

工业危废焚烧能量回收工艺优化

谷奋

广州拉斯卡工程技术有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EAE.2025050004

摘要 文章以某 40 万吨 / 年 MDI 项目能量回收装置为研究对象, 针对装置处理固体焦油、废液、废气等多元危废的工艺特点, 分析工业危废焚烧能量回收过程中的关键技术难题。通过对工艺设计基础、流程特性及安全要求的系统梳理, 从物料适配、燃烧控制、余热利用、烟气净化及安全保障五个维度, 提出针对性的工艺优化措施。

关键词 工业危废焚烧; 能量回收工艺; 优化

Optimization of Energy Recovery Process for Industrial Hazardous Waste Incineration

Gu Fen

Raschka Guangzhou Engineering & Technology Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract This paper takes the energy recovery unit of a 400,000-ton/year MDI project as the research object and analyzes the key technical challenges in the energy recovery process of industrial hazardous waste incineration, considering the process characteristics of the unit in handling various hazardous wastes such as solid tar, waste liquid, and waste gas. Through a systematic review of the fundamentals of process design, process characteristics, and safety requirements, targeted process optimization measures are proposed from five dimensions: material adaptation, combustion control, waste heat utilization, flue gas purification, and safety assurance.

Keywords industrial hazardous waste incineration; energy recovery process; optimization

引言

焚烧法因具备减量化程度高、无害化彻底等优势, 成为工业危废处置的主流技术, 而能量回收作为焚烧工艺的核心延伸, 可将危废焚烧产生的热能转化为蒸汽等二次能源, 实现“变废为宝”。某 40 万吨 / 年 MDI 项目能量回收装置针对多元危废特性, 设计了涵盖贮存预处理、焚烧、余热回收、烟气净化的完整工艺系统, 但在实际运行中仍面临物料热值波动、燃烧效率不足、余热利用率有限、污染物排放控制难度大等问题。

一、工程概况

本工程为某 40 万吨 / 年 MDI 项目配套的能量回收装置, 由广州拉斯卡工程技术有限公司设计, 建设规模为新建 1 条焚烧线, 预留 1 条苯胺焦油焚烧线, 年运转率达 8000 小时, 实现连续生产。装置核心处理对象为 MDI 生产过程中产生的固体焦油、废液及废气, 设计小时处理能力分别为 2 吨、0.58 吨和 26500Nm³, 年处理总量达 4.18 万吨 (固体焦油 1.60 万吨、废液 0.46 万吨、废气 2.12 亿 Nm³)。工艺系统采用“贮存预处理 – 焚烧 – 余热回收 – 烟气净化”的闭环设计, 通过多组分燃烧器实现多元危废协同焚烧, 配套 SNCR+SCR 脱硝、湿法脱酸、布袋除尘等烟气处理设施, 副产 3.6Mpa、280°C 的蒸汽, 产量不低于 63T/h, 在实现危废无害化处置的同时完成能量回收。该装置的工艺设计与运行特性, 为工业危废焚烧能量回收工艺优化提供了典

型工程样本。

二、工业危废焚烧的重要性

(一) 解决生态环境安全隐患的核心手段

工业危废成分复杂多样, 包含氯苯、甲醇、苯胺、硝基苯等有毒有害物质, 以及氟、氯、重金属等污染因子, 若采用填埋、堆放等传统处置方式, 易造成土壤污染、地下水渗漏等不可逆的生态破坏。某 MDI 项目产生的固体焦油、废液及废气中, 部分组分属于甲类火灾危险物质, 且含有汞、镉、铅等重金属, 最大限值分别达 3ppm、5ppm、0.5%, 直接排放或处置不当将引发严重环境风险。焚烧法通过 1100°C 以上的高温燃烧, 可将危废中的有机污染物彻底分解, 分解率达 99% 以上, 重金属等无机污染物则固化于灰渣中, 大幅降低环境危害。该能量回收装置通过密闭式

焚烧系统，将多元危废集中处置，避免了有毒有害物质的无组织排放，同时配套氮封、活性炭除臭等设施，确保储存与预处理过程的环保性，为生态环境安全提供了重要保障。

（二）践行资源循环利用的关键路径

工业危废虽具有危害性，但部分组分如固体焦油、高浓度废液等具有较高的热值，其中固体焦油热值达 27.5MJ/kg ，废液热值在 $18.72\text{--}30.50\text{MJ/kg}$ 之间，具备转化为二次能源的潜力。传统处置方式仅关注危废的无害化，忽视了其能源属性，造成资源浪费。该 MDI 项目能量回收装置通过一体化锅炉设计，将危废焚烧产生的热能转化为高品质蒸汽，额定蒸发量不低于 63.4t/h ，可用于工业生产或供暖，实现了“废物 – 能源”的转化。这种模式不仅降低了企业对化石能源的依赖，还减少了碳排放，符合“双碳”目标下的资源循环利用要求。据测算，该装置年回收热能可等效替代标准煤约 2.5 万吨，为企业创造了显著的节能效益，彰显了工业危废焚烧能量回收的资源价值^[1]。

三、工业危废焚烧能量回收工艺的难题

（一）多元危废物料适配性差，燃烧稳定性不足

工业危废的来源多样性导致其成分、热值、污染物浓度波动显著。该 MDI 项目处理的 9 股废气、7 股废液及固体焦油，热值差异较大，其中废气热值在 $0.07\text{--}14.61\text{MJ/Nm}^3$ 之间，废液热值为 $18.72\text{--}30.50\text{MJ/kg}$ ，固体焦油热值为 27.5MJ/kg 。同时，物料中含有氟、氯、硫等有害成分，最大限值分别达 0.012%、1%、2%，重金属总量最大限值为 2.8%。

这种多元性给工艺适配带来巨大挑战：一方面，热值波动导致焚烧炉热负荷不稳定，低于 60% 负荷时需额外添加 LNG 辅助燃料，增加运行成本；另一方面，有害成分集中输入易超出烟气处理系统承载能力，造成设备腐蚀与排放超标。此外，通常产生废气的上游生产装置无缓存设施，需“来多少处理多少”，与固体、液体危废的缓存调节形成矛盾，进一步加剧了燃烧过程的不稳定性。

（二）余热回收效率有限，能源浪费较为突出

余热回收是能量回收装置的核心目标，但该工艺在余热利用过程中面临多重制约。首先，一体化锅炉的烟气温度从 1100°C 降至 220°C 时，虽通过 4 个回程进行热量交换，但飞灰堆积易导致受热面结垢，影响传热效率，需定期采用激波吹灰装置清灰，间接降低了系统的连续运行效率。其次，蒸汽系统的运行稳定性影响余热回收效果，汽包液位受补水、蒸汽流量波动影响较大，若控制不当易导致蒸汽产量波动，设计产量 $\geq 63\text{T/h}$ 的目标难以稳定达成^[2]。

（三）烟气污染物控制难度大，环保达标压力高

工业危废焚烧产生的烟气含有 NO_x 、 SO_2 、 HCl 、二噁英、重金属等多种污染物，处理难度极大。该装置的烟气中，脱硝前 NO_x 含量 $\leq 1700\text{mg/Nm}^3$ ，需通过 SNCR+SCR 组合工艺将其降至 40mg/Nm^3 以下，脱硝效率要求极高。同时，物料中的氯、硫元素燃烧后生成 HCl 、 SO_2 ，需通过湿法脱酸系统高效脱除，而脱

酸过程产生的含盐废水又面临二次处理压力。二噁英的控制更是行业难题，其生成与燃烧温度、停留时间、湍流度密切相关，若焚烧炉内温度低于 1100°C 或烟气停留时间不足 2 秒，易导致二噁英生成。

（四）设备腐蚀与磨损严重，运行寿命受到影响

工艺系统中的设备长期处于高温、高腐蚀、高磨损环境，易出现故障。一体化锅炉燃烧室温度 $\geq 1100^\circ\text{C}$ ，内侧耐火材料虽厚度达 80mm ，但仍面临高温侵蚀与热冲击，长期运行易出现剥落、开裂；烟气中的 HCl 、 SO_2 等酸性气体在急冷塔、脱酸塔内形成腐蚀性环境，对塔体、管道及喷嘴造成严重腐蚀，需选用 2205 双相不锈钢、977S 耐高温玻璃钢等耐腐蚀材质，大幅增加了设备投资。

此外，固体焦油经研磨后粒径若 $> 200\text{ }\mu\text{m}$ ，在输送与燃烧过程中易对管道、喷枪造成磨损；飞灰在布袋除尘器、刮板输送机内的流动的流动也会导致设备磨损加剧。设备的腐蚀与磨损不仅增加了维护成本，还可能导致非计划停机，影响装置的连续运行稳定性，制约了能量回收工艺的长期高效运行^[3]。

四、工业危废焚烧能量回收工艺的优化措施

（一）优化物料配伍与进料控制，提升燃烧稳定性

针对多元危废适配性差的问题，首先需要完善物料预处理与配电系统。在现有 3 台 80m^3 废液储罐、1 台 80m^3 固体焦油料仓的基础上，增设 1 台 80m^3 废液储罐用于苯胺焦油储存，扩大缓存容量；通过智能检测系统实时监测各股物料的热值、成分及有害污染物含量，建立物料配伍模型，根据焚烧炉热负荷需求，自动调节固体焦油与废液的进料比例，将平均热值稳定在 $3.7\text{--}6.1\text{MJ/kg}$ 的最优区间，减少辅助燃料消耗。在废气阀组上设置压力高高 / 压力低低的连锁，以及辅助人工操作调控，来实现稳定高热值废气进料的波动，降低对燃烧的影响；对废液进料系统进行升级，采用高精度质量流量计与变频调节泵，实现流量的精准控制；在固体焦油研磨系统中增加粒径在线检测装置，确保研磨后颗粒粒径 $< 200\text{ }\mu\text{m}$ ，提升燃烧效率。通过物料配伍与进料控制的协同优化，将装置的稳定运行负荷区间扩大至 $40\% \sim 110\%$ ，降低热值波动对燃烧稳定性的影响。

（二）改进余热回收系统设计，提高能源利用效率

为提升余热回收效率，首先需优化一体化锅炉结构设计。采用新型膜式壁结构与高效传热元件，增加受热面积；改进激波吹灰装置的运行参数，根据受热面结垢情况制定差异化清灰周期，减少飞灰堆积对传热的影响。优化汽包三冲量液位调节系统，引入蒸汽流量、给水流量的动态补偿算法，提高液位控制精度，稳定蒸汽产量，确保蒸汽产量稳定在 63T/h 以上。优化烟气换热器（GGH）的换热效率，采用高效翅片管式换热器，提升烟气余热回收量；调整急冷塔的冷却策略，采用分级冷却方式，先通过余热回收装置回收部分热量后再进行急冷，减少热能浪费；将脱酸塔出口烟气的加热热源由蒸汽改为余热回收后的高温烟气，降低二次能源消耗。通过这些优化措施，可将装置的余热回收效率提升

至 90% 以上，显著提高能源利用水平。

（三）升级烟气净化工艺，强化污染物协同控制

针对烟气污染物控制难度大的问题，需要对现有烟气净化系统进行升级。在 SCR 反应器内增设催化剂预留层，将催化剂布置由 2+1 层改为 3+1 层，提升脱硝效率；采用高精度氨喷射格栅，根据烟气中 NO_x 浓度的分布情况，实现氨气量的精准分配，将氨逃逸量控制在 2.5mg/Nm³ 以下。在碱洗段增设高效填料层，延长烟气与碱液的接触时间；采用 pH 值智能调节系统，根据烟气中酸性气体含量实时调整 32% 氢氧化钠溶液的注入量，将循环液 pH 值稳定在 7~8，提高 HCl、SO₂ 的脱除效率。强化二噁英与重金属控制：在布袋除尘器前增加活性炭喷射量至 20kg/h，提升吸附效果；在灰渣处理系统中增设重金属稳定化处理单元，采用化学稳定化药剂对飞灰进行处理，降低二次污染风险。通过多污染物协同控制，确保烟气排放指标全面优于国家标准^[4]。

（四）优化设备选型与防护设计，延长运行寿命

为解决设备腐蚀与磨损问题，需从选型、防护等方面进行优化。对急冷塔、脱酸塔等腐蚀环境下的设备，采用 ND 钢 + 20G 复合材质，提升耐腐蚀性能；将飞灰输送管道、刮板输送机等易磨损设备的材质升级为耐磨合金钢，延长使用寿命；引风机叶轮采用 SS316L 材质，壳体采用 SUS304 材质，增强抗腐蚀与抗磨损能力。在一体化锅炉耐火材料内侧涂刷耐高温防腐涂层，减少高温烟气与腐蚀性气体的侵蚀；对管道、设备的连接法兰采用金属缠绕垫片，提升密封性能，防止泄漏；在固体焦油研磨机与输送管道之间增设缓冲装置，降低颗粒对管道的冲击磨损。建立设备全生命周期管理体系，定期对关键设备进行检测与维护，制定预防性维护计划，将设备故障率降低 30% 以上，保障装置的连续

稳定运行。

（五）完善安全防控体系，降低系统运行风险

针对工艺系统的安全风险，需构建全方位的安全防控体系。在易燃、易爆物料管道上增设双重密封阀与泄漏检测装置，一旦检测到泄漏，立即启动紧急切断程序；在焚烧炉设置火焰检测器与高温工业电视监控系统，实现燃烧过程的多重实时监控手段，若出现火焰异常，自动调整燃料与助燃风比例或启动紧急停炉程序。在现有安全阀的基础上，增设压力变送器与智能报警装置，实现超压预警；优化锅炉汽包的安全泄放逻辑，当压力超过设定值 10% 时，自动启动紧急泄放阀与备用安全阀，确保受压设备安全。完善个体防护与应急设施：在装置关键岗位增设紧急冲淋器与洗眼器，确保操作人员在意外接触有毒有害物质时能及时急救；为操作人员配备防毒面具、防噪声耳罩、耐高温手套等防护用品；建立应急救援预案，定期开展火灾、泄漏等应急演练，提升应急处置能力。通过多重安全防控措施，实现安全风险的有效管控^[5]。

结束语：工业危废焚烧能量回收工艺是实现危废无害化处置与资源化利用的有效途径，对环保与节能具有重要意义。文章以某 40 万吨 / 年 MDI 项目能量回收装置为研究对象，系统分析了工艺运行中存在的物料适配性差、余热回收效率低、污染物控制难度大、设备腐蚀磨损严重、安全风险高等核心难题。通过优化，可显著提升装置的燃烧稳定性、能源利用效率与环保达标水平，降低设备故障率与安全风险，为工业危废焚烧能量回收工艺的高效运行提供技术支撑。未来，还需结合智能化技术，进一步提升工艺的自动化控制水平，推动工业危废处置行业向绿色、高效、可持续方向发展。

参考文献

- [1] 张然然. 工业危废焚烧处置设施的性能研究 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(27):83-87.
- [2] 张立春. 工业危废焚烧处置的安全管理要点 [J]. 化工管理, 2024(4):84-86.
- [3] 田世豪, 田永林. 工业园区危险废物集中焚烧处理工艺优化与环境影响评估 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(8):204-206.
- [4] 陈继东. 工业危险废物焚烧处置运行管理 [J]. 当代化工研究, 2021(10):115-116.
- [5] 郭开展. 工业危险废物焚烧处置系统的设计优化 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(12):113-115.