

预热温度对干湿球法烟气含湿量测试仪含湿量测试的影响

刘宇明, 黄家辉, 邬 昕

上海市计量测试技术研究院, 上海

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

本文针对具有预热功能的干湿球法烟气含湿量测试仪进行不同预热温度的含湿量测试, 研究不同预热温度对干湿球法烟气含湿量测试仪含湿量测试的影响, 测试的干湿球法烟枪数据, 为干湿球法烟气含湿量测试仪实际使用和计量校准提供参考。

关键词

干湿球法, 含湿量

The Influence of Preheating Temperature on the Moisture Content Testing of Flue Gas Using the Dry Wet Bulb Method

Yuming Liu, Jiahui Huang, Xin Wu

Shanghai Institute of Metrology and Testing Technology, Shanghai

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

This paper conducts moisture content tests of different preheating temperatures for dry and wet bulb flue gas humidity testers with preheating function, and studies the impact of different preheating temperatures on the moisture content test of dry and wet bulb flue gas humidity testers. The tested smoke gun data of dry and wet bulb flue gas humidity testers provide reference for the actual use and metering calibration of dry and wet bulb flue gas humidity testers.

Keywords

Dry and Wet Bulb Method, Moisture Content

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/>

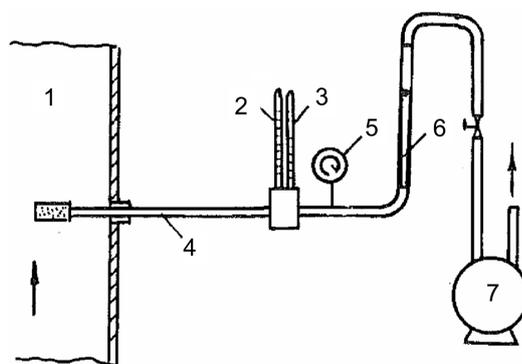


Open Access

1. 研究背景

近年来,随着现代微电子、微机械加工、计算机等技术发展,出现了阻容法、电容法、激光法等[1][2]多种湿度测量方法,有些厂家还会根据实际情况研发生产具有多功能的烟气含湿量测试仪,例如具有预热功能的干湿球法烟气含湿量测试仪。郭等人[3]研究了预热温度对阻容法烟气含湿量测试仪的影响,目前仪器自带加热温度是否对干湿球法烟气含湿量测试仪测试具有如何影响还需研究。

图1是干湿球法测定排气水分含量装置示意图,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(1)自动计算烟气含水率。



1——烟道; 2——干球温度计; 3——湿球温度计; 4——保温采样管;
5——真空压力表; 6——转子流量计; 7——抽气泵

Figure 1. Schematic diagram of the device for determination of exhaust water content by wet and dry bulb method

图 1. 干湿球法测定排气水分含量装置示意图

$$X_{sw} = \frac{P_{bv} - 0.00067(t_c - t_b)(B_a + P_b)}{B_a + P_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_{sw} ——气体中水分含量体积百分数, %;

P_{bv} ——温度 t_b 时为饱和水蒸气压力, Pa;

t_b ——湿球温度, °C;

t_c ——干球温度, °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,可按公式(2)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[4]。

$$P_w = P_{bv} - A(t_c - t_b)P_b \quad (2)$$

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。

图 1 是干湿球法测定排气水分含量装置示意图,干球温度计测量烟气的温度,湿球温度计测量水管中的温度。在日常工作中,若误开具有预热功能的干湿球法烟气含湿量测试仪的预热功能,会导致干球温度测量值偏高,会对干湿球法烟气含湿量测试仪测试造成影响,可能对生产监督造成不必要的影响,因此对于此类具有预热功能的干湿球法烟气含湿量测试仪需要进行研究,此实验数据仅供具有加热功能的干湿球法烟气含湿量测试仪测试参考。

2. 试验与结果分析

2.1. 试验设计与参数选择

本文选用 ClimeWvent C/600/70/3 温湿度标准箱为湿度发生装置,配有露点仪铂电阻温度计和压力计记录测试时标准数值。选取含湿量为 5%、10%和 20%作为研究不同预热温度下的标准含湿量值,预热温度分别为 0°C (仪器初始含湿量值,初始含湿量)、50°C、60°C、70°C、80°C、90°C、100°C、110°C和 120°C 预热。将烟枪放置在温湿度标准箱内,设置好 5% (温度 50.0°C,湿度 40.0% RH)、10% (温度 50.0°C,湿度 80.0% RH)、20% (温度 70.0°C,湿度 65.0% RH)标准值温度与湿度参数。待温湿度标准箱和烟枪加热温度达到稳定后 30 min,每隔 2 min 记录温度和露点、仪器温度和仪器含湿量示值,每个工况记录三组数据并取平均值。

2.2. 试验结果与分析

表 1 是不同预热温度下干湿球法烟气含湿量测试仪试验数据,详细记录了标准器温度、露点、仪器加热温度和仪器示值。计算含湿量值是结合记录的标准器参数和当天测试时大气压数据,使用公式(1)计算而来的。

Table 1. Schematic diagram of the device for determination of exhaust water content by wet and dry bulb method

表 1. 不同预热温度下干湿球法烟气含湿量测试仪试验数据

标准器 温度(°C)	露点 (°CDP)	计算 含湿量值(%)	设置 加热温度(°C)	实际 加热温度(°C)	仪器 含湿量值(%)
50.9	33.0	4.98	0	0	5.9
50.8	32.0	4.70	50	53	5.9

续表

50.6	32.0	4.70	60	61	6.7
50.3	32.0	4.70	70	71	7.3
50.4	32.4	4.81	80	82	7.8
50.4	32.2	4.76	90	92	8.7
50.4	32.3	4.78	100	102	9.4
50.4	32.5	4.84	110	113	9.8
50.4	32.6	4.86	120	120	10.7
50.2	46.1	10.03	0	0	9.1
50.2	46.1	10.03	50	52	9.1
50.2	45.4	9.67	60	61	9.0
50.2	45.4	9.67	70	71	9.2
50.2	45.3	9.62	80	82	9.4
50.2	45.7	9.82	90	90	9.8
50.2	45.5	9.72	100	99	9.9
50.2	45.5	9.72	110	115	10.3
50.2	45.5	9.72	120	120	10.4
70.0	59.9	19.60	0	0	17.5
70.0	60.4	20.06	70	72	18.2
70.0	60.2	19.88	80	81	18.3
70.0	59.9	19.60	90	92	18.2
70.1	60.3	19.97	100	100	18.6
70.1	60.8	20.43	110	112	19.4
70.1	60.5	20.15	120	120	19.6

图 2 是相对初始含湿量绝对误差折线图, 其数值为预热温度烟枪含湿量值与不预热时烟枪含湿量值的绝对值, 反映设置预热温度后的含湿量示值偏离程度。随着预热温度的升高, 仪器含湿量相对初始含湿量升高。预热温度对 5% 的影响最为明显, 预热温度 120℃ 下, 差值达 4.8%。可以看出, 干湿球法烟气含湿量测试仪在 10% 以下测量较为接近标准值; 在含湿量标准值 20% 时, 仪器偏差较大, 这是因为干湿球法在测量高温高湿时会出现较大的误差。

周等人研究了干湿球法能准确测定烟温在 100℃ 以下烟气的含湿量, 但测量烟温较高烟气的含湿量准确度较差[5]; 许等人研究发现干湿球法对于温度超过 100℃ 的烟气, 其测量结果准确度较低, 且受到烟气正压影响比较大[1]。多人研究发现干湿球法烟枪的含湿量值与温度有影响关联。

从公式(1)可以看出, P_{bv} 的数值由湿球温度决定, 该值对测量结果有显著影响。自动烟气和烟道气测试仪中支持湿度探测器的温度计是热电偶, 其精度较高, 如果湿球温度测量有误差, 也会导致低温烟道气湿度测量出现较大误差, 但烧结机脱硫系统出口处的饱和烟道气湿度与理论计算基本一致, 表明湿球和干球温度测试准确度并非高温烟道气湿度数据偏高的原因。

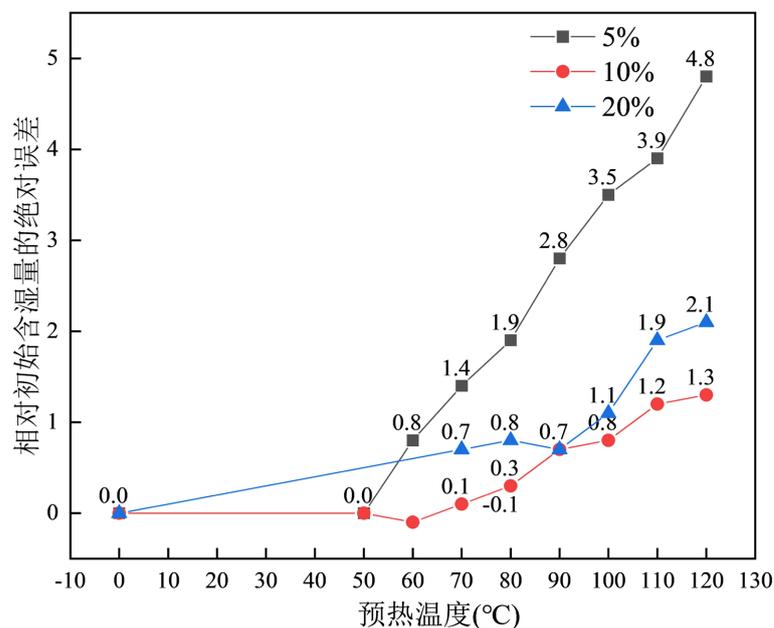


Figure 2. Test data of wet and dry bulb flue gas moisture content tester under different preheating temperatures
图 2. 相对初始含湿量绝对误差折线图

在用干湿球法测量烟气湿度时，干球温度均与烟气温度有一定的偏差，烟气温度越高偏差越明显，不具有预热功能的烟枪的主要原因是烟气在流入湿度检测仪干湿球测量段时损失了部分热量。虽然干球温度低于烟气温度，但在该温度下不会形成冷凝水汽，因此对烟气湿度测量数据无影响。当烟枪开启加热功能会出现干气温度增加的情况，根据公式(1)、(2)可知当预热温度超过烟气温度， P_w (气体中水蒸汽的分压力)升高， X_{sw} (含湿量)增大，这与实验得到的烟枪含湿量值随着预热温度增高而增大相符。

3. 总结

本试验得出的结论如下：

1) 随着预热温度的升高，干球温度 t_c 增大，含湿量 X_{sw} 增大，仪器含湿量相对初始含湿量升高；且预热温度对 5% 的影响最为明显，预热温度 120°C 下，差值达 4.8%。

2) 干湿球法烟气含湿量测试仪在 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。

3) 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。

参考文献

- [1] 许震, 冯子健, 杨海峰. 不同烟气含湿量测量方法的适用性分析[J]. 环境监控与预警, 2018, 10(3): 30-32.
- [2] 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(A01): 44-46.
- [3] 郭昕, 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.
- [4] 郭静, 阮宜纶. 大气污染控制工程(第 2 版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [5] 周灵辉, 杨凯, 谢馨, 等. 干湿球法测量烟气湿度的准确性探讨[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(10): 125-127+134.