

垃圾焚烧傅里叶红外气体分析仪的研制及应用

阎杰, 陈民旺

安徽皖仪科技股份有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年10月9日; 录用日期: 2023年11月20日; 发布日期: 2023年11月28日

摘要

为了满足垃圾焚烧污染源多组分气体在线监测的需要, 研制了一款基于傅里叶红外光谱分析技术的气体分析仪, 本文对分析仪的硬件、软件进行了描述。在实验室测量了该仪器对SO₂和NO的重复性和示值误差, 结果表明分析仪的重复性优于1%, 示值相对误差小于2%, 具备良好的准确性; 同时, 模拟测量了排放现场不同浓度水气干扰下的结果, 结果表明SO₂和NO的示值绝对偏差低于1 ppm, 相对偏差小于2%, 具备一定的现场应用能力。

关键词

傅里叶红外光谱仪, 气体监测, 测量

Development and Application of Fourier Transform Infrared Gas Analyzer for Garbage Incineration

Jie Yan, Minwang Chen

Anhui Wanyi Science and Technology Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: Oct. 9th, 2023; accepted: Nov. 20th, 2023; published: Nov. 28th, 2023

Abstract

In order to meet the need for online monitoring of multi-component gases from waste incineration pollution sources, a gas analyzer based on Fourier transform infrared spectroscopy analysis technology has been developed. This article describes the hardware and software of the analyzer. The repeatability and indication error of the instrument for SO₂ and NO were measured in the laboratory, and the results showed that the repeatability of the analyzer was better than 1%, and the relative error of indication was less than 2%, indicating good accuracy; At the same time, simulation measurements were conducted on the results of different concentrations of water vapor interference at the emission site. The results showed that the absolute deviation of SO₂ and NO readings was less than 1 ppm, and the relative deviation was less than 2%, indicating certain on-site application capabilities.

Keywords

Fourier Transform Infrared Spectrometer, Gas Monitoring, Measure

Copyright © 2023 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

焚烧法是当前生活垃圾处理的主要方式,在垃圾燃烧过程中会产生大量烟气,烟气中的 SO_2 、 NO_x 等组分严重危害人体健康,监测排放的有害组分含量,定量评估污染物浓度作为环保指标十分重要。国家已出台相关标准对焚烧炉排放烟气中的污染物限值做了规定[1],并要求焚烧厂安装在线监测设备,将数据实时传输到监控平台,同时定期审查设备运行情况,以确保数据的准确性[2]。

垃圾焚烧产生的烟气成分复杂,标准中规定的测量组分包括 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 HCl 和 CO ,相对于通过多种仪表组合测量(如 DOAS 测量 SO_2 、 NO 、 NO_2 , TDLAS 测量 CO 、 HCl)的方式,傅里叶红外气体分析仪有着更少的维护量和更高的灵活性。

傅里叶红外气体分析技术在发达国家起步较早,目前已有成熟产品占领国内市场,如 Gaset 的 DX、CX 系列¹,ABB 的 MBGAS3000²,Sick 的 MCS 100FT³。相比于国外,我国开展相关研究起步较晚,目前主要在售的产品包括谱育科技的 EXPEC2000 FT⁴,杭州春来科技的 FT-3000⁵。

安徽皖仪科技股份有限公司在自主研发的干涉仪基础上,集成开发了傅里叶红外气体分析仪 FT1900。本文介绍分析仪的软硬件基本情况,并对分析仪的性能进行实验验证。

2. 傅里叶红外气体分析仪

2.1. 硬件系统

图 1 和图 2 分别是 FT1900 分析仪的结构模型图和示意图。该分析仪主要由 globar 红外光源、角镜摆动型迈克尔逊干涉仪、激光发射及采集模块、红外采集模块、信号处理模块、气体池及外围光路组成。

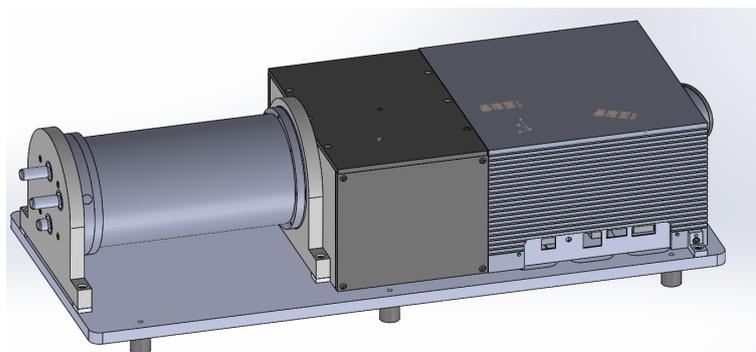


Figure 1. Fourier transform infrared gas analyzer FT1900

图 1. 傅里叶红外气体分析仪 FT1900

¹<https://www.gaset.com>

²<https://new.abb.com/cn>

³<https://www.sick.com/cn/zh/>

⁴<https://www.expec-tech.com/>

⁵<https://www.tranlion.com/>

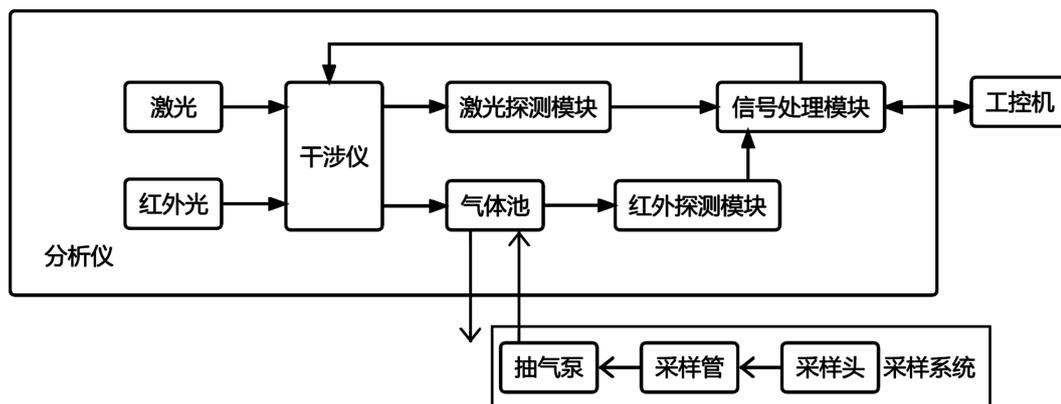


Figure 2. Schematic diagram of FT1900 structure
图 2. FT1900 结构示意图

气体池采用多次反射 White 池[3]方案, 基长设计为 15 cm, 光束经过 28 次反射, 光程达到 4.2 m。使用石英作为反射镜基底, 表面镀金膜以获得高反射率, 同时在金膜外又镀多层耐腐光学膜, 以获得长使用寿命。气体池外包装加热带, 使用时将气室需加热, 通过 Pt100 和温控器控制温度稳定至 $180^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

测量原理如下: 不相干的红外光经干涉仪成为相干光, 该相干光被气体池中的气体部分吸收后, 剩下的部分被红外探测器接收转变成电信号, 随着干涉仪角镜的摆动可以持续采集到红外干涉图。激光光源发出的单色光经干涉仪后产生的相干光被激光传感器接收, 其响应为正弦信号, 经整形电路处理成方波后用于干涉仪运行状态的调制以及红外干涉信号的采集。红外干涉图经 FFT(快速傅里叶变换)等数学处理, 得到光谱图。

获取到背景光谱以及带有气体信息的样品图, 即可得到样品的吸收光谱, 并进一步计算得到最终浓度结果。所研分析仪的性能参数如表 1 所示。

Table 1. Analyzer performance parameter table
表 1. 分析仪性能参数表

参数	值
光谱范围	$900\sim 4000\text{ cm}^{-1}$
波数准确性	优于 0.1 cm^{-1}
波数重复性	优于 0.001 cm^{-1}
分辨率	$2\sim 8\text{ cm}^{-1}$
信噪比	>8000
尺寸(mm)	$580 \times 260 \times 160$
质量	18 kg
气室容积	0.95 L
IP 等级	IP54

2.2. 软件系统

在硬件系统基础上开发了相应的软件系统, 软件系统分为两部分, 一部分为调试软件, 一部分为建模及测量软件。调试软件用在分析仪的装配调试过程中, 将分析仪性能调至出厂设定值, 建模及测量软件用于气体模型的建立及对气体的定量求解。

2.2.1. 调试软件

调试软件的功能是配合标准生产工艺流程, 对每一步装配调试步骤的结果进行质量控制, 以期生产的分析仪符合性能要求。

图 3 为调试软件光谱模式下所采集的 2 cm^{-1} 分辨率的空气光谱图, 软件可实时对光谱仪温湿度以及红外光源驱动电压电流进行监控, 同时可通过光谱数据来计算仪器的信噪比、分辨率、能量、重复性等数据。

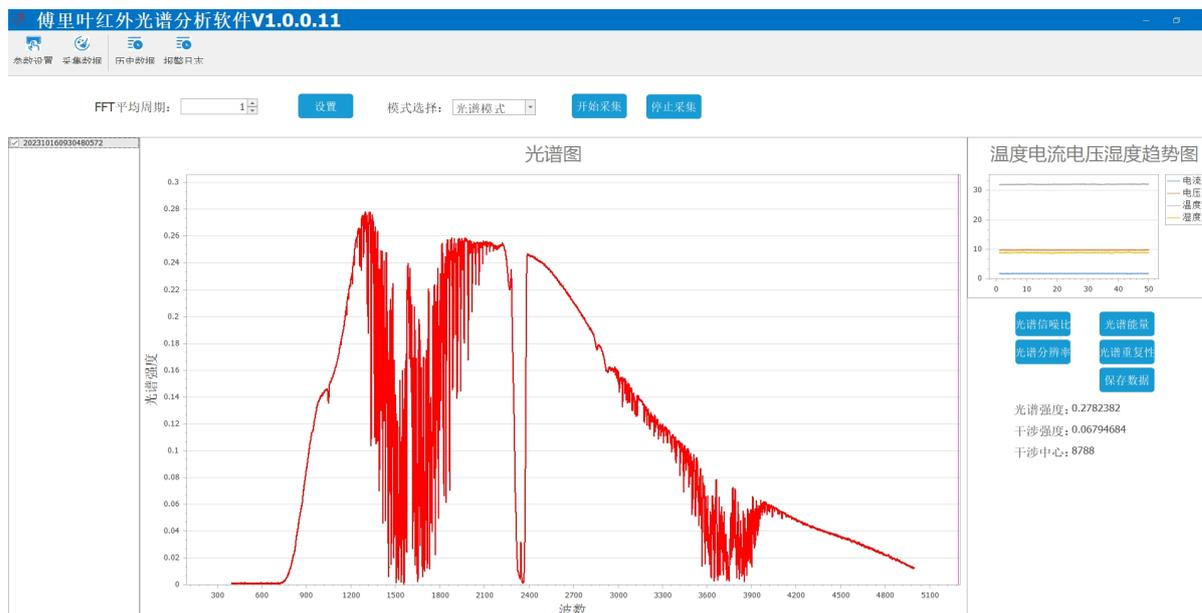


Figure 3. 2 cm^{-1} resolution air spectrogram

图 3. 2 cm^{-1} 空气光谱图

2.2.2. 建模及测量软件

建模及测量软件通过测量标准气体的吸光度和浓度数据, 基于相关算法建立模型, 实现未知气体的浓度预测。软件定量分析上支持偏最小二乘(PLS)等多种算法, 使用者可根据自身需求选择。图 4 为软件测量界面, 图中显示了通入 100 mg/m^3 的 NO 测量结果。

傅里叶红外分析仪				WAVEAL
组分	湿基值	干基值	单位	量程
H ₂ O	-0.00		%	40
NO	99.43	99.43	mg/m ³	100
SO ₂	0.07	0.07	mg/m ³	100
NO ₂	0.78	0.78	mg/m ³	150
HCl	0.82	0.82	mg/m ³	150
CO	-0.19	-0.19	mg/m ³	200
CO ₂	0.01	0.01	%	20
NH ₃	-0.01	-0.01	mg/m ³	50
CH ₄	-0.17	-0.17	mg/m ³	100
N ₂ O	0.18	0.18	mg/m ³	100

Figure 4. Software measurement interface

图 4. 软件测量界面

软件标定界面存储着气体的建模数据, 用户可根据自身需求对气体的组分及量程进行更改, 设置功能主要是对算法参数及仪器分辨率等系统参数进行设置, 查询界面用于记录使用者的操作行为。

3. 实验与验证

根据国标的要求进行实验来验证分析仪测量的准确性。此外, 对于实际应用, 垃圾焚烧烟气中含有高浓度水气, 因此需要设计实验验证在高浓度水气干扰下, 是否能够准确解析出低浓度污染气体。

3.1. SO₂ 和 NO 标气验证

验证分析仪测量 NO 和 SO₂ 的准确性, 准确性包含重复性和示值误差两个方面。

3.1.1. 实验装置及过程

实验装置: FT1900 型傅里叶红外气体分析仪, 采集光谱时设置仪器分辨率为 8 cm^{-1} , 光谱平均次数为 16 次。PQ-001 型配气仪(安徽皖仪科技股份有限公司)可以将不同类型的气体按体积混合以产生目标浓度。实验中所用 SO₂ 和 NO 标气购自安徽强源气体有限公司, N₂ 购自液化空气(昆山)气体科技有限公司, 纯度为 99.9995%。

配气仪的进气口分别接 SO₂ (或 NO) 标气和 N₂, 出气口通过伴热管与分析仪气体池进气口相连, 将伴热管和气体池加热至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温。所配 SO₂ 标气的量程为 70 ppm, NO 为 224 ppm。

通入氮气和量程气对仪器进行标定, 仪器的背景光谱图以及标定的 SO₂、NO 吸光度谱图分别如图 5、图 6、图 7 所示。

3.1.2. 重复性测定

通入 N₂ 将气室吹扫干净后通入 SO₂ 量程气, 待示数稳定后记录数值, 然后再次通入 N₂ 气, 重复测量 6 次, 结果如表 2 所示, 为 0.21%。NO 测量步骤与 SO₂ 相同, 结果如表 3 所示, 为 0.67%。

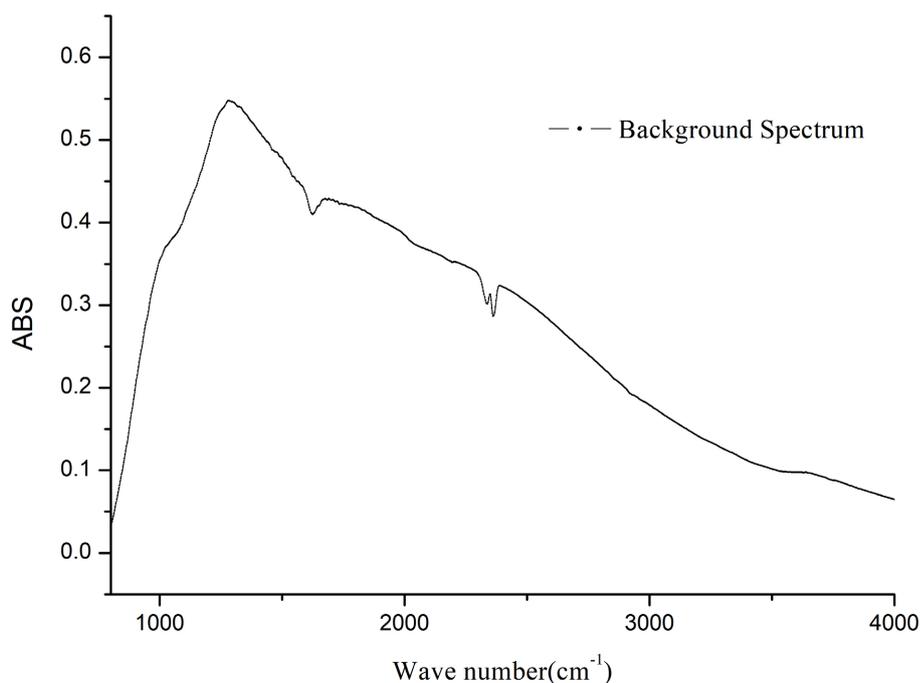


Figure 5. Background spectrum
图 5. 背景光谱

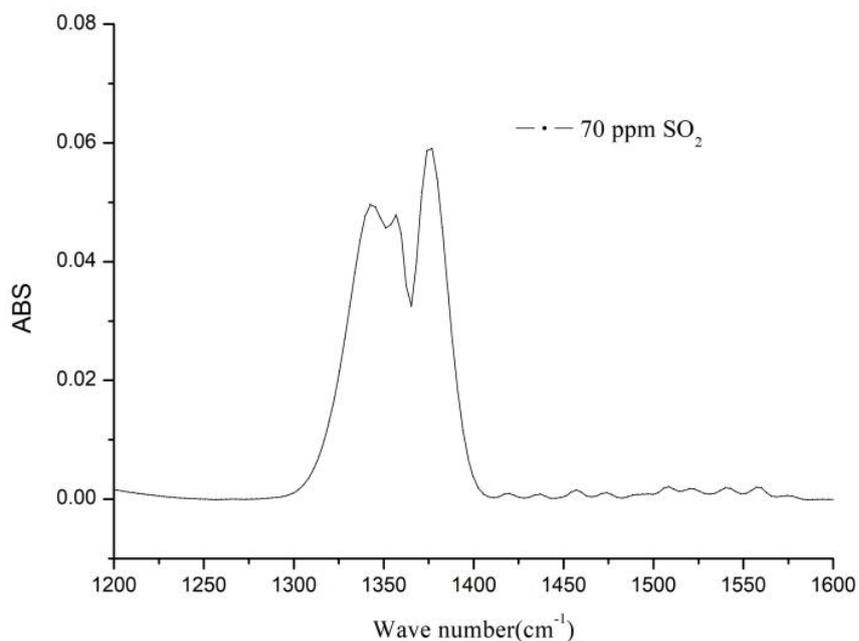


Figure 6. Absorbance diagram of 70 ppm SO₂ standard gas

图 6. 70 ppm SO₂ 标气的吸光度图

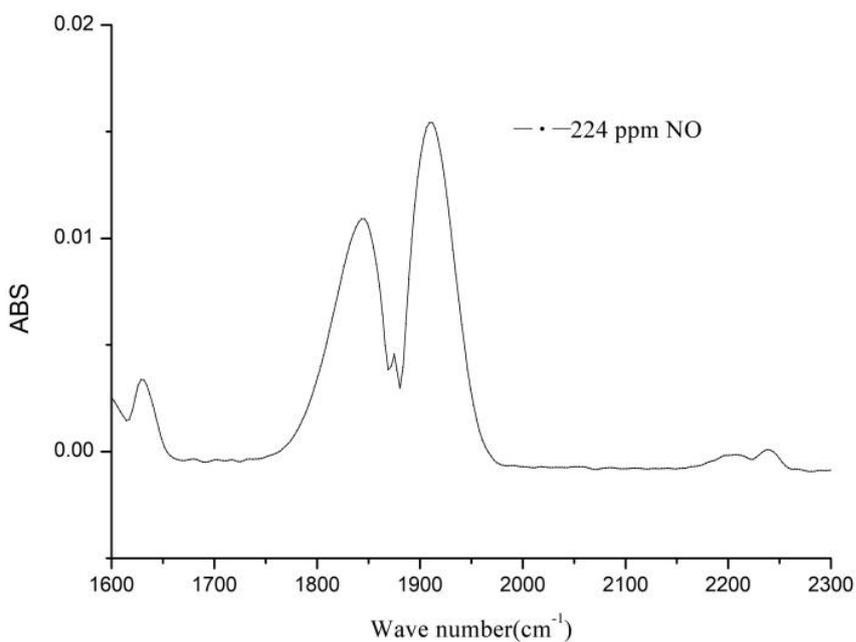


Figure 7. 224 ppm NO standard gas absorbance diagram

图 7. 224 ppm NO 标气吸光度图

Table 2. SO₂ repeatability measurement results

表 2. SO₂ 重复性测定结果

理论值	实测值						平均值	重复性
	1	2	3	4	5	6		
70	70.78	70.55	70.91	70.52	70.81	70.6	70.70	0.21%

Table 3. NO repeatability measurement results**表 3.** NO 重复性测定结果

理论值	实测值						平均值	重复性
	1	2	3	4	5	6		
224	224.57	224.07	223.2	222.56	221.57	220.13	222.68	0.67%

3.1.3. 示值误差测定

通入 N_2 将气室吹扫干净后再依次通入 20%、50%、80% 量程浓度的 SO_2 ，待示数稳定后记录数值，再次通入 N_2 回零，重复测试 3 次，以 3 次测量的平均值计算示值误差，结果如表 4 所示，示值误差小于 1%。NO 测量步骤与 SO_2 相同，结果如表 5 所示，示值误差小于 2%。

Table 4. Measurement results of SO_2 indication error**表 4.** SO_2 示值误差测定结果

目标浓度	理论值	实测值			平均值	示值误差
		1	2	3		
20%	14	14.37	14.3	14.45	14.37	0.53%
50%	35	35.24	35.35	35.4	35.33	0.47%
80%	56	56.51	56.69	56.76	56.65	0.93%

Table 5. NO indication error measurement results**表 5.** NO 示值误差测定结果

目标浓度	理论值	实测值			平均值	示值误差
		1	2	3		
20%	44.8	44.08	43.6	44.35	44.01	-1.76%
50%	112	111.16	112.23	112.36	111.80	-0.18%
80%	179.2	179.53	179.4	180.46	179.38	0.10%

3.2. 模拟烟气条件下测量 SO_2 和 NO

水气的吸收光谱分布在整個中红外区间，因此在实际测量工作中需要考虑水气对其它气体的干扰，需要验证分析仪是否能在不同浓度水的条件下保持对污染气体测量的准确性。

3.2.1. 实验装置及过程

将 3.1.1 中用于配气的干燥氮气替换成具有一定湿度的氮气即可，湿氮气由配气仪中的湿度发生器组件蒸发去离子水和氮气混合得到，通过高精度流量计可配置一定浓度 H_2O 气的湿氮气。标定的 30% 水气的吸光度谱图如图 8 所示。

3.2.2. 测量结果

在 10%、20% 和 30% 的水条件下，配置了不同浓度的 SO_2 和 NO 气体。测量结果分别如表 6、表 7 和表 8 所示，结果显示 SO_2 和 NO 测量的绝对偏差均小于 1 ppm，说明本文所述的 FT1900 型气体分析仪能有效消除 H_2O 的干扰，实现对 SO_2 和 NO 的准确测量，具备一定的现场应用能力。

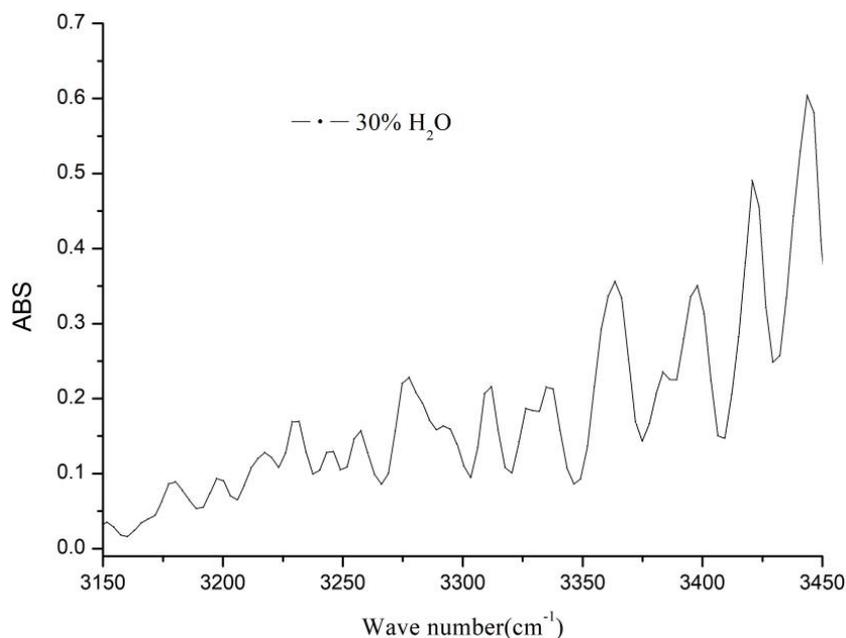


Figure 8. 30% H₂O absorbance diagram

图 8. 30% H₂O 吸光度图

Table 6. Measurement results of SO₂ and NO at different concentrations when water concentration is 10%

表 6. 水浓度为 10% 时, 不同浓度的 SO₂ 和 NO 测量结果

	低浓度 SO ₂	中浓度 SO ₂	高浓度 SO ₂	低浓度 NO	中浓度 NO	高浓度 NO
1	13.88	34.76	55.55	43.99	111.79	178.79
2	13.52	35.21	55.25	44.03	112.58	179.17
3	13.67	34.94	55.18	43.73	112.21	178.76
4	13.87	34.95	55.08	43.84	111.39	179.24
5	13.67	35.21	55.01	43.94	111.95	178.95
6	14.22	35.51	55.22	44.36	110.99	178.29
平均值	13.80	35.10	55.21	43.89	111.82	178.87
理论值	14	35	56	44.8	112	179.2
绝对偏差	0.20	0.10	0.79	0.82	0.18	0.33
相对偏差	1.40%	0.27%	1.40%	1.83%	0.16%	0.18%

Table 7. Measurement results of SO₂ and NO at different concentrations when water concentration is 20%

表 7. 水浓度为 20% 时, 不同浓度的 SO₂ 和 NO 测量结果

	低浓度 SO ₂	中浓度 SO ₂	高浓度 SO ₂	低浓度 NO	中浓度 NO	高浓度 NO
1	14.26	35.27	56.57	44.45	111.90	178.68
2	14.09	34.99	55.87	44.87	111.28	179.23
3	14.20	35.28	55.83	45.21	111.07	178.71
4	14.47	35.62	56.65	44.76	111.22	178.28
5	14.19	35.31	56.74	44.74	111.08	178.58

Continued

6	14.32	35.91	56.82	45.46	111.60	179.10
平均值	14.25	35.40	56.41	44.91	111.36	178.76
理论值	14	35	56	44.8	112	179.2
绝对偏差	0.25	0.40	0.41	0.11	0.64	0.44
相对偏差	1.81%	1.13%	0.74%	0.25%	0.57%	0.24%

Table 8. Measurement results of SO₂ and NO at different concentrations when water concentration is 30%
表 8. 水浓度为 30% 时, 不同浓度的 SO₂ 和 NO 测量结果

	低浓度 SO ₂	中浓度 SO ₂	高浓度 SO ₂	低浓度 NO	中浓度 NO	高浓度 NO
1	13.42	35.36	56.49	44.47	111.57	179.46
2	14.17	35.31	56.42	44.35	111.85	180.72
3	14.61	35.89	56.15	45.03	112.15	179.29
4	14.38	35.62	56.12	44.92	113.95	178.85
5	14.31	36.06	56.60	45.44	112.75	179.50
6	13.99	35.42	56.76	45.62	113.49	179.90
平均值	14.15	35.61	56.42	44.97	112.63	179.62
理论值	14	35	56	44.8	112	179.2
绝对偏差	0.15	0.61	0.42	0.17	0.63	0.42
相对偏差	1.05%	1.74%	0.75%	0.39%	0.56%	0.23%

4. 结论

研制的傅里叶红外气体分析仪具备重复性高、示值准确、不受水气干扰的优点。针对垃圾焚烧烟气排放气体成分复杂的特点, 分析仪同时对多污染组分进行监测, 可满足垃圾焚烧应用的需要。同时, 根据不同的监测需求, 分析仪可对有红外吸收特性的气体因子进行扩展, 在半导体、医药等工业过程领域也有着较大的推广前景。

参考文献

- [1] GB 18485-2014 生活垃圾焚烧污染控制标准[EB/OL]. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=9FB5FEAE9E7FA4678998D8045BFCEB075>, 2014-05-16.
- [2] HJC-ZY80-2017 生活垃圾焚烧固定源烟气排放连续监测系统技术要求及检测方法[EB/OL]. <https://www.doc88.com/p-68961203873207.html>, 2023-07-28.
- [3] 穆永吉, 陈远, 余俊, 等. 一种多次反射怀特池的研究与设计[J]. 光学技术, 2014, 40(4): 345-348. <https://doi.org/10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2014.04.013>