

Study on treatment of high salt wastewater generated by medical waste incineration tail gas

Yuling Lai

Heyuan Kangyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Heyuan, Guangdong, 517000, China

Abstract

In the high-temperature incineration-based medical waste treatment system, wet acid removal processes are predominantly employed for exhaust gas purification. However, the resulting high-salinity wastewater, containing complex components (heavy metals, organic matter, and various soluble salts), poses significant challenges for subsequent treatment systems. Traditional multi-effect evaporation

Keywords

medical waste incineration; high salt wastewater; wet desulfurization; rapid cooling and spraying; system coordination

医疗废物焚烧尾气处理产生高盐废水的处理方式研究

赖玉玲

河源市康源环保技术有限公司, 中国 · 广东 河源 517000

摘 要

在医疗废物高温焚烧主导的处置体系中, 尾气净化多采用湿法脱酸工艺, 然而该过程产生的高盐废水因含盐量极高、成分复杂(含重金属、有机物及多种可溶性盐), 给后续处理系统带来诸多难题, 传统采用多效蒸发处理方式难以长期高效运行, 而在急冷工段进行回喷可实现热量吸收、提升碱液反应效率并减少废水外排负担。为此, 本文围绕该处理路径展开机制分析和工程评估, 旨在为高盐废水资源化利用提供有效的技术支撑。

关键词

医疗废物焚烧; 高盐废水; 湿法脱酸; 急冷回喷; 系统协同

1 引言

医疗废物具有高危性和复杂成分, 其无害化处置广泛采用焚烧工艺以实现减量化和彻底灭菌。焚烧过程中产生的酸性气体需经湿法喷淋脱酸系统处理, 在此过程中伴随生成大量高盐废水, 废水中含有大量氯盐、硫酸盐及残余碱液, 具有腐蚀性强、浓度高、处理难度大等特点。传统多效蒸发处理方式投资大、能耗高、运行稳定性差, 已逐渐暴露出诸多工程瓶颈, 高盐废水高效、经济的处理方式亟需深入研究。

2 焚烧尾气喷淋系统中高盐废水的形成机制

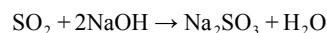
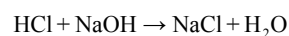
2.1 医疗废物焚烧中含氯有机物与无机盐的释放

医疗废物成分复杂, 包含大量含氯塑料、一次性输液器、医用手套、血袋以及部分含盐药品等, 其在高温焚烧过程中发生热解、裂解和燃烧反应, 释放出多种含氯有机物和无机盐成分, 其中氯元素在高温作用下易与金属离子或碱性物质形成氯化钠、氯化钙、氯化镁等盐类, 并以气态或细微颗粒

状态进入烟气系统。此外, 一些药品包装及医用材料中也含有钠、钾、钙等易形成水溶性盐的元素, 这些物质在焚烧过程中转化为氧化物或盐类后随烟气进入后处理单元, 形成尾气中的盐分负荷, 对喷淋脱酸系统中的液相体系构成物质来源。此过程中, 由于焚烧温度变化、烟气停留时间不同以及进料成分波动, 盐类的释放路径具有不确定性, 但大量富含可溶盐的焚烧产物会直接进入喷淋塔循环水系统, 成为高盐废水形成的初始驱动因素。

2.2 喷淋脱酸系统中 NaOH 与酸性气体的中和反应

医疗废物焚烧过程中释放出大量酸性气体, 如 HCl、SO₂、HF 等, 为实现尾气达标排放, 普遍采用湿法喷淋脱酸工艺, 常用碱液为 NaOH 溶液, 其与酸性气体接触后发生中和反应生成对应盐类, 如氢氯酸与氢氧化钠反应生成氯化钠与水, 硫氧化物可进一步形成硫酸钠或亚硫酸钠溶于循环水系统中, 导致废水中盐分浓度持续上升, 典型中和反应如下:



上述反应在喷淋塔内的气液接触界面持续发生, 使得

【作者简介】赖玉玲(1987-), 女, 中国广东河源人, 本科, 工程师, 从事固体废物及医疗废物处理处置研究。

碱液不断转化为高浓度可溶性无机盐类，废水盐分逐步累积，尤其在循环喷淋系统中表现为总溶解固体（TDS）和电导率的迅速提升，若不及时排放或处理，将对系统运行产生腐蚀、结垢与管道堵塞等工程问题。此外，随着处理负荷的增加，NaOH用量也呈上升趋势，进一步增加了盐类产量与废水浓度，使高盐废水成为喷淋脱酸系统中必须重视的副产问题^[1]。

2.3 盐类在喷淋塔及循环水系统中的富集路径

喷淋脱酸系统常采用循环水工艺，吸收塔下部设置循环水池，通过泵将中和液反复喷洒至烟气路径以增强反应效率，受限于喷淋塔液体容积、蒸发损失率及补水条件，未及时排出的中和产物在系统内逐步富集，尤其是NaCl、Na₂SO₃、Na₂SO₄等可溶性盐类，其在高温条件下的溶解度上升加速了循环水中盐浓度的累积过程。当系统运行稳定阶段进入多循环闭环时，盐类物质通过反复回流不断叠加，导致喷淋液的TDS浓度远高于原始补水水平，超过饱和点后即发生晶体析出，沉积于设备管道、喷嘴及塔体内壁，产生严重结垢与堵塞问题。此外，在高温高湿的操作条件下，部分盐类在循环系统中发生水解、氧化等副反应，可能形成亚硝酸盐、硫酸根、氨氮等复杂成分，进一步增加了废水的处理负荷^[2]。

3 现有高盐废水处理方式的适应性与局限性

3.1 多效蒸发系统的运行特点与工程实践

多效蒸发系统是当前医疗废物焚烧尾气喷淋系统中高盐废水常见的终端处理方式，具有较强的浓缩与分盐能力，适用于高含盐、高腐蚀性水质的处理需求，其基本原理是利用多级降压蒸发结构实现热能梯级利用，减少能源消耗并连续提取废水中的水分形成浓缩液或结晶盐，进而降低废水体积与污染负荷^[3]。在工程实践中，多效蒸发广泛部署于规模较大或处置负荷较高的焚烧项目中，并常与热源联动或结合机械蒸汽再压缩技术提升热效率，这种系统具备较高的自动化程度和运行稳定性，在理论条件下可实现废水零排放。但其设备构造复杂、运行参数敏感，需根据高盐废水中的盐类类型、浓度范围及杂质组成进行精细化设计与调整，尤其对系统材质、温度控制、物料分布及排渣方式等方面提出较高要求，不具备良好前处理与稳定操作条件时，容易出现运行波动或达标风险。

3.2 蒸发处理面临的堵塞、腐蚀与高能耗问题

多效蒸发在处理高盐废水过程中面临设备结垢、腐蚀与能耗大的普遍性工程问题，其主要原因在于废水中含有大量钠、钙、镁等易结晶盐类以及氯离子、硫酸根等高腐蚀性组分，随着蒸发浓缩过程推进，盐类不断析出并附着于换热面及蒸发管内壁，形成坚硬水垢降低换热效率，影响系统连续运行并缩短清洗周期。此外，频繁的除垢操作不仅提高维护成本也降低了设备使用寿命，同时高盐废水的腐蚀性对蒸

发器金属材质构成挑战，常规不锈钢难以长期耐受高浓度氯盐环境，需使用价格较高的特种合金材料才能保障设备长期稳定运行。在能耗方面，尽管多效蒸发具备热能回收结构，整体系统仍需持续消耗蒸汽或电力作为热源支持蒸发过程，单位水处理能耗远高于传统污水处理系统，尤其在蒸发浓度高、水分回收率大的条件下更为显著。

3.3 当前处理方式对系统运行效率与成本的影响

多效蒸发作为高盐废水的主要处理方式在实际工程应用中会对焚烧系统整体运行效率和成本构成显著影响，一方面蒸发系统作为独立单元需要配套建设储水池、供热系统、清洗装置和浓缩液处理模块，增加厂区设备布局复杂度，并提升了项目投资门槛，特别是对场地有限或处理量不稳定的医疗废物焚烧厂而言，难以形成工程匹配的优化配置；另一方面蒸发系统本身运行稳定性依赖于连续性与均衡进水，若高盐废水排放波动较大或杂质组成复杂，会引发系统频繁启停、热负荷波动及控制参数失衡，导致运行不稳定甚至中断，影响尾气喷淋系统高效排放的后续保障。在经济方面，蒸发系统对热源、水泵、电控等设施依赖程度高，能源与运维成本长期累积带来持续支出压力，加之高端防腐材料采购成本居高不下，使得单位吨废水处理费用远高于传统废水系统，对医疗废物处置企业的整体运营结构造成财务负担，这种高投入、高运行、高维护的模式不利于在行业内普遍推广，限制了高盐废水处理系统与焚烧装置的深度耦合与经济协同能力，亟需开发更具系统兼容性、能耗更低、运维更简化的新型处理路径。

4 回喷降温方式在高盐废水处理中的系统协同作用

4.1 高盐废水回喷急冷段的热量交换与喷淋逻辑

高盐废水在焚烧尾气急冷段的回喷利用，属于一种热质协同强化利用的过程，该处理方式以烟气急冷降温为目标，将高盐废水通过多级雾化喷枪系统引入急冷塔或急冷烟道，使其在高温烟气中迅速蒸发并吸收大量显热，实现烟气温从850℃以上快速降低至200℃以下的过程，进而有效抑制二噁英等污染物的再生成。喷淋液采用高盐废水后，其初始温度、盐含量和蒸发潜热直接影响降温效率与热平衡控制，高盐废水在高温作用下可以快速汽化，但因其含有大量可溶盐如氯化钠、硫酸钠等物质，在蒸发过程中可能出现过饱和状态并析出晶体颗粒，部分盐类可随气流进入后端飞灰捕集系统，也有少量沉积于喷淋塔底部或壁面。具体操作过程中，应设置多级喷枪阵列覆盖整个烟道横截面，并采用变频控制系统调节喷液压力和流量，使喷雾粒径维持在100~300微米范围内，其中喷枪材质需采用耐腐蚀合金以适应高盐高温工况。整个急冷过程中的控制核心为液气比稳定性和入口烟气流速，典型液气比范围在0.8~1.2 L/Nm³，根据不同焚烧负荷动态调整喷液量，以保障急冷段出

口温度波动小于 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，高盐废水中所含残余碱类成分可在此过程中提前中和部分酸性气体，形成前端预脱酸效果，有助于降低后段喷淋塔负荷^[4]。

4.2 回喷对 NaOH 吸收率的影响与碱液利用提升

医疗废物焚烧尾气处理系统中，常以喷淋塔碱液吸收法进行酸性气体控制，其中 NaOH 为主要反应介质，其单位利用率对运行经济性具有决定作用。高盐废水作为急冷段回喷液时，由于该类废液中通常含有未完全反应的 NaOH、 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 等弱碱性组分，在高温烟气环境中可以与 HCl、 SO_2 等酸性气体发生快速气液中和反应，形成氯化钠、亚硫酸钠等可溶性盐类，从而实现对部分酸性气体的前置吸收，减少后段喷淋塔的碱液消耗。此类回喷作用可有效延长 NaOH 的反应路径与滞留时间，提高其利用效率并降低补充碱液的频次。在实际运行中，需通过对高盐废水进行 pH 和总碱度监测，回喷液 pH 控制在 9.5 ~ 10.5 之间，使其在急冷段达到较好的中和反应效果^[5]。此外，高盐废水中所含微量钠盐会在雾化蒸发过程中进一步提高液滴表面碱性浓度，增强其在高温环境下的反应活性。为实现该协同效应，喷淋系统应采用多通道喷雾结构，根据急冷塔气体停留时间及温度梯度布置分段喷淋，使不同反应区段充分匹配不同组分的反应速率。该方式提升了 NaOH 的单位反应效率，并延缓了碱液衰减速率，间接减少了碱液更换与排污频率。尤其是在碱耗敏感或碱液采购成本高的项目中，采用高盐废水回喷的方式可作为一种碱耗削减与循环回用相结合的优化路径，提升系统协同运行能力并改善资源利用率。

4.3 回喷方式对布袋除尘器与后续系统的运行影响

高盐废水回喷急冷段的采取对布袋除尘器与后续系统的运行稳定性具有直接影响，其关键在于高盐水滴蒸发不完全或蒸发后的盐类颗粒与飞灰混合后所形成的复合颗粒物可能对滤袋结构与过滤性能造成负荷压力。在喷淋过程中若存在局部雾化不均、液滴粒径偏大或回喷液温度偏低等情况，则容易出现部分液滴未完全气化，随烟气携带至除尘器前端，在滤袋表面形成盐分沉积，进而引发压差升高、气流分布失衡及清灰频次增加等问题。当高盐水中的盐类如氯化钠、硫酸钙在布袋入口温度较低的情况下结晶析出，会导致

滤袋粘结、结垢及局部糊袋，影响清灰效果并缩短滤袋寿命。为减缓此类影响，应严格控制急冷段出口烟气温度，使其高于布袋除尘器酸露点至少 20°C ，并将急冷段出口温度控制在 180 ~ 200°C 之间。此外，滤袋材质应根据高盐烟气条件进行选型，使用具备耐腐蚀、抗结晶析出能力的滤料材料，如聚四氟乙烯覆膜材料、芳纶纤维或玻纤复合材料等物质，以提高其在高盐、高湿、高负荷环境下的稳定性^[6]。此外，为进一步减少回喷引发的颗粒黏附与滤袋堵塞风险，可在布袋除尘器入口设置气流整流装置并结合烟气在线监控系统进行温湿度动态调整，使除尘系统在高盐运行条件下保持合理压差与连续清灰节奏，保证整体除尘效率不因回喷操作而下降。

5 结论

本文聚焦医疗废物焚烧尾气处理过程中湿法脱酸系统所产生高盐废水的来源机制、处理困境及改进路径，针对多效蒸发处理方式存在的堵塞、腐蚀与高能耗等问题，系统分析了高盐废水成分在焚烧及喷淋过程中的转化和富集过程，明确指出该类废水对系统运行造成持续性负荷。基于此，将高盐废水回喷于急冷段的协同利用工艺，可在实现高效降温的基础上，降低碱耗、减轻终端处理负担并提升整体运行效率，并对其对布袋除尘系统的适应性进行了分析为高盐废水处理提供了可行的资源化利用方向。

参考文献

- [1] 阮艺. 医疗废物焚烧过程中的环境风险及防控措施研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(18): 160-162.
- [2] 任德杰. 医疗废物焚烧工艺配套设计优化及焚烧系统性能测试分析[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(02): 545-550.
- [3] 郝元峰, 范海旺, 韩风云. 某医疗废物处置中心焚烧处置设施性能测试研究[J]. 中国标准化, 2023, (15): 189-194.
- [4] 陈刚, 于晓东, 岳佳妮, 等. 医疗废物处理处置污染控制标准解读[J]. 环境保护科学, 2021, 47(03): 1-6.
- [5] 陈岳祥. 医疗废物焚烧处理系统设计研究[J]. 科技资讯, 2021, 19(15): 47-49.
- [6] 夏侯娟. 江西省医疗废物处置工艺研究[D]. 南昌大学, 2013.