

湿煤气计量（湿度补偿）方案

——影响湿煤气计量与输差因素的分析

1. 问题的提出

冶金行业煤气计量存在管径大、流速低、介质脏、仪表维护困难等问题，一直是流体测量中的一个难点，对这些问题虽已有成熟解决方案，但仍存在供需输差大、量值置信度低等问题。主要原因是煤气在生产过程中经水洗工艺后，造成煤气中含有大量水蒸气（为方便讨论，把含有水蒸气的煤气称为湿煤气），湿煤气输差大问题早已引起人们的关注，但因没有可行的解决方法，湿煤气计量问题长期困扰着冶金行业的计量人。煤气流量计量须进行湿度修正，并采用干气体积流量（或能量计量）进行结算，才能使煤气计量做到科学、准确、公平。

2. 相关标准与概念

2.1 相关标准

GB/T18215-2000《城镇人工煤气主管道流量测量》国家标准（以下简称《煤气流量测量》标准）给出了关于煤气湿度补偿定义和计算方法。

2.2 干煤气、湿煤气、湿煤气中的干部分的区别

- 1) 干煤气：煤气中不含水蒸气；
- 2) 湿煤气：煤气中含有水蒸气；
- 3) 湿煤气中干部分：湿煤气中扣除了水蒸气的部分。

2.3 煤气中水（蒸汽）存在的状态

- 1) 过饱和态（已有部分蒸汽凝结为水）；
- 2) 饱和态（气态）；
- 3) 不饱和态（气态）。

2.4 关于煤气湿度测量

由于煤气在输送过程中湿度随温度、压力的变化而变化，在不同流量测量点湿度不同，要安装多个湿度计显然是不现实的，另外煤气中的化学成分对湿度计检测元件的腐蚀严重，所以采用湿度计测量湿煤气湿度在实践中是不多见的。

3. 举例说明

湿煤气流量与湿煤气中干部分流量比较。已知条件为：

管径 $D_{20}=900\text{mm}$ ，压力(绝) $=0.11\text{MPa}$ ，工况湿度 $\varphi_1=100\%$ ，流量参比条件： 0°C ， 0.101325MPa 。

煤气组分： $\text{H}_2=60\%$ ， $\text{CH}_4=18\%$ ， $\text{CO}=10\%$ ， $\text{CO}_2=2\%$ ， $\text{N}_2=10\%$

夏季煤气温度： $t_b=60^\circ\text{C}$ ， $t_c=40^\circ\text{C}$ ；冬季煤气温度： $t_b=45^\circ\text{C}$ ， $t_c=25^\circ\text{C}$ ，管道示意图见图1。

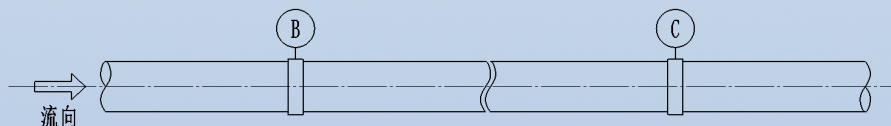


图1

当管道中湿煤气中干部分流量为30000(m³ /h)，不同温度条件下的湿煤气密度和流量值见表1。

夏季	湿煤气 中干部 分流量	湿煤气流量					
		B测点温度 60℃		C测点温度 40℃		B、C 测点输差 (%)	
		密度 $\rho_B=0.4741$		密度 $\rho_C=0.468$		28.52	
		流量	与干部分 比较增加	流量	与干部分 比较增加		
	30000	50508	68.3%	36102	20.3%		
冬季	湿煤气 中干部 分流量	湿煤气流量					
		B测点温度 45℃		C测点温度 25℃		B、C 测点输差 (%)	
		密度 $\rho_B=0.4669$		密度 $\rho_C=0.4788$		15.09	
		流量	与干部分 比较增加	流量	与干部分 比较增加		
	30000	38221	27.4%	32450	8.1%		

表1

从表1可以看到：在湿煤气中干部分流量不变的条件下，湿煤气流量随温度的变化而变化，夏季比冬季的输差大，说明在相对湿度不变的情况下温度越高湿度对煤气流量值的影响越大，要想降低管道的输差，就要从煤气的湿度上考虑解决方案。

4. 湿度对煤气密度影响分析

以焦炉煤气为例，在干煤气密度（组份）不变的条件下，经水洗后的煤气中含有大量呈饱和态的水蒸汽，相对湿度为100%，《煤气流量测量》给出了密度及计算公式。

4. 1 参比状态下湿煤气的密度（见《煤气流量测量》12式）

$$\rho_n = \rho_{gn} + \rho_{sn} \quad (1)$$

式中：

- ρ_n ——湿煤气在参比条件下的密度 (kg/m³)；
- ρ_{gn} ——湿煤气在参比条件下干部分的密度 (kg/m³)；
- ρ_{sn} ——湿煤气在参比条件下湿部分的密度 (kg/m³)。

4. 2 湿煤气在参比条件下干部分的密度（见《煤气流量测量》13式）

$$\rho_{gn} = \sum_{i=1}^n X_i \rho_{in} \quad (2)$$

式中：

- ρ_{in} ——煤气中第i种组分参比条件下的密度 (kg/m³)；
- X_i ——煤气中第i种组分的体积分数；
- n ——煤气体总组分数。

4. 3 操作条件下湿煤气的密度（见《煤气流量测量》14式）

$$\rho = \rho_g + \rho_s \quad (3)$$

式中：

- ρ_s ——湿煤气在操作条件下湿部分的密度 (kg/m³)；
- ρ_g ——湿煤气在操作条件下干部分的密度 (kg/m³)。

ρ_s 与 ρ_g 分别按 (4)、(5) 式计算：

$$\rho_g = \rho_{gn} \frac{P - \varphi P_{s\max}}{P_n} \frac{T_n}{TZ} \quad (4)$$

式中：

- P ——操作条件下煤气的绝对压力 (kPa)；

$P_{s\max}$ ——操作条件下最大可能水蒸汽绝对压力 (kPa) ;

T ——操作条件下煤气的热力学温度 (K) ;

φ ——操作条件下煤气的相对湿度, %,按式 (6) 计算;

Z ——操作条件下干煤气的压缩因子,用雷德利克-孔 (Redlich-Kwong) 方程 (简称R-K公式) 计算。

$$\rho_s = \varphi \rho_{s\max} \quad (5)$$

式中:

$\rho_{s\max}$ ——操作条件下最大可能水蒸汽密度 (kg/m³)。

相对湿度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, 计算式为 (《煤气流量测量》17式)

$$\varphi = \frac{P_s}{P_{s\max}} = \frac{\rho_s}{\rho_{s\max}} \quad (6)$$

式中:

P_s ——操作条件下煤气湿部分的绝对分压 (kPa) 。

从上述 (1)、(3) 式可以看出, 不论在参比还是操作条件, 湿煤气的密度是由两干、湿两部分组成。具体演算要根据实际需要, 参照2、4、5、和6式进行。

4. 4 湿煤气中水蒸汽状态判断

上述系列公式给出了湿煤气各参量的计算方法, 为计算湿煤气流量和湿煤气中干煤气流量提供了依据。但在实际应用中首先要判断湿煤气中水蒸汽状态, 这对计算至关重要。

(1) 湿煤气中水蒸气饱和态

当湿煤气在输送中处于降温、降压过程, 可以判断湿煤气中水蒸汽处于饱和态; 采用上述系列公式可以完成湿煤气各参量的计算, 从而得到湿煤气流量和湿煤气中干煤气流量。

(2) 湿煤气中水蒸气不饱和态

当工艺管道中设置增压风机等, 使湿煤气在输送中升压, 水蒸气呈不饱和状态, 随温度、压力的变化煤气湿度发生变化。因此, 煤气中水蒸气呈不饱和状态下各参数的计算与煤气中水蒸气呈饱和状态有不同, 必须通过状态湿度换算完成。

5. 解决方案

上述一系列公式与分析给出了各参量的计算方法, 流量计算机以此为依据, 进行相关功能的硬件和软件开发。在实际应用中根据现场参数对计算机进行设置, 流量计算机自动完成相关计算与显示:

*操作条件下湿煤气的密度、瞬时流量和累计流量;

*参比条件下干煤气 (湿煤气中干部分) 密度、瞬时流量和累计流量。



(1) 设置功能

在FC2000系列流量计算机中有专用于湿煤气流量计算的参数设置项, 主要包含:

*煤气组份或设计密度 (计算机可根据组份或设计密度计算标准参比条件下的密度与操作条件下的密度);

*相对湿度状态二个选项:

a. 约定 (或已知) 状态 (采用约定的相对湿度及工况温度与压力进行湿度补偿);

b. 工况状态 (计算机根据工况温度与压力及煤气中的蒸汽状态实时计算相对湿度, 进行湿度补偿)。

*煤气中的蒸汽状态, 有饱和态、不饱和态两个选项。

$P_{s\max}$ ——操作条件下最大可能水蒸汽绝对压力 (kPa) ;

T ——操作条件下煤气的热力学温度 (K) ;

φ ——操作条件下煤气的相对湿度 (%) ,按式 (6) 计算;

Z ——操作条件下干煤气的压缩因子,用雷德利克-孔 (Redlich-Kwong) 方程 (简称R-K公式) 计算。

$$\rho_s = \varphi \rho_{s\max} \quad (5)$$

式中:

$\rho_{s\max}$ ——操作条件下最大可能水蒸气密度 (kg/m³)。

相对湿度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, 计算式为 (《煤气流量测量》17式)

$$\varphi = \frac{P_s}{P_{s\max}} = \frac{\rho_s}{\rho_{s\max}} \quad (6)$$

式中:

P_s ——操作条件下煤气湿部分的绝对分压 (kPa) 。

从上述 (1) 、 (3) 式可以看出, 不论在参比还是操作条件, 湿煤气的密度是由两干、湿两部分组成。具体演算要根据实际需要, 参照2、4、5、和6式进行。

4. 4 湿煤气中水蒸气状态判断

上述系列公式给出了湿煤气各参量的计算方法, 为计算湿煤气流量和湿煤气中干煤气流量提供了依据。但在实际应用中首先要判断湿煤气中水蒸汽状态, 这对计算至关重要。

(1) 湿煤气中水蒸气饱和态

当湿煤气在输送中处于降温、降压过程, 可以判断湿煤气中水蒸气处于饱和态; 采用上述系列公式可以完成湿煤气各参量的计算, 从而得到湿煤气流量和湿煤气中干煤气流量。

(2) 湿煤气中水蒸气不饱和态

当工艺管道中设置增压风机等, 使湿煤气在输送中升压, 水蒸气呈不饱和状态, 随温度、压力的变化煤气湿度发生变化。因此, 煤气中水蒸气呈不饱和状态下各参数的计算与煤气中水蒸气呈饱和状态有不同, 必须通过状态湿度换算完成。

5. 解决方案

上述一系列公式与分析给出了各参量的计算方法, 流量计算机以此为依据、进行相关功能的硬件和软件开发。在实际应用中根据现场参数对计算机进行设置, 流量计算机自动完成相关计算与显示:

*操作条件下湿煤气的密度、瞬时流量和累计流量;

*参比条件下干煤气 (湿煤气中干部分) 密度、瞬时流量和累计流量。



(1) 设置功能

在FC2000系列流量计算机中有专用于湿煤气流量计算的参数设置项, 主要包含:

*煤气组份或设计密度 (计算机可根据组份或设计密度计算标准参比条件下的密度与操作条件下的密度) ;

*相对湿度状态二个选项:

a. 约定 (或已知) 状态 (采用约定的相对湿度及工况温度与压力进行湿度补偿) ;

b. 工况状态 (计算机根据工况温度与压力及煤气中的蒸汽状态实时计算相对湿度, 进行湿度补偿) 。

*煤气中的蒸汽状态, 有饱和态、不饱和态两个选项。