

基于等离子体技术的难处理危险废物无害化处置 机理与工艺优化

苏柳燕

无锡市固废环保处置有限公司，江苏无锡

DOI:10.62836/environment.v3i1.1101

摘要: 本文首先对等离子体技术进行概述，阐述其定义、分类以及在废物处理中的作用原理；接着分析难处理危险废物的种类、特性以及当前处理技术存在的局限性；深入探讨等离子体技术的无害化处置机理，包括等离子体环境下的化学反应过程、对有机物的分解机制和对重金属的稳定化机制；详细介绍等离子体技术的工艺流程，涵盖等离子体反应器的设计与工作原理以及工艺参数优化；提出工艺优化策略，如等离子体炬功率与气体流量协同调控技术、多级等离子体系统处理复杂成分危废的工艺设计、基于机器学习的等离子体处理参数智能优化方法、提高处理效率的方法和减少能耗与成本的优化措施。

关键词: 等离子体技术；难处理危险废物；无害化处置；处置机理；工艺优化

Optimization of Mechanism and Process for Harmless Disposal of Difficult-to-Handle Hazardous Waste Based on Plasma Technology

Liuyan Su

Wuxi Solid Waste Environmental Protection Disposal Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu

Abstract: This paper first provides an overview of plasma technology, elaborating on its definition, classification, and operational principles in waste treatment. It then analyzes the types, characteristics, and current limitations of challenging hazardous waste treatment technologies. The discussion delves into the harmless disposal mechanisms of plasma technology, including chemical reaction processes under plasma conditions, decomposition mechanisms for organic compounds, and stabilization mechanisms for heavy metals. The process flow of plasma technology is detailed, covering reactor design, operational principles, and process parameter optimization. Optimization strategies are proposed, such as synergistic control of plasma torch power and gas flow rate, process design for multi-stage plasma systems handling complex hazardous waste components, machine learning-based intelligent optimization of plasma treatment parameters, methods to enhance treatment efficiency, and optimization measures to reduce energy consumption and costs.

Keywords: plasma technology; hazardous waste treatment; harmless disposal; disposal mechanism; process optimization

1 等离子体技术概述

1.1 等离子体技术的定义与分类

等离子体是一种由大量带电粒子（包括离子、电子）以及中性粒子（原子、分子）所组成的，在整体上表现为近似电中性的物质聚集状态。根据粒子温度的不同，等离子体可分为高温等离子体和低温等离子体两大类。高温等离子体中粒子温度极高，通常达到上万甚至上亿摄氏度，如太阳内部的核聚变反应所产生的等离子体就属于此类；低温等离子体则粒子温度相对较低，又可进一步细分为热等离子体和冷等离子体，热等离子体中电子和离子温度大致相等，处于热力学平衡状态，而冷等离子体中电子温度远高于离子温度，处于非热力学平衡状态，在难处理危险废物无害化处置等领域有着广泛的应用。

1.2 等离子体技术在废物处理中的作用原理

等离子体技术在难处理危险废物无害化处置中具有独特且重要的作用原理，这一原理是实现危险废物有效处理的关键所在。等离子体技术是一种将物质电离成离子、电子和中性粒子的状态，根据其产生方式和特性可分为多种类型，如高温等离子体和低温等离子体等。在废物处理领域，其作用原理基于等离子体环境下复杂的物理和化学反应过程。

首先，高温等离子体将废物中含有的有机物进行一系列的热解、气化等反应，迅速将其降解为小型气体分子，包括氢气、一氧化碳、甲烷等，进而收集并利用或者进行适当的处理，实现资源化，减小有害物质。其次，针对废物中的重金属，等离子体所创造的高能环境可以将重金属的化学结构和组织形态进行改变，进而降解为较为稳定无毒害的物种，减小重金属的迁移能力以及对于动植物的可吸收性，避免了重金属二次污染[1]。同时，等离子体还能够破坏废物中的有毒细菌、病菌，使其在高温高氧化性的等离子体环境下失去毒性，不会危害生态环境及人体健康。

2 难处理危险废物的特性与挑战

2.1 难处理危险废物的种类与特性

难处理危险废物主要包含重金属废物，如含汞、铅、镉等重金属的废物，重金属含量高，具有持久性、生物蓄积性和毒性，对环境和人体健康有很大危害；持久性有机污染物，如多氯联苯、二噁英等，化学性质稳定，难以降解，易在人体内积累，具有致癌、致畸、突变等危害；医疗废物，含有很多能够传播疾病的病原体，如细菌、病毒等，具有传染性，处理不慎很可能导致疾病传播；放射性废物，含有放射性物质，能够释放射线，对周围环境和生物造成辐射伤害，辐射的危害具有长期性和潜伏性等特点。难处理危险废物具有成分复杂、毒性大、危害性强、处理困难等特点。

2.2 当前难处理危险废物处理技术的局限性

已有的处理工艺效率低，对于组分复杂、毒性强的难处理危险废物不能进行高效快速的分解转化；很多处理工艺存在二次污染的问题，比如焚烧技术中可能出现的二噁英等有毒气体，填埋技术中可能出现的渗沥液对土壤、地下环境的污染等。处理成本高，在一定程度上限制了相应处理工艺的大范围应用，对于一些特殊的难处理危险废物没有合适的处理工艺。

3 等离子体技术的无害化处置机理

3.1 等离子体环境下的化学反应过程

在等离子体中存在大量高能电子、离子、激发态的中(价)原子和分子、自由基等活性粒子，这些活性粒子的能量高，反应活性大，它们能使难处理危险废物中的有害物质发生一系列复杂的化学反应。如：高能电子与气体分子之间发生非弹性碰撞，使气体分子激发、电离或分解，并产生大量的自由基和活性物种；这些自由基和活性物种与废物中的有机物和无机物之间发生氧化、还原、分解、聚合化学反应，从而将废物中的有毒有害物质转变为无毒或低毒物质，同时等离子体的高温可使化学反应更快地进行，从而使废物中的有害物质在较短

时间内得到彻底分解。

3.2 等离子体技术对有机物的分解机制

等离子体技术通过高能电子与有机物分子、自由基等活性粒子发生碰撞，导致有机物分子发生一系列的复杂的化学反应。这些反应表现为有机物的氧化、裂解、聚合等反应，使其中化学键断裂，生成小分子化合物，如二氧化碳、水等无害物质，紫外光、高温有利于有机物的分解，使得等离子体技术能够有效的分解有机物，达到了无害化处理危险废弃物的目的。

3.3 等离子体技术对重金属的稳定化机制

在等离子体技术应用于难处理危险废物时，对于重金属稳定化处理机制有重要作用，等离子体的产生能够对重金属进行熔融、气化等形态的改变，改变原有的状态。而且等离子体中的高能电子、活性粒子与重金属产生化学作用，使重金属产生成新的稳定的物质，通过等离子体技术部分重金属形成新的形态如氧化物、硫化物等，这些新的重金属相对稳定，难以迁移和释放，从而降低重金属对环境的危害[2]。除此之外，等离子处理技术还可以通过改变废物的性质对重金属进行固定和包裹，使重金属稳定化。

4 等离子体技术的工艺流程

4.1 等离子体反应器的设计与工作原理

等离子体反应器作为等离子体技术的主设备，在进行设计时需要根据处理废物本身的特性，处理的规模大小和处理效率等进行对应的设计，一般情况下等离子体反应器分为等离子体炬、反应室、气体系统、废物进料系统、尾气处理系统等几部分。在原理上等离子体炬发射出等离子体，将电能转化成热能，反应室内部快速升温，通过废物进料系统将废物投入反应室中，在高温等离子体的作用下废物中的有机物快速分解、重金属进行熔融、气化等物相变化和化学反应转化成稳定形态，通过尾气处理系统处理掉废物处理时产生的尾气，用气体系统提供反应所需的反应气体。

4.2 等离子体技术的工艺参数优化

合理化的工艺参数有利于等离子体技术处理难处理危险废物效果的提高，在操作执行过程中，对于等离子体炬功率、气体流量、废物进料速度、反应室内压力温度等多种因素，要综合性的考虑与控制，以期达到最佳的处理效果，减少能耗，控制成本[3]。等离子体炬功率的加大，有利于废物分解、转化的速度加快，但是功率过大会加重损耗与能耗，因此要保证效率的基础上，确定最佳的功率；气体流量的大小变化会造成反应室内压力与温度的变化，也会影响反应速率，要根据废物种类与处理要求合理选择。

5 工艺优化策略

5.1 等离子体炬功率与气体流量协同调控技术

该项技术是通过控制等离子体炬功率的大小和烟气流速，两者相互协调配合，使等离子处理效果最佳。等离子功率、烟气流速根据处理废物的品种和特点实时调整，使反应室内的温度、气氛维持在一定范围内，提升处理废物的转化率、利用率，可以减少设备损耗、降低能耗，减少成本，保障处理工艺的经济性和环保性。

具体来说，就是在协同调节过程中，合理建立功率与相应的气体流量量值匹配模型，针对不同组分、热值高低不同的难处理危废设置功率与气体流量基准值域，在处理过程中实时反馈测量反应室内部温度、压力、组分含量等数据，通过反馈调节不断调整功率和气体流量，例如当危废热值较高时适当提高气体流量进行降温处理，防止区域过热，同时可以略微改变功率维持反应温度的平衡，当危废热值较低时降低气体流量，同时提高功率确保足够反应温度，通过协同微调最大程度提高处理效率和效果，降低设备损耗和维护频次，实现经济与环境效益双提升。

5.2 多级等离子体系统处理复杂成分危废的工艺设计

针对成分复杂的危险废物，采用多级联系统将

多级等离子体串联或并联进行分批处理，多级等离子体处理系统可以根据成分组成物质的物化性质，在不同的环境，进行分批分解转化。比如，在高温熔点的无机物与低沸点有机物的混合混合危险废物处理时，在一级反应器内，用高能的等离子体让固体物质熔融状态变为液体物质而成为无机物质，然后在二级反应器内控制反应温度和反应条件，对有机组分进行充分降解分解，能够在很短的时间内实现对混合危险废物的处理，并且能避免同一个反应器内成分复杂，对处理效果造成的不良影响[4]；另一方面，实现多级并联或串联反应器间能量梯级使用，节能效果最好，而且处理时的在线信息监测和反馈信号可以实现反应器的自动调节，让反应的进行以及最终产品质量都能有保障。

5.3 基于机器学习的等离子体处理参数智能优化方法

此方法是通过建立机器学习模型，实时监测等离子体处理过程的各项参数，动态调整处理参数。首先，通过历史数据训练机器学习模型，使其能够理解各废物成分与处理效果之间的关系。然后，在处理过程中，机器学习模型根据实时监测到的数据，迅速计算并推荐最佳的参数组合，如等离子体炬功率、气体流量、反应温度等，以达到最佳的处理效果。最后机器学习模型能够通过自适应学习，随着处理经验的增加，不断提高优化效果和准确率。

可以加强学习方法的运用，让机器学习模型随着变化的垃圾组分和垃圾处理条件修正和调整行动，像对含有不稳定组分特征的垃圾，就可以通过试错不停调整和修正行动权重，保障达标处理的同时可以节省能耗。可以利用迁移学习，让机器学习模型通过少量的迁移迅速适应新的垃圾处理环境，缩短设计周期，这些都得益于大量高精度的传感器用于实时数据的传感器设备和边缘计算的前端集成使得模型运行快速准确。

5.4 提高等离子体技术处理效率的方法

可以通过改变反应器结构进行改进，比如可以

通过对电极进行更好的结构设计来使得等离子体分布更为合理，能够使得废物和等离子体接触更快，从而处理速度会更快，改变废物的喂入方式，使得废物能够均匀连续稳定地进入反应器中，避免因进料不均匀而导致部分处理不到位或者处理时间过长问题，改变对等离子体的产生设备的改变，使其能产生更多的等离子体并提高其能量密度。

除了上述几种途径外，还可以考虑引入自动化控制系统，精准调控反应器内部各项参数，如温度、压力、气体组分等，为等离子体处置提供理想的反应环境，进一步提升处置效率[5]。最后，对处置后的废弃物进行即时分离与回收，降低后续操作对整体流程的掣肘作用，也是一种可供尝试的途径。

另外可以优化等离子体与废物的混合过程，采用一些特殊的喷嘴设计，或者搅拌器等，使废物与等离子体充分混合，增大反应接触面，也可以改善处理效率。或者对等离子体在处理反应的中间产物进行检测分析，随时调整处理参数，使没有意义的反应不进行，也可以达到提升处理效率之目的。

5.5 减少能耗与成本的优化措施

可以从能源利用入手，优化能源利用效率，如采用余热回收技术，将反应过程中产生的余热进行回收再利用，用于其他设备或工艺环节的需要，减少能源的额外消耗。在成本方面，合理选用设备材料，在满足设备性能和质量要求的前提下，选用性价比更高的材料，降低设备采购成本。加强设备维护和管理，定期进行检修和维护，延长设备使用寿命，减少设备更换和维修频次，降低长期运营成本。优化工艺流程，减少中间环节，提高整体处理效率，也可以在一定程度上降低能耗和成本。

也可考虑选用节能型等离子体产生装置，节能型等离子体产生装置较于传统等离子体产生装置，更节省能源，既能够满足处置的需要，又可避免能源的消耗，也可搭建能源管理系统，对等离子体处理时的能源损耗进行实时采集核算，发现能源损耗的地方，及时调试调整，这也是节约能耗的正确

路径。对于成本控制，除了所选材料得当，注重保养，还可用规模生产的方式来降低单位处理成本，扩大处理规模，降低单位固定成本的方法，来达到成本控制的目的。

6 结语

难处理危险废物的无害化处理方面，等离子技术有较强的优势和很大的发展空间，通过对难处理危险废物无害化处理原理的探索，进一步优化处理工艺和方案，提高处理效率，降低处理能耗和成本，为日益突出的危险废物处理问题提供可靠的技术支持，随着等离子技术越来越成熟，其在危险废物处理领域的应用将愈发广泛，为危险废物处理提

供更加高效、绿色、可持续发展的解决方案。

参考文献

- [1] 孙成伟,沈洁,任雪梅,等.等离子气化技术用于固体废物处理的研究进展[J].物理学报,2022(09):72-85.
- [2] 胡春云,蒋太波.危险废物等离子体处理技术的应用研究[J].东方电气评论,2022(03):5-10.
- [3] 曹煜彬,单晓静,吴笑天.危险废物等离子体处理技术的机理与应用探索[J].皮革制作与环保科技,2024(04):85-87.
- [4] 蒋太波.危险废物等离子体处理技术的应用探讨[J].四川化工,2022(03):17-22.
- [5] 农丽霞.危险废物等离子体处置技术的实践应用研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(10):84-86+95.

