

CEMS 吹扫气系统中空气净化装置的工艺研究

石剑飞, 李鹏程, 袁 贺

(深圳市深能南部生态环保有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 本文深入探讨了纳芬空气净化装置在傅立叶变换 CEMS 吹扫系统中的应用及其产生的效果。通过对相关数据的分析和实际案例的研究, 阐述了纳芬管干燥技术应用的优缺点, 以深圳市深能南部生态环保有限公司现安装的傅立叶变换 CEMS 系统为例, 分析了造成傅立叶变换红外气体分析仪数据频繁偏高以及水份数值波动大的原因, 并针对此问题增设纳芬空气净化装置, 旨在为解决分析仪分析数据偏差的问题提供有益参考。

关键词 纳芬空气净化; 傅立叶变换; 气体分析仪; 纳芬管干燥

中图分类号: TH7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.024

0 引言

随着傅立叶变换红外吸收技术在国内日渐普及, 基于傅立叶变换技术的气体分析仪, 集成于 CEMS 系统, 也开始大量应用在垃圾焚烧发电厂中。傅立叶变换红外吸收气体分析仪内部均有个核心部件, 那就是干涉仪, 干涉仪内部包括了多个表面镀了黄金的镜面, 以提高红外光的反射率以及降低镜面对红外光不必要的吸收。目前, 在一些应用项目中, 采用纯度为 99.99% 的大瓶工业氮气对干涉仪进行吹扫, 最终发现傅立叶变换红外气体分析仪测量的数据出现偏高以及水份数值波动大的现象, 从而造成数据瞬时超标等问题^[1]。随着国家对环保的重视程度越来越严格, 出现此类数据超标或异常的问题, 将给企业造成严重的负担。

1 傅立叶变换红外吸收分析仪简介

深圳市深能南部生态环保有限公司的一期1号炉、2号炉以及 SCR 入口的 CEMS 系统投产于 2015 年, CEMS 系统是由芬兰共和国 GASMET 公司引进, 由厦门格瑞斯特环境技术公司集成的 CX-4000 型傅立叶变换式红外吸收分析仪。

傅立叶变换红外吸收分析仪内部结构主要含如下部分: 红外光源、傅立叶变换红外吸收分析仪必备的核心部件——干涉仪、测量气室、红外检测器以及分析仪的主板。

红外光源发射红外光进入干涉仪, 在干涉仪内部进行分光和干涉后, 形成干涉红外光, 经过反射镜最终进入测量气室, 测量气室前后各有一个镀有黄金的镜面, 干涉红外光在两个黄金镜面之间多次反射, 反射光程 5 米, 光程越长, 检测精度就越高。干涉红外光在测量气室内, 与被测气体接触, 被测气体中各种

气体组分吸收了干涉红外光在不同波长上的光能, 造成红外光光能衰减, 最终干涉红外光从测量气室射出, 进入红外检测器, 检测器检测出干涉红外光的光能值, 并将结果发送给分析仪主板, 分析仪主板通过内部高速芯片, 对干涉红外光的光能值, 进行快速傅立叶变换的数学计算, 最终将以时间为横坐标的红外吸收光谱转换为以频率为横坐标的红外吸收光谱, 分析仪主板将最终的红外吸收光谱发送到外部分析仪专用的分析软件中, 在软件中进行进一步的解析以及 PLS 等特殊算法, 将不同气体之间的交叉干扰降到最低, 最终在软件中显示最终结果。

分析仪的核心部件为干涉仪, 干涉仪内部有多个镀金的镜面, 红外光就在干涉仪内部镜面之间进行分光和干涉, 所以干涉仪内部空间环境必须干净, 做到无油、无尘、无水汽的严格要求。如果有油滴, 这些油滴会附着在干涉仪内部镜面上, 会对红外光反射角度造成影响, 红外光照射在这些油滴上会产生不规则的散射, 造成红外光光路偏移、不集中, 同时, 油滴也会吸收一部分的红外光能量, 造成最终测量数据偏高或数据波动的现象。同样的, 灰尘颗粒如果附着在镜面上, 也会造成红外光路的部分遮挡以及影响光路反射角度。最糟糕的情况就是水汽的影响, 如果镜面上长时间附着水滴, 会对镜面表面镀层造成不同程度的侵蚀, 严重时会引起镜面上镀金层脱落。

水汽的测量, 是傅立叶变换红外吸收 CEMS 系统测量的一个重要气体组分, 水汽的测量对其他气体组分的测量有着至关重要的影响, 因为水汽在红外波段上有比较宽的明显的吸收峰范围(大约在 $1\ 250 \sim 2\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 300 \sim 4\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 都有比较明显的吸收峰), 在

这些水汽吸收峰覆盖范围内的其他气体的吸收峰明显比水汽的吸收峰小很多^[2] (见图 1)，红色线为 2% 水汽的吸收峰，而黑色线为 350 ppm 一氧化碳 CO 气体的吸收峰，水汽的吸收峰峰值比 CO 气体的吸收峰峰值大了十倍多。所以干涉仪内部空间环境如果有水汽，将会影响测量气室内烟气水汽含量的测量，同时干扰其他气体测量。

2 傅立叶变换 CEMS 吹扫系统演变史

为了满足干涉仪内部空间环境干净和干燥，深圳市深能南部生态环保有限公司早期采用厂内仪用压缩空气，经纯化器并调压后供给干涉仪吹扫用，如果不及时维护空压机、不定期更换过滤器、不及时排水，往往压缩空气的质量远远达不到干涉仪吹扫用气的要求，经常出现仪用空气里带油带水的情况。

后来放弃仪用空气，采用了制氮机加冷干机联用的方式。制氮机产出的氮气理论上纯度可以达到 99.9% 以上，再经过冷干机脱水后的氮气，其露点理论上可以降到 -20 ℃ 以下，再经过三联精细过滤器进一步去除氮气里的颗粒物杂质和油分，最后供给干涉仪吹扫用。但整个吹扫系统较复杂，维护量大，制氮机和冷干机往往离傅立叶变换 CEMS 较远，制氮机产出的氮气经过较长管路才能到达分析仪，造成氮气品质变差，对分析仪的吹扫效果变差。

采用大瓶高压氮气瓶对分析仪的吹扫效果较好，氮气的纯度可以达 99.99% 以上。高压氮气瓶可以放置在离 CEMS 较近的位置，但仍需每日人工转运氮气瓶至集气包进行置换。这要求巡检人员必须加强每日对氮气站集气包巡检的频次，如巡检人员每日氮气更换不及时，将导致干涉仪工作异常，浪费大量的人力物力进行维护。使用大瓶高压氮气的成分也较高，单台 CEMS 每月平均用气量约 45 瓶，按照 45 元 / 瓶的价格计算，

每年氮气吹扫气采购费用约 24 000 元 / 台 / 年。三台 CEMS 分析仪每年采购氮气的费用就是 72 000 元 / 年。

2024 年 3 月，深圳市深能南部生态环保有限公司采用了最新的纳芬空气净化装置作为吹扫系统。纳芬空气净化装置占用空间不大，和傅立叶变换 CEMS 主机柜并柜安装，减少了传输管路长度，降低了吹扫气在传输管路上的污染等问题，同时纳芬空气净化装置内部也集成了 CEMS 的校准控制气路，方便操作。采用纳芬空气净化装置对分析仪的吹扫效果较好，系统运行稳定且无需耗费大量人力物力进行维护。

3 纳芬空气净化装置

空气净化装置的主要工作原理：周围环境空气由膜式泵抽取，先经过超细过滤器消除灰尘、油污和微小的机械杂质，然后进入冷凝器，冷凝器也称为高效冷阱，温度自动控制在 3 ℃，可以有效地去除空气中大部分的水汽和部分化学物质，当空气中的湿度较高时，可以观察到冷凝水由蠕动泵排出。露点为 3 ℃ 的干燥空气再次进入过滤器进行二次过滤，随后进入纳芬管进一步将水汽去除，输出的被净化空气则成为露点 -25 ℃ 左右的纯净空气^[3]。

3.1 纳芬管介绍

纳芬空气净化装置的核心部件就是纳芬管，采用美国进口的纳芬管。纳芬管干燥技术是一种用于去除管路中水分和湿气的技术，在各种工业领域中，管路中的水分或湿气往往会导致设备的腐蚀、结冰、堵塞等问题，因此需要采用有效的干燥技术来解决这些问题。

纳芬管的材质为 Nafion™ 聚合物，是在 1960 年代末发明的。Nafion™ 是 2-[1-[二氟 [(三氟乙基) 氧] 甲基]-1,2,2,2- 四氟乙氧基]-1,1,2,2- 四氟乙磺酸和四氟乙烯 (也就是我们常说的特氟龙 Teflon) 的共聚物。简单来说，Nafion™ 是以 Teflon 为主链，并附

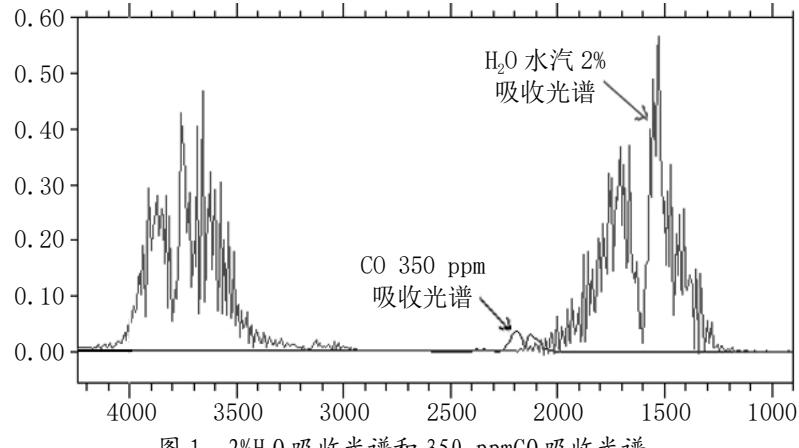


图 1 2%H₂O 吸收光谱和 350 ppmCO 吸收光谱

带碳氟化合物的临时侧链，侧链终端为磺酸。其分子式可写为： $C_7HF_{13}O_5S \cdot (C_2F_4)_n$ ^[4]。

纳芬管 Nafion™ 聚合物是碳氟化合物基和磺酸基聚合，如同大多数含氟聚合物一样，其具有极强的耐腐蚀性。碳氟化合物基的碳原子和磺酸基的硫原子之间强大的原子引力，使得磺酸基和碳氟化合物结合紧密，无法移除。但由于磺酸基和碳氟化合物的性质不同，磺酸基会进行化学反应^[5]。磺酸基的存在使 Nafion™ 聚合物添加了三种重要的性能：

1. 由于磺酸基团的强酸性，Nafion™ 聚合物可作为酸催化剂。
2. 当接触溶液时，Nafion™ 聚合物起到离子交换树脂的作用。
3. 单个磺酸基团最多能吸收十三个水分子。磺酸基通过聚合一定数量的疏水性聚合物形成离子通道，水通过离子通道被传输。

纳芬管除湿、降低露点的原理就采用到了上述的第三个性能，Nafion™ 聚合物对水汽具有类似选择性半渗透的属性。

3.2 纳芬管除湿原理

Nafion™ 聚合物通过一级动力学反应将水分子从膜的一侧转移到另一侧。这与多孔膜不同，多孔膜依赖于分子的物理大小。Nafion™ 聚合物的选择性基于化学反应性，而不是分子的大小，因此它不是传统意义的渗透原理。Nafion™ 聚合物选择性地转移水蒸气，而气流中的大多数分析物保持不变。Nafion™ 聚合物转移水分子的驱动力是其膜两侧的湿度水平之差。Nafion™ 聚合物试图在其膜的两侧达到水蒸气的分压平衡。

在图 2 中，含湿样气从左侧样气入口进入纳芬管，

样气中的水分子在不同的水气分压下透过纳芬管管壁进入外套管与纳芬管之间的反吹气中，反吹气将水分子从左侧的反吹气出口带出，最终纳芬管中干燥的样气从右侧的样气出口流出。

如果将右侧的干燥的样气分一路出来进入反吹气入口，可以达到更好的干燥效果，此项技术也称为纳芬管干燥回流技术。采用此项技术，样气露点可以最低降低到 -50 °C。

3.3 纳芬管干燥技术的优缺点

纳芬管干燥技术利用 Nafion™ 聚合物的特殊性质来吸附和分离管路中的水分和湿气。Nafion™ 聚合物材料具有较大的比表面积和吸附能力，可以将水分和湿气迅速吸附到其表面上，并利用材料两侧的水汽分压不同，将水分和湿气转移脱附到水汽分压低的一侧，从而实现气体的干燥^[6]。

由于 Nafion™ 聚合物材料不仅比表面积大，吸附能力强，还具有较好的稳定性和耐腐蚀性，Nafion™ 聚合物材料在干燥过程中不易受到被干燥气体的损伤或破坏，可以长时间地保持其吸附和脱附的能力。被干燥的气体如果具有强酸强碱性，Nafion™ 聚合物材料同样也具有很好的耐腐蚀性，这使得纳芬管干燥技术可以在长期使用中保持其高效性和可靠性，从而减少了维护和更换的频率和成本^[7]。

纳芬管干燥技术还具有较好的适应性和灵活性，它可以应用于各种不同直径和材质的管路中，包括金属管路、塑料管路等。无论是小口径的细管还是大口径的管路，纳芬管干燥技术都可以有效地去除其中的水分和湿气，确保管路内气体的干燥。

一根纳芬管的直径一般较小，在干燥大口径管路

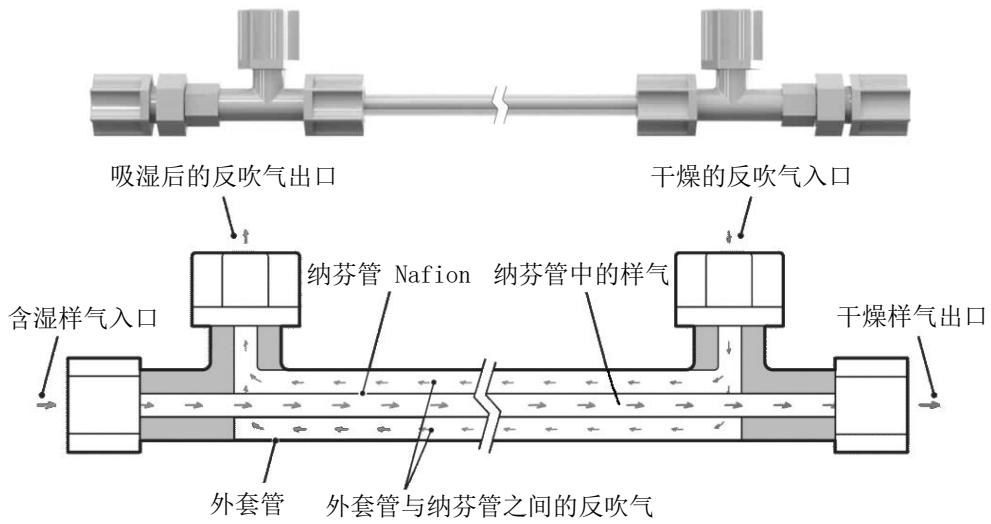


图 2 纳芬管实物图及除湿原理图

的气体时，都是采用多束纳芬管并联使用。如果样气中含有颗粒杂质，容易堵塞纳芬管。纳芬管一旦堵塞，不容易清理，只能更换整根纳芬管。

纳芬管在干燥气体的过程中，如果气体中含有油分，油滴会有很大可能吸附在纳芬管内壁形成油膜，从而降低干燥效果。

纳芬管采用的NafionTM聚合物材料，具有选择性，不仅对水分具有去除的作用，对其他气体也具有去除性。

4 纳芬空气净化装置在傅立叶变换 CEMS 吹扫系统中的应用成效

深圳市深能南部生态环保有限公司于 2024 年 3 月采用了最新的纳芬空气净化装置作为 CEMS 分析仪的吹扫系统。截至 2025 年 9 月已上电运行一年多时间，现

纳芬空气净化装置运行正常。空气净化装置对原始气有一定要求，环境空气温度越低、空气质量越好的原始气，产出的净化气温度、露点等越稳定，杂质、油分等含量也越低。产出净化气的质量越高，对于延长分析仪的使用寿命效果越好。

为了验证纳芬空气净化装置产出的净化气是否达到吹扫气的使用要求，深圳市深能南部生态环保有限公司委托专业的检测机构对净化后的气体进行成分检测，检测结果如表 1 所示。

从检测结果可以看出：由于纳芬空气净化装置抽取的是周围空气，并不是厂用仪用压缩空气，周围空气的含油量不高，仅有 0.258 mg/m^3 ，经过净化处理后，气体含油量降低到 0.226 mg/m^3 ，油分去除率 12% 左右。

表 1 空气净化装置净化前后空气质量对比检测项目

气体成分	检测方法	检测结果	
		抽气泵入口	净化后的气体
含油量 (mg/m^3)	GB/T 13277.2-1015	0.258	0.226
水分 (露点) ($^{\circ}\text{C}_{\text{td}}$)	GB/T 13277.3-1015	16.61	-21.57
固体颗粒含量 (个/ m^3)	0.3 $\mu\text{m} \leq \text{粒径} < 0.5 \mu\text{m}$	6 400 315	2 084
	0.5 $\mu\text{m} \leq \text{粒径} < 1.0 \mu\text{m}$	3 993 621	884
	1.0 $\mu\text{m} \leq \text{粒径} < 5.0 \mu\text{m}$	752 882	918

经过净化装置处理后的气体，由入口的气体露点 16.6°C 降低到 -21.6°C ，降低露点的功能明显，完全满足用户使用要求。如果再结合纳芬管干燥回流技术，露点可以降低到 -30°C 以下。固体颗粒物的去除分三个等级： $0.3 \mu\text{m} \leq \text{粒径} < 0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m} \leq \text{粒径} < 1.0 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m} \leq \text{粒径} < 5.0 \mu\text{m}$ ，从检测结果中可以得出纳芬空气净化装置的固体颗粒物去除率都达到了 99.95% 左右，完全满足用户使用要求。

同时，自空气净化装置投入使用开始。我们对 CEMS 分析仪的几项重要健康参数进行了持续的观察并记录，运行 18 个月后，干涉仪光谱图峰值、激光光源电压值等均只有小幅度的下降。净化气对分析仪健康参数的衰减影响微乎其微。

5 结束语

纳芬空气净化装置应用在傅立叶变换 CEMS 吹扫系统中，其产出的净化气无论是在颗粒物杂质含量、水分含量、油质含量等方面，都能满足 CEMS 吹扫的要求，完全可以替代日常氮气的吹扫，不仅降低了成本，而且降低了大量的人力物力。纳芬管干燥技术在石油化工、电力、冶金、制药等行业均有重要的应用价值和

的发展前景，值得推广使用，尽管存在一些缺点，但通过持续的研究和创新，有望进一步的改进和应用，为工业生产带来更多的便利和效益。

参考文献：

- [1] 王德发,周枫然,叶菁,等.FTIR 在气体标准物质研究中的应用 [J].计量科学与技术,2021,65(05):67-76.
- [2] 高原,易磊.傅立叶变换红外光谱仪在近红外区波数示值误差的校准方法研究 [J].计量与测试技术,2022(07):72-74,78.
- [3] 宋敬虎.Nafion 烟气除湿系统在炼化企业烟气 CEMS 中的应用探讨 [J].生态环境与保护,2020,03(01):36-38.
- [4] 姚学忠,王铁民,郭行义,等.CEMS 烟气预处理系统用 Nafion 膜的改性及性能表征 [J].应用化工,2021,50(02):392-394,402.
- [5] 同 [4].
- [6] 同 [2].
- [7] 叶兵,侯鹏,吴厚荣,等.便携式干法烟气预处理装置除水效率分析 [J].环境监控与预警,2022,14(03):59-62.