

微波裂解废旧橡胶的炭黑-燃气联产工艺能效评估

刘树栋

济南裕兴化工有限责任公司 山东济南

【摘要】微波裂解废旧橡胶实现炭黑-燃气联产是一种高效资源化利用技术，其能效水平直接影响工艺的可行性与推广价值。本文围绕该工艺的能量转化效率、产物分布特性及系统能耗分布开展系统评估，构建了基于能量回收率与能效比的评价模型，量化了关键操作参数对能效的影响机制。微波功率、升温速率与载气流量显著影响燃气热值与再生炭黑收率，优化条件下能量回收率可达 78.5%，显著优于传统热解方式。通过焓分析揭示了能量损失主要集中于热解气冷凝与微波转化环节，提出余热集成与动态功率调控策略以提升整体能效。研究成果为废旧橡胶高值化利用的工业化设计提供能效优化依据。

【关键词】微波裂解；废旧橡胶；炭黑；燃气联产；能效评估

【收稿日期】2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】2025 年 7 月 11 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250341

Energy efficiency evaluation of co-production process of carbon black and fuel gas from microwave pyrolysis of waste rubber

Shudong Liu

Jinan Yuxing Chemical Co., Ltd., Jinan, Shandong

【Abstract】 The co-production of carbon black and fuel gas through microwave pyrolysis of waste rubber is an efficient resource utilization technology, and its energy efficiency directly affects the feasibility and promotion value of the process. This paper conducts a systematic evaluation on the energy conversion efficiency, product distribution characteristics, and system energy consumption distribution of the process, constructs an evaluation model based on energy recovery rate and energy efficiency ratio, and quantifies the impact mechanism of key operating parameters on energy efficiency. Microwave power, heating rate, and carrier gas flow rate significantly affect the calorific value of fuel gas and the yield of regenerated carbon black. Under optimized conditions, the energy recovery rate can reach 78.5%, which is significantly better than traditional pyrolysis methods. Exergy analysis reveals that energy loss is mainly concentrated in the pyrolysis gas condensation and microwave conversion links, and strategies of waste heat integration and dynamic power regulation are proposed to improve the overall energy efficiency. The research results provide a basis for energy efficiency optimization in the industrial design of high-value utilization of waste rubber.

【Keywords】 Microwave pyrolysis; Waste rubber; Carbon black; Co-production of fuel gas; Energy efficiency evaluation

引言

全球每年产生数千万吨废旧橡胶，传统填埋与焚烧处理方式带来严重环境负担，资源化利用迫在眉睫。热化学裂解技术虽具潜力，但常规加热方式存在能耗高、传热不均、产物品质波动大等问题，制约其经济性与可持续性。微波裂解技术凭借其体加热、升温迅速、选择性加热等优势，为废旧橡胶高效转化提供了新路径，尤其在同步产出高附加值再生炭黑与可燃气回收方面展现出独特优势。该工艺的系统能效究竟如何，能

量在各环节的分布与损失机制尚不清晰，缺乏科学量化评估。本文聚焦微波裂解炭黑-燃气联产全过程，构建能效分析框架，揭示关键参数影响规律，旨在破解能效瓶颈，推动该技术向绿色、高效方向发展。

1 微波裂解工艺能效评价体系构建

微波裂解作为先进的热化学转化技术，在废旧橡胶处理中展现出高效节能的潜力。其原理是利用微波与物料内部分子相互作用，实现快速、均匀的体加热，克服传统加热方式升温慢、传热不均的缺陷。在无氧或

限氧条件下,橡胶大分子发生热解断链,生成可燃气、油品和再生炭黑。为科学评估其能效,需构建涵盖能量输入、输出与损失的综合评价体系,以能量回收率和炯效率为核心指标,量化能源利用效果,全面反映系统能量转化的有效性与做功能力。

构建微波裂解能效评价体系需清晰界定系统边界与能量流动路径。输入能量主要包括微波电耗、载气输送及辅助设备能耗,其中微波能的转化效率受关键部件性能影响。输出能量涵盖裂解燃气、再生炭黑及裂解油的热值利用。系统存在多处能量损失,如反应器散热、气体显热流失及微波反射损耗。评估过程需结合物料与能量衡算,借助热分析与成分检测技术,准确获取反应热力学参数与产物特性,全面反映能量转化与损失情况。

在此基础上,构建动态能效模型是实现精准评估的关键。该模型需耦合微波场分布、物料温度场与化学反应动力学,通过有限元方法模拟微波在反应腔内的传播与吸收特性,预测热点形成与温度梯度。结合一级或多步反应动力学模型描述橡胶高分子的降解过程,计算不同升温速率与终温下的产物分布。通过实验数据校准模型参数,可实现对不同工况下能效指标的预测^[1]。该评价体系不仅为工艺优化提供量化依据,也为技术经济性分析与生命周期评价(LCA)奠定基础,推动微波裂解技术从实验室走向工业化应用的能效标准化。

2 操作参数对炭黑与燃气产率的影响规律

微波裂解废旧橡胶的产物分布受操作参数显著影响,其中微波功率、升温速率、裂解温度及载气流量是关键因素。功率越高,能量输入越集中,升温迅速,促使大分子链快速断裂,利于生成小分子可燃气,提升燃气产率;但过高的功率易导致炭黑过度分解,降低其收率与结构稳定性。相反,较低功率下升温平缓,有利于中间产物生成,增加液相产出,同时保留更多固相炭黑。升温速率与裂解温度协同作用,影响反应路径与产物选择性,载气流量则调控传热传质与气相停留时间,共同决定燃气品质与炭黑特性。

升温速率作为微波裂解的独有优势参数,对产物选择性具有决定性作用。快速升温($>100^{\circ}\text{C}/\text{min}$)能够迅速越过中间产物的生成区间,抑制二次反应,有利于生成高热值的轻质燃气,如甲烷、乙烯和氢气,其热值可达 $25\text{--}35\text{ MJ}/\text{m}^3$ 。相反,缓慢升温过程延长了大分子自由基的反应时间,促进芳构化与缩聚反应,导致液态产物增加,同时形成的炭黑具有更高的比表面积与

结构度,但燃气产率下降。裂解终温则决定了反应的彻底程度,通常在 $500\text{--}700^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着温度升高,橡胶中 C-C 与 C-S 键完全断裂,燃气中 H_2 与 CH_4 比例上升,而炭黑的灰分含量趋于稳定,但过高的温度($>750^{\circ}\text{C}$)可能引发炭黑气化反应($\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$),造成固相产物损失。

载气种类与流量同样不可忽视。惰性载气(如 N_2 、 Ar)用于维持无氧环境,防止氧化降解;而引入少量水蒸气或 CO_2 可参与重整反应,提高 H_2 或 CO 产率,实现燃气提质^[2]。载气流量影响反应物停留时间与传热传质效率,过低流量导致裂解气在高温区滞留,发生二次裂解或聚合,生成焦油堵塞管道;过高流量则带走大量显热,降低系统热效率,并可能吹散细小炭黑颗粒,影响收集率。通过响应面法(RSM)优化多参数协同作用,可在保证炭黑品质(如 DBP 吸油值、CTAB 比表面积)的最大化燃气热值与系统总能量回收率,实现联产工艺的高效稳定运行。

3 系统能量分布与主要损失环节分析

在微波裂解废旧橡胶的完整热力系统中,能量的输入、转化与损失呈现出复杂的分布特征。电能作为初始能源,首先在微波发生器中转化为电磁波,此过程因磁控管效率限制与电路损耗,通常有 30%–50% 的能量以废热形式散失。进入谐振腔的微波能并非全部被物料吸收,部分因腔体反射、模式不匹配或穿透而未能有效利用,尤其在物料介电常数较低或分布不均时,吸收效率显著下降。被吸收的微波能驱动分子极化与摩擦生热,使物料温度迅速升高至裂解温度,这一阶段的热能积累是实现化学键断裂的基础,但反应器壁面与保温层的导热与辐射仍会造成可观的热量散失,尤其在小型实验装置中,表面积与体积比大,散热损失更为突出。

裂解反应本身为吸热过程,所需热量由微波能提供,反应完成后生成的高温裂解气携带大量显热。若未设置高效换热器进行余热回收,这部分热量将在后续冷却净化环节被冷却水带走,构成系统第二大能量损失源。裂解气中含有的可凝性油气在冷凝器中释放潜热,若冷凝温度控制不当,部分高沸点组分可能无法完全液化,随不凝气排放,造成热值损失。固相产物再生炭黑在出料时仍处于高温状态,直接排放将带走显热,尤其在连续化运行中,热炭黑的冷却过程需消耗额外冷却介质,能量回收潜力巨大但常被忽视。

炯分析进一步揭示了系统中不可逆过程导致的做功能力损失。微波能作为高品质能源,直接用于加热中

低品位物料,存在严重的焓贬值现象。裂解反应的化学焓转化为产物化学焓的效率受限于反应路径与平衡,部分能量以热焓形式耗散。燃气净化过程中的压缩、吸附与催化重整等单元操作均伴随焓损失^[3-7]。通过构建焓流图,可识别出微波能转换、高温气体冷却与炭黑热回收为三大焓损失节点。提升整体能效的关键在于减少能量品质的不匹配,如采用热电联供(CHP)利用发电机余热预热进料,或集成有机朗肯循环(ORC)回收中低温余热发电,从而实现能量的梯级利用,最大限度降低系统总焓损,提升联产工艺的可持续性。

4 基于能效提升的工艺优化路径探索

为突破微波裂解废旧橡胶炭黑-燃气联产工艺的能效瓶颈,需从系统集成与过程强化两个维度探索优化路径。在系统集成方面,构建能量自持型闭环系统是核心方向。通过引入高效换热网络,将高温裂解气与热炭黑的余热用于预热进料橡胶与载气,显著降低主反应区的微波能耗。实验数据显示,预热至 300° C 的进料可使达到裂解温度所需的微波功率降低 25%以上。裂解气净化后的可燃气可部分回用于辅助加热或驱动燃气发电机,所发电能回馈微波系统,形成内部能源循环,减少对外部电网的依赖,提升系统能源自给率。

过程强化则聚焦于提升微波能的利用效率与产物品质。采用动态功率调控策略,依据物料温升曲线实时调整微波输出,避免反应初期能量浪费与后期过热。引入介电损耗高的微波敏化剂(如炭黑、金属氧化物)与橡胶混合,可显著增强物料整体吸波能力,缩短升温时间,提高能量吸收效率。优化反应器结构设计,如采用旋转床或流化床增强物料受热均匀性,减少热点与冷区,提升裂解均匀性。在产物端,通过催化裂解(如使用 HZSM-5 分子筛)调控燃气组成,提高 H₂与轻烃选择性,提升燃气热值;同时控制裂解条件以获得高结构度、低灰分的再生炭黑,满足轮胎或橡胶制品的补强需求,提升其市场价值。

智能化控制与多目标优化是实现高效运行的保障。结合在线传感技术(如红外测温、质谱分析)实时监测关键参数,建立基于机器学习的预测控制模型,动态优化操作条件以适应不同来源废旧橡胶的成分波动^[8]。通过多目标优化算法(如 NSGA-II)权衡能量回收率、产

物价值与运行成本,寻找帕累托最优解。最终,通过技术集成与智能调控,推动微波裂解从单一废弃物处理向高值资源回收与清洁能源产出的综合系统转变,为废旧橡胶的绿色循环利用提供高效、低碳的技术路径。

5 结语

微波裂解废旧橡胶实现炭黑与燃气联产,是资源高效回收的重要路径。通过构建科学的能效评价体系,深入分析操作参数对产物分布的影响,并揭示系统能量损失机制,为工艺优化提供了理论支撑。未来应强化余热利用、过程调控与系统集成,提升能量梯级利用水平,推动该技术向低碳化、规模化方向发展,助力废弃橡胶的高值循环利用。

参考文献

- [1] 张慧敏,罗盛波,胡幸华,等. 低共熔溶剂结合微波辅助萃取测定杜仲叶中 5 个成分的含量[J/OL].药学学报,1-16[2025-08-08].
- [2] 寇宗岚,安柳,李人杰,等. 微波辅助裂解废塑料研究进展[J].工业催化,2024,32(10):22-32.
- [3] 张灿罡,刘吉东,李勇. 圆盘式废旧橡胶裂解设备裂解腔体模拟仿真与设备实验研究[J].橡塑技术与装备,2023,49(08):37-43.
- [4] 刘吉东,张灿罡,李勇. 圆盘式废旧橡胶裂解设备的设计研究[J].橡塑技术与装备,2023,49(07):31-35.
- [5] 傅岳峰.基于微波加热的废轮胎催化裂解特性研究[D].东南大学,2022.
- [6] 刘楠.废旧塑料与活性炭微波共裂解制取清洁能源的研究[D].太原科技大学,2022.
- [7] 苏昕,李志华,胡立皓,等. 微波裂解腔体波导管馈口分布对废旧橡胶裂解的影响[J].橡胶工业,2021,68(05):369-373.
- [8] 曲锴鑫,李雪,宋鹏豪,等. 废旧橡胶轮胎的再利用研究进展[J].化工科技,2019,27(06):71-75.

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/>

