

富氢气流量的测量与纯氢流量的计算

孙尚峰, 李剑, 孙广军 营创三征(营口)精细化工有限公司 (辽宁营口 115003)

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (上海 200070)

提 要 供需双方贸易交接计量以富氢气体的纯氢量为准, 而要测量的富氢气体, 因含有饱和水蒸气, 所以随着温度的变化, 水蒸气含量相应变化。又因氢含量也在波动, 所以平均分子量变化不停, 为测量带来困难。由于测量对象管径大、静压低、流速低、密度小, 无法用涡街流量计测量, 所以采用孔板流量计, 并用热导式氢分析仪测量氢含量, 在流量演算器中进行密度补偿、气体干部分计算和纯氢流量计算。测量准确、可靠、数据可信。

关键词 变组分气体 流量测量 湿气体干部分 孔板流量计 ϵ 补偿

Hydrogen-rich flow measurement and calculation of pure hydrogen flow

Sun shangfeng, Li jian, Sun guangjun Yingchuang Sanzheng (Yingkou) Fine Chemicals Co. Ltd., (Yingkou 115003)

Ji bofeng, Ji gang Shanghai Tontion automation instrumentation Co. Ltd., (Shanghai 200070)

Abstract: The trade transfer between the supply and demand sides is based on the amount of pure hydrogen in the hydrogen-rich gas. The hydrogen-rich gas which is measured, saturated water vapor content in the hydrogen-rich gas changes corresponding to temperature. It's difficult to measure because the hydrogen content is also fluctuating, the average molecular weight changes continuously. We use orifice to measure instead of vortex flowmeter due to the large diameter of the measuring object, low static pressure, low flow rate and low density. And measure the hydrogen content with a thermal conductivity hydrogen analyzer, make density compensation, gas dry part calculation and pure hydrogen flow calculation in flow computer. The measurement results are accurate and reliable.

Key words: Variable component gas flow measurement wet gas dry part orifice flowmeter ϵ compensation

0. 问题的提出

某化工厂从附近的氯碱厂输入纯度为 98% 的氢, 生产化工产品, 生成氢含量为 (70~90)% (干部分的体积比) 的富氢气体, 经一根内径为 468mm 的管道返回氯碱厂, 混合气中的水气含量达饱和程度, 混合气中的氢含量用热导式氢分析仪测量, 测量范围为 (50~100)%V/V。成分分析仪制造厂提供的信息是, 氢分析仪给出的是干气体中的氢含量。

工艺专业要求测量湿气体的干部分流量, 并与氢含量数据一起计算纯氢流量。这是一个变组分气体的湿气体干部分流量测量问题。

1. 测量方案的确定

1.1 涡街流量计方法

(1) 此方法信号处理较简单

涡街流量计说到底是一种体积流量计, 即其输出仅与流过旋涡发生体处的流体平均流速成正比, 而与其物性 (密度、粘度等) 无关。

如果能用涡街流量计测量这种气体的流量, 则信号经下面的处理后, 就可得到纯氢流量。

- a. 将湿气体的水汽量扣除;
- b. 将湿气体的干部分流量换算到标准状态流量;
- c. 将测量到的干气体中氢含量值与干部分流量相乘, 就得到纯氢流量。

但因测量对象具有管径大, 流速低, 静压低, 流体密度小的特点, 用涡街流量计测量是否可行须经分析和具体验算。

(2) 已知条件

本测量对象与最低可测流速有关的参数有:

- a. 管道内径: $D_{20} = 468\text{mm}$;
- b. 最高压力: 70 kPa G;
- c. 常用压力: 40 kPa G;
- d. 最低压力: 20 kPa G;

- e. 最大流量：10000 Nm³/h（干部分）；
- f. 常用流量：7000 Nm³/h（干部分）；
- g. 最小流量：2800 Nm³/h（干部分）；
- h. 介质温度：21℃~63.5℃（常用 50℃）
- i. 常用工况流体密度： $\rho_1 = 0.4138 \text{ kg/m}^3$ 。

工况条件下的流体密度小于 0.5kg/m³，使用涡街流量计测量受到流体密度的限制，根据上述数据计算得到常用工况条件下最小流量对应的流速为 3.57m/s。

(3) 最低可测流速验算^{[1][2]}

横河公司提供了大口径 DY 型涡街流量计最低可测流速公式为

$$V = (21000 / \rho)^{\frac{1}{5}} \quad (1)$$

式中 V —— 最低可测流速，m/s； ρ —— 流体密度，kg/m³。

将 $\rho = 0.4138 \text{ kg/m}^3$ 代入式 (1) 得最低可测流速为 8.73 m/s，显然比最小流量对应的最低流速大得多。

(4) 缩小管径的方法是否可行

缩小后的管径与缩径前后流速的关系可用式 (2) 计算：

$$\frac{D_2^2}{D_1^2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

式中 D_2 —— 缩小后的管径，mm； D_1 —— 缩小前的管径，mm； V_2 —— 缩小后的流速，m/s； V_1 —— 缩小前的流速，m/s。

将 $D_1 = 468 \text{ mm}$ ， $V_1 = 3.57 \text{ m/s}$ ， $V_2 = 8.73 \text{ m/s}$ 代入式 (2)，得 $D_2 = 299.3 \text{ mm}$ ，即要选 DN300 涡街流量计才能勉强将最小可测流量覆盖，如果混合气中的氢含量高于常用值或流体压力低于常用值（出现这种情况的概率为 50%），则因流体密度减小，导致最小流量无法测量。而且管道缩径后，流通截面积只有缩径前的 41%，缩径导致流速增高，最大流量时的流速高达 31m/s，大大高于规程规定的安全流速^[3]。因此，改用差压流量计方法。

1.2 科氏力质量流量计方法

用科氏力质量流量计直接测量变组份气体的质量流量，是个既省力又准确的方案，但要求被测气体静压在 0.1MPa 以上，以便测量管内气体达到必要的流速。但在本例中，静压最低时仅 20kPa。而且流速升高，也不符合安全流速的规定。

1.3 孔板流量计方法

孔板流量计方法只要雷诺数大于 5000，就能保证测量精确度。不受下限流速的约束。但对于组份变化的气体，在温度压力不变的情况下，其密度会随组分的变化而变化，从而引入测量误差，为此必须对组分变化对测量的影响进行补偿。

2. 孔板流量计方法的实施

2.1 孔板流量计基本公式^{[4][5][6]}：

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

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。

当流量用体积流量表示时，式 (3) 变为式 (4)

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

式中： q_v —— 体积流量，m³/s；其余符号意义同式 (3)。

2.2 混合气密度计算公式^{[7][8]}

① 标准状态下湿气体干部分的密度 ρ_{gn} 用公式 (5) 计算。

$$\rho_{gn} = \sum_{i=1}^n X_i \rho_{gni} \quad (5)$$

式中： ρ_{gn} —— 标准状态湿气体干部分密度， kg/m^3 ； X_i —— 干部分各组分的含量，% (V/V)； ρ_{gni} —— 干部分各组分的密度， kg/m^3 。

由于氢含量的百分比占有较大的体积百分数，本实例中只对湿气体干部分中的氢含量进行测量，氢之外的几种气体认为是保持固定比例，即式 (5) 简化成式 (6)。

$$\rho_{gn} = X_h \rho_{hn} + (1 - X_h) \rho_{Nn} \quad (6)$$

式中： X_h —— 氢含量，% (V/V)； ρ_{hn} —— 标准状态氢气密度， kg/m^3 ； ρ_{Nn} —— 标准状态氢之外其他气体平均密度， kg/m^3 。

② 工作状态下干部分密度 ρ_g 的计算

$$\rho_g = \frac{P_1 - \phi_1 P_{s1\max}}{P_n} \cdot \frac{T_n \cdot Z_n}{T_1 \cdot Z_1} \cdot \rho_{gn} \quad (7)$$

式中： ρ_g —— 工作状态干部分密度， kg/m^3 ； P_1 —— 工作状态差压装置正端取压口绝对压力，Pa； ϕ_1 —— 湿气体相对湿度，取 $\phi_1 = 100\%$ ； $P_{s1\max}$ —— 工作状态下饱和水蒸气分压，Pa； P_n —— 标准状态绝对压力，Pa； T_n 、 T_f —— 标准状态和工作状态气体热力学温度，K； Z_n 、 Z_f —— 标准状态和工作状态气体压缩系数，取 $Z_n = Z_f = 1$ ； ρ_{gn} —— 标准状态干气体密度， kg/m^3 。其中， $P_{s1\max}$ 由查表 1 得。

表 1 饱和水蒸气的压力和密度表^[9]

t/°C	20.0	24.0	28.0	32.0	36.0	40.0	44.0	48.0	52.0	56.0	60.0	64.0
P_{is} (绝对压力) /Pa	2334.0	2981.2	3775.6	4756.2	5942.8	7374.6	9100.6	11160	13612	16514	19917	23909
$\rho_{s1\max}$ / (kg/m^3)	0.0173	0.0218	0.0272	0.0338	0.0417	0.0512	0.0623	0.0756	0.0910	0.1092	0.1302	0.1546

③ 工作状态下湿气体密度 ρ_{1f} 的计算。

$$\rho_{1f} = \rho_{g1} + \rho_{s1} \quad (8)$$

$$= \rho_{g1} + \phi_1 \rho_{s1\max}$$

$$= \frac{P_1 - \phi_1 \rho_{s1\max}}{P_n} \cdot \frac{T_n \cdot Z_n}{T_1 \cdot Z_1} \rho_{gn} + \phi_1 \rho_{s1\max}$$

式中： ρ_{s1} —— 工作状态下水蒸气的密度， kg/m^3 ； $\rho_{s1\max}$ —— 工作状态下饱和水蒸气密度， kg/m^3 。

$$\rho_{s1\max} = f(T_1) \quad (9)$$

$\rho_{s1\max}$ 由查表 1 得。

其余符号的意义同式 (7)。

2.3 工作状态下混合气干部分体流量的计算

$$q_{v1} = \frac{P_n}{P_1 - \phi_1 P_{s1\max}} \cdot \frac{T_1}{T_n} \cdot \frac{Z_1}{Z_n} \cdot q_{vn} \quad (10)$$

式中： q_{v1} —— 工作状态下混合气干部分体流量， m^3/h ； q_{vn} —— 标准状态下混合气干部分体流量， Nm^3/h 。(由测量任务书给出，包括刻度流量 $q_{vn\max}$ ，常用流量 $q_{vn\text{com}}$ 和最小流量 $q_{vn\min}$) 其余符号的意义与式 (7) 相同。

2.4 差压装置的计算

求得 q_{v1} 和 ρ_{1f} 后，就可利用式 (4) 计算差压装置。

3. 温度压力及 ε_1 的补偿

3.1 温度压力补偿氢含量补偿公式

气体温度偏离设计温度，压力偏离设计压力，氢含量偏离设计含量后，湿气体干部分流量可用式 (11) 进行补偿^[10]。

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

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获得。

式 (9) 中，由于工况变化， ρ_1 已经从式 (8) 所表示的值变成式 (12) 所表示的值。

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

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

将式 (6) 代入式 (12) 并用设计使用工况下的氢含量 X'_h 代替 X_h ，得

$$\rho'_1 = \frac{P'_1 - \phi P'_{S1max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T'_1} \cdot \frac{Z_n}{Z'_1} [X'_h \cdot \rho_{hn} + (1 - X'_h) \cdot \rho_{Nn}] + \phi \cdot \rho'_{S1max} \quad (14)$$

式中符号的意义同式 (7) 和 (8)。

其中： $\rho_{hn} = 0.0838 \text{ kg/m}^3$

ρ_{Nn} 被看做常数。

因此，将式 (14) 代入式 (11) 就可得到完整的补偿公式。

$$q'_{Vn} = q_{Vn} \frac{P'_1 - P'_{S1max}}{P_1 - P_{S1max}} \cdot \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{T_1}{T'_1} \cdot \frac{Z_1}{Z'_1} \left(\rho_1 / \left\{ \frac{P'_1 - P'_{S1max}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T'_1} \cdot \frac{Z_n}{Z'_1} [X'_h \rho_{hn} + (1 - X'_h) \rho_{Nn}] + \phi_1 \rho'_{S1max} \right\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

3.2 流量示值的可膨胀性系数补偿

为了提高湿气体干部分流量测量精确度，必须进行气体可膨胀性系数 (Expansibility) 的补偿和按 GB/T 2624-2006 中的 $C = f(\beta, Re_D)$ 公式进行雷诺数补偿，具体操作方法详见参考文献[10][11]。

3.3 补偿公式的实现

式 (15) 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_{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 (4) 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} —— 标准状态干气体密度， kg/m^3 ；

$\rho'_{s \max}$ —— 工作状态下饱和水蒸气密度, kg/m^3 (由 T'_1 查表 1 得)。

3.4 结构上的处理

由于混合气中的水蒸气含量总是达到饱和程度, 为防止冷凝水在孔板前聚积, 在三阀组内聚积, 在差压变送器高低压室内聚积, 影响测量精确度, 仪表采用偏心孔板, 并将差压变送器布置在水平管道上方, 而且弃用针形阀三阀组, 改用不锈钢球阀, 从而杜绝积水。

为便于清理差压信号导压管内可能生成的污物, 差压装置采用径距取压方法。

4. 纯氢流量的计算

孔板流量计经密度补偿测得的湿气体干部分流量, 换算到标准状态体积流量后, 乘上干气体中的氢含量, 就得到纯氢流量。

5. 结束语

(1) 这是一个变组分气体流量测量问题, 组分的变化源自混合气中氢含量的变化和气体温度变化引起的水气含量的变化。介质温度冬季最低 21°C , 夏季最高 63.5°C , 水气含量相差 9 倍之多。所以混合气密度变化很大。

(2) 本实例采用热导式氢分析仪测量气体干部分的氢含量, 并根据气体中饱和水蒸气压力与饱和水蒸气密度表, 扣除水气含量, 计算得到纯氢流量。

(3) 本实例采用流量演算器实现各项计算。由于使用的是汇编语言, 所以杜绝了病毒的侵扰。运行安全可靠。

(4) 本实例中的系统在东北某化工企业投运六年以来, 运行可靠, 未发生过故障。测量结果与产品产量一起计算得到的氢单耗, 不受季节影响, 故作为贸易交接手段双方认可。从而解决了经营管理中的难题。

参考文献

1. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计. 北京: 中国石化出版社, 2006
2. 蔡武昌, 应启冕. 新型流量检测仪表. 北京: 化学工业出版社, 2006
3. GB50177-2005 氢气站设计规范
4. 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
5. ISO 5167:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full
6. 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用. 北京: 化学工业出版社, 2001
7. 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
8. 孙淮清, 王建中. 流量测量节流装置设计手册 第二版. 北京: 化学工业出版社. 2005
9. 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
10. 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
11. 纪纲, 王建忠. 差压流量计范围度问题研究. 自动化仪表, 2005, (8)

本文源自于一石油化工自动化 2019.3