

煤气流量测量和一般湿气体的干部分计算

许红兵（保定电力职业技术学院，河北保定 071051）

纪 纲（上海同欣自动化仪表有限公司，上海 200070）

提 要 煤气计量的本质是对其干部分进行计量。由于煤气温度变化时，其水蒸气含量会有变化，水蒸气的扣除量相应变化。不仅如此，由于组份变化，混合物的密度也相应变化，所以，只有进行全补偿才能保证测量精确度。严格地说煤气流量测量是一个变组份气体的流量测量任务。

关键词 煤气 流量测量 湿气体干部分 密度补偿

0. 问题的提出

江苏某钢厂在从某分厂输往另一分厂的煤气管道上加装了一台均速管流量计，仪表的配置如图 1 所示。仪表投运后，接收方对计量数据提出异议，认为从消耗定额和热量平衡的关系分析，示值明显偏高。

负责该套表计建设的是该厂计量处能源计量科，当现场服务人员问及流量计显示的流量值是湿煤气的总量还是湿煤气的干部分流量时，计量科对口人员说不清楚，但表示可打电话向一次仪表供应商咨询。后来，供应商答复是湿煤气的总量，所以按照总量计算是因为委托方并未要求测量湿气体的干部分流量。而且委托方并不知晓国家标准中规定煤气应按湿气体的干部分计量。一次仪表供应商后来按照委托方修改之后的要求，按湿气体的干部分重新设计计算，流量示值相应降低，从而纠正了差错。

这个事例让人们想到，国家标准虽然早已发布实施，但要让有关的计量和管理人员普遍了解并正确执行，不是一件容易的事。

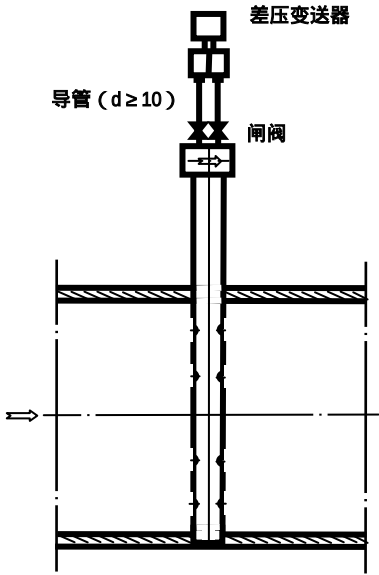


图 1 均速管流量计

1. 湿煤气干部分流量与湿煤气总流量的关系

我们知道，焦炉、高炉、电炉、煤气发生炉等工业炉窑都可以产生煤气。各种炉窑产生的煤气尽管其组成、热值各不相同，但有两点是共同的，即煤气从炉窑出口流出时，温度总是很高，总是带有一定含量的灰尘。所以，这些煤气在输送到用户端之前，一般都要经过冷却和洗涤，因此，一般水分含量都呈饱和状态，相对湿度为 100%。在一些场合，煤气在从供出端向用户端的输送过程中，由于煤气温度逐渐降低，所以一面输送一面有水滴析出，这些在水平管道底部流动的水，需在预先设计的排水节点排出，以免占去管道太大的流通截面，增加输送阻力。

煤气在被输送到用户端后，大多数作为燃料，而煤气中的水分，在燃烧时不仅不会发生热量，而且因为燃料温度低而排烟温度高，导致带走热量，所以，标准中规定煤气计量应将湿煤气中的水份扣除^[1]。

湿煤气的含水量并不是一个常数，它是煤气温度和相对湿度的函数，表 1 所示为气体中饱和水蒸气的压力和密度随温度变化的关系。

表 1 气体中饱和水蒸气的压力和密度随温度变化的关系 ^[2]

温度 t/	饱和水蒸汽分压 $P_{s\max}/\text{Pa}$	完全饱和时的水分密度 $\rho_w/(\text{kg}/\text{m}^3)$
0	608.012	0.0048

10	1225.83	0.0094
20	2333.98	0.0173
30	4246.28	0.0304
40	7374.60	0.0512
50	12336.7	0.0830
60	19917.3	0.1302
70	31155.7	0.1982
80	47356.3	0.2934

从表 1 可清楚地看出，气体温度变化后，其饱和水蒸气分压有大幅度的变化。在不同的地区、不同的季节，一个计量点的煤气温度最大变化可能会达到 40 甚至更大，显然，在湿气体总流量不变的情况下，其干部分流量已经发生了很大的变化，这就是一些钢厂发现，夏季煤气温度高，环境温度也高，煤气单耗不降反升的原因。

2. 差压法煤气流量测量公式

采用标准孔板节流装置的方法测量煤气流量目前仍是主流，与干气体流量测量的最大差别除了扣除湿煤气中的水蒸气之外，还要考虑煤气中的水蒸气含量变化之后，流体密度也发生了变化，从而影响流量示值。

下面是湿煤气干部分流量测量所用的必要公式，这些公式不仅为湿煤气的干部分计算提供依据，而且也实际工况偏离设计工况后，对因此而引入的误差进行校正提供依据。

2.1 流量计算公式

差压流量计的基本公式为^{[3][4]}：

$$q_m = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (1)$$

式中： q_m —— 质量流量，kg/s；

C —— 流出系数；

β —— 直径比， $\beta = d/D$ ；

ε_1 —— 节流件正端取压口平面上的可膨胀性系数；

d —— 工作条件下节流件的开孔直径，m；

D —— 管道内径，m；

Δp —— 差压，Pa；

ρ_1 —— 节流件正端取压口平面上的流体密度，kg/m³。

式中： ε_1 用公式(2)计算^{[3][4]}（当差压装置为标准孔板时）

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \cdot [1 - (P_2/P_1)^{1/\kappa}] \quad (2)$$

式中： κ —— 等熵指数；

P_1 —— 节流件正端取压口绝对压力，Pa；

P_2 —— 节流件负端取压口绝对压力（ $P_2 = P_1 - \Delta P$ ），Pa。

当流量用体积流量表示时，式(1)变为

$$q_v = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p}}{\sqrt{\rho_1}} \quad (3)$$

式中： q_v —— 体积流量， m^3/s ；

其余符号意义同式（1）

2.2 煤气密度计算公式^[4]

煤气在标准状态下干部分的密度 ρ_{gn} 用公式（4）计算^[5]

$$\rho_{gn} = \sum_{i=1}^n X_i \rho_{gni} \quad (4)$$

式中： X_i —— 煤气各组分的体积百分数，%；

ρ_{gni} —— 煤气各组分在标准状态下的密度， kg/m^3 （由查表得^[2]）。

工作状态下，煤气干部分的密度 ρ_{g1} 用公式（5）计算

$$\rho_{g1} = \frac{P_1 - \varphi_1 P_{s1max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_1} \cdot \frac{Z_n}{Z_1} \cdot \rho_{gn} \quad (5)$$

式中： P_n 、 P_1 —— 标准状态和工作状态下气体绝对压力，Pa；

Z_n 、 Z_1 —— 标准状态和工作状态下气体压缩系数；

T_n 、 T_1 —— 标准状态和工作状态下气体温度，K；

P_{s1max} —— 工作状态下，饱和水蒸气压力（ $P_{s1max} = f(t_1)$ 由 T_1 查表 1 得），Pa。

工作状态下湿煤气的密度按（6）计算。

$$\rho_1 = \rho_{g1} + \rho_{s1} \quad (6)$$

式中： ρ_{g1} —— 湿煤气在工作状态下干部分的密度， kg/m^3 ；

ρ_{s1} —— 湿煤气在工作状态下湿部分的密度， kg/m^3 。

ρ_{g1} 和 ρ_{s1} 分别按公式（7）和（8）计算。

$$\rho_{s1} = \varphi_1 \rho_{s1max} \quad (7)$$

$$\rho_{s1max} = f(t_1) \quad (8)$$

式中： ρ_{s1max} —— 工作状态下，饱和水蒸气密度（ $\rho_{s1max} = f(t_1)$ 由 T_1 查表 1 得）， kg/m^3 ；

φ_1 —— 工作状态下，湿煤气的相对湿度（一般取 100%）^[5]；

t_1 —— 节流件正端取压口平面处的流体温度， $^{\circ}C$ 。

将式（5）和（7）代入（6）得

$$\rho_1 = \frac{P_1 - \varphi_1 P_{s1max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_1} \cdot \frac{Z_n}{Z_1} \cdot \rho_{gn} + \varphi_1 \rho_{s1max} \quad (9)$$

2.3 煤气干部分工作状态下体积流量的计算

$$q_{v1} = q_{vn} \frac{P_n}{P_1 - P_{S1max}} \cdot \frac{T_1}{T_n} \cdot \frac{Z_1}{Z_n} \quad (10)$$

式中： q_1 —— 湿煤气干部分工作状态下的体积流量， m^3/h ；

q_{vn} —— 湿煤气干部分状态的体积流量， Nm^3/h 。

其余符号的意义与式（5）相同。

2.4 差压装置的计算

求得 q_{v1} 和 ρ_1 后，就可利用式（3）计算差压装置。

3. 温度压力及 ε_1 的补偿

温度压力补偿公式

气体温度和压力变化后，湿气体干部分在标准状态下的流量可用式（11）进行补偿。

$$q'_{vn} = q_{vn} \frac{P'_1 - P'_{S1max}}{P_1 - P_{S1max}} \cdot \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{T_1}{T'_1} \cdot \frac{Z_1}{Z'_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho'_1}} \quad (11)$$

式中：带“'”符号者为实际使用工况条件下的参数，不带“'”为设计工况所对应的参数，在差压装置计算书中能找到。

式（11）中，由于工况变化， ρ_1 已经从式（9）所表示的值变成式（12）所表示的值。

$$\rho'_1 = \frac{P'_1 - \phi'_1 P'_{S1max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T'_1} \cdot \frac{Z_n}{Z'_1} \rho_{gn} + \phi_1 \rho'_{S1max} \quad (12)$$

$$\rho'_{S1max} = f(T'_1) \quad (13)$$

因此，将式（12）代入式（11）就可得到完整的补偿公式。

$$q'_{vn} = q_{vn} \frac{P'_1 - P'_{S1max}}{P_1 - P_{S1max}} \cdot \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{T_1}{T'_1} \cdot \frac{Z_1}{Z'_1} \cdot \left(\rho_1 / \left(\frac{P'_1 - P'_{S1max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T'_1} \cdot \frac{Z_n}{Z'_1} \rho_{gn} + \rho'_{S1max} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

4. 补偿公式的实现

式（16）看上去很长，但有一半是已知的，只需按仪表说明书的要求填入菜单，另一半是测量值或计算值。具体罗列如下：

q'_{vn} —— 经过补偿的湿气体干部分体积流量， Nm^3/h ；

q_{vn} —— 设计状态湿气体干部分体积流量， Nm^3/h ；

P'_1 —— 工作状态节流件正端取压口气体绝对压力，MPa（实测值）；

P'_{S1max} —— 工作状态下饱和水蒸气压力，kPa（由 T_1 查表 1 得）；

P_1 —— 设计状态节流件正端取压口气体绝对压力，MPa（查孔板计算书得）；

P_{S1max} —— 设计状态下饱和水蒸气压力，kPa（由 T_1 查表 1 得）；

ε'_1 —— 工作状态流体可膨胀性系数（按式（2）计算得）；

ε_1 —— 设计状态流体可膨胀性系数（查孔板计算书得）；

T_1 —— 设计状态气体热力学温度，K（ $T_1 = t_1 + 273.16$ ，查孔板计算书得）；

T'_1 —— 工作状态气体热力学温度，K（由气体温度实测值换算得）；

- Z_1 —— 设计状态气体压缩系数（设置或自动计算得）；
 Z'_1 —— 工作状态气体压缩系数（设置或自动计算得）；
 ρ_1 —— 设计状态节流件正端取压口气体密度， kg/m^3 （查孔板计算书得）；
 P_n —— 标准状态气体绝对压力，101.325kPa；
 T_n —— 标准状态气体热力学温度，K（293.16K）；
 Z_n —— 标准状态气体压缩系数（ $Z_n=1.0000$ ）；
 ρ_{gn} —— 标准状态干煤气密度， kg/m^3 ；
 $\rho'_{1s\max}$ —— 工作状态下饱和水蒸气密度， kg/m^3 （由 T'_1 查 1 得）。

5. 数量上的差异

在分析了相关的关系式之后，大家会进一步关心它们之间的数量概念，即

- 煤气的干部分流量与湿煤气总流量之间差多少？
- 煤气温度变化之后，其干部分流量变化多少？
- 煤气温度变化之后，其组成的变化对测量结果的影响有多大。

要回答这三个问题十分困难，因为关系复杂，不能简单地用某一个数值来描述，下面拟通过例子，作个大概的描述。

5.1 煤气的干部分流量与湿煤气总流量之间的数量概念

在煤气压力较低时，其压缩系数近似为 1，这时，湿煤气的干部分与湿煤气总量之间的体积比，等于干部分压力与总压之比 $(P_1 - \varphi P_{S1\max}) / P_1$ 。

例如： $P_1=5000\text{Pa}$ ，当地大气压 $P_a=101325\text{Pa}$ ， $t_1=60$ ，从 t_1 查表 1 得 $P_{S1\max}=47356\text{Pa}$ ，则在 $\varphi=100\%$ 时，体积比为

$$R_v = \frac{5000 + 101325 - 1 \times 47356.3}{5000 + 101325} = 0.55461$$

随着温度 t_1 的变化， R_v 相应变化。

湿煤气干部分与湿煤气总量之间的质量比，由于水蒸气密度比湿煤气的干部分密度小得多，所以干部分与总量之间的质量比要比其体积比大得多。

5.2 对煤气温度变化进行补偿的例子

(1) 已知条件

被测流体组成和密度

表 2 被测气体的组成和密度

组 分	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
体积百分比%	13.0	26.0	1.0	0.1	59.9
ρ_{20} , kg/m^3	1.829	1.165	0.0838	0.6669	1.1646

常用压力

$p = 5000\text{Pa}$ （表压）

常用温度

$t_1 = 20$

工作状态下相对湿度

$\varphi = 100\%$ （因有水洗涤工序，温度变化时湿度仍为 100%）

差压上限

$\Delta p = 1600\text{Pa}$

管道内径

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

当地平均大气压

$$P_a = 101325 \text{ Pa}$$

(2) 计算

计算煤气在标准状态下干部分的密度 ρ_{gn}

将表 2 中的数据代入式 (5) 得

$$\rho_{gn} = 1.23977 \text{ kg/m}^3$$

计算煤气设计状态下干部分的密度 ρ_{g1}

$$\begin{aligned}\rho_{g1} &= \frac{P_1 - \varphi_1 P_{S1\max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_1} \cdot \frac{1}{1} \cdot \rho_{gn} \\ &= \frac{(5000 + 101325) - 100\% \times 2333.98}{101325} \cdot \frac{293.16}{293.16} \times 1.23977 \\ &= 1.27239 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

求煤气设计状态和使用状态下水蒸气的密度 $\rho_{S1\max}$

查表 1 得

$$\rho_{S1\max} = 0.0173 \text{ kg/m}^3$$

计算湿煤气设计状态下密度 ρ_1

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho_{g1} + \varphi_1 \rho_{S1\max} \\ &= 1.27239 + 0.0173 \\ &= 1.28969 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

(3) 计算补偿结果 (总压不变, 温度从 20 升到 60)

湿煤气干部分在标准状态体积流量 q'_{vn} :

按 $T'_1 = 60$ 查表 1 得

$$P'_{s1\max} = 19917.3 P_a$$

$$\rho'_{S1\max} = 0.1320 \text{ kg/m}^3$$

$$q'_{vn} = \frac{P'_1 - \varphi P'_{S1\max}}{P_1 - \varphi P_{S1\max}} \cdot \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{T_1}{T'_1} \cdot \frac{Z_1}{Z'_1} \left[\rho_1 / \left(\frac{P_1 - \varphi P'_{S1\max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T'_1} \cdot \frac{Z_n}{Z'_1} \cdot \rho_{gn} + \varphi' \rho'_{S1\max} \right) \right]^{\frac{1}{2}} q_{vn} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}&= \frac{(5000 + 101325) - 100\% \times 19917.3}{(5000 + 101325) - 100\% \times 2333.98} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{293.15}{333.15} \cdot \frac{1}{1} \left[1.28969 / \left(\frac{5000 + 101325 - 100\% \times 19917.3}{101325} \cdot \frac{293.15}{333.15} \cdot \frac{1}{1} \times 1.23977 + 0.1302 \right) \right]^{\frac{1}{2}} q_{vn} \\ &= 0.9163 q_{vn}\end{aligned}$$

综上所述, 式 (16) 描述的是不仅对 温度升高引起流体体积膨胀进行补偿, 而且对湿气体的干部分

的变化进行全补偿的补偿幅值。

6. 结束语

1. 煤气一般为湿气体。煤气的计量，按照国家标准是对其干部分进行计量。其实质是将湿气体中所含的水蒸气扣除。

2. 由于煤气温度不同，煤气中的水蒸气饱和分压也不同，所以应按公式在线计算扣除值。

由于煤气的主要组份是一氧化碳、二氧化碳和氮，水蒸气的密度比相同温度压力条件下的干煤气密度小得多，所以，水蒸气分压变化导致煤气组分变化，这使得湿煤气的密度产生明显的变化，在煤气温度较高时，变化尤其显著。严格地说，煤气流量测量是一个变组份气体流量测量任务。

3. 式（1）所示的标准差压流量计基本公式计算出来的是质量流量，将式（1）变换成式（3）就可得到体积流量。从式（3）可见，测量结果要受流体密度影响，此密度不仅受流体温度压力的影响而且受煤气中水蒸气含量的影响。

4. 由于湿气体中的水汽扣除和对由于气体中水蒸气含量的变化引起的密度变化进而带来测量误差进行补偿关系复杂，需要专用流量演算器完成或在 DCS 中写入有关公式来实现。完整的补偿公式如式（17）所示。

参考文献

1. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 第二版. 北京: 化学工业出版社. 2009
2. 王森, 纪纲. 仪表常用数据手册. 北京: 化学工业出版社. 2006 第二版. 140
3. GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量
4. ISO 5167:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full
5. GB/T 18215.1-2000 城镇人工煤气主管道流量测量 第一部分: 采用标准孔板节流装置的方法

（摘自《医药工程设计》2012 年第 6 期）