

匀性,解决高速气流引发的二次噪声问题。该优化方案在燃气轮机排气系统中应用后,消声效率提升22%,设备维护周期延长至3年。

4 尾气-噪声协同控制的全流程集成研究

4.1 系统集成设计原则

空间布局优化采用SCR脱硝装置与消声器串联集成设计,利用尾气余热(300-450℃)直接预热催化剂层,使脱硝反应温度窗口前移,脱硝效率提升10%。紧凑型结构通过共享壳体与气流通道,减少独立设备冗余空间,整体体积缩减20%,同时降低系统压损15%。

流场-声场协同控制通过整流栅与声学超材料复合实现。整流栅采用蜂窝状导流结构(开孔率35%),使SCR入口流速分布均匀性指数提升至0.92(标准差 ≤ 0.25),避免局部流速过高导致的催化剂磨损与氨逃逸。声学超材料层由微穿孔板与共振腔构成,针对63-250Hz低频噪声特性,通过声阻抗匹配实现8dB降噪量,且对气流阻力影响低于5%。该设计在燃气轮机尾气处理系统中应用后,系统综合能效提升18%,满足《GB 12348-2008》Ⅲ类厂界噪声限值。

4.2 数字化管理平台的构建

数字化管理平台通过物联网与智能算法深度融合,实现工业排放与噪声的动态管控。物联网实时采集层部署高精度传感器网络,尾气组分(NO_x、CO、颗粒物)与噪声声压级采样频率达1Hz,数据经5G云端传输至中央数据库,传输延迟低于50ms,确保监测数据实时性。Unity 3D可视化引擎构建三维数字孪生场景,将污染物浓度分布以色谱云图动态呈现,噪声热力图通过声压级梯度映射(分辨率1秒),超标点位自动触发声光报警,响应时间小于2秒,满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》实时监管需求。机器学习预测模块采用LSTM-Attention网络模型,融合历史工况数据与实时监测参数,对催化剂失效、风机异常等故障进行预判,准确率突破92%,提前72小时生成运维决策建议,如催化剂再生周期调整或消声器维护计划,降低非计划停机风险35%。平台集成多源数据接口,支持与SCADA系统无缝对接,实现“监测-分析-预警-决策”闭环管理,推动工业环保治理向智能化、精准化升级。

4.3 典型行业集成解决方案

①数据中心采用SCR-DPF与有源消声技术协同复合隔声罩,实现超低排放与噪声控制。SCR-DPF系统通过选择性催化还原与颗粒物捕集,将NO_x浓度降至10ppm以下,颗粒物排放量减少95%;有源消声模块基于声学相位抵消原理,针对63-800Hz频段噪声实现主动抑制,复合隔声罩则采用GB5083—1985标准设计的多层阻尼结构(隔声量 \geq

40dB),最终噪声控制在75dB以内,满足《数据中心能效等级》一级标准。

②能源行业集成静电捕集、氧化催化与超材料消声技术。静电捕集装置通过高压电场捕获颗粒物,效率达98%,结合电催化氧化技术(氧化剂利用率95%以上)将CO、HC等气态污染物深度净化,颗粒物排放浓度稳定低于5mg/m³;超材料消声器依托微穿孔板与亥姆霍兹共振腔结构,在200-1000Hz频段实现12dB降噪量,且气流阻力损失 $< 8%$,避免系统能效下降。

③电力企业应用平衡消声器与弹性减振组合方案。平衡消声器通过扩张腔与干涉管设计,优化气流声学匹配,排气噪声由98dB降至80dB;SHM可调式弹簧减振器(固有频率2.5-5Hz)安装于设备基座,通过动态刚度调节抑制结构振动,使固体传声衰减18dB,振动传递率降低至0.15,符合《工业企业噪声控制设计规范》Ⅲ类限值。

5 结论与展望

本文通过工业排放后处理与噪声控制技术的协同创新,构建了高效集成的绿色治理体系。技术层面实现三大突破:SCR-DPF与催化氧化耦合技术使NO_x去除率稳定超过95%,颗粒物排放浓度降至5mg/m³以下;基于声学超材料的主动噪声控制系统针对63-800Hz低频噪声实现15dB降噪量,且气流阻力损失控制在8%以内;余热回收与流场优化设计提升系统能效12%,显著降低单位处理能耗。集成方案应用成效显著:模块化设计缩短项目周期60%,数字化运维平台实现故障预判准确率92%,使综合运维成本降低30%,为数据中心、能源及电力行业提供可复用的绿色技术范式,支撑国家“双碳”战略与工业噪声排污许可管理要求落地。未来研究需聚焦跨尺度声-热-流多物理场耦合模型的开发,通过高精度仿真解析复杂工况下污染物生成与噪声传播的动态关联机制,提升协同控制精度。同时,基于数字孪生技术构建自适应控制系统,融合实时监测数据与机器学习算法,动态优化排放-噪声-能耗平衡策略,实现全生命周期智能调控。此外,需探索新型低碳材料(如纳米催化剂、轻量化隔声结构)在极端工况下的应用潜力,推动工业环保技术向智能化、精准化、低碳化方向深度演进。

参考文献

- [1] 张珂,杨永超.大气污染源解析与控制技术的研发与应用[J].资源节约与环保,2025,(06):135-138.
- [2] 李丹,钱晓雍.工业企业废水处理碳排放核算方法研究[J].环境科学与管理,2025,50(06):34-39.
- [3] 周超,杨向前,刘媛,等.各国钻井场噪声适用标准浅析[J].环境工程,2023,41(S2):1114-1116+1120.
- [4] 冯苗.噪声污染防治技术与发展[M].化学工业出版社:2023:519.

Study on the Low-Temperature Co-Pyrolysis of Waste Tires and Vacuum Residue

Xiaoqing Xu Chengchao Liu Jinlin Li

South-Central Minzu University, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract

Waste tires (WT) and vacuum residue (VR) are difficult to degrade and have complex compositions, making conventional disposal inefficient. In this study, a 60WT/40VR mixture was subjected to low-temperature catalytic co-pyrolysis under oxygen-free conditions to investigate the effects of Fe/C catalysts prepared at different temperatures on product yields and compositions. The results show that adding the catalyst decreased the 360 °C fraction and increased the 480 °C fraction, while the total oil yield remained nearly unchanged. The Fe/C-700 catalyst achieved the highest oil yield of about 40.0 wt%. GC-MS analysis showed that the D-limonene content increased from 3.6% to 28.7%. This work reveals the role of Fe/C catalysts in the low-temperature co-conversion of WT and VR, providing a basis for cleaner and higher-value utilization of waste materials.

Keywords

Waste tire pyrolysis; Vacuum residue pyrolysis; Product distribution

废轮胎与减压渣油的低温共热解研究

胥晓清 刘成超 李金林

中南民族大学, 中国 · 湖北 武汉 430074

摘要

废旧轮胎与减压渣油因难降解且组分复杂, 常规处置能效低、资源化不足。本文以60WT/40VR为研究对象, 在无氧条件下开展低温催化共热解, 系统考察不同温度制备Fe/C催化剂对三相产率、油品组分的影响。结果表明: 加入催化剂后, 360°C馏分降低、480°C馏分升高, 而总油基本不变; 其中Fe/C-700的总油收率可达≈40.0 wt%。GC-MS分析表明, D-柠檬烯含量由3.6%最高提升至28.7%。该研究阐明了铁基碳复合催化剂在WT×VR低温协同转化中的作用, 为废弃物清洁高值化利用提供技术依据。

关键词

废轮胎热解; 减压渣油热解; 产物分布

1 引言

废旧轮胎因其耐久性和难降解性, 已成为亟待解决的固体废弃物, 长期堆积不仅占用大量土地资源, 还可能导致土壤和地下水污染, 甚至引发火灾等安全隐患。同时, 石油工业产生的废重油面临环境与资源化利用挑战。废重油具有黏度高、组分复杂且含有毒有害物质, 常规处理难以高效转化, 限制了其资源化利用^{1,2}。为此, 发展高效、绿色的热化学转化手段至关重要。

共热解可发生氢转移与自由基耦合等协同作用, 在废轮胎和废重油资源化利用中展现出较大优势。该技术在无氧高温下裂解废弃物, 能有效提高油品收率和品质, 降低固体残渣产量, 从而调控产物分布并提升液体产率^{3,4}。引入催

剂能够显著降低反应活化能, 提升热解性能⁵。本研究围绕“Fe/C催化剂如何协同WT与VR的低温转化”, 重点从三相产率、热解油组分分析开展讨论。

2 实验与方法

2.1 原料表征

本研究使用的废轮胎来自废弃物回收厂, 减压渣油来自广东茂名石化减压蒸馏之后的底物, 还制备了60WT/40VR的样品。表1显示了轮胎胶粉和减压渣油的工业和元素分析结果。减压渣油和废轮胎都有较高的挥发分(59.62%和62.09%)。

2.2 催化剂制备

尿素 15.0 g; 葡萄糖 10.0 g, 乙酸铁 10.0 g, 碳酸氢钠 15.0 g; 混合后球磨机充分研磨, 置于烧杯, 180 °C热处理 12 h。在氮气管式炉中按照煅烧温度的不同分别制备了Fe/C-400、Fe/C-550、Fe/C-700、Fe/C-850。

【作者简介】胥晓清(1997-), 男, 哈尼族, 中国云南玉溪人, 硕士, 从事资源回收、均相催化研究。

表 1 废轮胎与原料油的元素分析和工业分析

样品	工业分析 (wt.%)				元素分析 (wt.%)					
	水分	挥发分	固定碳	灰分	C	H	N	S	O 及其它 ^a	H/C
减压渣油	0.01	59.62	39.24	1.13	86.53	6.66	1.09	3.08	2.64	0.92
废轮胎	1.61	62.09	33.51	2.79	79.49	6.68	0.57	4.76	11.39	0.99

a 由差减法得到

2.3 共热解实验

在热解反应釜中进行了减压渣油和废轮胎的共热解实验，将比例为 60WT/40VR 的样品充分混合，探究加入铁催化剂对热解三相产物的变化规律及产物特性分析。该实验装置主要由加热炉、热电偶、温度控制器、冷凝器产物收集装置构成。反应收集 360℃、480℃ 的液体和气相产物。以 5℃/min 从室温升至 360℃ 保持 40 分钟，收集产物然后再升至下一目标温度，降温之后收集焦炭。

$$\text{热解油产率} = \frac{W_o}{W_s} \times 100\%$$

$$\text{热解炭产率} = \frac{W_r}{W_s} \times 100\%$$

$$\text{气相产率} = 100 - \text{热解油产率} - \text{热解炭产率}$$

式中， W_o 为热解油质量， W_r 为残渣质量， W_s 为总样品质量。

2.3.1 产物分析

使用赛默飞 TRACE13001 和 ISQ7000 对油样进行气相色谱-质谱 (GC-MS) 测定。注入器温度为 250℃，以氦气为载气，分流比为 10:1。温度编程如下：从 40℃ 开始，上升到 250℃ (升温速率：20℃/min)。用 NIST08 和 NIST08s 质谱数据库对化合物进行了鉴定。用傅里叶红外光谱仪 (Vertex70, 德国 Bruker) 记录了原料和油样的 FT-IR 光谱。

3 实验结果及分析

3.1 催化剂 XRD

图 1 为催化剂 XRD，随煅烧温度升高，结晶性增强：

Fe/C400 以 Fe_3O_4 为主，相对无定形碳较多； $\geq 550^\circ C$ 后 Fe_3C 峰增强，700–850℃ 时 Fe_3C 成为主相，并可见 26.5° 附近微弱石墨峰，表明石墨化趋势增强。该相变趋势与高温下铁与碳的碳化反应一致。

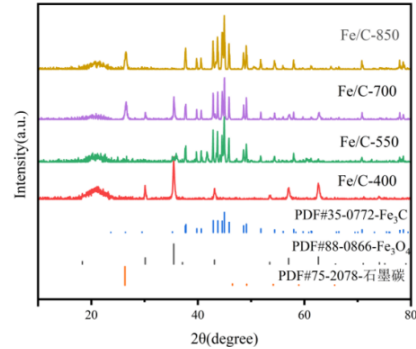


图 1 催化剂 XRD 谱图

3.2 共热解实验

3.2.1 三相产物分布

如图 2a 所示，随加入催化剂后，Oil-360℃ 组分减少，Oil-480℃ 的含量增多，总体热解油含量无明显变化，热解炭以及气体的产量无明显变化。Fe/C-400 产生了较多的气体产物，推断： Fe_3O_4 作为催化剂活性相，可促进重质烃类断裂，同时其高分散性和较小晶粒有助于提供更多活性位点。这一结果说明，尽管未形成碳化铁， Fe_3O_4 本身在热解条件下已具备显著的催化裂解能力，能够有效将大分子组分裂解为小分子气体。Fe/C-700 催化剂的热解油收率达到 40.0%。

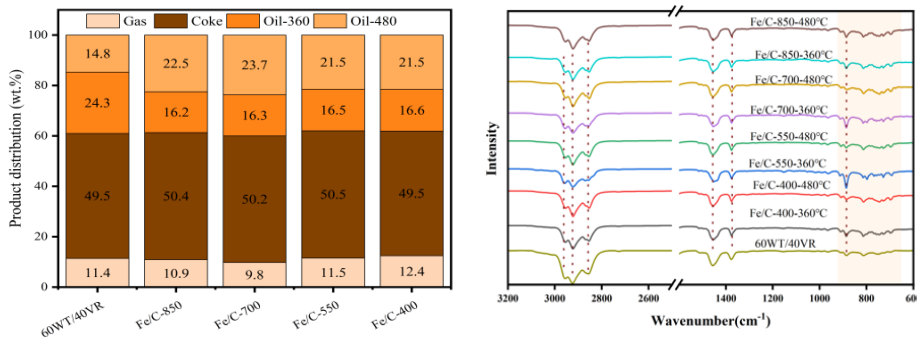


图 2 (a) 加入催化剂后的三相产率；(b) 原料和热解油的 FT-IR

3.2.2 液相产物 FT-IR

图 2b 为热解油的红外光谱图，3000–2800 cm^{-1} 区域出现明显的强吸收峰，属于脂肪族 C–H 伸缩振动 (如甲基、亚甲基基团)，说明样品中含有较多的脂肪烃成分或烷基

结构；1380 cm^{-1} 和 1460 cm^{-1} 区域的峰一般归于芳香环的 C=C 伸缩振动或脂肪烃的 $-CH_3$ 和 $-CH_2-$ 弯曲振动吸收峰。在 900–600 cm^{-1} 油较多的吸收峰，通常归于芳香环的 C-H 面外弯曲振动。催化剂制备温度的提高，热解油 FT-IR 谱图在