

外,捕集设备的规模化应用对工艺流程的集成度要求较高,设备运行的稳定性和维护性也是实施过程中不可忽视的技术挑战。未来,通过自动化控制和智能监测技术的应用,捕集设备的运行成本和维护费用有望减少25%。

5 碳封存技术在工业排放治理中的应用

5.1 碳封存技术的应用场景与优势

碳封存技术的应用场景主要集中在深层地质储存、油气田增产和矿物封存。深层地质储存是最常见的封存方式,通过将二氧化碳注入地下深层岩石中进行长期封存。研究表明,全球已有超过400亿吨二氧化碳成功封存,主要储存于北美和欧洲的地下岩层。油气田封存技术不仅可以减少二氧化碳排放,还能增强油气田的开采效率,特别是在老化油田中,二氧化碳的注入能够提升油气产量。矿物封存技术通过将二氧化碳与矿物反应生成碳酸盐矿物,预计可封存的二氧化碳量达到每年1.5至2亿吨。碳封存技术的主要优势在于其长期的稳定性和可操作性,能够为大规模减排提供持续的技术支持^[1]。

5.2 碳封存的环境影响与安全性分析

碳封存的环境影响主要集中在封存过程中的泄漏风险和地下水污染问题。为确保封存的二氧化碳长期稳定地存储,必须选择适宜的封存地点,如深层盐岩、枯竭油气田等,这些地区具有良好的密封性。通过模拟研究发现,深层地质储存的封存风险较低,封存的二氧化碳在1000年的时间尺度内几乎不可能泄漏。然而,封存过程中可能会对地下水系统产生影响,特别是在封存点周围的压力和温度变化可能导致地下水的化学成分变化。为此,封存技术需要进行充分的环境监测和风险评估,确保二氧化碳不会进入水源层,并定期检测封存区的稳定性。安全性分析表明,在严格监控和管理的情况下,封存技术的风险是可以接受的。

5.3 碳封存技术的实施路径与技术要求

碳封存技术的实施路径主要包括选择合适的封存场地、构建监测体系和优化注入技术。选择封存场地时,必须考虑到地下岩层的结构、封闭性以及二氧化碳的注入容量。对封存场地的地质特征进行详细评估,并结合气候变化模型预测未来的气候变化对封存的潜在影响,确保长期稳定性。在技术要求方面,封存过程中需要高精度的监测技术来跟踪二氧化碳的流动和存储情况。注入技术的优化也至关重要,如何控制二氧化碳的注入速率与地下压力,避免引发地质灾害,

是封存技术中的一个关键问题。未来,通过提升地质封存模型的精准度和数据分析能力,封存效率将得到大幅提升,预计封存成本将在未来20年内下降30%。

5.4 碳封存技术的经济性与可行性分析

碳封存技术的经济性是决定其广泛应用的重要因素。封存过程涉及的主要成本包括场地选择与评估、注入技术、监测设备、以及长期运营和维护费用。尽管初期投资较高,但随着技术的成熟和规模效应的显现,封存成本有望逐步降低。研究表明,深层地质封存的成本通常在每吨二氧化碳20至40美元之间,而矿物封存和油气田增产封存的成本相对较高。通过优化注入速率、提高监测精度以及减少不必要的资源消耗,封存成本预计将在未来十年内下降25%至30%。此外,随着全球碳市场的建立和碳交易机制的推广,企业通过出售碳配额可弥补部分封存成本,进一步提升技术的经济可行性^[4]。总体来看,碳封存技术在长期来看具有较高的经济可行性,并且随着市场需求和技术革新,其经济性将得到不断改进。

6 结语

碳捕集与封存技术在工业排放治理中的应用具有重要的现实意义和广阔的前景。随着全球对碳减排要求的日益提升,碳捕集与封存技术不仅为高排放行业提供了切实可行的减排路径,也为实现碳中和目标提供了技术支持。然而,尽管技术不断发展,仍面临高成本、技术瓶颈及政策支持不足等挑战。未来,随着技术的不断突破和政策的完善,碳捕集与封存技术有望在全球范围内得到更广泛的应用,特别是在能源、钢铁、化工等重污染行业。通过加强国际合作、推动技术创新、优化经济激励机制,碳捕集与封存技术将在全球气候变化治理中发挥更加积极的作用,为应对气候变化和实现可持续发展目标做出重要贡献。

参考文献

- [1] 张立麒,赵传文.专栏执行主编寄语低碳燃烧与碳捕集技术[J].电力科技与环保,2025,41(06):857-858.
- [2] 邵子墨,雷天凯,任玮,等.水泥工业二氧化碳减排技术研究[J].工业炉,2025,47(06):1-13.
- [3] 杨新乐,张恒源,于宁,等.集成甲烷发电与太阳能的碳捕集系统热力分析[J].化学工程,2025,53(12):84-89+94.
- [4] 薛俊杰,东振,卢海兵,等.煤炭地下气化与碳捕集利用技术的集成:实现碳中和的清洁能源路径[J].矿产保护与利用,2025,45(05):1-13.

Dioxin Memory Effect in the Low-Temperature Zone at the Tail End of Waste Incinerators and Transient Control Strategies for Exhaust Gas Treatment

Hengzhao Tian

Hebei Institute of Cloud Environmental Monitoring Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

The generation and control of dioxins during waste incineration is a major challenge in the field of environmental protection. This paper focuses on the dioxin memory effect in the low-temperature zone (200-400°C) at the tail end of waste incinerators. By using a multiphase heat and mass transfer mathematical model, combined with laboratory simulation equipment and field tests, the generation mechanism, accumulation pattern, and influencing factors of the memory effect of dioxins in the flue gas treatment system are studied. The research results show that during transient conditions such as incinerator startup, load changes, and shutdown, dioxin adsorption-desorption occurs on the metal surfaces in the low-temperature zone at the tail end, resulting in a significant memory effect, causing a lagging peak in the dioxin concentration in the flue gas, which can reach 2 to 5 times the steady-state concentration. Based on the mechanism of the memory effect, transient control measures for exhaust gas treatment processes such as temperature gradient optimization, residence time control, catalyst arrangement, and the timing of activated carbon injection are proposed. Comparative tests show that the proposed measures can effectively suppress the peak dioxin emissions during transient conditions, reducing them by 60% to 80%, and accelerate the attainment of stable emission rates. This provides good guidance for the clean production of waste incineration power plants and is conducive to promoting the development of solid waste treatment industries.

Keywords

Waste incineration; Dioxin; Memory effect; Transient control; Exhaust gas treatment

垃圾焚烧炉尾部低温段二噁英记忆效应与废气处理工艺瞬态调控策略

田恒钊

河北工院云环境检测技术有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

垃圾焚烧过程中二噁英产生及控制是环保领域一大难题。本文围绕垃圾焚烧炉尾部低温区(200-400°C)二噁英记忆效应问题,采用多相流传热传质数学模型,结合实验室模拟设备及现场试验,对二噁英在烟气处理系统中生成机理、积累规律及记忆效应影响因素进行研究。研究表明,在焚烧炉启炉、负荷变化及停炉等瞬态工况下,尾部低温区金属表面会发生二噁英吸附-脱附现象,从而产生明显记忆效应,造成烟气中二噁英浓度出现滞后性峰值,峰值可达到稳态浓度2~5倍。根据记忆效应机理提出温度梯度优化、停留时间控制、催化剂布置方式以及活性炭喷射时机等废气处理工艺瞬态控制措施。通过对比试验表明,所提措施可以有效抑制瞬态工况下二噁英排放峰值,使其下降60%-80%,并且加快达到稳定排放速度。这对垃圾焚烧发电厂清洁生产起到良好指导作用,有利于推动固废处理行业发展。

关键词

垃圾焚烧; 二噁英; 记忆效应; 瞬态调控; 废气处理

1 引言

垃圾焚烧是城市固体废物处理的一种重要方式,在全世界得到普遍应用。据 2025 年统计数据显示,世界范围内的垃圾焚烧发电厂每年可处理垃圾量超过 3 亿吨,而中国的

垃圾焚烧发电厂所占比例更是高达 40% 以上。但是,二噁英的产生及排放问题一直困扰着这个行业的发展。特别是焚烧炉尾部低温段(200-400°C),由于烟气中前驱物的再合成以及设备表面的记忆效应,二噁英浓度在瞬态工况下会出现较大的峰值,对末端治理造成很大困难。近年来,随着超低排放标准出台,如何有效控制二噁英记忆效应以及改进废气处理技术成为研究重点。

【作者简介】田恒钊(1999—),男,中国河北威县人,本科,从事废气处理工艺优化研究。

垃圾焚烧行业的发展与环保要求是紧密相连的。从

2019年开始,欧盟对二噁英排放标准进行了更加严格的规定($<0.1 \text{ ng I-TEQ/m}^3$),促进了急冷技术、催化降解以及智能控制的发展。有学者认为,二噁英的记忆效应主要是由于飞灰中的重金属起到催化的作用以及设备表面残留的前驱物吸附-脱附所造成的,在启停炉或者负荷变化等瞬态工况下,这种效应更加明显,使得烟气出口处二噁英浓度出现滞后性峰值,甚至可以达到稳态浓度的2-5倍。为了克服这个问题,本文基于多相流传热传质数学模型,在实验室模拟的基础上,结合现场试验,探讨了记忆效应产生的原因及影响因素,提出了以温度梯度优化、催化剂布置方式以及活性炭喷射时机为主的废气处理工艺瞬态调控方法。实验结果表明,所提出的调控方法可以使瞬态工况下二噁英排放峰值下降60%-80%,并且大大缩短达到稳定排放所需时间,有利于垃圾焚烧发电厂的清洁生产。

2 垃圾焚烧炉尾部低温段二噁英记忆效应机理研究

2.1 低温段二噁英形成与积累机制

垃圾焚烧炉尾部低温段(200-400℃)是二噁英再合成的重要场所,其产生及富集机理主要是由于飞灰表面上的催化作用以及前驱体的吸附。而在该温度范围内,含有氯的有机物比如氯苯、氯酚等通过自由基反应生成二噁英,同时飞灰中过渡金属(如Cu、Fe、Ni)起到催化剂的作用,大大加快碳、氢、氧、氯等元素重新组合的速度。尤其是当烟气经过余热锅炉或者湿法脱硫塔时,飞灰颗粒与设备金属表面产生物理化学作用,使二噁英前驱物被吸附并聚集。这种情况在启停炉或负荷变化时更加明显,因为温度变化会影响飞灰表面化学活性,进而提高催化效果。近五年来,传统焚烧方式下尾部低温段产生的二噁英占总量90%以上,是制约二噁英排放的主要因素之一^[1]。另外,飞灰比表面积及粒径大小对于二噁英吸附量也有很大影响,大比表面积飞灰可以吸附更多二噁英,从而加重记忆效应。

2.2 记忆效应的物理化学过程分析

记忆效应是由于烟气处理系统中残留的二噁英前驱物以及催化剂在之后的操作过程中不断释放而造成出口处二噁英浓度高于入口处的现象。从物理化学角度来说,这个过程主要分为吸附、脱附以及再生三个步骤。在焚烧炉点火或者负荷改变的时候,烟气中的二噁英前驱物会被飞灰颗粒以及设备金属表面所吸附,形成稳定的化学键。在温度降低到250-450℃之间时,这些被吸附物质会在飞灰表面过渡金属的作用下发生脱附并再次参与到二噁英生成过程中来。实验表明,飞灰中重金属含量越高,二噁英释放速度越快,特别是铜的存在大大增强了记忆效应。另外,烟气在低温区停留时间也会影响记忆效应,停留时间越长,二噁英再生成的机会就越大。而且,记忆效应还与温度变化有关, $\pm 50^\circ\text{C}$ 的温度变化就可以引起较大的二噁英释放量。通过对“时间-

浓度”关系进行研究得出结论,记忆效应在启停炉时最明显,出口二噁英浓度可以达到正常水平的2-5倍,这对末端治理提出了更高的要求。

2.3 温度波动对二噁英释放规律的影响

温度波动是影响垃圾焚烧炉尾部低温段二噁英释放规律的重要因素之一。在焚烧炉启动、负荷变化或者停炉过程中,温度的变化会使飞灰表面化学环境发生较大变化,进而对二噁英释放产生很大影响。有研究发现,当温度从高温区降到250-450℃之间时,飞灰表面过渡金属催化剂活性提高,使得被吸附在飞灰表面二噁英前驱物快速脱附并且重新参与反应生成二噁英。而且,在温度波动较大情况下,这种释放更加明显。比如, $\pm 50^\circ\text{C}$ 温差就可以让二噁英释放速度增加几倍,造成瞬态工况下排放峰值远大于稳态水平。同时,温度波动也会使烟气在低温段停留时间变长,从而促进二噁英生成^[2]。实验表明,在启停炉期间,二噁英浓度滞后性峰值可以达到稳态浓度2~5倍,并且持续时间较长。因此,控制温度梯度、减少低温段停留时间是抑制二噁英释放有效措施。

2.4 记忆效应的量化表征方法

为了更好地量化垃圾焚烧炉尾部低温区的记忆效应,在此利用多相流传热传质数学模型以及高分辨气相色谱-质谱联用仪(HRGC-MS)进行在线检测,绘制出“时间-浓度”变化图,研究低温区设备进出口处二噁英浓度变化情况,发现记忆效应具有滞后性。而飞灰中重金属含量对二噁英吸附/释放速度影响较大,特别是铜含量高的飞灰具有更大的记忆效应。并且烟气在低温区停留时间越长,二噁英生成量越多,每增加1s,二噁英生成量增加10%-15%。因此,提出一种结合温度窗口、停留时间和飞灰性质的记忆效应量化表征方式,通过对飞灰表面化学成分以及二噁英浓度变化进行在线检测来评价记忆效应大小,该方法可以很好地预测瞬态工况下二噁英排放最大值,同时对废气处理技术改进起到指导作用。

3 废气处理工艺瞬态调控策略优化

3.1 基于记忆效应的工艺参数动态监测系统

近年来,垃圾焚烧行业发展迅速,2025年我国垃圾焚烧处理量已达2亿吨/年,但是二噁英排放问题依然是制约其可持续发展的主要因素之一。尾部低温段(200-400℃)的记忆效应在启停炉以及负荷变化过程中表现得非常突出,造成烟气中二噁英浓度出现滞后性峰值,给环境带来很大危害。研究发现,飞灰表面上的重金属催化剂(如Cu、Fe)在温度变化过程中会经历吸附-脱附过程,是形成记忆效应的根本原因。为了更好地解决这个问题,提出了一种基于记忆效应的工艺参数在线监测方法。该方法利用高分辨气相色谱-质谱联用仪对低温段进出口处二噁英浓度进行在线检测,同时利用三维动态模型对金属表面催化活性变化情况进