

前 言

随着城镇人工煤气迅速发展,制定符合我国国情的城镇人工煤气主管道中煤气的流量测量标准是现有燃气行业急待解决的问题,也是深化改革、改善企业管理的迫切需求。

本标准中的标准孔板节流装置的主要技术要求等同于国际标准 ISO 5167-1:1991《用差压装置测量流体流量 第一部分:安装在充满流体的圆形截面管道中的孔板、喷嘴和文丘里管》及引用 GB/T 2624—1993《流量测量节流装置 用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量》。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 是标准的附录,本标准的附录 D、附录 E、附录 F 和附录 G 是提示的附录。

本标准由全国工业过程测量和控制标准化技术委员会提出并归口。

本标准主要起草单位:上海工业自动化仪表研究所、中国计量科学研究院、上海市煤气公司、北京博思达仪器仪表有限公司;参加的单位有中国市政工程华北设计研究院、冶金工业部鞍山焦化耐火材料设计研究院、北京市煤气热力工程设计院、北京市煤气公司、沈阳市煤气公司、徐州市煤气公司、河北宣化煤气公司、厦门市煤气公司、北京炼焦化学厂、石家庄焦化厂、上海西派埃自动化工程有限公司、天津新科成套仪表有限公司、辽宁省朝阳市煤气公司。

本标准主要起草人:邵瑞华、翟秀贞、罗元海、王京安。

中华人民共和国国家标准

城镇人工煤气主管道流量测量
第1部分:采用标准孔板节流装置的方法

GB/T 18215.1—2000

Flow measurement of city manufactured gas in main pipes
Part 1: Method using standard orifice plate throttling device

1 范围

本标准规定了城镇人工煤气主管道流量测量中以多管并联标准孔板节流装置(包括可换孔板节流装置)为原理的差压式流量计的流量计算、测量系统的构成、技术要求与安装要求、人工煤气的物理性质及计算公式,以及测量系统的检验规则和流量测量的不确定度等内容。

本标准中规定的流量测量方法和系统适用于圆管的人工煤气的流量测量。

2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 2624—1993 流量测量节流装置 用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量

GB/T 12207—1990 城市燃气相对密度测定方法

GB/T 13612—1992 人工煤气

JB/T 2274—1991 流量显示仪表

JJG 640—1994 差压式流量计检定规程

3 定义和符号

3.1 定义

本标准采用下列定义。

3.1.1 (城镇)人工煤气 (city) manufactured gas

由人工制气厂生产的城镇煤气。

3.1.2 主管道 main pipe

由制气厂或经营企业输送到用户之前,用于贸易结算的总管道。

3.1.3 多管并联 multiple-pipe parallel-connection

将主管道通过汇管分成多条并联管的一种连接。它便于清扫,提高流速,扩大范围度和方便检验。

3.1.4 可换孔板节流装置 changeable orifice plate throttling device

以孔板为节流件在不拆动管线或不停气情况下可更换孔板进行检查和清洗的节流装置。

3.2 符号

本标准中使用的符号见表1,脚标见表2。表中未列的符号见本标准有关条文的说明。

表 1 符号

序号	量	符号	量纲	法定计量单位	备注
1	流出系数	C	无量纲		
2	工作条件下上游管道内径	D	L	m	
3	工作条件下孔板开孔直径	d	L	m	
4	相对误差、相对不确定度	E	无量纲		%
5	孔板上、下游侧直管段	l	L	m	
6	煤气的绝对静压	p	ML⁻¹T⁻²	Pa	
7	差压	Δp	ML⁻¹T⁻²	Pa	
8	压力损失	$\Delta\omega$	ML⁻¹T⁻²	Pa	
9	质量流量	q_m	MT⁻¹	kg/s	
10	体积流量	q_v	L³T⁻¹	m³/s	
11	与 D 有关的雷诺数	Re_D	无量纲		
12	煤气的热力学温度	T	Θ	K	
13	煤气的摄氏温度	t	Θ	℃	
14	平均轴向流速	U	LT⁻¹	m/s	
15	直径比 $\beta=d/D$	β	无量纲		
16	可膨胀性系数	ε	无量纲		
17	煤气的比热容比	κ	无量纲		
18	煤气的动力粘度	μ	ML⁻¹T⁻¹	Pa·s	
19	阻流件的局部阻力损失系数	ξ	无量纲		
20	煤气的密度	ρ	ML⁻³	kg/m³	
21	相对湿度	φ	无量纲		%

表 2 脚标

含 义	符 号
临界、折合对比	c
干的	g
湿的、水蒸气	s
次数、管数、阻流件数	i
质量、混合	m
最大(饱和)	max
标准状态(20℃、101.325 kPa)	N
对比	r
次数、方次	n
定压	p
定容、体积	v
上游、状态 1	1
下游、状态 2	2
约定状态	H

4 测量原理和计算公式

4.1 原理

测量管道由和主管道串联的多根并联管道组成,充满主管道的煤气经汇管分别流入安装在各并联的测量管道内的节流装置(以下简称节流装置),流束在孔板处形成局部收缩,从而使流速增加,静压力降低,于是在孔板前后产生了差压,流速越高,产生的差压就越大,本标准规定的测量方法是通过各条并联管上的节流装置来测量主管道中人工煤气的流量。

为便于清洗、检修、更换和检定,可优先采用可换孔板节流装置。

4.2 计算公式

4.2.1 流量计算公式

主管道的总的质量流量 q_m 可按公式(1)通过各条并联管上节流装置测得的各分流量 q_{mi} 计算获得。

$$q_m = \sum_{i=1}^n q_{mi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中: q_{mi} 由公式(2)求得。

$$q_{mi} = \frac{C_i}{\sqrt{1 - \beta_i^4}} \varepsilon_{1i} \frac{\pi}{4} d_i^2 \sqrt{2 \Delta p_i \rho_{1i}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: ε_1 用公式(3)计算。

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa_1 p_1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

体积流量 q_v 用公式(4)计算:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

当计算的结果用体积流量表示时,应将其换算到标准状态(一般取 20℃, 101.325 kPa)或约定的参比状态下(由供需双方确认的参比压力、温度及湿度)的值。标准状态下体积流量 q_{vN} 按公式(5)计算,约定状态下的体积流量 q_{vH} 按附录 A 中的公式 A1 换算。

$$q_{vN} = \frac{q_m}{\rho_N} \quad \dots\dots\dots (5)$$

流量状态换算公式列在附录 A(标准的附录)中。

差压式流量计示值修正公式列在附录 B(标准的附录)中。

4.2.2 雷诺数计算公式

上游管道直径表示的雷诺数 Re_D 按公式(6)计算。

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi \mu_1 D} \quad \dots\dots\dots (6)$$

4.2.3 压力损失计算公式

测量系统中,汇管之间单根管线总的压力损失 $\Delta\omega$,按公式(7)计算:

$$\Delta\omega = \sum_{i=1}^n \left(\xi_i \frac{\rho_i U_i^2}{2} \right) + (1 - \beta^{1.9}) \Delta p \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: ρ_i 与 U_i 分别表示各阻流件出口处的密度与流速, Δp 为差压的上限值。

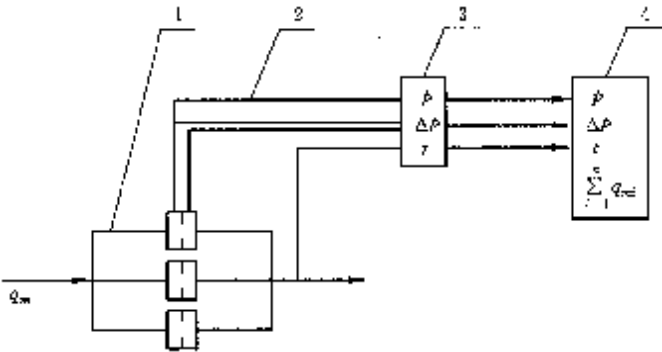
5 测量系统的构成和技术要求

5.1 构成

测量系统是由多管并关节流装置及其测量管道与管件、差压信号管路、差压变送器、温度变送器、压力变送器及流量显示装置构成,其示意图见图 1。

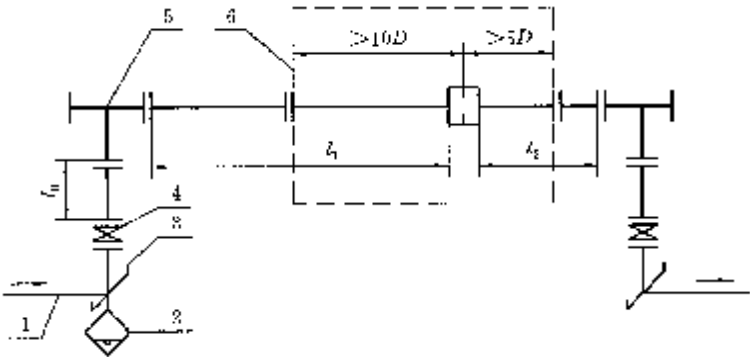
节流装置及其测量管道与管件的铺设(用单管说明)见图 2,图中虚线框内为节流装置,它包括孔

板、取压装置和前后测量管。



1—节流装置及其测量管道与管件；2—压力、温度、差压信号管路；
3—压力、差压、温度变送器；4—流量显示装置

图 1 测量系统示意图



1—主管道；2—疏水器；3—汇管；4—全开球阀或全开闸阀；
5—三通(或 90°弯头)；6—孔板节流装置

图 2 节流装置及其测量管道与管件铺设示意图

5.2 技术要求

5.2.1 对煤气的要求

- a) 测量的煤气应是牛顿流体,在物理学和热力学上是均匀的和单相(或可以认为是单相)的流体;
- b) 测量的煤气质量应符合 GB/T 13612 的规定;
- c) 进入测量系统的煤气,流动应稳定或随时间缓慢变化。

5.2.2 测量系统的准确度等级应满足表 3 的要求,用于贸易结算的测量系统准确度一般应优于 2.5 级。

表 3 测量系统的准确度等级

准确度等级	1.0	1.5	(2.0)	2.5	(4.0)	5.0
基本误差限 $E_{max}, \%$	± 1.0	± 1.5	(± 2.0)	± 2.5	(± 4.0)	± 5.0
注:基本误差限以示值的百分数表示;优先使用不带括号的等级。						

5.2.3 采用可换孔板节流装置或多管并联形式在不停气的条件下,可以对节流装置进行清洗、检修、更换和检定。清洗周期根据煤气脏污程度而定,一般首次为三个月。

5.2.4 孔板与取压装置应符合 GB/T 2624—1993 中第 7 章的要求。

5.2.5 仪表要求

仪表包括差压变送器、压力变送器、温度变送器、检测密度的仪器、流量显示装置(也称二次表或二次装置)等。

- a) 仪表应能实现本标准规定的计算公式(软件)及准确度等要求;
- b) 仪表的防爆性能应符合防爆场所的防爆等级的要求;
- c) 流量显示装置的技术要求应符合 JB/T 2274—1991 中第 5 章的要求;
- d) 流量显示装置应具有设定计量人工煤气所需要数学模型的各种参数;
- e) 流量显示装置基本误差的试验方法按附录 E(提示的附录)进行。

6 测量系统的安装要求

6.1 节流装置安装的部位

节流装置离压送机应足够远,以尽可能满足稳定流的要求。如果节流装置处产生脉动流,则见附录 D(提示的附录)。

6.2 节流装置及其管路管件的安装

6.2.1 节流装置一般应设置在主管道输气管道上方,由汇管与其连接(见图 2)。

6.2.2 节流装置采用多管并联形式分为双管(Y 型)、三管及四管并联三种。

6.2.3 节流装置及其测量管道内表面应无明显的凹凸坑及其他异物。

6.2.4 直管段长度

当孔板上、下游侧的阻流件按图 2 铺设时,直管段长度 l_1 、 l_2 应根据 β 由表 4 确定。其他按 GB/T 2624—1993 的 6.1.4。

表 4 最短的直管段长度

β	上游直管段长度 l_1	下游直管段长度 l_2
0.40	14(7)	6(3)
0.45	14(7)	6(3)
0.50	14(7)	6(3)
0.55	16(8)	6(3)
0.60	18(9)	7(3.5)
0.65	22(11)	7(3.5)
0.70	28(14)	7(3.5)

注:表中 l_1 、 l_2 的值为管径 D 的倍数;使用括号内的数值时应增加附加 0.5% 不确定度。

6.2.5 测量管道圆度

孔板上游 $2D$ 长度范围内任意直径与平均直径($0 \sim 0.5D$ 长度内 12 个直径的平均值)之差应不超过 $\pm 0.3\%$;当 $2D$ 以外由一种或多种截面的管道组成若干台阶高度 h ,若 h 不超过 $\pm 0.3\%$ 的圆度要求,则流出系数的误差 E_c 无附加不确定度。当 h 超过 $\pm 0.3\%$ 的圆度要求但又满足公式(8)和(9)时,则应在 E_c 上算术相加 $\pm 0.2\%$ 的附加不确定度。

$$\frac{h}{D} \leq 0.002 \left(\frac{S}{D} + 0.4 \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{h}{D} \leq 0.05 \dots\dots\dots (9)$$

式中: h ——台阶高度;

S ——上游取压口或夹持环到台阶的距离。

6.2.6 上游管道的相对粗糙度应满足 $\frac{K}{D} \leq 10^{-3}$ 的要求 (K ——绝对粗糙度, 单位同 D)。

6.2.7 孔板应垂直于管道轴线, 其偏差允许在 $\pm 1^\circ$ 之间。

6.2.8 孔板中心轴线与管道轴线之间的偏差 e_z (不同轴度) 满足公式(10)时, 则流出系数的误差 E_c 无附加不确定度, 当 e_z 满足公式(11)时, 应在 E_c 上算术相加 $\pm 0.3\%$ 的附加不确定度。

$$e_z \leq \frac{0.0025D}{0.1 + 2.3\beta^4} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{0.0025D}{0.1 + 2.3\beta^4} < e_z \leq \frac{0.005D}{0.1 + 2.3\beta^4} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中: e_z ——孔板轴线与管道轴线之间的偏差(不同轴度)。

6.2.9 流体静压应在上游取压口平面处取出, 与差压取压口分开; 流体温度应在下游靠近的主管道处取出。

6.3 装配

6.3.1 测量管与节流装置在组装前应检验合格, 待管道清洗后再装配(取压口方向见 6.5.4)。装配和夹紧的方法均应保证孔板及取压装置安装在正确的位置上保持不变, 其密封垫圈不应有任何部位突入管道内。

6.3.2 测量管可以是纵向焊接管, 但内部焊缝应该与管子的轴线平行, 焊缝所在的管轴平面与任一取压口轴线所在管轴平面之间的夹角应大于 30° 。

6.3.3 在测量系统前应有排水系统及防冻措施。

6.4 测量系统的密封性

测量系统的密封性应在 $(1 \sim 1.1)$ 倍公称压力下, 持续时间不少于 24 h 进行密封性试验, 压力降小于 1%。

6.5 差压信号管路

6.5.1 应保证节流装置的输出差压信号无泄漏、无堵塞现象, 能够准确无误地传送给差压变送器。

6.5.2 应防止冷凝水进入导压管。

6.5.3 正负导压管应尽量靠近, 导压管应垂直或倾斜铺设(倾斜度不得小于 1:12)导压管内径一般为 $\phi 10 \text{ mm} \sim \phi 25 \text{ mm}$, 长度不超过 16 m。

6.5.4 安装节流装置的主管道水平或倾斜时, 取压口位置如图 3 所示, $\alpha \leq 45^\circ$; 当安装节流装置的主管道垂直时, 取压口的位置在取压装置的平面上, 可任意选择。

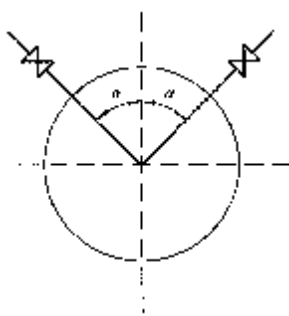


图 3 取压口位置

6.5.5 差压变送器的安装位置一般按图 4 进行。

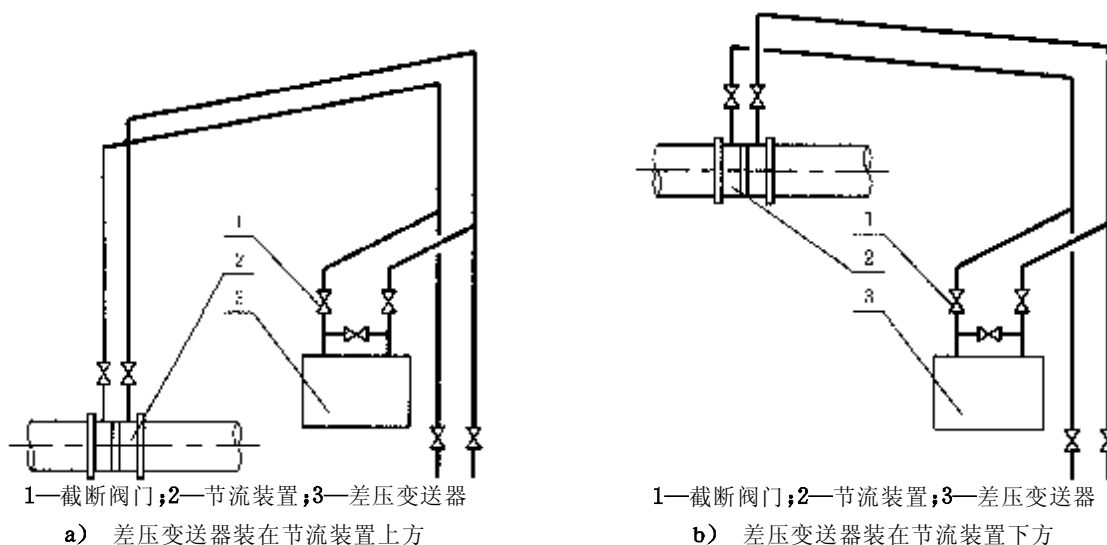


图4 差压变送器的安装位置(a)、b)可任意选用)

7 煤气的物理性质及计算公式

7.1 密度及其计算公式

煤气的密度可以在孔板前用检测密度的仪器测定(参见 GB/T 12207),也可根据孔板前的流体组分、工作状态(p 、 T)计算或由表中查得。

7.1.1 标准状态下湿煤气的密度 ρ_N

ρ_N 按公式(12)计算。

$$\rho_N = \rho_{gN} + \rho_{sN} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中: ρ_{gN} ——湿煤气在标准状态下干部分的密度;

ρ_{sN} ——湿煤气在标准状态下湿部分的密度。

7.1.2 煤气在标准状态下干部分的密度 ρ_{gN}

ρ_{gN} 按公式(13)计算。

$$\rho_{gN} = \sum_{i=1}^n X_i \rho_{gNi} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中: X_i ——煤气各组分的体积百分数%。

7.1.3 工作状态下湿煤气的密度 ρ_1

ρ_1 按公式(14)计算。

$$\rho_1 = \rho_{g1} + \rho_{s1} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中: ρ_{g1} ——湿煤气在工作状态下干部分的密度;

ρ_{s1} ——湿煤气在工作状态下湿部分的密度。

ρ_{g1} 与 ρ_{s1} 分别按公式(15)和(16)计算。

$$\rho_{g1} = \rho_{gN} \frac{p_1 - \varphi_1 p_{s1\max}}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_1} \cdot \frac{Z_N}{Z_1} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\rho_{s1} = \varphi_1 \rho_{s1\max} \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中: Z ——气体压缩系数;

$p_{s1\max}$ ——工作状态下,饱和水蒸气压力;

$\rho_{s1\max}$ ——工作状态下,饱和水蒸气密度。

7.2 湿度及其计算公式

煤气在净化过程中都经过洗涤,因此一般水分含量都呈饱和状态,相对湿度为 100%。在工艺末端

设置增压风机,或在煤气输配过程中经增压后,水蒸气呈不饱和状态,随着温压状态的变化,煤气的湿度亦发生变化,因此在计算煤气密度时应根据具体情况确定湿度的数值。本标准用相对湿度计算。

相对湿度 φ 为湿煤气中实际所包含的水蒸气量与同温度下最大可能水蒸气量的比值,常用公式(17)表示。

$$\varphi = \frac{\rho_s}{\rho_{s\max}} = \frac{p_s}{p_{s\max}} \quad \dots\dots\dots(17)$$

不同状态 φ 的换算按公式(18)计算。

$$\varphi_1 = \varphi_2 \frac{p_{s1} T_2 \rho_{s2\max}}{p_{s2} T_1 \rho_{s1\max}} \quad \dots\dots\dots(18)$$

若由公式(18)求出的 $\varphi > 1$ 时,说明在工作状态下的煤气已被水蒸气饱和。而且部分水蒸气已冷凝,这时取 $\varphi = 1$ 。

7.3 粘度及其计算公式

粘度是用于雷诺数计算的参数,由于 Re_D 的准确度对 C 的影响较小,粘度的准确度不必像代入流量公式中的参数那样高。

7.3.1 单气体的动力粘度计算公式

单气体的动力粘度用公式(19)计算。

$$\mu = aT^n \quad \dots\dots\dots(19)$$

由两个已知的气体动力粘度值(μ_1 与 μ_2)确定系数 n 和 a 。 n 与 a 分别用公式(20)和(21)计算。

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$a = \frac{\mu_1}{T_1^n} \quad \dots\dots\dots(21)$$

7.3.2 煤气的动力粘度计算式

煤气的动力粘度 μ_m 按公式(22)计算。

$$\mu_m = \frac{X_1 \mu_1 \sqrt{M_1} + \dots + X_n \mu_n \sqrt{M_n}}{X_1 \sqrt{M_1} + \dots + X_n \sqrt{M_n}} \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中: M ——各组分的摩尔分子量。

粘度主要用于 Re_D 计算,在常用工作压力与工作温度下变化很小,在煤气计量中可用 80% 左右组分的粘度来计算 μ_m 。

7.4 等熵指数及其计算公式

计算气体可膨胀性系数 ε 值时,需要知道被测气体的等熵指数 κ ,只有气体服从理想气体定律时, κ 才等于比热容比,即定压热容与定容热容的比值。

煤气的等熵指数不服从叠加规律,但其定压热容和定容热容服从叠加规律,可按叠加规律求得,然后再求出煤气的比热容比。等熵指数对流量计算不很敏感,尤其是对工作于低压状态的煤气,可以用比热容比近似计算等熵指数。

煤气比热容比 κ_m ,可按公式(23)计算。

$$\kappa_m = \frac{\frac{C_{p1} M_1 X_1}{\kappa_1} + \dots + \frac{C_{pn} M_n X_n}{\kappa_n}}{\frac{C_{p1} M_1 X_1}{\kappa_1} + \dots + \frac{C_{pn} M_n X_n}{\kappa_n}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中: C_p ——定压热容;

κ ——可从附录 F(提示的附录)查得,取 20℃ 或附近温度下的值。

在煤气计量中, C_p 、 κ 用 80% 左右的组分来计算。

8 检验规则

8.1 各部件的检验

8.1.1 节流装置及管路管件检验

a) 孔板、取压装置、测量管、管路、管件的检验应按 JJG 640—1994 的第 17 章~第 19 章进行, 其结果应符合 5.2.4、6.2.3~6.2.8 的要求。

b) 如采用可换孔板节流装置, 孔板升降及孔板座体的检验至少重复 5 次, 并应符合 6.2.8 的要求。

8.1.2 差压信号管路

用目测法或量具进行检查, 其结果应符合 6.5 的要求。

8.1.3 仪表检验

a) 差压变送器的检验应按 JJG 640—1994 的第 28 章~第 34 章进行, 其结果应符合其准确度等级要求;

b) 流量显示仪表检验应按 JB/T 2274—1991 中的 6.2 进行, 其结果应符合其准确度等级要求;

8.2 测量系统检验

8.2.1 节流装置与仪表应有制造计量器具许可证、产品合格证书与检定证书。

8.2.2 测量系统密封性检验

应对每条测量管加压到 1~1.1 倍公称压力, 观察 24 h, 其结果应符合 6.4 的要求。

8.2.3 在测量系统投运前应在规定的温度、压力范围内检验理论计算流量与显示装置显示的流量, 其差值应符合双方合同的要求。其测试方法应按附录 E 的规定进行。

9 流量测量的不确定度

测量系统的流量测量相对不确定度 E_{q_m} 和 E_{q_v} (E_{q_m} 和 E_{q_v} 的置信概率为 95%) 根据误差传递原理, 分别按公式(24)和公式(25)计算。

$$E_{q_m} = \frac{\delta q_m}{q_m} = \pm \left[\left(\frac{q_{m1}}{q_m} \right)^2 (E_{q_{m1}})^2 + \left(\frac{q_{m2}}{q_m} \right)^2 (E_{q_{m2}})^2 + \dots + \left(\frac{q_{mi}}{q_m} \right)^2 (E_{q_{mi}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$E_{q_v} = \frac{\delta q_v}{q_v} = \pm \left[\left(\frac{q_{v1}}{q_v} \right)^2 (E_{q_{v1}})^2 + \left(\frac{q_{v2}}{q_v} \right)^2 (E_{q_{v2}})^2 + \dots + \left(\frac{q_{vi}}{q_v} \right)^2 (E_{q_{vi}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(25)$$

式中: $E_{q_{mi}}$ 和 $E_{q_{vi}}$ 分别按公式(26)和公式(27)计算。

$$E_{q_{mi}} = \pm \left[E_{Ci}^2 + E_{\varepsilon_i}^2 + \left(\frac{2\beta_i^4}{1-\beta_i^4} \right)^2 E_{Di}^2 + \left(\frac{2}{1-\beta_i^4} \right)^2 E_{di}^2 + \frac{1}{4} E_{\Delta p_i}^2 + \frac{1}{4} E_{\rho_{1i}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} + E_{oi} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$E_{q_{vi}} = \pm \left[E_{Ci}^2 + E_{\varepsilon_i}^2 + \left(\frac{2\beta_i^4}{1-\beta_i^4} \right)^2 E_{Di}^2 + \left(\frac{2}{1-\beta_i^4} \right)^2 E_{di}^2 + \frac{1}{4} E_{\Delta p_i}^2 + \frac{1}{4} E_{\rho_{1i}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} + E_{oi} \quad \dots\dots\dots(27)$$

式中: E_C 、 E_ε 、 E_D 、 E_d 、 $E_{\Delta p}$ 、 E_{ρ_1} 分别表示 C 、 ε 、 D 、 d 、 Δp 、 ρ_1 的相对不确定度, 参考 JJG 640—1994 中的 35.1.2 和 35.1.3;

E_o ——当不符合标准, 又能给出附加误差时的总的附加误差;

E_{q_m} 、 E_{q_v} ——应根据供需双方的合同, 其值不超过表 3 基本误差限的要求。

附 录 A
(标准的附录)
煤气流量换算公式

A1 湿煤气体积流量的换算公式

$$q_{v2} = q_{v1} \frac{(p_1 - \varphi_1 p_{s1\max})}{(p_2 - \varphi_2 p_{s2\max})} \cdot \frac{T_2 Z_2}{T_1 Z_1} \quad \dots\dots\dots (A1)$$

式中: q_{v1}, q_{v2} ——分别为状态“1”和状态“2”湿煤气的体积流量, m^3/h ;

p_1, p_2 ——分别为状态“1”和状态“2”的绝对压力, Pa ;

T_1, T_2 ——分别为状态“1”和状态“2”的热力学温度, K ;

Z_1, Z_2 ——分别为状态“1”和状态“2”的煤气压缩系数;

φ_1, φ_2 ——分别为状态“1”和状态“2”的煤气相对湿度, %;

$p_{s1\max}, p_{s2\max}$ ——分别为状态“1”和状态“2”的水蒸汽最大可能压力, Pa 。

A2 工作状态下干煤气体积流量换算到标准状态时的体积流量

$$q_{v20} = q_v \frac{\rho}{\rho_{20}} = q_v \frac{p}{p_{20}} \cdot \frac{T_{20} Z_{20}}{T Z} \quad \dots\dots\dots (A2)$$

$$q_{v0} = q_v \frac{\rho}{\rho_0} = q_v \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0 Z_0}{T Z} \quad \dots\dots\dots (A3)$$

式中: q_v ——工作状态下干煤气的体积流量, m^3/h ;

q_{v0} —— 0°C , 101.325 kPa 状态下干煤气的体积流量, m^3/h ;

q_{v20} —— 20°C , 101.325 kPa 状态下干煤气的体积流量, m^3/h ;

ρ ——工作状态下干煤气密度, kg/m^3 ;

p, T, Z ——分别为工作状态下绝对压力(Pa), 热力学温度(K), 压缩系数;

ρ_0, ρ_{20} ——分别为 0°C , 20°C 及 101.325 kPa 状态下干煤气的密度, kg/m^3 ;

p_0, p_{20} ——分别为标准状态下的绝对压力, Pa ;

T_0, T_{20} ——分别为 0°C 、 20°C 的热力学温度, K ;

Z_0, Z_{20} ——分别为 0°C 、 20°C 及 101.325 kPa 状态的煤气压缩系数。

A3 煤气的压缩系数计算公式

单气体压缩系数 Z 采用公式(A4)R-K (Redlich-Kwong) 方程计算。

$$Z^3 - Z^2 - (B^2 + B - A)Z - AB = 0 \quad \dots\dots\dots (A4)$$

式中: A, B 分别按公式(A5)和(A6)计算。

$$A = \frac{0.42748 p_r}{T_r^{2.5}} \quad \dots\dots\dots (A5)$$

和

$$B = \frac{0.086647 p_r}{T_r} \quad \dots\dots\dots (A6)$$

式中: p_r ——气体的对比压力, $p_r = \frac{p}{p_c}$;

T_r ——气体的对比温度, $T_r = \frac{T}{T_c}$;

p_c ——气体的临界压力,Pa;

T_c ——气体的临界温度,K。

采用迭代法求 Z ,按公式(A7)计算。

$$Z_n = Z_{n-1} - \frac{F'_{n-1}}{F''_{n-1}} \quad \dots\dots\dots (A7)$$

式中: F'_{n-1} 、 F''_{n-1} 按公式(A8)和(A9)计算。

$$F'_{n-1} = Z_{n-1}^3 - Z_{n-1}^2 - (B^2 + B - A)Z_{n-1} - AB \quad \dots\dots\dots (A8)$$

$$F''_{n-1} = 3Z_{n-1}^2 - 2Z_{n-1} - (B^2 + B - A) \quad \dots\dots\dots (A9)$$

R-K 方程亦用于煤气压缩系数的计算,这时式中的对比压力,对比温度应采用折合对比压力和折合对比温度,折合对比参数按公式(A10)和(A11)计算。

$$T_c = \sum_{i=1}^n X_i T_{ci} \quad \dots\dots\dots (A10)$$

$$p_c = \sum_{i=1}^n X_i p_{ci} \quad \dots\dots\dots (A11)$$

附 录 B

(标准的附录)

差压式流量计示值修正公式

流量示值	气体密度改变时	气体温度改变时	气体压力改变时	气体温度和压力改变时	气体湿度改变时
工作状态下被测气体的流量	$q'_v = q_v \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$ $q'_m = q_m \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}}$	$q'_v = q_v \sqrt{\frac{T'Z'}{TZ}}$ $q'_m = q_m \sqrt{\frac{TZ}{T'Z'}}$	$q'_v = q_v \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p'Z'}{pZ}}$ $q'_m = q_m \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p'Z'}{pZ}}$	$q'_v = q_v \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p'T'Z'}{pTZ}}$ $q'_m = q_m \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p'T'Z'}{pTZ}}$	
干气体在标准状态(20℃、101.325 kPa)的流量	$q'_{vN} = q_{vN} \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \sqrt{\frac{TZ}{T'Z'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p'Z}{pZ'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p'TZ}{pT'Z'}}$	
湿气体干部分在标准状态(20℃、101.325 kPa)的流量	$q'_{vN} = q_{vN} \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \frac{p - \phi p'_{\max}}{p - \phi p_{\max}} \times \frac{TZ}{T'Z'} \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \frac{p' - \phi p'_{\max}}{p' - \phi p_{\max}} \times \frac{\varepsilon' Z}{\varepsilon Z'} \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \frac{p' - \phi p'_{\max}}{p' - \phi p_{\max}} \times \frac{\varepsilon' TZ}{\varepsilon T'Z'} \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$	$q'_{vN} = q_{vN} \frac{p - \phi p_{\max}}{p - \phi p_{\max}} \times \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$
注 1 被测气体的状态和参数改变时,其各量的符号与改变前相同,只是在符号的右上角加“'”; 2 以上所列各式仅适用于不至于引起流出系数 C 改变的情况下,如果由于有关参数变化较大而引起流出系数 C 改变时,相应地乘以 C'/C 数值。					

附录 C
(标准的附录)
设计计算例题

C1 节流件为标准孔板孔径的节流装置设计计算例题

C1.1 已知条件

(1) 被测流体:高炉煤气

组分	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
体积百分量, %	13.0	26.0	1.0	0.1	59.9

(2) 流量(0℃、101.325 kPa 状态、 $\varphi_0=0$)

$q_{vmax}=7\,500\text{ m}^3/\text{h}$

$q_{vcom}=6\,000\text{ m}^3/\text{h}$

$q_{vmin}=4\,500\text{ m}^3/\text{h}$

(3) 工作压力

$p=5\,000\text{ Pa}$ (表压)

(4) 工作温度

$t_1=30\text{ }^\circ\text{C}$

(5) 工作状态下相对湿度

$\varphi_1=100\%$

(6) 差压上限

$\Delta p=1\,600\text{ Pa}$

(7) 允许的压力损失

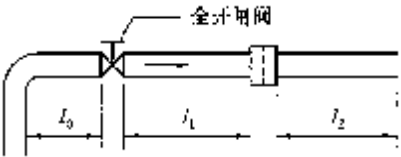
$\Delta\omega\leq 1\,200\text{ Pa}$

(8) 管道内径

$D_{20}=600.0\text{ mm}$

(9) 管道材质:20# 钢轻微锈蚀纵向焊接管($K=0.3\text{ mm}$)

(10) 管道和局部阻力件敷设简图



l_0 、 l_1 、 l_2 按设计要求敷设。

(11) 仪表使用地点:乌鲁木齐附近

(12) 取压方法: $D-D/2$ 取压,配 DBC 型差压变送器 $E_s=1.0\%$

C1.2 辅助计算

(1) 仪表使用地点平均大气压

$P_a=0.994\times 10^5\text{ Pa}$

(2) 工作压力(绝对)

$p_1=p+P_a=5\,000+99\,400=104\,400\text{ Pa}$

(3) 工作温度

$T_1=273.15+30=303.15\text{ K}$

(4) 管道材质及孔板的线膨胀系数

$$\lambda_D = 11.16 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}) \quad \lambda_k = 16.60 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$$

(5) 工作温度下的管道内径

$$D = D_{20}[1 + \lambda_D(t_1 - 20)] = 600.0 \times [1 + 11.60 \times 10^{-6}(30 - 20)] = 600.067 \text{ mm}$$

(6) 各组分在 0℃、101.325 kPa 状态下,干气体的密度

组分	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
$\rho_{0i}, \text{kg}/\text{m}^3$	1.977	1.250 4	0.089 88	0.716 7	1.250 6

(7) 各组分在工作状态下的压缩系数

$$Z = 1$$

(8) 0℃、101.325 kPa 状态下,高炉煤气干部分的密度 ρ_{g0} 按公式(12)计算

$$\begin{aligned} \rho_{g0} &= \sum_{i=1}^5 X_i \rho_{g0i} \\ &= 1.977 \times 0.13 + 1.2504 \times 0.26 + 0.08988 \times 0.01 + 0.7167 \times 0.001 + 1.2506 \times 0.599 \\ &= 1.3328 \text{ kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

(9) 工作状态下,高炉干煤气的密度 ρ_g 按公式(15)计算

$$\begin{aligned} \rho_{g1} &= \rho_{g0} \frac{p_1 - \varphi p_{s1\max}}{p_0} \cdot \frac{T_0 Z_0}{T_1 Z_1} = 1.3328 \times \frac{104400 - 1 \times 4245}{101325} \times \frac{273.15 \times 1}{303.15 \times 1} \\ &= 1.18707 \text{ kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

式中,当 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ 时,由附录 G 查表得: $p_{s1\max} = 4245 \text{ Pa}$

(10) 工作状态下高炉湿煤气的密度 ρ_1 由公式(14)计算

$$\rho_1 = \rho_{g1} + \rho_{s1} = \rho_{g1} + \varphi \rho_{s1\max} = 1.18707 + 1 \times 0.03037 = 1.2174 \text{ kg}/\text{m}^3$$

式中:当 $t = 30^\circ\text{C}$ 时,由附录 G 查表得: $\rho_{s1\max} = 0.03037 \text{ kg}/\text{m}^3$

(11) 工作状态下高炉煤气的动力粘度

a) 各组分的动力粘度和摩尔分子量

	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
$\mu, \text{mPa} \cdot \text{s}$	0.015 1	0.018 4	0.009 1	0.011 3	0.018 0
M_i	44.009 95	28.010 6	2.016	16.043	28.013 4
$\sqrt{M_i}$	6.634 0	5.292 5	1.419 9	4.005 4	5.292 8

表中 μ 是根据公式(19)计算得到,并由附录 F 查表得 M_i 。

b) 高炉煤气的动力粘度 μ_m 由公式(22)计算

$$\begin{aligned} \mu_m &= \frac{\mu_1 X_1 \sqrt{M_1} + \dots + \mu_n X_n \sqrt{M_n}}{X_1 \sqrt{M_1} + \dots + X_n \sqrt{M_n}} \\ &= \frac{0.0151 \times 0.13 \times 6.6340 + \dots + 0.0180 \times 0.599 \times 5.2928}{0.13 \times 6.6340 + \dots + 0.599 \times 5.2928} \\ &= 0.0176 \text{ mPa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

(12) 工作状态下高炉煤气的等熵指数

a) 各组分的等熵指数和定压比热容

	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
κ_i	1.295	1.395	1.412*	1.315*	1.4*
$c_{p,i} (\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$	845.2	1036.8	14210.5	2246.8	1035.1
* 15.6℃时的值。					

b) 高炉煤气的等熵指数 κ_m 按公式(23)计算

$$\kappa_m = \frac{C p_1 M_1 X_1 + \dots + C p_n M_n X_n}{\frac{C p_1 M_1 X_1}{\kappa_1} + \dots + \frac{C p_n M_n X_n}{\kappa_n}}$$

$$= \frac{845.2 \times 44.009\,95 \times 0.13 + \dots + 1\,035.1 \times 28.013\,4 \times 0.599}{\frac{845.2 \times 44.009\,95 \times 0.13}{1.295} + \dots + \frac{1\,035.1 \times 28.013\,4 \times 0.599}{1.4}} = 1.380\,7$$

(13) 管道粗糙度

$$K = 0.3 \text{ mm}$$

(14) 求 D/K

$$K/D = 0.3/600 = 0.5 \times 10^{-3} < 10^{-3}$$

故可采用 $D-D/2$ 取压方式标准孔板。

(15) 工作状态下高炉煤气的体积流量

流量状态换算按公式(A1)计算

$$q_{v1} = q_{v0} \frac{p_0}{(p_1 - \varphi_1 p_{s1\max})} \frac{T_1 Z_1}{T_0 Z_0}$$

$$= q_{v0} \frac{101\,325}{104\,400 - 1 \times 4\,245} \times \frac{303.15 \times 1}{273.15 \times 1} = 1.122\,8 q_{v0}$$

$$q_{v1\max} = 1.122\,8 q_{v\max} = 1.122\,8 \times 7\,500 = 8\,420.96 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{v1\text{com}} = 1.122\,8 q_{v\text{com}} = 1.122\,8 \times 6\,000 = 6\,736.77 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{v1\min} = 1.122\,8 q_{v\min} = 1.122\,8 \times 4\,500 = 5\,052.58 \text{ m}^3/\text{h}$$

(16) 求 Re_D 值

按公式(6)计算

$$Re_{D\min} = \frac{4 q_{v1\min} \rho_1}{\pi \mu_1 D} = \frac{4 \times \frac{5\,052.58}{3\,600} \times 1.217\,4}{\pi \times 0.017\,6 \times 10^{-3} \times 0.600\,067} = 2.05 \times 10^5$$

$$Re_{D\text{com}} = \frac{4 q_{v1\text{com}} \rho_1}{\pi \mu_1 D} = \frac{4 \times \frac{6\,736.77}{3\,600} \times 1.217\,4}{\pi \times 0.017\,6 \times 10^{-3} \times 0.600\,067} = 2.74 \times 10^5$$

$$Re_{D\max} = \frac{4 q_{v1\max} \rho_1}{\pi \mu_1 D} = \frac{4 \times \frac{8\,420.96}{3\,600} \times 1.217\,4}{\pi \times 0.017\,6 \times 10^{-3} \times 0.600\,067} = 3.43 \times 10^5$$

(17) 验算最小界限雷诺数

$$Re_D \geq 1\,260 \beta^2 D = 1\,260 \times 0.5^2 \times 600 = 1.9 \times 10^5$$

(18) 求 Δp_{com} 值

$$\Delta p_{\text{com}} = \left(\frac{q_{v\text{com}}}{q_{v\max}} \right)^2 \Delta p = \left(\frac{6\,000}{7\,500} \right)^2 \times 1\,600 = 1\,024 \text{ Pa}$$

C1.3 计算

(1) 求 A_2

$$A_2 = \frac{4 q_{v1\text{com}} \rho_1}{\pi D^2 \sqrt{2 \Delta p_{\text{com}} \rho_1}} = \frac{4 \times \frac{6\,736.77}{3\,600} \times 1.217\,4}{\pi \times 0.600\,067^2 \times \sqrt{2 \times 1\,024 \times 1.217\,4}} = 0.161\,33$$

(2) 求 β

a)

$$\text{假设 } C = 0.600 \quad \varepsilon = 1$$

$$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{C_0}{A_2} \right)^2 \right]^{-1/4} = \left[1 + \left(\frac{0.600}{0.161\,33} \right)^2 \right]^{-1/4} = 0.509\,52$$

$$C_0 = 0.595\,9 + 0.031\,2\beta_0^{2.1} - 0.184\,0\beta_0^8 + 0.002\,9\beta_0^{2.5} \times \left(\frac{10^6}{Re_{D_{com}}} \right)^{0.75} \\ + 0.039\,0\beta_0^4 \times (1 - \beta_0^4)^{-1} - 0.015\,84\beta_0^3 = 0.604\,78$$

$$\varepsilon_0 = 1 - (0.41 + 0.35\beta_0^4) \frac{\Delta p_{com}}{\rho_1 p_1} \\ = 1 - (0.41 + 0.35 \times 0.509\,52^4) \frac{1\,024}{1.380\,7 \times 104\,400} = 0.996\,92$$

b)

$$\beta_1 = \left[1 + \left(\frac{C_0 \varepsilon_0}{A_2} \right)^2 \right]^{-1/4} = \left[1 + \left(\frac{0.604\,78 \times 0.996\,92}{0.161\,33} \right)^2 \right]^{-1/4} = 0.508\,42$$

$$C_1 = 0.604\,74 \quad \varepsilon_1 = 0.996\,92$$

c)

$$\beta_2 = \left[1 + \left(\frac{C_1 \varepsilon_1}{A_2} \right)^2 \right]^{-1/4} = 0.508\,44$$

$$|\beta_2 - \beta_1| = 0.000\,02 < 0.000\,1 \quad \text{迭代停止}$$

(3) 求 d

$$d = \beta_2 D = 0.50844 \times 600.067 = 305.098 \text{ mm}$$

(4) 验算流量

$$q_{vcom} = \frac{\pi}{4} \frac{C_1}{\sqrt{1 - \beta_2^4}} \varepsilon d^2 \sqrt{2\Delta p_{com} / \rho_1} \times 3\,600 \\ = \frac{\pi}{4} \frac{0.604\,74}{\sqrt{1 - 0.508\,44^4}} 0.996\,92 \times 0.305\,098^2 \\ \times \sqrt{2 \times 1\,024 / 1.217\,4} \times 3\,600 = 6737.016 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$E = \left| \frac{q_{vcom} - q_{vcom}}{q_{vcom}} \times 100\% \right| = \left| \frac{6\,737.016 - 6\,736.77}{6736.77} \times 100\% \right| \\ = 0.003\% \leq |0.2\%| \text{ (允许偏差值)}$$

(5) 求 d_{20}

$$d_{20} = \frac{d}{1 + \lambda_q(t_1 - 20)} = \frac{305.098}{1 + 16.6 \times 10^{-6}(30 - 20)} = 305.047 \text{ mm} \\ \Delta d_{20} = \pm d_{20} \times 0.000\,5 = \pm 0.15 \text{ mm}$$

(6) 最大压损 $\Delta\omega$

$$\Delta\omega = (1 - \beta^{1.9})\Delta p = (1 - 0.508\,44^{1.9}) \times 1\,600 = 115\,7.4 \text{ Pa}$$

(7) 确定最小直管段长度

$$l_1 = 14D = 8\,400 \text{ mm}$$

$$l_2 = 6D = 3\,600 \text{ mm}$$

$$l_0 = 10D = 6\,000 \text{ mm}$$

(8) 流量测量不确定度 E_{q_v} 按公式(27)计算

首先,节流装置零部件的几何精度经检验符合本标准要求,则

$$E_G = \pm 0.6\%$$

$$E_s = \pm \left(4 \frac{\Delta p}{p_1} \right) \times 100\% = \pm \left(4 \times \frac{1\,600}{104\,400} \right) \times 100\% = \pm 0.061\%$$

$$E_D = \pm 0.4\%$$

$$E_d = \pm 0.07\%$$

$$E_{\Delta p} = \pm \frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p_{\text{com}}} E_s = \pm \frac{1\ 600}{1\ 024} E_s = \pm 1.56 \times 1.0\% = \pm 1.56\%$$

(E_s 是差压变送器的精确度等级, $E_s = 1.0\%$)

$$E_{\rho_1} = \pm 3.0\% \quad \left(\frac{\delta p_1}{p_1} = \pm 1\%, \frac{\delta T_1}{T_1} = \pm 1\% \right)$$

$$\begin{aligned} E_{q_v} &= \pm \left[E_G^2 + E_s^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 E_D^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 E_d^2 + \frac{1}{4} E_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} E_{\rho_1}^2 \right]^{1/2} \\ &= \pm \left[0.6^2 + 0.061^2 + \left(\frac{2 \times 0.508\ 44^4}{1-0.508\ 44^4} \right)^2 \times 0.4^2 + \left(\frac{2}{1-0.508\ 44^4} \right)^2 \times 0.07^2 + \frac{1}{4} \times 15.6^2 + \frac{1}{4} \times 3.0^2 \right]^{1/2} \times 10^{-2} \\ &= \pm 1.80\% \end{aligned}$$

C2 三管并联可换孔板节流装置差压计算例题

某焦化厂总管流量 $q_{v\max} = 30\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 、常用流量 $q_{v\text{com}} = 24\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 、最小流量 $q_{v\min} = 12\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 、口径 820 mm, 设计三管并联管道和可换孔板节流装置, 两管运行, 余一根管作为备用和在线校验。单管(两管情况相同)差压计算如下。

C2.1 已知条件

- (1) 被测流体: 焦炉湿煤气(以下简称煤气)
供需双方约定的煤气流量结算状态为:
 $p_H = 101.325\ \text{kPa}$ $T_H = 293.15\ \text{K}$ $\varphi_H = 0$
- (2) 单管流量煤气的体积流量(结算状态下)
 $q_{v\max} = 15\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$
 $q_{v\text{com}} = 12\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$
 $q_{v\min} = 6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$
- (3) 管道内径
 $D_{20} = 408\ \text{mm}$
- (4) 孔板开孔直径
 $d_{20} = 219.45\ \text{mm}$
- (5) 管道材质的线膨胀系数
 $\lambda_p = 11.6 \times 10^{-6}\ \text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$
- (6) 孔板材质的线膨胀系数
 $\lambda_k = 16.6 \times 10^{-6}\ \text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$
- (7) 工作压力(当地大气压为 100 060 Pa)
 $p = 59\ 940\ \text{Pa}$ (表压)
- (8) 工作温度
 $t_1 = 25^\circ\text{C}$
- (9) 工作状态下相对湿度
 $\varphi = 100\%$
- (10) 在 0°C 、101.325 kPa 状态下干燥煤气的密度 ρ_{g0}
 $\rho_{g0} = 0.46\ \text{kg}/\text{m}^3$
- (11) 煤气的动力粘度

$$\mu=0.0127 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

(12) 煤气的等熵指数

$$\kappa=1.36$$

(13) 煤气的压缩系数

$$Z=1$$

(14) 取压方式: 法兰取压

C2.2 辅助计算

(1) 工作压力(绝对)

$$p_1=59\,940+100\,060=160\,000 \text{ Pa}$$

(2) 工作温度

$$T_1=273.15+25=298.15 \text{ K}$$

(3) 工作状态下的管道内径、孔板开孔直径和孔径比

$$D=D_{20}[1+\lambda_D(t_1-20)]=408.02 \text{ mm}$$

$$d=d_{20}[1+\lambda_d(t_1-20)]=219.47 \text{ mm}$$

$$\beta=d/D=0.53789$$

(4) 工作状态下煤气的密度

$$\rho_{s1}=\rho_{s0}\frac{p_1-\varphi_1 p_{s1\max}}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{Z_0}{Z_1}=0.46 \times \frac{160\,000-100\% \times 3\,169}{101\,325} \times \frac{273.15}{298.15}=0.6523 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s1}=0.02304 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_1=\rho_{s1}+\rho_{s1}=0.6523+0.02304=0.6753 \text{ kg/m}^3$$

(5) 工作状态下煤气的体积流量

$$q_{v1\max}=q_{v\max}\frac{p_H}{p_1-\varphi_1 p_{s1\max}} \cdot \frac{T_1}{T_H}=15\,000 \times \frac{101\,325}{(160\,000-100\% \times 3\,169)} \times \frac{298.15}{293.15}=9\,856.46 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{v1\text{com}}=7\,885.08 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{v1\min}=3\,942.54 \text{ m}^3/\text{h}$$

(6) 求 Re_D 值

$$Re_{D\max}=\frac{4q_{v1\max}\rho_1}{\pi\mu_1 D}=\frac{4 \times \frac{9\,856.46}{3\,600} \times 0.6753}{\pi \times 0.0127 \times 10^{-3} \times 0.40802}=4.54 \times 10^5$$

$$Re_{D\text{com}}=3.63 \times 10^5$$

$$Re_{D\min}=1.82 \times 10^5$$

(7) 验算最小界限雷诺数

$$Re_D \geq 1\,260\beta^2 D = 1\,260 \times 0.53789^2 \times 408.02 = 1.48 \times 10^5$$

满足最小界限雷诺数要求。

C2.3 计算

(1) 求流出系数 C

$$C=0.5959+0.0312\beta^{2.1}-0.1840\beta^8+0.0029\beta^{2.5}(10^5/Re_D)^{0.75}$$

$$+0.0900L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1}-0.0337L_2\beta^3$$

$$=0.5959+0.008484-0.00129+0.00111+0.000512-0.000326=0.60439$$

式中: $L_1=L_2=25.4/D=25.4/408.02=0.062252$ (法兰取压)

(2) 求 A_3

$$A_3=\frac{8(1-\beta^4)q_{m1\max}^2}{\rho_1(C\pi d^2)^2}=\frac{8(1-0.53789^4)\left(\frac{9\,856.46 \times 0.6753}{3\,600}\right)^2}{0.6753 \times (0.60439 \times \pi \times 0.21947^2)^2}=\frac{25.0584}{0.005649}=4\,436.05 \text{ Pa}$$

(3) 迭代计算求 ε

$$n=1$$

$$X_1 = \Delta p_1 = A_3 / \varepsilon^2 = 4\,436.05 / 1 = 4\,436.05 \text{ Pa (设 } \varepsilon = 1)$$

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p_1}{\kappa p_1} = 1 - (0.41 + 0.35 \times 0.537\,89^4) \times \frac{4\,436.05}{1.36 \times 160\,000} = 0.991\,40$$

$$\delta_1 = A_3 - \Delta p_1 \varepsilon_1^2 = 4\,436.05 - 4\,436.05 \times 0.991\,40^2 = 75.97$$

$$n=2$$

$$X_2 = \Delta p_2 = A_3 / \varepsilon_1^2 = 4\,436.05 / 0.991\,40^2 = 4\,513.35 \text{ Pa}$$

$$\varepsilon_2 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p_2}{\kappa p_1} = 1 - (0.41 + 0.35 \times 0.537\,89^4) \times \frac{4\,513.35}{1.36 \times 160\,000} = 0.990\,9$$

$$\delta_2 = A_3 - \Delta p_2 \varepsilon_2^2 = 4\,436.05 - 4\,513.35 \times 0.990\,9^2 = 4.4692$$

$$\left| \frac{A_3 - X_2 \varepsilon_2^2}{A_3} \right| = \frac{4.4692}{4\,436.05} = 1.0 \times 10^{-3} > 5 \times 10^{-5}$$

$$n=3$$

$$X_3 = \Delta p_3 = A_3 / \varepsilon_2^2 = 4\,436.05 / 0.990\,9^2 = 4\,517.9 \text{ Pa}$$

$$\varepsilon_3 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p_3}{\kappa p_1} = 1 - (0.41 + 0.35 \times 0.537\,89^4) \times \frac{4\,517.9}{1.36 \times 160\,000} = 0.990\,88$$

$$\delta_3 = A_3 - \Delta p_3 \varepsilon_3^2 = 4\,436.05 - 4\,517.9 \times 0.990\,88^2 = 0.181$$

$$\left| \frac{A_3 - X_3 \varepsilon_3^2}{A_3} \right| = \frac{0.181}{4\,436.05} = 4 \times 10^{-5} < 5 \times 10^{-5}$$

迭代停止。

(4) 验算 p_2/p_1 值

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{160\,000 - 4\,517.9}{160\,000} = 0.972 > 0.75$$

(5) 计算不同流量时对应的差压

流量 $q_v, \text{Hm}^3/\text{h}$	差压 $\Delta p, \text{Pa}$	流出系数 C	可膨胀性系数 ε	雷诺数 Re_D
15 000	4 518	0.604 39	0.990 88	4.54×10^5
12 000	2 870	0.604 59	0.994 16	3.63×10^5
6 000	709	0.605 49	0.998 54	1.82×10^5

(6) 流量测量不确定度 E_{q_v} 按公式(27)计算

首先,节流装置零部件的几何精度经检验符合本标准要求,则:

$$E_C = \pm 0.6\%$$

$$E_\varepsilon = \pm \left(4 \frac{\Delta p}{p_1} \right) \times 100\% = \pm \left(4 \times \frac{5\,000}{160\,000} \right) \times 100\% = \pm 0.125\%$$

$$E_D = \pm 0.4\%$$

$$E_\beta = \pm 0.07\%$$

$$E_{\Delta p} = \pm \frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p_{\text{com}}} E_\varepsilon = \pm \frac{4\,518}{2\,870} = \pm 0.79\%$$

(选用 CECC-1511 差压变送器,精确度等级为 0.5, $E_\varepsilon = 0.5\%$)

$$E_{p_1} = \pm 1.5\% \text{ (测压和测温仪表的精确度等级为 0.5)}$$

$$E_{q_v} = \pm \left[E_C^2 + E_\varepsilon^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 E_D^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 E_\beta^2 + \frac{1}{4} E_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} E_{p_1}^2 \right]^{1/2}$$

$$= \pm \left[0.6^2 + 0.125^2 + \left(\frac{2 \times 0.53\,789^4}{1-0.53\,789^4} \right)^2 \times 0.4^2 + \left(\frac{2}{1-0.53\,789^4} \right)^2 \times 0.07^2 + \frac{1}{4} \times 0.79^2 + \frac{1}{4} \times 1.5^2 \right]^{1/2} \times 10^{-2}$$

$$=\pm 1.06\%$$

C2.4 如果供需双方约定(经确认)的煤气流量结算状态为:

$$p_H=101.325 \text{ kPa} \quad T_H=293.15 \text{ K} \quad \varphi_H=100\%$$

则上述 C2.2 中辅助计算的第(5)项工作状态下的煤气体积流量为:

$$\begin{aligned} q_{v1\max} &= q_{v\max} \frac{p_H - \varphi_H p_{s1\max}}{p_1 - \varphi_1 p_{s1\max}} \cdot \frac{T_1}{T_H} \\ &= 15\,000 \times \frac{101\,325 - 100\% \times 2\,339}{160\,000 - 100\% \times 3\,169} \times \frac{298.15}{293.15} = 9\,628.93 \text{ m}^3/\text{h} \\ q_{v1\text{com}} &= 7\,703.14 \text{ m}^3/\text{h} \\ q_{v1\min} &= 3\,851.57 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

(5) 计算不同流量时对应的差压

流量 $q_v, \text{Hm}^3/\text{h}$	差压 $\Delta p, \text{Pa}$	流出系数 C	可膨胀性系数 ϵ	雷诺数 Re_D
15 000	4 308	0.604 41	0.991 29	4.44×10^5
12 000	2 738	0.604 62	0.994 47	3.55×10^5
6 000	676	0.605 53	0.998 63	1.78×10^5

附录 D

(提示的附录)

煤气脉动流平均流量测量指南

城镇人工煤气需经压送机远程输送,如果节流装置处流体产生脉动,脉动流测量误差和平均流量的测量计算公式如下:

D1 稳定流阈值

$$\frac{U'_{\text{rms}}}{\bar{U}} < 0.05 \text{ 或 } \frac{\Delta p'_{\text{rms}}}{\Delta \bar{p}_p} \leq 0.10 \quad \dots\dots\dots (\text{D1})$$

$$U = \bar{U} + U'$$

$$\Delta p_p = \Delta \bar{p}_p + \Delta p'$$

式中: U ——轴向流速;

$\bar{U}$ ——时均(时间平均)流速;

U' ——流速脉动分量;

U'_{rms} ——流速脉动分量均方根值;

Δp_p ——节流装置产生的差压;

$\Delta \bar{p}_p$ ——时均差压;

$\Delta p'$ ——差压脉动分量;

$\Delta p'_{\text{rms}}$ ——差压脉动分量均方根值。

D2 采用差压式流量计测量脉动流时,建议采取以下措施

a) 在管线上采用衰减措施,安置滤波器(由容器及管阻组成);

- b) 仪表检测件尽量远离脉动源；
- c) 采用尽量大的 β 和 Δp ，在测量处减少管线尺寸；
- d) 管线、仪表支架安装牢固；
- e) 二根差压取压管阻力要对称。

D3 脉动衰减阻尼准则

$$\frac{H_0}{\kappa} \geq 0.0563 \frac{1}{\sqrt{\Psi}} \frac{q'_{mo,rms}}{\bar{q}_m} \dots\dots\dots (D2)$$

式中： $q'_{mo,rms}$ ——脉动源处质量流量脉动分量的均方根值；

$\bar{q}_m$ ——时均质量流量；

Ψ ——流量计流量示值由于脉动产生的最大允许相对误差；

κ ——气体的等熵指数；

H_0 ——霍奇森阻尼准则。

$$H_0 = \frac{V}{f} \frac{\Delta \bar{\omega}}{\bar{q}_v \bar{p}} \dots\dots\dots (D3)$$

式中： V ——脉动源与流量计之间容器及管线的容积；

$\frac{\bar{q}_v}{f}$ ——每脉动周期时均体积流量；

$\Delta \bar{\omega}$ ——脉动源与容器之间在恒压下的时均压损；

$\bar{p}$ ——容器中平均绝对静压。

满足公式(D2)，流量测量可按 GB/T 2624 计算时均流量 $\bar{q}_m$ 或 $\bar{q}_v$ 。

D4 时均流量的流量误差

$$E_T = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left[1 - \left(\frac{\Delta p'_{p,rms}}{\Delta p_p} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{-\frac{1}{2}} - 1 \dots\dots\dots (D4)$$

$$E_T = \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta p'_{p,rms}}{\Delta p_{ss}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \dots\dots\dots (D5)$$

公式(D4)和(D5)的使用条件为：

$$\frac{q'_{v,rms}}{\bar{q}_v} \leq 0.32 \frac{\Delta p'_{p,rms}}{\Delta p_{ss}} \leq 0.64 \dots\dots\dots (D6)$$

式中： E_T ——测量相对误差， $E_T \leq \Psi$ ，%；

$\Delta p'_{p,rms}$ ——差压脉动分量均方根值；

Δp_{ss} ——在同样时均流量下，稳定流时节流装置产生的差压；

$\bar{q}_v$ ——时均体积流量；

$q'_{v,rms}$ ——体积流量脉动分量均方根值；

$\Delta \bar{p}_{ss}$ —— Δp_{ss} 的时均值；

$\Delta \bar{p}_p$ —— Δp_p 的时均值；

E_T 为附加误差，它与 GB/T 2624 求得的基本误差合成为流量测量总误差。

附录 E

(提示的附录)

流量显示装置基本误差的试验方法

E1 输入参数

E1.1 设置参数

流量显示装置一般应能方便地设置下列参数:

测量管内径 $D_{20}(\text{m})$;

测量管材质的线胀系数 $\lambda_0(\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}))$;

孔板开孔直径 $d_{20}(\text{m})$;

孔板材质线胀系数 $\lambda_k(\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}))$;

当地常用大气压 $P_a(\text{kPa})$;

煤气工作状态相对湿度 φ ;

流量结算的约定标准状态 $P_H(\text{kPa})$ 、 $t_H(^{\circ}\text{C})$;

变送器的测量范围:

差压变送器 $\Delta p_{\min} \sim \Delta p_{\max}(\text{Pa})$;

压力变送器 $p_{\min} \sim p_{\max}(\text{kPa})$;

温度变送器 $t_{\min} \sim t_{\max}(^{\circ}\text{C})$;

密度 ρ : 下列方法中任选一种:

a) 煤气体积组分, 见表 E1。

表 E1

组分	H_2	CH_4	N_2	CO	CO_2	O_2	C_mH_n
体积, %							

各组分的体积之和应为 100%;

b) 按 GB/T 12207, 输入干煤气的相对密度或标准状态 (20°C 、 101.325 kPa) 下干煤气的密度 $\rho_N(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

E1.2 外输入参数

从接线端子输入与 Δp 、 p 、 t 相应的电流信号 $I_{\Delta p}$ 、 I_p 、 I_t 标准信号源可用恒压源, 也可用恒流源。用不低于 4 位半的数字电压表对输入信号监测。

E2 试验步骤

E2.1 体积流量计量基本公式

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} \varepsilon_1 d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p}}{\sqrt{\rho_1}} 3600 \dots\dots\dots (\text{E1})$$

式中: ρ_1 ——湿煤气密度 (kg/m^3), 按本标准中公式(14)、公式(15)和公式(16)确定;

q_v ——工作状态, 湿煤气的体积流量 (m^3/h);

煤气的动力粘度 μ_1 和比热容比 κ_1 , 按本标准中公式(19)、公式(20)、公式(21)、公式(22)和公式(23)计算, 其余参数的定义及确定方法应符合 GB/T 2624 的规定。

在约定状态下, 煤气的体积流量为:

$$q_{vH} = q_v \frac{(p_1 - \varphi p_{s1max})}{p_H - \varphi_H p_{sHmax}} \frac{T_H}{T_1 Z_1} \dots\dots\dots (E2)$$

式中： q_{vH} ——约定状态下，湿煤气的体积流量， m^3/h ；
 Z_1 ——煤气工作状态下压缩系数，按附录 A 中公式(A4)、公式(A5)、公式(A6)、公式(A7)、公式(A8)和公式(A9)计算；
 $p_1、T_1$ ——工作状态下，煤气的绝对压力，热力学温度，由相应变送器提供；
 φ ——工作状态下，湿煤气的相对湿度，一般情况可取 100%，某些场合按实际测量结果而定。

E2.2 试验方法

按表 E2 要求送入标准化信号的组合，并用数字电压表读出其准确值。在显示屏读出实测流量值 q_{vH} 用 q_{ve} 表示。按公式(E1)、公式(E2)提供的基本算式。计算理论值 q_{vH} 用 q_{v0} 表示。由于输入信号为标准信号， q_{ve} 与 q_{v0} 之差即反映了流量显示装置的流量计量误差。循环测量三次取其中最大的数 $E_{ve\max}$ 作流量显示装置的流量计量误差。

表 E2

	试验点			输入方式
$I_{\Delta p}, mA$	18(9)	12(5)	8(2.5)	外输入
I_p, mA	18(9)	12(5)	8(2.5)	外输入
I_t, mA	12(5)	12(5)	12(5)	外输入
实测值 $q_{ve}, m^3/h$				
理论值 $q_{v0}, m^3/h$				
$E'_{ve} = \frac{q_{ve} - q_{v0}}{q_{v0}} \times 100\%$				
注：括号内数字表示变送器输出为 0mA~10mA。				

附 录 F
(提示的附录)
气 体 性 质 表

表 F1

名称	分子式	分子量	密度 ρ (kg/m ³) 20℃ 101.325 kPa	理想相对 密度 G_r 20℃ 101.325 kPa (空气=1)	压缩系数 Z_s 20℃ 101.325 kPa	比热容比 κ 20℃ 101.325 kPa	沸点 T_b (K) 101.325 kPa	临界点				偏心 因子 ω
								温度 T_c K	压力 p_c MPa	密度 ρ_c kg/m ³	压缩 系数 Z_c	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
空气(干)		28.962 6	1.204 1	1.000 0	0.999 63	1.4 *	78.8	132.42	3.766	317	0.312	
氮	N ₂	28.013 5	1.164 6	0.967 2	0.999 7	1.4 *	77.35	126.2	3.393	312	0.290	0.039
氧	O ₂	31.998 8	1.330 2	1.104 8	0.999 3	1.397*	90.17	154.78	5.043	426.2	0.288	0.025
氦	He	4.002 6	0.166 4	0.138 2	1.000 5	1.66	4.215	5.19	0.227	69.9	0.301	
氢	H ₂	2.015 9	0.083 8	0.069 6	1.000 6	1.412*	20.38	32.2	1.297	31.04	0.305	−0.218
甲烷	CH ₄	16.043	0.666 9	0.553 9	0.998 1	1.315*	111.6	190.555	4.599 8	161.55	0.288	0.011 5
乙烷	C ₂ H ₆	30.070	1.250 0	1.038 2	0.992 0	1.18 *	184.6	305.83	4.880	202.9	0.285	0.090 8
丙烷	C ₃ H ₈	44.097	1.833 2	1.522 4	0.983 4	1.13 *	231.05	369.82	4.250	216.6	0.281	0.145 4
丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123	2.416 3	2.006 7	0.968 2	1.10 *	272.65	425.14	3.784	227.7	0.274	0.192 8
异丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123				1.11 *	261.45	408.15	3.648	220.5	0.283	0.176
戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150	2.999 4	2.491 0	0.947 4	1.07 *	309.25	469.69	3.364	237.9	0.262	0.251 0
乙烯	C ₂ H ₄	28.054	1.166 0	0.968 6	0.994 0	1.22 *	169.45	283.35	5.042	227	0.276	0.085 6
丙烯	C ₃ H ₆	42.081	1.749 5	1.452 9	0.985	1.15 *	225.45	364.85	4.611	232.7	0.275	0.147 7
丁烯	C ₄ H ₈	56.108	2.332 6	1.937 3	0.972	1.11	266.85	419.53	4.023	233.4	0.277	0.187 4
顺丁烯-2	C ₄ H ₈	56.108				1.121 4	276.85	433.15	4.20	198.9	0.272	0.202
反丁烯-2	C ₄ H ₈	56.108				1.107 3	274.05	428.15	3.99	234.7		0.205
苯	C ₆ H ₆	78.114	3.247 5	2.696 9	0.936	1.101	353.25	562.16	4.898	302.1	0.271	0.210
氨	NH ₃	17.03	0.708 0	0.588 0	0.989	1.32	239.75	405.5	11.350	235.4	0.242	0.250
硫化氢	H ₂ S	34.082	1.416 9	1.176 7	0.990	1.32	212.85	373.2	8.940	338.5	0.284	0.109
一氧化碳	CO	28.010	1.164 4	0.967 1	0.999 6	1.395	81.65	132.85	3.494	300.4	0.295	0.053
二氧化碳	CO ₂	44.010	1.829 6	1.519 5	0.994 6	1.295	194.75(升华)	304.20	7.382	468.1	0.274	0.239
* 15.6℃, 101.325 kPa												

附 录 G
(提示的附录)
饱和水蒸气的压力和密度表

表 G1

$t, ^\circ\text{C}$	p (绝对压力, Pa)	$\rho, \text{kg/m}^3$
0	611	0.004 847
1	657	0.005 192
2	706	0.005 558
3	758	0.005 946
4	813	0.006 358
5	873	0.006 795
6	935	0.007 258
7	1 002	0.007 748
8	1 073	0.008 267
9	1 148	0.008 816
10	1 228	0.009 396
11	1 313	0.010 01
12	1 403	0.010 66
13	1 498	0.011 34
14	1 599	0.012 06
15	1 705	0.012 82
16	1 818	0.013 63
17	1 938	0.014 47
18	2 064	0.015 36
19	2 198	0.016 30
20	2 339	0.017 29
21	2 487	0.018 33
22	2 644	0.019 42
23	2 810	0.020 57
24	2 985	0.021 77
25	3 169	0.023 04
26	3 363	0.024 37
27	3 567	0.025 67
28	3 782	0.027 23
29	4 008	0.028 76

GB/T 18215.1—2000

表 G1(完)

$t, ^\circ\text{C}$	p (绝对压力, Pa)	$\rho, \text{kg/m}^3$
30	4 245	0.030 37
31	4 495	0.032 05
32	4 758	0.033 82
33	5 033	0.035 66
34	5 323	0.037 59
35	5 627	0.039 61
36	5 945	0.041 72
37	6 279	0.043 93
38	6 630	0.046 24
39	6 997	0.048 65
40	7 381	0.051 16
41	7 777. 6	0.033 79
42	8 198. 1	0.056 52
43	8 638. 7	0.059 38
44	9 099. 6	0.062 36
45	9 582. 1	0.065 46
46	1 008. 6	0.068 69
47	10 611. 8	0.073 06
48	11 161. 9	0.075 51
49	11 735. 6	0.079 22
50	12 334. 8	0.083 02
51	12 960. 5	0.086 79
52	13 612. 6	0.091 08
53	14 293. 2	0.095 35
54	15 002. 2	0.099 79
55	15 740. 6	0.104 4
56	16 510	0.109 2
57	17 312. 6	0.114 2
58	18 147. 2	0.119 3
59	19 016	0.124 7
60	19 920. 2	0.130 2