

浅谈几种常见烟气含湿量测试仪的性能特点及使用场景

刘宇明, 种叶龙, 黄家辉, 张亦杰, 张楠, 邬昕*

上海市计量测试技术研究院, 上海

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月21日

摘要

烟气含湿量是工业排放监测、燃烧效率优化及环保合规性评估的关键参数。不同工况下对烟气湿度的测量需求差异显著, 阻容法、重量法和干湿球法作为主流测试方法, 各有其技术特点及适用场景。本文结合文献与工业实践, 系统分析三类方法的原理、性能特征及适用范围, 为仪器选型提供科学依据。

关键词

含湿量, 阻容法, 重量法, 干湿球法

Research on the Innovative Path of New Quality Productivity to Empower Traditional Measurement

Yuming Liu, Yelong Zhong, Jiahui Huang, Yijie Zhang, Nan Zhang, Xin Wu*

Shanghai Institute of Metrology and Testing Technology, Shanghai

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

Flue gas moisture content is a key parameter for industrial emission monitoring, combustion efficiency optimization, and environmental compliance assessment. The measurement requirements for flue gas humidity under different working conditions are significantly different, and the resistance and capacitance method, gravimetric method and wet and dry bulb method are the mainstream test

*通讯作者。

文章引用: 刘宇明, 种叶龙, 黄家辉, 张亦杰, 张楠, 邬昕. 浅谈几种常见烟气含湿量测试仪的性能特点及使用场景[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 380-383. DOI: 10.12677/jsta.2025.133037

methods, each with its own technical characteristics and applicable scenarios. In this paper, the principles, performance characteristics and scope of application of the three types of methods are systematically analyzed by combining literature and industrial practice, so as to provide a scientific basis for instrument selection.

Keywords

Moisture Content, Resistance and Capacitance Method, Gravimetric Method, Wet and Dry Bulb Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业烟气含湿量是衡量燃烧效率、评估污染物排放及优化环保治理工艺的关键参数。随着全球环保法规的日趋严格(如欧盟《工业排放指令》2010/75/EU、中国《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75-2017), 精准测量烟气湿度已成为工业过程控制与环保合规的刚性需求。然而, 烟气成分复杂(如含硫化物、氮氧化物、粉尘等), 且温度、压力波动显著, 导致传统湿度测量方法在实际应用中面临精度下降、设备腐蚀、数据漂移等诸多挑战[1] [2]。

目前, 阻容法、重量法及干湿球法作为主流技术, 在原理、性能及适用性上呈现显著差异。例如, 阻容法虽响应迅速, 但在极端酸性环境中易受干扰; 重量法虽精度高, 却难以满足在线监测需求; 干湿球法则受限于工况条件, 逐步退出核心工业场景。本文从技术原理、性能参数、应用边界及典型案例出发, 系统对比三者的技术经济性, 为工程选型提供科学依据。

2. 烟气含湿量测试仪的性能特点及使用场景

2.1. 阻容法烟气含湿量测试仪

阻容法是基于高分子湿敏电容传感器(Hygroscopic Capacitive Sensor)的介电常数变化原理[3]。传感器由对称梳状电极和高分子聚合物薄膜(如聚酰亚胺)组成, 当水分子吸附至薄膜微孔时, 介电常数升高, 电容值(C)与烟气绝对湿度(H)呈线性关系:

$$C = k \cdot H + C_0 \quad (1)$$

式中, k 为灵敏度系数, C_0 为初始电容值。传感器内置 Pt100 温度探头, 通过多项式拟合算法补偿温度漂移(典型补偿范围 -20°C ~ 180°C)。

测量范围与精度: 绝对湿度 0%~40% vol, 分辨率 0.01% vol, 综合误差 $\pm 1.5\%$ FS (满量程); 响应特性: T90 响应时间 ≤ 15 秒(ISO 11632 标准要求 ≤ 30 秒), 支持 4~20 mA/RS485 信号输出; 环境适应性: 采用 316L 不锈钢探杆和陶瓷基体封装, 耐受粉尘浓度 $\leq 200 \text{ g/m}^3$ 、 $\text{SO}_2 \leq 5000 \text{ ppm}$ 、 $\text{NO}_x \leq 3000 \text{ ppm}$ 的恶劣工况; 抗干扰设计: 配备电伴热系统(120°C ~ 150°C 恒温)防止酸性冷凝液腐蚀, 并通过动态基线校正(DBC)消除油污、积碳对传感器的污染。

如图 1, 郭等人[4]研究发现在多次试验中, 预热温度一定的情况下大多数阻容法烟枪仪器在 5%、10% 和 20%呈上述类似一次函数的线性变化, 说明其具有宽量程误差稳定性。

预热 温度	烟气含湿量测量仪A			烟气含湿量测量仪B		
	5% 测量点	10% 测量点	20% 测量点	5% 测量点	10% 测量点	20% 测量点
	含湿量测量值					
60℃	4.75%	9.41%	18.8%	4.59%	9.22%	18.5%
70℃	4.72%	9.37%	18.6%	4.57%	9.18%	18.5%
80℃	4.40%	8.93%	17.9%	4.33%	8.78%	18.2%
90℃	4.30%	8.78%	17.9%	4.26%	8.60%	18.1%

Figure 1. Test data of the capacitance method flue gas moisture content tester at different preheating temperatures [4]
图 1. 不同预热温度阻容法烟气含湿量测试仪测试数据[4]

2.2. 重量法烟气含湿量测试仪

重量法严格遵循《固定污染源废气低浓度颗粒物的测定重量法》(HJ 836-2017)和 ISO 12141:2002 标准,通过等速采样抽取定量烟气,经干燥管(硅胶/分子筛)吸附水分后,利用高精度天平(分辨率 0.1 mg)测量吸湿前后质量差 Δm , 计算含湿量公式:

$$H = \frac{\Delta m}{V \cdot \rho} \times 100\% \quad (2)$$

式中, V 为采样体积(标态), ρ 为水蒸气密度。

系统组成: 含烟尘采样枪、冷凝器、干燥器、质量流量控制器(MFC)及十万分之一天平; 测量精度: 扩展不确定度 $U = 1.2\%$ ($k = 2$), 低湿度(1%~5% vol)区间优于阻容法; 采样要求: 等速跟踪误差 $\leq \pm 8\%$, 单次采样时间 ≥ 30 分钟, 实验室恒温($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)恒湿($50 \pm 5\%$ RH)条件[5]。无法实时反馈数据, 操作周期长达 2~4 小时; 设备成本高昂, 需专业技术人员操作。

2.3. 干湿球法烟气含湿量测试仪

干湿球法通常使用两个相同的热电偶作为感温元件, 分别测量干球温度和湿球温度。干球温度感温元件在烟气流主体内, 湿球温度感温元件用棉纱包裹, 与水容器相连。将湿球与周围的烟气视为一个系统, 而不考虑辐射热传导。基于干湿球法原理的自动湿度测量装置, 具有微处理器控制传感器, 测量并采集湿球和干球的表面温度, 以及湿球的表面压力和废气的静压, 同时由湿球的表面温度导出该温度下的饱和水蒸气压力; 并结合输入大气压力, 根据式(3)自动计算烟气含水率[6]。

$$X_{sw} = \frac{P_{bv} - 0.00067(t_c - t_b)(B_a + P_b)}{B_a + P_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_{sw} ——气体中水分含量体积百分数, %;

P_{bv} ——温度 t_b 为时饱和水蒸气压力, Pa;

t_b ——湿球温度, $^\circ\text{C}$;

t_c ——干球温度, $^\circ\text{C}$;

P_b ——通过湿球温度计表面的气体压力, Pa;

B_a ——大气压力, Pa;

P_s ——测点处排气静压, Pa;

根据测得的干球温度、湿球温度及通过湿球表面的气体绝对压力, 可按式(4)计算气体中水蒸汽的分压力, 然后再根据所测气体的绝对压力, 求出气体中水蒸汽含量的体积百分数[7]。

$$P_w = P_{bv} - A(t_c - t_b)P_b$$

(4)

式中, P_w ——气体中水蒸汽的分压力, kPa;

P_{bv} ——湿球温度下的饱和水汽压, kPa;

A ——干湿球系数;

t_b ——湿球温度, °C;

t_c ——干球温度, °C;

P_b ——通过气球表面的气体绝对压力, kPa。

表 1 是干湿球法烟气含湿量测试仪测试数据, 可以看出在 20% 偏离标准值较大, 这是因为干湿球法高温高湿含湿量测试, 温度或含湿量过高仪器数值误差明显偏大。在使用具有预热功能的干湿球法烟气含湿量测试仪, 需注意将预热功能关闭, 建议使用在 10% 以下的含湿量的工况, 确保其含湿量数据的准确性。

Table 1. Test data of wet and dry bulb method flue gas moisture content tester
表 1. 干湿球法烟气含湿量测试仪试验数据

标准器温度(°C)	露点(°C DP)	计算含湿量值(%)	仪器含湿量值(%)
50.9	33.0	4.98	5.9
50.2	46.1	10.03	9.1
70.0	59.9	19.60	17.5

3. 结论与展望

阻容法、重量法和干湿球法作为烟气含湿量检测的三大主流技术, 其性能特点与应用场景已形成明确分工。阻容法凭借高实时性、强环境适应性(耐高温、高湿、腐蚀性气体)和低维护成本, 成为工业在线监测(如 CEMS 系统)的首选方案, 尤其在火电、石化、钢铁等复杂工况中表现突出; 重量法以实验室级精度(误差 $\leq \pm 1.0\%$)和抗组分干扰能力, 在法规合规性检测、科研校准等场景中不可替代, 但其高昂的设备和时间成本限制了工业现场应用; 干湿球法因结构简单、成本低廉, 在低温洁净烟气的临时检测中仍具价值, 但受限于环境适应性差、维护频繁等缺陷, 正逐步被便携式阻容仪取代。

当前技术格局下, 阻容法主导工业在线监测, 重量法坚守实验室高精度阵地, 干湿球法则退居辅助角色。未来十年, 随着新材料、智能算法与政策法规的协同推进, 烟气含湿量检测将迈向更高精度、更强适应性与更广应用边界, 为全球减污降碳提供坚实技术支撑。

参考文献

[1] 王永强, 宋春玲, 黄继鑫, 等. 基于化工行业烟气特性的脱硝技术优选策略研究[J]. 山西化工, 2025, 45(1): 240-242+249.

[2] 李军状. 燃煤电厂有色烟羽成因与控制关键技术研发及应用[Z]. 国能南京电力试验研究有限公司, 2018-12-01.

[3] 刘军, 杨志伟, 韩立民. HMP45D 湿度测量误差调整及校准[J]. 吉林气象, 2008(1): 42-43.

[4] 邬昕, 乔家广, 庄炜杰. 预热对阻容法烟气含湿量测量仪测量结果的影响[J]. 上海计量测试, 2023, 50(2): 47-48+53.

[5] 黄成浩. 烟气湿度测试仪校准装置的研制[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(4): 18-20.

[6] 苑继超, 顾冬梅. 干湿球法测高温烟气湿度的误差研究[J]. 河北冶金, 2019(z1): 44-46.

[7] 潘建明, 田云萍. 干湿球法测量空气与烟气含湿量计算公式的推导和改正[J]. 环境与开发, 1998(4): 48-49+51.