

垃圾焚烧发电厂烟气排放监测 (SO₂/NO_x) 与自动控制策略研究

杨后贵

上海康恒环境股份有限公司 上海 201703

摘要：随着城市化进程的加速，垃圾产生量急剧增加，垃圾焚烧发电作为一种有效的垃圾处理和能源回收方式得到广泛应用。然而，垃圾焚烧过程中产生的SO₂和NO_x等污染物对环境和人体健康构成严重威胁。因此，准确监测烟气中SO₂和NO_x的排放浓度，并实施有效的自动控制策略，对于保障垃圾焚烧发电厂的环保运行至关重要。本文深入探讨了垃圾焚烧发电厂烟气排放监测 (SO₂/NO_x) 的技术细节，分析了自动控制策略的原理与实践，旨在为提高垃圾焚烧发电厂的环保水平和运行效率提供理论支持和实践指导。

关键词：垃圾焚烧发电厂；烟气排放监测；SO₂；NO_x；自动控制策略

1 引言

垃圾焚烧发电作为一种高效、减容的垃圾处理方式，不仅能够实现垃圾的无害化处理，还能将垃圾中的化学能转化为电能，具有显著的环境和经济效益。然而，垃圾焚烧过程中会产生多种污染物，其中SO₂和NO_x是主要的大气污染物之一。SO₂会导致酸雨的形成，对土壤、水体和生态系统造成破坏；NO_x不仅会形成酸雨，还会参与光化学烟雾的形成，对人体呼吸系统和心血管系统产生危害。因此，加强对垃圾焚烧发电厂烟气中SO₂和NO_x排放的监测与控制，是保障环境质量和公众健康的重要举措。

2 垃圾焚烧发电厂烟气中 SO₂ 和 NO_x 的产生机理

2.1 SO₂的产生机理

垃圾中含有一定量的硫元素，主要以有机硫和无机硫的形式存在。在垃圾焚烧过程中，硫元素会与氧气发

生反应生成SO₂。具体反应过程如下：

有机硫的分解与氧化：有机硫在高温下首先会发生热分解反应，例如含硫的有机化合物（如硫醇、硫醚等）在高温（通常在300-800℃）下分解为小分子含硫化合物，如硫化氢 (H₂S)、二硫化碳 (CS₂) 等。这些小分子含硫化合物进一步与氧气发生反应生成SO₂。以硫化氢为例，其反应方程式为：2H₂S+3O₂—高温2SO₂+2H₂O。

无机硫的氧化：无机硫（如硫化物、硫酸盐等）在高温下直接与氧气反应生成SO₂。例如，硫化亚铁 (FeS) 在高温下与氧气反应：4FeS+7O₂—高温2Fe₂O₃+4SO₂。

2.2 NO_x的产生机理

垃圾焚烧过程中产生的NO_x主要包括热力型NO_x、燃料型NO_x和快速型NO_x。其产生机理及影响因素如下表所示：

NO _x 类型	产生机理	主要影响因素
热力型NO _x	在高温条件下，空气中的氮气和氧气发生反应生成NO _x 。反应速率随温度的升高而急剧增加，一般在1300℃以上时，热力型NO _x 的生成量会显著增加。其反应过程主要遵循泽尔多维奇 (Zeldovich) 机理，主要反应为：N ₂ +O—高温 NO+N；N+O ₂ —高温 NO+O。	燃烧温度、氧气浓度和在高温区停留时间
燃料型NO _x	垃圾中的含氮化合物在燃烧过程中会释放出氮原子，这些氮原子与氧气反应生成NO _x 。燃料型NO _x 的生成量与垃圾的成分、燃烧温度和氧气浓度等因素有关。垃圾中的含氮化合物主要包括蛋白质、氨基酸等，在燃烧过程中，这些含氮化合物首先分解为含氮的中间产物，如HCN、NH ₃ 等，然后这些中间产物进一步与氧气反应生成NO _x 。	垃圾成分、燃烧温度和氧气浓度
快速型NO _x	在燃料富集的区域，碳氢化合物与氮气在高温下快速反应生成NO _x 。快速型NO _x 的生成量相对较少，但在某些特定的燃烧条件下（如高碳氢化合物浓度、高温和富氧环境）也不容忽视。其生成过程主要涉及碳氢化合物裂解产生的自由基与氮气分子的反应。	碳氢化合物浓度、温度和氧气浓度

3 垃圾焚烧发电厂烟气排放监测 (SO₂/NO_x) 技术与方法

3.1 在线监测技术原理与设备

3.1.1 SO₂在线监测技术

紫外荧光法：基于SO₂分子吸收特定波长（通常为190-

230nm）的紫外线后，被激发到高能级，当其返回到低能级时会发射出荧光，荧光强度与SO₂的浓度成正比。该方法的监测设备主要由光源、反应室、光电倍增管和信号处理系统等组成。其工作流程如（图1），紫外荧光法具有灵敏度高、选择性好等优点，适用于低浓度SO₂的监测。



图1 紫外荧光法工作流程

定电位电解法：利用电解池中的电极在恒定电位下， SO_2 在电极表面发生氧化还原反应，产生的电流与 SO_2 的浓度成正比。电解池通常由工作电极、对电极和参比电极组成，工作电极上涂有对 SO_2 敏感的催化剂。当烟气通过电解池时， SO_2 在工作电极上发生氧化反应，产生电子流动，形成电流信号，通过测量电流大小来计算 SO_2 的浓度。定电位电解法具有响应速度快、结构简单等特点，但电极易受污染，需要定期维护^[1]。

3.1.2 NO_x 在线监测技术

化学发光法：利用 NO 与臭氧发生化学反应产生化学发光，发光强度与 NO 的浓度成正比，通过测量发光强度来确定 NO 的浓度，进而推算出 NO_x 的浓度。化学发光分析仪主要由臭氧发生器、反应室、光电倍增管和信号处理系统组成。臭氧发生器产生臭氧，与烟气中的 NO 在反应室中发生反应： $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ，反应产生的激发态 NO_2 分子返回基态时发射出光子，光电倍增管将光信号转换为电信号，经过信号处理后得到 NO 的浓度^[2]。由于 NO_x 中 NO 占主要部分，通常通过测量 NO 浓度来估算 NO_x 浓度，也可通过其他辅助手段进一步准确测定 NO_x 浓度。化学发光法具有灵敏度高、线性范围宽等优点，是目前 NO_x 在线监测的主流技术之一。

红外吸收法：基于 NO_x 分子对特定波长红外光的吸收特性，通过测量红外光的吸收程度来计算 NO_x 的浓度。不同的 NO_x 分子（如 NO 、 NO_2 等）对特定波长的红外光有不同的吸收峰，当红外光通过含有 NO_x 的烟气时，部分红外光被吸收，通过检测吸收前后的红外光强度变化，结合朗伯-比尔定律，即可计算出 NO_x 的浓度。红外吸收法具有抗干扰能力强、稳定性好等特点，适用于复杂烟气环境的监测^[2]。

3.2 监测设备的选型与安装

选型原则：在选择监测设备时，应考虑设备的准确性、可靠性、稳定性和适用性。准确性是首要因素，要选择具有国家计量认证和环保认证的设备，确保监测数据的准确性和合法性。同时，要根据垃圾焚烧发电厂的实际情况，如烟气成分、温度、压力等参数，选择合适的监测设备型号。例如，对于高温、高湿的烟气环境，应选择具有良好耐温、耐湿性能的监测设备。

安装要求：监测设备的安装位置应具有代表性，能

够准确反映烟气中污染物的排放情况。一般安装在烟道直线段，避免安装在弯头、阀门等气流不稳定的部位，以减少气流扰动对监测结果的影响。安装过程中要严格按照设备说明书进行操作，确保设备的密封性和稳定性。例如，对于采样探头，要保证其与烟道的连接紧密，防止烟气泄漏影响采样准确性；对于监测设备的电气连接，要确保接地良好，避免电磁干扰^[3]。

3.3 监测数据的质量控制

校准与比对：定期对监测设备进行校准和比对，使用标准气体对设备进行标定，确保监测数据的准确性。校准周期应根据设备的使用频率和环境条件确定，一般建议每月进行一次校准。同时，与权威监测机构进行数据比对，及时发现和纠正监测数据的偏差。比对可以采用定期送样检测或现场比对的方式。

数据审核与处理：建立完善的数据审核制度，对监测数据进行实时监控和分析。设置数据异常报警阈值，当监测数据超出正常范围时，及时发出警报。对异常数据进行排查和处理，排除设备故障、人为干扰等因素的影响。例如，如果发现 SO_2 或 NO_x 浓度数据突然异常升高，应先检查监测设备的运行状态，如采样泵是否正常工作、传感器是否故障等；同时，排查是否有外部干扰因素，如烟道内是否有异物遮挡采样口等。

4 垃圾焚烧发电厂烟气中 SO_2 和 NO_x 排放的自动控制策略

4.2 基于前馈-反馈控制的策略

前馈控制：根据垃圾的成分、燃烧工况等参数，提前预测烟气中 SO_2 和 NO_x 的产生量，并调整控制参数。例如，通过安装垃圾成分分析仪，实时分析垃圾的热值、含硫量和含氮量。根据这些数据，利用预设的算法模型预测燃烧过程中 SO_2 和 NO_x 的生成趋势，提前调整脱硫剂（如石灰石浆液）和脱硝剂（如氨水或尿素溶液）的喷入量。

反馈控制：根据实时监测到的烟气中 SO_2 和 NO_x 的浓度，对控制参数进行动态调整。当监测到污染物浓度升高时，及时增加脱硫剂和脱硝剂的喷入量；当污染物浓度降低时，适当减少喷入量，以实现精准控制。反馈控制可以通过PID（比例-积分-微分）控制算法实现，根据监测值与设定值的偏差，自动调整执行机构（如喷入泵的流量）的动作。反馈控制流程图如下：

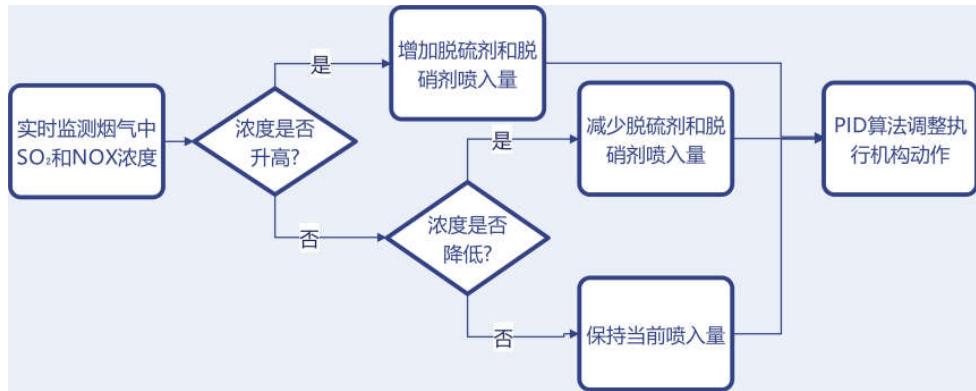


图2 反馈控制流程

4.2 智能优化控制策略

模型预测控制（MPC）：建立垃圾焚烧过程的数学模型，预测未来一段时间内烟气中SO₂和NO_x的浓度变化趋势。该模型需要考虑垃圾成分、燃烧温度、空气流量、脱硫脱硝效率等多个变量之间的复杂关系。根据预测结果，优化控制策略，提前调整操作参数，如调整燃烧器的风煤比、优化脱硫脱硝设备的运行参数等，使污染物排放始终处于达标状态。MPC能够处理多变量、非线性的控制问题，具有较好的控制效果。

神经网络控制：利用神经网络的学习和自适应能力，对垃圾焚烧过程中的复杂关系进行建模。通过大量的历史数据（包括垃圾成分、燃烧工况、污染物排放浓度等）训练神经网络，使其能够根据实时监测数据和操作参数，自动调整控制策略，实现对SO₂和NO_x排放的有效控制。神经网络控制具有较强的鲁棒性和适应性，能够应对垃圾成分和燃烧工况的变化。例如，当垃圾中含硫量突然增加时，神经网络控制能够快速调整脱硫剂的喷入量。

5 面临的挑战与对策

5.1 面临的挑战

垃圾焚烧发电厂烟气排放监测与自动控制面临多重挑战。技术上，垃圾成分复杂多变，SO₂和NO_x生成机理难精确预测，影响监测控制效果，且先进技术成本高，限制了广泛应用。管理方面，部分发电厂重视不足，存在监测设备维护不及时、控制策略执行不到位等问题，还缺乏统一标准规范，设备兼容性差^[4]。成本上，实施先进策略需大量资金投入，涵盖设备采购等多方面，小型发电厂成本压力大，一套完整系统或需数百万元投资，难以承担。

5.2 对策建议

为有效控制垃圾焚烧发电厂烟气中SO₂和NO_x排放，可从三方面着手。技术创新上，加大对生成机理研究

投入，研发新型传感器监测设备与智能控制算法，鼓励企业与科研机构合作降低成本；加强管理方面，建立健全监测和自动控制管理制度，明确部门职责与流程，做好设备日常维护，加强操作人员培训；政策支持上，政府出台政策鼓励采用先进技术，给予财政补贴、税收优惠，制定统一技术标准和规范，提升设备兼容性。

结语

垃圾焚烧发电厂烟气排放监测（SO₂/NO_x）与自动控制策略的研究对于保障垃圾焚烧发电厂的环保运行具有重要意义。通过采用先进的监测技术和自动控制策略，能够实时、准确地掌握烟气中SO₂和NO_x的排放情况，并及时采取有效的控制措施，确保污染物排放达标。未来，随着科技的不断进步，垃圾焚烧发电厂烟气排放监测和自动控制技术将朝着更加智能化、精准化的方向发展。例如，利用大数据、人工智能等技术，实现对烟气排放的实时监测和智能控制；开发更加高效、低成本的监测设备和控制技术，提高企业的经济效益和环保水平。同时，随着社会对环境保护的要求不断提高，垃圾焚烧发电厂将面临更加严格的监管和更高的环保标准。因此，持续加强烟气排放监测和自动控制策略的研究与应用，将是垃圾焚烧发电行业未来发展的方向。例如，未来可能会开发出能够自适应不同垃圾成分和燃烧工况的智能监测与控制系统，实现更加精准的污染物排放控制。

参考文献

- [1]赵全,陈雷.烟气在线监测系统在垃圾焚烧发电厂的应用[J].冶金管理,2021,(17):177-178.
- [2]张琳.宁夏中卫市垃圾焚烧发电厂周边污染物浓度扩散及监测问题研究[J].化工设计通讯,2022,48(09):188-190.
- [3]生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据应用管理规定[J].中华人民共和国国务院公报,2020,(05):23-25.
- [4]《生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据应用管理规定》于2020年1月1日起施行[J].中国环境监察,2020,(01):4.