

垃圾焚烧厂渗滤液处理沼气发电系统的能量平衡分析

郭玉超

洪洞县民生垃圾综合处理有限公司 山西临汾

【摘要】垃圾焚烧厂在处理过程中产生的大量渗滤液含有高浓度有机物，若直接排放不仅会造成环境污染，还会增加处理成本。将渗滤液处理与沼气发电系统耦合，通过厌氧消化产生沼气并用于发电，可实现废弃物减量化与能源化利用的双重目标。本文以能量平衡分析为主要研究思路，探讨渗滤液厌氧处理过程中沼气产量、发电效率以及系统能量回收率之间的关系。结果表明，合理优化厌氧消化工艺与余热回收措施，能够显著提升系统净能量产出，并降低运行能耗，为垃圾焚烧厂实现资源循环与能源自给提供参考路径。

【关键词】垃圾焚烧厂；渗滤液处理；沼气发电；能量平衡

【收稿日期】2025 年 8 月 17 日

【出刊日期】2025 年 9 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20250061

Energy balance analysis of biogas power generation system for leachate treatment in waste incineration plants

Yuchao Guo

Hongdong Minsheng waste comprehensive treatment Co., Ltd., Linfen, Shanxi

【Abstract】A large amount of leachate generated during the operation of waste incineration plants contains high-concentration organic matter. Direct discharge of such leachate not only causes environmental pollution but also increases treatment costs. Coupling leachate treatment with a biogas power generation system—where biogas is produced through anaerobic digestion and then used for power generation—can achieve the dual goals of waste reduction and energy recovery. Taking energy balance analysis as the core research approach, this paper explores the relationships between biogas production, power generation efficiency, and system energy recovery rate during the anaerobic treatment of leachate. The results show that reasonable optimization of anaerobic digestion processes and waste heat recovery measures can significantly improve the net energy output of the system and reduce operational energy consumption. This study provides a reference path for waste incineration plants to realize resource recycling and energy self-sufficiency.

【Keywords】Waste incineration plant; Leachate treatment; Biogas power generation; Energy balance

引言

垃圾焚烧厂在实现减量化、无害化和资源化的过程中，渗滤液作为一种高污染、高负荷的副产物，处理难度极大。传统物化或生化处理方式多以削减污染物为目标，忽视了其潜在的能源价值。利用厌氧消化将渗滤液中的有机物转化为沼气，并进一步通过发电系统实现能源回收的研究逐渐增多。这一模式不仅能够降低处理能耗，还可提升系统整体能效，契合绿色低碳发展的方向。能量平衡分析作为评价能源转化与利用效率的重要工具，能够揭示系统能量输入与输出之间的关系，从而为优化设计与运行管理提供依据。通过对垃圾焚烧厂渗滤液处理沼气发电系统进行能量平衡研究，

可以探索其在减污降碳、提升能源自给率和促进循环经济发展方面的实际作用。

1 垃圾焚烧厂渗滤液特性及能量回收潜力分析

垃圾焚烧厂在高温燃烧过程中会产生多种副产物，其中渗滤液是最难处理的问题之一。渗滤液主要来源于垃圾在堆放、压缩及焚烧冷凝环节中产生的液体，其特点是水量庞大、成分复杂、有机物浓度较高，并且氨氮和盐分含量偏重。这类高负荷废水如果未经妥善处理直接排放，不仅会对地表水和地下水造成长期污染，还会对厂区运行的环境管理带来隐患^[1]。从能源利用的角度来看，渗滤液中富含的有机质在厌氧条件下能够被分解，生成具有燃料价值的气体。通过科学设计厌氧

消化工艺,并结合余热回收与再利用措施,可以实现由污染物向能源的转化过程。这一过程不仅缓解了废水处理压力,也在绿色循环体系中形成衔接环节,使污染控制与能源回收有机结合,推动垃圾焚烧厂向资源化和低碳化方向发展。

渗滤液成分复杂,其生化可降解性受到氨氮和盐分的影响,若直接采用常规生物处理工艺,系统易发生抑制现象,导致有机物去除效率低下。然而通过调控 pH 值、温度以及采用高效产甲烷菌群的驯化,可以显著提升厌氧消化的稳定性与甲烷产率。甲烷作为高热值气体,在燃气发电机组中燃烧能够实现电能和热能的双重产出。系统能量回收的潜力不仅取决于渗滤液中可降解有机物的含量,还与发电设备的能效水平和余热回收效率密切相关。在同等有机负荷条件下,若能够实现能量多级利用,系统的综合能源效率会大幅提升,这也是垃圾焚烧厂向资源化转型的重要支撑。

在整体能源系统框架下,渗滤液的能量回收潜力不仅体现在单纯的发电量,还体现在降低外购电力和蒸汽需求的综合效益中。当渗滤液处理与焚烧厂锅炉余热系统形成耦合时,能够利用高温烟气对厌氧反应器进行温度维持,减少额外供热需求。厌氧消化产生的沼气若经过提纯,还可以用于锅炉燃烧替代部分化石燃料,进一步减少碳排放。这种多维度的能量回收模式,既符合低碳发展趋势,也能提高垃圾焚烧厂的经济效益。通过系统化的能量平衡分析,可以量化不同环节的能量流向与利用效率,从而为未来规模化推广提供理论与实践的参考。

2 渗滤液厌氧消化与沼气发电系统能量转化过程研究

厌氧消化是渗滤液资源化利用的核心技术,其过程包括水解、产酸、产乙酸以及产甲烷等阶段。在这一多级微生物反应链中,有机物逐步被分解为小分子物质,最终生成甲烷和二氧化碳。渗滤液中溶解性有机物含量较高,水解阶段相对容易,但高浓度氨氮会对产甲烷菌群产生毒性作用,影响甲烷生成速率。为提升系统运行稳定性,常采用多相厌氧反应器、膜分离耦合技术或高效载体固定化技术,以增强微生物群落的耐受性和反应速率。沼气作为最终产物,进入燃气发电机组后能够转化为电能与热能,其中电能用于厂区内内部用电,热能则用于维持厌氧系统温度和预处理工艺,实现能量的内部循环。

沼气发电系统的能量转化效率受多方面因素影响,其中甲烷含量是决定燃烧热值的核心参数。甲烷比例

越高,单位体积沼气的热值随之增加,发电效率也会显著提升。为了保证系统的长期稳定运行,实际工程中往往通过脱硫、脱水和除尘等净化措施去除硫化氢、水蒸气及颗粒物,不仅降低了机组腐蚀风险,还提升了燃烧过程的稳定性与安全性^[2]。发电机组在运行过程中会产生大量余热,这部分能量通过热水交换或蒸汽锅炉回收后,可用于维持厌氧消化罐的恒温环境,并为渗滤液预处理环节提供加热需求。通过这种能量转化与循环利用机制,系统整体效率得以提高,实现了从污染治理到能源产出的有机结合,展现出资源化与减排的双重价值。

在能量平衡分析中,沼气产量、电能输出以及余热回收效率是核心指标。通过对比渗滤液处理前后的能量输入与输出,可以明确系统是否实现了正向的能源收益。若沼气发电量大于系统自耗电量,则意味着系统在能源利用上实现了盈余状态。这一盈余不仅降低了厂区外购电量,还可以向电网输出部分电能,带来经济收益。更为重要的是,能源正收益表明污染物在处理过程中实现了能源化转化,符合循环经济的基本原则。对于垃圾焚烧厂而言,这一过程不仅是废物资源化利用的体现,更是绿色低碳发展的重要路径。

3 能量平衡计算与系统运行优化路径

能量平衡计算是评估垃圾焚烧厂渗滤液处理沼气发电系统可行性的重要手段。通过对输入能量和输出能量进行核算,可以判断系统的能效水平及优化潜力。输入能量主要包括渗滤液中的化学能、系统加热所需的热能以及设备运行消耗的电能;输出能量则由沼气发电产生的电能、余热回收的热能以及潜在的副产能量组成。若输入能量大于输出能量,说明系统能效不足,需要对工艺参数或设备配置进行优化。反之,则表明系统具备较好的能源利用潜力,可以进一步扩大规模。

在优化运行路径上,首先应关注厌氧消化过程的稳定性与甲烷产率。通过精准控制水力停留时间、温度以及 pH 值,能够维持微生物群落的最佳活性。高效搅拌与在线监测技术的应用,使得反应器内物质分布更加均匀,避免局部酸化或气体积聚的情况发生^[3-7]。对于高氨氮渗滤液,还可通过分段稀释、氨氮去除或添加缓冲剂来减轻抑制作用,从而提升系统甲烷产量。在能量利用层面,余热回收是提升整体效率的关键,发电机组尾气余热可以通过换热器回收,供厌氧罐加温,实现系统内部能源的循环再利用。

从系统集成的角度看,优化路径不仅包括单一环节的提升,更涉及多系统间的耦合。垃圾焚烧厂锅炉余

热与渗滤液处理系统加热需求之间可以实现匹配,避免能源浪费。发电产生的电能优先满足厂区内设施运行,再将剩余部分并入电网,实现经济收益。通过智能化监测与控制平台,可以实时调整运行参数,使系统处于最佳能效状态。最终目标是通过系统化的能量平衡与优化,使垃圾焚烧厂在实现渗滤液无害化处理的达到能源最大化回收的目标,从而推动循环经济的落地实施。

4 垃圾焚烧厂渗滤液处理沼气发电系统的实际应用成效

在实际工程中,渗滤液处理沼气发电系统的应用已逐渐展开。部分垃圾焚烧厂通过建设厌氧消化装置,将高浓度渗滤液引入反应器中进行处理,产生的沼气用于燃气发电机组发电。运行结果显示,系统能够有效降低渗滤液的有机物浓度与氨氮含量,同时实现能源回收。与传统单一的渗滤液生化处理工艺相比,这种耦合系统在能源利用与污染控制方面具有更显著的优势。发电产生的电能可覆盖厂区部分用电需求,减少外购电量,余热则被用于维持反应温度,使整体系统更加节能高效。

实际运行的另一显著成效在于经济与环境效益的双提升。通过能量平衡分析,许多厂区发现发电量与节能能够显著抵消部分运行成本,甚至在部分条件下带来额外收益。沼气替代了部分传统燃料,减少二氧化碳及氮氧化物的排放,提升了环保水平。对于地方政府而言,该模式不仅改善了固废处理的环境风险,还能为能源结构转型和碳减排目标提供有力支撑。在国家“双碳”战略背景下,这一实践模式具有推广价值,能够为更多城市垃圾焚烧厂提供参考样板。

从未来发展角度来看,实际应用的持续优化依赖于技术升级和政策支持。通过强化反应器材料耐腐蚀性、提升发电设备效率以及推进沼气净化技术,可以进一步提高系统运行的稳定性与经济性^[8]。若能够结合智能监控平台,对能量流向、发电效率及排放指标进行实时管理,将使系统运行更为精细化和可控化。随着垃圾焚烧厂在规模化发展中的不断推进,渗滤液处理沼气发电系统的应用将成为推动资源循环和能源回收的重要路径,展现出更为广阔的前景。

5 结语

垃圾焚烧厂渗滤液处理与沼气发电系统的耦合,为废弃物资源化利用开辟了新的路径。通过能量平衡分析可以发现,合理优化厌氧消化与余热回收,不仅能够提升能源转化效率,还能降低运行能耗,实现减污降碳与能源自给的双重目标。该模式体现了循环经济理念的实践价值,为固废处理行业提供了可推广的技术方向,也为绿色低碳发展提供了重要支撑。

参考文献

- [1] 刘跃谋,田应琼. “双碳”背景下的生活垃圾焚烧厂碳减排[J].资源节约与环保,2025,(07):5-9.
- [2] 李晓云,陈峰,王炳胜,等. 垃圾焚烧厂渗滤液回用脱除氮氧化物装置工艺及应用[J].环境卫生工程,2025, 33(03): 114-116.
- [3] 于超,孟伟,孙燕华,等. 静脉产业园中餐厨垃圾处理厂与生活垃圾焚烧厂协同处理[J].资源节约与环保,2025,(06):62-67.
- [4] 张佳薇,胥东,袁玲莉,等. 垃圾焚烧厂渗滤液沼气高值化利用中标准完善的思考[J].能源研究与利用,2025,(03): 45-48.
- [5] 袁玲莉,胥东,朱春申,等. 我国垃圾焚烧厂渗滤液沼气资源量和减排潜力分析及在“双碳”背景下的产业发展前景[J].中国沼气,2025,43(03):64-69.
- [6] 李娟,李金香,郑海涛,等. 生活垃圾焚烧厂典型恶臭源恶臭物质排放特征分析[J/OL].北京工业大学学报, 2025,(09): 1111-1120[2025-08-25].
- [7] 张净瑞,郑铭灏,郑飞龙,等. 我国生活垃圾渗滤液的产生、处理现状及发展趋势[J/OL].环境工程学报,1-19[2025-08-25].
- [8] 李哲,马怡,蔡尚迎,等. 老龄与新鲜垃圾渗滤液中微塑料的污染特征[J].安全与环境工程,2025,32(01):33-40.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS