg: ECSC-EECEAEC, 1980.
- [43] BOSIO, J. , CABROL, J. F. , KEREVAN, P. Intercomparison of the calibration results obtained at Gaz de France Alforville and K-Lab on a critical flow Venturi nozzle. *FLO-MEL'94*. Glasgow, Scotland.
- [44] VULOVIC, F. Report on the intercomparison carried out on eight European benches using a sonic nozzle as transfer standard. *EUROMET PROJECT No. 307*. -M. CERMAP VUL/SZ 97/I/129, 1997.
- [45] VULOVIC, F. , VINCEDEAU, E. , VALLET, J. P. , WINDENBERGER, C. , VIL-LANGER, O. , BOSIO, J. Influence of the thermodynamics calculations on the flow-rate of sonic nozzles. *Int. Fluid Flow Measurement Symposium*, Denver 27-30 June, 1999.

Other references

- [46] IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. IAPWS, 1996.
- [47] STEWART, D. G. , WATSON, J. T. R. and VAIDYA, A. M. The effect of using atmospheric air in critical flow nozzles. *Paper presented at the 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement*, Denver, June 1999.



GB/T 21188-2007

版权专有 侵权必究

*

书号:155066 • 1-30939

定价: 30.00 元

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
用临界流文丘里喷嘴测量气体流量
GB/T 21188—2007/ISO 9300:2005

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.75 字数 74 千字
2008年4月第一版 2008年4月第一次印刷

*

书号: 155066·1-30939 定价 30.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533