

行预测。实验结果表明,在温度区间为 250-450℃的情况下,±50℃的温度波动会使二噁英生成速率提高3倍以上。因此,需要对烟气温度梯度、停留时间以及飞灰性质等进行有效监控,使其保持在合理范围内。比如,采用数字孪生技术将 CFD 仿真与机器学习相结合,可以及时发现可能发生的超限情况并及时进行相应的调整来减少记忆效应带来的影响。这样一种在线监测与预报相结合的方式,不但提升了系统的反应速度,而且也为之后的多级净化设备联调提供了良好的基础^[3]。

3.2 多级净化装置协同控制策略

垃圾焚烧尾部低温段的记忆效应显著增加末端治理难度,瞬态工况下传统单一净化设备难以满足超低排放要求。为此,提出多级净化设备协同控制方案,通过急冷技术、硫氨基复合阻滞剂循环喷射与智能清灰实现二噁英全方位抑制。核心采用双流体喷嘴急冷,将烟气温度从 550℃快速降至 200℃以下且停留时间< 1s,抑制二噁英低温再生成;研发含硫、氮组分的复合阻滞剂并循环喷射,维持烟气中(S+N)/Cl 摩尔比 1.4 ~ 2.0,阻滞率超 99%;同时在余热锅炉与除尘器间加装超声波防垢装置,减少积灰与催化剂残留,弱化记忆效应。深圳某垃圾焚烧厂应用显示,该方案可使瞬态工况下二噁英排放峰值降低 60% ~ 80%,2 小时内恢复正常,有效助力垃圾焚烧清洁生产及固废处理行业绿色发展。

3.3 活性炭喷射系统智能调节机制

活性炭喷射是垃圾焚烧烟气处理的重要步骤,主要目的是去除烟气中的二噁英等有害物质。但是,在瞬态工况下,传统的固定喷射量方式不能满足复杂工况要求,造成吸附效果降低以及浪费大量活性炭。因此,提出了一种基于记忆效应分析活性炭喷射系统智能控制策略。该策略根据烟气中二噁英浓度变化以及炉膛温度、氧含量、CO 浓度等信息,对活性炭喷射量及时间进行优化控制。比如,在启停炉过程中,由于记忆效应影响,二噁英浓度可能会出现滞后性高峰,这时系统就会加大喷射量保证吸附效果。而在稳定运行时,适当降低喷射量节省成本。试验结果显示,使用智能控制策略之后,活性炭使用量降低了约 30%,而二噁英去除率仍然可以达到 99.9% 以上。另外,该策略利用数字孪生技术对喷射过程进行模拟仿真并进行优化,使整个系统更加经济环保^[4]。这给垃圾焚烧厂精细化管理提供了一种新思路。

3.4 瞬态工况下的预测控制算法

垃圾焚烧瞬态工况下,二噁英排放波动受记忆效应影

响显著,是废气治理重点。为此提出基于数字孪生的预测控制方法,通过焚烧炉-烟气净化系统三维动态模型、CFD 模拟与机器学习,以炉温、烟气流速、氧浓度、飞灰性质等为输入,结合记忆效应滞后性优化工艺参数。启停炉时提前调控炉温变化率与活性炭喷射量,使记忆效应消退时间小于 2 小时;通过 DCS 系统实时控制炉温、氧量、CO 浓度,确保燃烧稳定(炉温波动< ±20℃)。实验证明,该方法可使瞬态工况二噁英排放峰值降低 70% 以上,优于传统控制,对提升垃圾焚烧厂效率、推动行业智能化意义重大。

4 结语

垃圾焚烧炉尾部低温段二噁英记忆效应的研究揭示了瞬态工况下污染物排放的关键机制及其对环境治理的影响。研究发现,在启停炉或负荷波动过程中,低温段金属表面吸附的二噁英前驱物会因为温度的变化而发生脱附,造成烟气中二噁英浓度出现滞后性峰值,这给末端治理带来很大困难。利用多相流传热传质模型进行分析并结合实验结果表明,改善温度梯度、延长停留时间和合理布置催化剂可以有效地减少二噁英的产生。尤其是硫氨基复合阻滞剂循环喷射和急冷技术联用可以将瞬态工况下二噁英排放峰值降低 60%-80%,并且使稳定排放时间缩短到 2 小时以内。这对于垃圾焚烧行业来说是非常有意义的技术进步。近年来,随着固体废物处理需求增加,我国垃圾焚烧厂数量已经突破 700 座,年处理能力达到 2 亿吨,但是二噁英排放仍然是影响行业发展的一个重要因素。本文提出的瞬态调控方法不仅可以提高废气处理效率,而且对实现超低排放有积极意义,具有良好的环境和社会效益^[5]。今后,结合智能化控制技术进一步完善,可以促进垃圾焚烧工艺更加清洁化、高效化。

参考文献

- [1] 吕璐,方子欣,范驰.电炉炼钢烟气二噁英污染与治理技术研究[J].工业安全与环保,2024,50(04):87-91.
- [2] 陶胜.城市生活垃圾焚烧发电厂二噁英污染治理研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(13):98-100.
- [3] 于杲旸,解晓明,华玉龙,周裕成,周威.探究垃圾焚烧电厂烟气净化工艺[J].广州化工,2020,48(14):125-126+134.
- [4] 付坚强,高鑫.浅谈垃圾焚烧电厂废气处理工艺[J].科技视界,2017,(04):274.
- [5] 斯洪良,吴斌.垃圾焚烧炉烟气净化系统的工艺分析[J].电力科技与环保,2011,27(05):32-34.

Prevention and Control Strategies for Dioxin Formation Mechanisms Coupled with Waste Incineration Conditions and Assessment of Environmental Impact

Ying Xue

Hebei Zhengtian Lianrun Environmental Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

Dioxin is a persistent organic pollutant produced during the incineration of waste, and its prevention and reduction is an important part of environmental protection. This paper studies the formation mechanism of dioxin and explores the impact of incineration process parameters on dioxin generation and corresponding prevention and reduction measures. This study combines laboratory simulation with on-site monitoring to optimize and analyze the main process parameters such as incineration temperature (850-1100°C), residence time (1-4 seconds), and oxygen concentration (6-12%). The results show that under conditions of temperature above 900°C, residence time greater than 2 seconds, and appropriate oxygen concentration, dioxin generation can be reduced by more than 85%. A multiple regression model is established to describe the relationship between process parameters and dioxin emissions. Based on the mechanism research, a prevention and control strategy of “source control - process optimization - end treatment” is proposed, which means reducing dioxin generation from the source, minimizing dioxin formation during the process, and removing dioxin as much as possible in the final stage. Environmental impact assessment shows that after implementing comprehensive prevention and control measures, the content of dioxin in the soil and air around the incineration plant has decreased by 78% and 82% respectively, significantly reducing the threat to human health. This paper provides certain guidance for the clean production and environmental management of the waste incineration industry and has positive significance for promoting the progress of dioxin pollution prevention and control technology.

Keywords

Dioxin; Waste incineration; Formation mechanism; Prevention and reduction; Environmental impact assessment

二噁英产生机理与垃圾焚烧工况耦合的防控减排策略及对周围环境影响评估

薛莹

河北正天连润环境技术有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

二噁英是垃圾焚烧过程中产生的持久性有机污染物,其防控减排是环境保护的重要内容。本文通过对二噁英的形成机理进行研究,探讨了垃圾焚烧工况参数对二噁英生成的影响以及相应的防控减排措施。本研究采用实验室模拟与现场监测相结合的方式,对不同的焚烧温度(850-1100°C)、停留时间(1-4秒)、氧气浓度(6-12%)等主要工况参数进行优化分析。结果表明,在温度900°C以上、停留时间大于2秒、适当氧气浓度下,二噁英生成量可减少85%以上。利用多元回归模型建立工况参数与二噁英排放之间的关系。根据机理研究提出“源头控制-过程优化-末端治理”的防控思路,即从源头上减少二噁英的产生,在过程中尽量减少二噁英的生成,在最后阶段尽可能去除二噁英。环境影响评价表明,采取综合防控措施后,焚烧厂周围土壤及空气中二噁英含量下降了78%和82%,对人体健康危害大大减轻。本文对垃圾焚烧行业清洁生产 and 环境管理起到一定指导作用,对于促进二噁英污染防控技术进步有着积极意义。

关键词

二噁英; 垃圾焚烧; 产生机理; 防控减排; 环境影响评估

1 引言

垃圾焚烧行业是城市固体废物处理的重要方式,在全

世界范围内承担着越来越多的垃圾处理任务。但是,二噁英是一种持久性有机污染物,在垃圾焚烧过程中产生并排放,是目前环境治理的一大难题。根据近五年来的情况来看,全世界垃圾焚烧厂数量每年以3%的速度增加,而二噁英排放量由于技术进步以及政策推动逐年减少,但是不同地区之间还存在着很大差距。比如一些发展中国家的垃圾焚烧厂附近

【作者简介】薛莹(1997—),女,中国河北定州人,本科,从事二噁英的防控减排研究。

的土壤和空气中二噁英含量仍然高于安全标准,给当地环境以及居民健康带来一定风险。所以,对二噁英产生原因及与垃圾焚烧工况之间的关系进行探讨,对于促进垃圾焚烧行业清洁生产和可持续发展有着积极作用。

而且,垃圾焚烧过程中二噁英的生成途径很多,有气相反应、固相催化等,这给二噁英的防控带来很大困难。因此,在此情况下,本文采用实验室模拟与现场监测相结合的方法,分析垃圾焚烧工况参数与二噁英生成的关系,提出“源头控制-过程优化-末端治理”三位一体的防控方法。该研究结果对于垃圾焚烧行业具有指导意义,同时也有助于二噁英污染防控技术的发展。

2 二噁英产生机理与垃圾焚烧工况耦合关系研究

2.1 垃圾焚烧过程中二噁英形成的热力学与动力学机理

垃圾焚烧时,二噁英生成是一个非常复杂的过程,是热力学以及动力学问题。在高温下,垃圾中氯源(如聚氯乙烯、含氯盐类)与碳氢化合物反应生成前驱体,然后经过一系列气相反应及表面催化反应生成二噁英。而根据研究,在 $850^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 之间,温度对于二噁英生成路径选择起着决定性作用,在低温区(低于 900°C),主要是由于不完全燃烧产生前驱体,而在高温区则有利于二噁英分解反应进行。另外,由于垃圾成分复杂,所以不同的化学反应路径之间存在竞争关系,比如氯苯、氯酚等前驱体生成速度以及后续转化率受垃圾中有机物和无机物比例影响较大。近年来数据显示,全世界每年有超过两亿吨垃圾被焚烧,而约有30%的焚烧厂由于操作不当造成二噁英排放超标,这也说明改进焚烧技术的重要性。

根据近五年行业情况,使用先进技术可以减少二噁英生成量60%-70%,但是这需要精确控制焚烧条件才能达到。

2.2 焚烧温度、停留时间与氧含量对二噁英生成的影响机制

焚烧温度、停留时间和氧含量是影响二噁英生成的主要因素之一,这些因素共同决定着焚烧过程中的污染物排放情况。研究发现,在低于 850°C 的情况下,由于温度较低,燃烧不充分,容易产生大量的二噁英前体。而在高于 900°C 的情况下,二噁英分解速度很快,可以减少85%以上的二噁英生成。但是,仅仅提高焚烧温度并不是最好的办法,因为温度过高会造成氮氧化物等其他污染物的增加,所以要兼顾各种污染物的同时去除。停留时间也是影响二噁英生成的一个重要因素,实验表明,如果烟气在高温区停留时间小于2s,二噁英生成量会大大增加,而如果停留时间大于4s,就可以大大减少二噁英生成量。另外,氧气浓度对燃烧以及二噁英生成都有很大影响,合适的氧气浓度是6%-12%,过高或者过低都会使二噁英生成量增加。近年来,垃圾焚烧厂通

过对上述参数进行优化,已经使部分焚烧厂二噁英排放浓度低于 $0.1\text{ng TEQ}/\text{m}^3$,给行业发展起到很好的示范作用。

2.3 飞灰组分与催化剂作用下的二噁英合成路径分析

飞灰是垃圾焚烧过程中产生的主要固体副产物之一,其成分及性质对于二噁英的形成有着很大影响。飞灰中含有大量的金属氧化物(如 CuO 、 Fe_2O_3),这些金属氧化物在一定温度下具有很好的催化性能,可以有效地使氯苯、氯酚等前驱物转化为二噁英。有研究显示,在 $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 之间,铜基催化剂对二噁英生成效果最好。而在更高温下,铁基催化剂同样具有良好的催化效果^[1]。另外,飞灰比表面积以及孔隙度对于二噁英吸附以及反应都有很大影响,比表面积大的飞灰可以提供更多的反应位点,从而加快二噁英生成速度。近年来,垃圾焚烧行业对飞灰进行处理,比如加入碱性物质或者高温熔融等方法,使得飞灰中二噁英含量大大减少,可以达到70%以上。但是,飞灰中重金属迁移和释放问题仍然需要解决,其对环境的影响还有待进一步研究。

2.4 工况参数与二噁英排放浓度的定量耦合模型构建

根据实验以及现场监测得到的数据,建立了工况参数与二噁英排放浓度之间的定量关系模型,以反映焚烧过程中各个参数之间的作用机理。模型使用多元回归的方法,把焚烧温度、停留时间、氧气浓度等主要因素作为自变量,二噁英排放浓度作为因变量,得到一个非线性的数学公式。结果发现,焚烧温度对二噁英排放浓度的影响是随着温度升高而逐渐降低,而停留时间和氧气浓度对二噁英排放浓度的影响是随着停留时间和氧气浓度增加而减少。利用该模型进行预测,预测值与实际值之间的相对误差小于10%,说明该模型具有较好的准确性。该模型可帮助垃圾焚烧厂在生产过程中及时了解二噁英排放情况,从而为工况参数调整提供参考依据。结合近五年来行业发展情况,应用此类模型进行指导生产的焚烧厂,其二噁英排放达标率提高20%以上,对行业减排起到良好作用。

3 基于机理耦合的防控减排策略与环境影响评估

3.1 多级协同防控技术体系的优化设计与验证

垃圾焚烧行业是城市固体废物处理的重要组成部分,在全世界范围内得到迅速发展。但是,二噁英的产生及排放一直是困扰该行业的主要问题之一。从原理上讲,建立多层次协同防控技术体系是解决这个问题的有效手段。本研究采用实验室模拟和现场测试相结合的方式,对垃圾预处理、燃烧过程改进以及末端治理手段等进行综合评价。结果发现,在垃圾焚烧过程中,采取源头控制措施(如垃圾分类与预处理)可以大大减少氯源物质进入焚烧炉内,从而减少二噁英生成的可能性。此外,通过对燃烧过程进行优化,如适当提高温度、延长停留时间和增加氧气含量等,也可以有效抑制二噁英的生成。例如,在温度 900°C 以上、停留时间大于