

工业炉窑废气排放监测技术应用研究

刘阳

凯乐检测认证集团（绵阳）有限公司，四川绵阳

DOI:10.62836/environment.v3i3.1465

摘要：工业炉窑广泛应用于建材、冶金、化工、陶瓷、玻璃、铸造等行业，其燃烧、加热、煅烧和熔融过程会产生颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳及挥发性有机物等废气污染物。本文围绕工业炉窑废气排放监测技术应用展开研究，重点分析颗粒物采样、气态污染物现场监测、烟气参数测定和自动连续监测系统应用技术，并从仪器校准、工况记录、样品保存、数据折算和结果审核等方面探讨质量控制方法，提出优化采样点位、结合生产工况、加强在线运维和服务治理决策等措施，以提升工业炉窑废气监测的准确性和实用性。

关键词：工业炉窑；废气排放；颗粒物监测；气态污染物；质量控制；在线监测

Study on the Application of Exhaust Gas Emission Monitoring Technologies for Industrial Furnaces and Kilns

Yang Liu

Kaile Testing and Certification Group (Mianyang) Co., Ltd., Mianyang, Sichuan

Abstract: Industrial furnaces and kilns are widely used in building materials, metallurgy, chemical engineering, ceramics, glass, casting, and other industries. Their combustion, heating, calcination, and melting processes generate exhaust gas pollutants such as particulate matter, sulfur dioxide, nitrogen oxides, carbon monoxide, and volatile organic compounds. This paper focuses on the application of exhaust gas emission monitoring technologies for industrial furnaces and kilns, with emphasis on particulate matter sampling, on-site monitoring of gaseous pollutants, flue gas parameter measurement, and the application technologies of automatic continuous monitoring systems. It also discusses quality control methods from the aspects of instrument calibration, operating condition records, sample preservation, data conversion, and result review, and proposes measures such as optimizing sampling locations, integrating production operating conditions, strengthening online operation and maintenance, and supporting pollution control decision-making, aiming to improve the accuracy and practicality of exhaust gas monitoring for industrial furnaces and kilns.

Keywords: industrial furnaces and kilns; exhaust gas emission; particulate matter monitoring; gaseous pollutants; quality control; online monitoring

*作者简介：刘阳（1995年-），女，汉族，四川雅安，本科，助理工程师，研究方向：环境监测。

1 引言

工业炉窑是工业生产中能源消耗和大气污染物排放较为集中的设备类型，炉型结构、燃料种类、原料成分、燃烧温度、烟气治理工艺和生产负荷变化，都会影响废气污染物排放水平。由于炉窑烟气具有温度高、含湿量变化大、粉尘浓度波动明显、工况负荷不稳定等特点，监测过程中容易受到采样条件、仪器状态和现场操作影响[1]。因此，有必要系统研究工业炉窑废气排放监测技术应用与质量控制方法，为企业达标排放、污染治理优化和环境监管提供可靠数据支撑。

2 工业炉窑废气排放监测技术应用

2.1 颗粒物采样与浓度测定技术

工业炉窑颗粒物监测的核心在于准确获取烟道中粉尘的实际排放浓度，技术重点应放在等速采样、断面布点和滤筒称重三个环节。工业炉窑烟气中颗粒物受燃料灰分、炉料性质、燃烧温度、除尘设施效率和烟气流速影响较大，现场监测时应根据烟道形状确定采样断面，圆形烟道通常沿两条互相垂直的直径设置采样点，矩形烟道则按断面面积划分网格布点，测点数量一般不少于8个，烟道截面较大或流速分布不均匀时可增加至12–16个。颗粒物采样采用滤筒法或滤膜法，采样嘴直径可根据烟气流速选择4mm、6mm、8mm或10mm规格，采样过程应保持采样嘴入口速度与测点烟气流速一致，等速采样偏差宜控制在 $\pm 10\%$ 以内[2]。对于高温烟气，采样管应采取保温措施，温度一般保持在 120°C 以上，采样结束后通过滤筒采样前后质量差计算颗粒物质量，将采样体积折算为标准状态干烟气体积，得到颗粒物排放浓度，评价布袋除尘、电除尘或旋风除尘装置的实际去除效果。

2.2 气态污染物现场监测技术

工业炉窑气态污染物监测主要针对 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 O_2 、 CO_2 以及部分行业涉及的 HCl 、 HF 、 VOCs 等因子，根据污染物性质选择合适的现场分析方法。 SO_2 主要来源于含硫燃料或含硫原料燃烧、煅

烧过程，燃煤炉窑、石灰窑、玻璃窑和部分有色冶炼炉窑应重点监测； NO_x 主要在高温燃烧条件下生成，炉膛温度超过 1300°C 时热力型 NO_x 生成明显增加，因此陶瓷烧成窑、玻璃熔窑、金属热处理炉等应加强 NO_x 监测，当 CO 浓度异常升高时往往说明供氧不足、炉内混合不均或燃烧控制不稳定。 SO_2 、 NO 、 NO_2 和 CO 常用电化学法、紫外差分吸收法或非分散红外法， O_2 可采用电化学法或顺磁法， CO_2 多采用非分散红外法[3]。对于高湿、高尘或高腐蚀性烟气应在采样探头前端配置过滤装置，过滤精度可控制在 $2\mu\text{m}$ 左右，采样管线宜采用伴热方式，温度保持在 $120\text{--}180^{\circ}\text{C}$ ，避免 SO_2 、 NO_2 、 HCl 等水溶性气体因冷凝而损失，连续测定时间一般不少于5min，浓度波动明显时可延长至10–15min，气态污染物监测结果通常需要结合含氧量进行折算， NO_x 一般以 NO_2 计，便于与排放限值进行统一比较。

2.3 烟气流速、含湿量与含氧量测定技术

烟气流速、含湿量与含氧量是工业炉窑废气监测中不可缺少的辅助参数，烟气流速通常采用皮托管配合微压计测定，通过各测点动压、静压、温度等参数计算断面平均流速。工业炉窑排气筒烟气流速常见范围为 $5\text{--}20\text{m/s}$ ，若流速低于 5m/s ，烟道内气流稳定性较差，颗粒物分布不均匀，采样代表性容易下降；若流速超过 20m/s ，则对采样泵抽气能力、采样嘴匹配和等速控制要求更高。含湿量可采用冷凝法或仪器法测定，湿法脱硫、湿式除尘后烟气含湿量通常较高，可达到 $10\%\text{--}20\%$ ，若不扣除水分影响，污染物浓度折算会产生偏差[4]。含氧量是判断烟气稀释程度和燃烧状态的重要指标，燃气炉窑 O_2 浓度常见为 $3\%\text{--}8\%$ ，燃煤或固体燃料炉窑常见为 $6\%\text{--}12\%$ ，当实测 O_2 明显偏高时说明过量空气系数较大，实测污染物浓度可能被稀释，因此应按规定基准氧含量进行折算。常用折算思路是将实测污染物浓度、实测氧含量和基准氧含量进行换算，使不同炉窑、不同风量条件下的排放数据具有可比性，排放速率计算则需要将标准状态干烟气体积与污染物折算浓度结合，形成 g/h 或 kg/h 数据用于企业

排放总量核算和治理设施运行效果评价。

2.4 自动连续监测系统应用技术

自动连续监测系统主要用于重点工业炉窑排放过程的长期跟踪,由采样探头、伴热管线、预处理单元、分析仪、颗粒物监测仪、流速仪、温压湿测量单元、数据采集传输单元和反吹系统组成,可连续监测颗粒物、SO₂、NO_x、O₂、烟气流速、温度、压力、湿度等指标。抽取式系统通过采样探头抽取烟气,经伴热、过滤、除湿和稳流后进入分析仪,适合污染物组分较多、需要稳定预处理的排口;原位式系统直接在烟道内完成光学测量,响应速度快,适合烟道条件稳定、粉尘和水汽干扰相对可控的场景。颗粒物连续监测可采用激光后向散射法、透射法或 β 射线法,低浓度排放口应选择检出限较低、线性响应较好的设备。CEMS安装位置应避开弯头、阀门、变径和风机出口等扰流区,前直管段宜不少于4倍烟道直径,后直管段宜不少于2倍烟道直径。例如布袋除尘器压差突然下降时,颗粒物连续数据可能同步升高,脱硫循环液pH偏低时SO₂排放浓度容易上升,脱硝喷氨量不足或炉温升高时,NO_x浓度可能出现持续高值,为企业稳定达标和污染治理优化提供数据支撑。

3 工业炉窑废气排放监测质量控制

3.1 监测前仪器检定、校准与现场核查

工业炉窑废气监测前的质量控制重点在于确认仪器设备、标准物质和现场条件均满足监测要求,核查烟尘采样器、烟气分析仪、皮托管、微压计、温度计、流量计、电子天平等设备的检定或校准证书,确认其在有效期内,量程、精度和适用条件与现场烟气浓度、温度、流速相匹配。颗粒物采样设备应进行气密性检查和流量核查,采样泵负载能力应满足现场烟道负压和采样时间要求,流量示值偏差一般控制在 $\pm 5\%$ 以内。气态污染物分析仪进入现场前应完成零点和跨度检查,SO₂、NO_x、CO等标准气体应具有有效证书,跨度气浓度宜覆盖预计测量范围的50%–90%,应关注采样平台安全性、采样孔密封性、烟道直管段条件、采样孔数量和插入深

度,若存在强烈振动、漏风、积灰或采样孔位置不合理等问题,应在记录中说明并采取补充测点、延长测定时间或调整监测断面的方式控制偏差。

3.2 采样过程工况记录与操作规范控制

采样过程质量控制的关键是保证监测数据能够代表炉窑正常排放状态,而不是偶然工况或操作波动下的瞬时结果,监测期间应同步记录炉窑生产负荷、燃料种类及消耗量、炉膛温度、投料量、产品产量、风机频率、烟气治理设施运行参数等信息,其中布袋除尘器压差、脱硫循环液pH值、喷淋液流量、脱硝喷氨量、引风机电流等参数应与采样时间对应记录[5]。对于连续式炉窑应选择负荷稳定、治理设施正常运行时段开展监测,对于间歇式炉窑应明确升温、保温、投料、出料等阶段,颗粒物采样过程中按测点顺序均衡采样,及时观察动压、流量、负压和滤筒状态,发现滤筒破损、采样泵异常、冷凝水倒吸或流量波动超出控制范围时应暂停采样并重新确认,气态污染物读数应在仪器响应稳定后记录,连续监测时间一般不少于5min,波动较大时应延长至10–15min。

3.3 样品保存、数据折算与结果审核

样品保存、数据折算和结果审核是监测质量控制的收口环节,直接影响最终报告结论的可靠性。颗粒物样品采集后应将滤筒或滤膜完整转移至洁净密封容器,采样前后称量应在恒温恒湿条件下完成,电子天平分辨率宜达到0.1mg,若两次平行称量差值异常,应重新平衡后复称。吸收液、吸附管、气袋等样品应根据污染物性质采取避光、密封、低温保存等措施,并在规定保存时间内完成分析,防止挥发、吸附或化学转化造成浓度偏差,数据处理时应将采样体积折算为标准状态干烟气体积并结合烟气温度、压力、含湿量、含氧量和流量计算排放浓度及排放速率。涉及基准氧含量折算时应核对实测含氧量是否与炉窑燃烧状态一致,防止因漏风或过量空气过大导致结果失真,结果审核应检查原始记录、仪器校准、工况稳定性、采样时间、空白样、平行样、计算公式和有效数字表达,对明

显离散数据应结合现场记录进行复核，不能简单平均处理。

4 工业炉窑废气排放监测优化措施

4.1 优化采样点位布设，提高监测代表性

采样断面设置在烟气流速稳定、污染物混合均匀、便于安全操作的位置，优先选择距弯头、阀门、变径、风机出口和汇流口较远的直管段，采样断面前直管段宜不少于4倍烟道直径，后直管段宜不少于2倍烟道直径。圆形烟道可沿两条相互垂直直径布点，矩形烟道可按断面面积划分网格布点，测点数量可根据烟道尺寸控制在8–16个。对于多台炉窑共用排气筒的情况，应结合支管汇入位置和烟气混合距离设置采样断面，必要时在支管和总管分别监测，以区分单台炉窑排放贡献。采样平台应满足操作空间、防护栏杆、照明和电源要求，采样孔应便于皮托管、采样枪和探头完整插入，保证颗粒物、气态污染物和烟气参数可同步测定。

4.2 结合生产工况开展精准监测

工业炉窑废气监测应与生产工况深度结合，按照炉窑运行特征选择更具代表性的监测时段。连续式炉窑可选择产量稳定、炉温稳定、燃料供应稳定和治理设施正常运行阶段开展监测，同步记录生产负荷、燃料用量、炉膛温度、烟气量、产品产量和治理设施参数。间歇式炉窑应根据升温、保温、投料、熔融、烧成、出料等阶段制定分阶段监测方案，对于水泥、陶瓷、玻璃、铸造、砖瓦等炉窑，可将颗粒物、SO₂、NO_x、CO和O₂数据与炉温、风量、过量空气系数、除尘器压差、脱硫pH值、脱硝喷氨量等参数同步分析，判断污染物浓度变化与工艺运行之间的对应关系，采样时间可根据排放波动适当延长，气态污染物连续读取不少于5–15min，颗粒物采样应保证足够采样体积，使监测结果更准确地服务达标评价和排放管理。

4.3 加强在线监测设备运行维护

对安装自动连续监测系统的工业炉窑，应将在线监测设备运行维护作为排放监测优化的重要

环节。企业应围绕采样探头、伴热管线、预处理单元、分析仪、颗粒物监测仪、流速仪、温压湿测量单元和数据采集传输单元建立维护清单，按日、周、月分级开展检查。日常维护重点查看数据传输、仪器报警、样气流量、伴热温度、反吹状态和排水情况，清理探头滤芯、检查采样管路密封性、更换过滤器和蠕动泵管，保持预处理系统稳定。伴热温度保持在120℃以上，防止高湿烟气冷凝；采样流量和分析仪响应应保持在设备规定范围内，出现颗粒物数据突升、SO₂或NO_x持续漂移、O₂异常波动时应及时开展零点、跨度和参比方法核查。颗粒物在线设备应定期通过手工监测建立或修正校准曲线，气态污染物分析仪应使用有效标准气进行校准。

4.4 推动监测数据服务污染治理决策

工业炉窑企业可建立颗粒物、SO₂、NO_x、CO、O₂、烟气量、炉温、燃料消耗和治理设施参数的关联分析表，将手工监测、在线监测和生产运行数据统一整理，形成可用于管理决策的数据链。颗粒物浓度与布袋除尘器压差、清灰周期、滤袋更换时间相结合，可用于判断除尘系统运行效率，SO₂浓度与燃料含硫量、脱硫剂投加量、循环液pH值相结合，可用于优化脱硫运行参数，NO_x浓度与炉温、过量空气系数、分级燃烧、喷氨量或脱硝反应温度相结合，可用于调整低氮燃烧和脱硝控制策略。

5 结束语

工业炉窑废气排放监测是掌握污染物排放水平、评价治理设施运行效果和推动企业稳定达标的重要手段。实际监测中，应根据炉窑类型、燃料结构、烟气条件和污染物特征，合理应用颗粒物采样、气态污染物现场监测、烟气参数测定和自动连续监测技术，确保监测数据具有代表性和准确性。要加强监测前仪器校准、采样过程工况记录、样品保存、数据折算和结果审核，提升全过程质量控制水平，结合生产工况开展精准监测，加强在线设备维护，并将监测数据用于除尘、脱硫、脱硝和燃烧控制优化，为工业炉窑污染治理和绿色生产提

供可靠支撑。

参考文献

- [1]胡宁,苏可,常新,等.聊城市工业炉窑污染排放现状调查及防治对策研究[J].清洗世界,2026,42(5):97-99.
- [2]郑晓涛.工业炉窑废气余热发电的研究[C]//国家建材技术图书馆,建筑材料工业技术情报研究所.第十二届水泥工业节能环保技术高峰论坛会议文集.北京:建筑材料工业技术情报研究所,2023:60-61.
- [3]郑晓涛.工业炉窑废气余热发电的研究[C]//国家建材技术图书馆,建筑材料工业技术情报研究所.第十二届水泥工业节能环保技术高峰论坛会议文集.北京:建筑材料工业技术情报研究所,2023:60-61.
- [4]曹林锋,乔世杰,王凤,等.烟气含氧量对铸造工业大气污染物排放浓度的影响[J].铸造工程,2022,46(6):80-84.
- [5]郭恒横,魏森林,王晓军,等.德阳地区砖瓦工业炉窑废气中二氧化硫和氮氧化物的检测与研究[J].广州化工,2025,53(13):123-126.

Copyright © 2026 by author(s) and Global Science Publishing 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