

垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术现状和发展趋势

周胜常

上海环境卫生工程设计院有限公司 上海 200237

摘要:垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术,作为当前垃圾处理领域的关键技术之一,正面临着日益严格的环保要求和市场需求。该技术通过高效集成多种净化工艺,实现对烟气中颗粒物、SO₂、NO_x、HCl、重金属及二噁英等多种污染物的协同去除。本文综述了垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术的现状,并探讨其未来的发展趋势,旨在为垃圾焚烧行业的环保升级和技术创新提供参考。

关键词:垃圾焚烧烟气;多污染物一体化净化技术;发展趋势

引言:随着城镇化步伐的加快与废弃物量的持续增长,垃圾焚烧技术因其高效节能特性,日益成为世界各地垃圾处理的主导方案。然而,焚烧过程中释放的烟气富含多种有害物,对自然生态及民众健康构成潜在风险。鉴于此,研发高效且经济的烟气综合净化技术,已成为垃圾焚烧领域内一个亟需攻克的关键议题。

1 废弃物焚烧排放的烟气组分及其环境影响

废弃物焚烧流程会产生庞大体积的烟气,此类烟气化学组分繁复,囊括了众多潜在的有害成分。关键组分涵盖二氧化碳(CO₂)、一氧化碳(CO)、氮氧化物族群(NO_x)、二氧化硫(SO₂)、氯化氢气体(HCl)、氟化氢(HF)、诸如二噁英类的有机污染物(PCDDs/PCDFs),以及悬浮颗粒物等。这些组分对环境生态和人体健康均构成了严重的潜在威胁。具体而言,CO₂作为主要的温室气体之一,虽自身非直接毒性,但大规模排放无疑会加剧全球气候暖化现象;CO为剧毒气体,能与血红素紧密结合,削弱血液的氧运输功能,从而触发中毒反应;NO_x与SO₂不仅直接威胁人类健康,还间接引发光化学烟雾与酸雨等生态环境问题;HCl与HF则兼具强烈的腐蚀性,并能与其他污染物协同反应生成更多有害物;二噁英类物质具备显著的致癌与致突变潜能,对人体健康构成重大风险;而悬浮颗粒物则包裹了诸如汞、镉、铅等微量重金属元素,这些元素在人体内部积累至一定阈值后,会对神经、消化及呼吸等多个系统造成实质性伤害。

2 垃圾焚烧烟气污染物的危害

2.1 对大气环境的影响

垃圾焚烧烟气中的有害物质会严重污染大气环境。这些有害物质包括有毒气体和颗粒物,它们在大气中扩散,不仅会降低空气质量,还可能形成雾霾,影响大气能见度^[1]。SO₂和HCl等酸性气体在大气中与水蒸气结

合,会形成酸雨,对森林、农作物和水体造成破坏,同时还会对建筑物和基础设施造成腐蚀和损害。

2.2 对人体健康的危害

垃圾焚烧烟气中的有害物质对人体健康构成严重威胁。长期吸入含有重金属和有机污染物的颗粒物,会对呼吸系统造成慢性损害,引发呼吸道炎症、肺癌等疾病。重金属和有机污染物如二噁英还可通过食物链进入人体,对神经系统造成损害,影响智力发育。这些有害物质在人体内积累到一定量时,还会引发其他神经系统疾病、心血管系统疾病以及增加癌症发生风险。

2.3 对生态系统的破坏

垃圾焚烧烟气中的有害物质还会对生态系统造成破坏。酸雨的形成不仅影响生态环境,还会破坏土壤结构,影响作物的生长和产量。同时这些有害物质还可能进入水体,对水生生物造成毒害,破坏水生生态系统。垃圾焚烧过程中产生的飞灰等固体废弃物,如果处理不当,也可能对土壤和地下水造成污染,进一步威胁生态系统的安全。

3 垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术现状

随着城市化进程的加速和人们生活水平的提高,垃圾产生量急剧增加,垃圾处理成为城市环境治理的重要一环。垃圾焚烧作为一种能高效实现减量化与资源回收的处理手段,正日益成为垃圾管理的主要技术路径。垃圾焚烧过程中产生的烟气含有多种污染物,如颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、酸性气体、重金属和二噁英等,对环境和人体健康构成严重威胁。

3.1 干法净化技术

干式净化工艺涉及向烟气内喷撒干燥的吸附材料或催化媒介,促使这些材料与烟气污染物发生化学转变或物理黏附作用,以此实现烟气的净化目标。这种方法具有废水零排放、设备简单、维护方便等优点。在干法净

化技术中,常用的吸附剂包括消石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)干粉、碳酸氢钠(NaHCO_3)干粉等。这些吸附剂颗粒的表面直接与烟气中的酸性气体(如 SO_2 、 HCl 、 HF 等)接触,发生化学中和反应,形成无害的中性盐颗粒。吸附剂还能吸附烟气中的重金属和二噁英等有害物质。布袋除尘器常用于干法净化系统的末端,以捕集反应生成的固体颗粒和未反应的吸附剂,进一步净化烟气。干法净化技术的净化效率相对较低,一般难以满足严格的排放要求。吸附剂的消耗量和再生成本也是需要考虑的问题。为了提高净化效率,研究者们不断开发新型吸附剂和催化剂,并优化喷入方式和反应条件。

3.2 半干法净化技术

半干式清洁技术巧妙融合了干式与湿式技术的优势,既保持了干式技术的无废水排放特性,又实现了高效的清洁效能。此技术常采取旋转喷雾烘干或循环流化床等工艺。在旋转喷雾烘干法中,约20%浓度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆液被精准送入脱酸塔顶端的旋转雾化装置,浆液经雾化后形成微小液滴,于脱酸塔内与烟气充分交融并发生化学作用。反应所得固态微粒及未反应吸附剂伴随烟气被布袋除尘装置捕捉。此技术因具备高清洁效率、低石灰消耗量及无废水排放等特质,在垃圾焚烧发电领域颇受欢迎。循环流化床法则利用流化床反应器促使吸附剂微粒与烟气充分混合反应,适用于处理大流量烟气,且清洁效率高^[2]。然而,循环流化床法的初期设备投入与运行费用较高,且需定期清除反应器内积灰。半干式清洁技术在处理垃圾焚烧产生的烟气上表现卓越,特别是在移除酸性气体与重金属方面效果突出。未来,半干式清洁技术的发展方向将聚焦于进一步缩减设备投资与运行成本,并提升清洁效率与经济性。

3.3 湿法净化技术

湿法净化技术主要通过喷淋洗涤的方式,使烟气与碱液逆流接触并进行化学反应,从而去除烟气中的污染物。常用的湿法净化技术包括石灰石-石膏湿法、钠碱法湿法等。石灰石-石膏湿法利用石灰石浆液与烟气中的二氧化硫反应,生成硫酸钙等固体物质,并通过沉淀、过滤等方式实现固液分离。这种方法脱硫效率高,且能回收利用生成的硫酸钙作为石膏副产品。石灰石-石膏湿法可能会产生废水等二次污染,需要配套废水处理系统。钠碱法湿法则是利用氢氧化钠或碳酸钠等碱性溶液与烟气中的污染物反应。这种方法具有反应速度快、净化效率高等优点。但钠碱法湿法的运行成本相对较高,且需要定期更换碱液。湿法净化技术在处理垃圾焚烧烟气方面具有高效、稳定的优点,尤其适用于处理高浓度污染

物。如何降低废水处理成本、提高资源回收利用率,仍是湿法净化技术需要解决的问题。

3.4 高级氧化技术

高级氧化技术是一种利用强氧化剂(如臭氧、过氧化氢等)将烟气中的污染物氧化为无害或低毒物质的技术。在垃圾焚烧烟气净化中,高级氧化技术常用于去除难降解的有机物和二噁英等有害物质。通过向烟气中喷入强氧化剂,使这些有害物质发生氧化反应,生成无害或低毒的物质。高级氧化技术能够增强烟气的生物降解性能,为后续的生物处理步骤创造良好条件。高级氧化技术的运行成本相对较高,且需要配套专业的氧化剂储存和输送系统。如何优化氧化剂的投加量和反应条件,提高净化效率和经济性,也是高级氧化技术需要解决的问题。

3.5 集成净化技术

集成净化技术是将多种净化技术有机结合起来,形成一个高效、稳定的烟气净化系统。在垃圾焚烧烟气净化中,集成净化技术常用于处理复杂多变的烟气成分。例如,可以将干法、半干法或湿法净化技术与布袋除尘器、选择性催化还原(SCR)脱硝系统、活性炭吸附装置等结合起来,形成一个完整的烟气净化系统。该系统既能去除烟气中的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等常规污染物,又能去除重金属、二噁英等难降解有害物质。集成净化技术的关键在于优化各净化单元的配置和运行参数。例如,需要根据烟气成分和排放要求选择合适的净化技术和设备;需要根据反应条件和净化效率调整吸附剂或催化剂的投加量和反应时间;需要定期清理和维护净化设备,确保其正常运行和净化效果。随着环保要求的不断提高和技术的不断进步,集成净化技术将成为垃圾焚烧烟气净化的主流方向。通过不断优化净化单元的配置和运行参数,提高净化效率和经济性,为环境保护和可持续发展做出更大的贡献^[3]。

4 多污染物一体化净化技术的发展趋势

4.1 技术融合与创新

技术融合与创新是多污染物一体化净化技术发展的核心驱动力。随着材料科学、化学工程、信息技术等多学科的交叉融合,传统的净化技术正在经历深刻的变革。例如,纳米材料、催化新材料的应用,使得净化效率得到显著提升,同时降低了能耗和副产品的产生。这些新材料不仅提高了污染物去除的选择性和效率,还减少了净化过程中的二次污染风险。未来,技术融合将更加注重跨领域技术的整合与创新。例如,将生物技术与化学净化技术相结合,利用微生物的代谢作用去除难降

解污染物；或者将物理法与化学法结合，开发更高效、更节能的净化工艺。数字化与网络技术的融合应用将促进净化技术向智能化迈进，使得远程监视、故障预先警示及自动调节等功能得以实现，从而增强净化系统的稳固性和作业效率。

4.2 智能化与自动化

随着物联网技术、大数据技术以及人工智能领域的迅猛进步，净化系统正经历着向智能化层次的逐步转型与升级。通过安装传感器和监测设备，实时收集和分析净化过程中的数据，可以精确控制净化工艺参数，优化净化效果。基于机器学习和人工智能的预测模型，可以预测净化系统的运行状态，提前发现并解决潜在问题，降低维护成本和停机时间。通过自动化控制系统，可以实现净化设备的远程操作、自动调节和故障报警等功能，减少人工干预，降低操作风险。随着机器人技术的不断进步，未来有望实现对净化设备的智能巡检和维护，进一步提高净化系统的可靠性和稳定性。

4.3 环保政策与市场需求驱动

环保法规的强化与市场需求的演变是多污染物一体化净化技术前进的动力源泉。面对全球环境挑战的加剧，多国政府已推行更为严苛的环保规定，针对工业排放及垃圾焚烧等行业设定了更高的污染物排放标准。这些法规的执行，既加速了净化技术的研发进程和应用实践，也带动上下游产业链的协同发展^[4]。在市场需求层面，随着公众环保觉醒及绿色消费趋势的盛行，众多企业及消费者日益关注产品的环境友好度及生产流程的绿色清洁。这一需求转变，促使企业加大净化技术的研发投入，推动技术持续革新与优化。同时，市场竞争的白热化也激励企业探索更为高效经济的净化方案，以符合日益升级的环保标准及市场需求。

4.4 产业链协同发展

产业链协同发展是多污染物一体化净化技术实现可持续发展的重要保障。净化技术的发展不仅涉及材料、设备、工艺等多个环节，还与能源、环保、化工等相关

产业紧密相连。加强产业链上下游企业的合作与协同，对于推动净化技术的快速发展具有重要意义。未来，产业链协同发展将更加注重技术创新与产业升级的结合，通过整合产业链资源，推动技术创新与产业升级的深度融合，可以形成更加完整、高效的净化产业链。产业链协同发展还将注重环保效益与经济效益的平衡，在推动净化技术发展的同时，需要充分考虑其环保效益和经济效益的协调性。通过提升资源配置效率、强化资源使用效益、削减能耗及排放等措施，推动净化技术朝向绿色及可持续的方向发展。通过加强政策引导和市场机制建设，推动净化技术的广泛应用和产业化发展，为环境保护和可持续发展做出更大的贡献。

结束语

综上所述，垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术正处于快速发展阶段，其在提高净化效率、降低能耗和减少二次污染方面取得了显著进展。未来，技术创新的不息步伐与环保政策的持续收紧，将引领该技术迈向更高效率、更智能化、更绿色可持续的进化路径。相信通过持续的技术研发和应用推广，垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术将为全球环境保护和可持续发展做出更大贡献。

参考文献

- [1]陈建军,龙吉生,陈琳,等.垃圾焚烧烟气多污染物一体化净化技术现状和发展趋势[J].环境工程,2024,42(9): 211-221.DOI:10.13205/j.hjgc.202409020.
- [2]李帅,胡红云,黄永达,等.垃圾焚烧电厂重金属排放与控制[J].能源环境保护.2023,37(3).DOI:10.20078/j.eep.20230405.
- [3]阙正斌,李德波,肖显斌,等.中国垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除技术研究进展[J].洁净煤技术.2023,29(6). DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.22011002.
- [4]侯海瑞.催化滤袋在垃圾焚烧烟气多污染物去除中的应用[J].化工装备技术.2022,43(5).11-14.DOI:10.16759/j.cnki.issn.1007-7251.2022.10.003.