

生物质烘焙预处理对热解制芳烃的影响 研究进展

李晶晶^{1,2,3}, 王志伟^{1,2,3*}, 郭娜^{1,2,3}, 徐楠^{1,2,3}, 张宏勋^{1,2,3}, 陈高峰^{1,2,3}

(1.河南工业大学环境工程学院, 河南 郑州 450001; 2.河南工业大学碳中和研究院, 河南 郑州 450001;
3.郑州市有机固废转化碳中和技术国际科技合作基地, 河南 郑州 450001)

摘要:综述了生物质烘焙预处理耦合热解制取芳烃的研究现状,重点探讨了烘焙方式、耦合预处理工艺、催化剂类型及反应温度对芳烃制取的影响。单一烘焙预处理通过脱除水分、降低氧含量优化生物质特性,为芳烃生成奠定基础;烘焙与酸预处理、催化热解的耦合工艺可协同脱除杂质、调控反应路径,显著提升芳烃产率;ZSM-5、HZSM-5等催化剂及金属改性催化体系,能有效促进芳构化反应并改善产物分布;适宜的烘焙与热解温度能够精准调控生物质组分降解与芳烃定向生成。通过优化烘焙预处理及热解反应条件,可实现芳烃产率与选择性的双重提升,为生物质高值化转化制取芳烃提供高效途径。

关键词:生物质;烘焙;热解;芳烃;酸预处理

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0030-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.006

Research progress on the effect of biomass torrefaction pretreatment on pyrolysis-based aromatics production

LI Jing-jing^{1,2,3}, WANG Zhi-wei^{1,2,3*}, GUO Na^{1,2,3}, XU Nan^{1,2,3},
ZHANG Hong-xun^{1,2,3}, CHEN Gao-feng^{1,2,3}

(1.School of Environmental Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2.Carbon Neutrality Research Institute, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
3.International Science and Technology Cooperation Base for Organic Solid Waste Conversion and
Carbon Neutrality Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This review systematically evaluates current research on aromatic hydrocarbon production through pyrolysis integrated with biomass torrefaction pretreatment. The study focused on the torrefaction methodologies, combined pretreatment approaches, catalyst selection, and reaction temperature on aromatic hydrocarbon production. Single-stage torrefaction pretreatment enhances biomass quality by eliminating moisture and reducing oxygen content, thereby establishing a favorable feedstock foundation for subsequent aromatic formation. Integrated processes combining torrefaction with acid pretreatment and catalytic pyrolysis demonstrate synergistic effects in impurity removal and reaction pathway modulation, resulting in substantial improvements in aromatic productivity. Catalyst systems including ZSM-5, HZSM-5, and metal-modified variants exhibit superior performance in promoting aromatization reactions while optimizing product distribution profiles. Strategic control of torrefaction and pyrolysis temperatures enables precise regulation of biomass component degradation kinetics and targeted aromatic synthesis pathways. Through optimized thermal processing conditions, this integrated approach achieves simultaneous enhancement of both aromatic yield and selectivity, offering a technically viable pathway for high-value conversion of lignocellulosic biomass into industrially significant aromatic compounds.

Key words: biomass; torrefaction; pyrolysis; aromatic hydrocarbons; acid pretreatment

随着全球对可持续能源和绿色化学关注度提升,生物质作为丰富的可再生资源,在储存、运输和利用上优势显著,可生产高附加值化学品与可再生燃料,其高效转化及高值化利用已成为研究热点^[1]。生物质是高氧低氢的原料,含有高灰分,氧元素(35%~45%)和灰分(1%~15%)含量非常高,导致生物质有效氢碳比(H/C_{eff})低,热解时含氧化

合物过多、芳烃选择性及产率偏低,生物油中含氧化合物浓度高而芳烃浓度低^[2]。芳烃是一类重要的有机化合物,通常来自不可再生的化石燃料。通过提高芳烃、苯、甲苯和二甲苯(BTX)的产量进一步提高热解油价值和利用率,这些高价值的化学品经分离提纯可用作燃料添加剂等,所以通过优化生物质转化制备芳烃工艺为解决传统化石资源依赖问题提

收稿日期:2025-08-11;修回日期:2026-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52276181);国家重点研发项目(2023YFB4203605)

作者简介:李晶晶(2002-),女,硕士生;王志伟(1980-),男,博士,研究员,研究方向为生物质热化学转化技术、有机固体废弃物高效处理技术,通讯联系人,bioenergy@163.com。

供了潜在途径,但生物质仍需有效预处理来优化芳烃的生成以及提升品质。本文中基于烘焙预处理技术,重点探讨了4种处理方式对生物质热解制芳烃的影响:①单一烘焙预处理;②烘焙耦合酸预处理;③烘焙预处理后催化热解;④烘焙-酸洗-催化热解耦合处理。

1 生物质原料特性

生物质的化学组成、可用性和合适的预处理方法对于有价值产品的经济增值至关重要,生物质主要由纤维素、半纤维素和木质素3大组分构成,可从农业废弃物、木质材料、非木质材料以及城市或工业生物质废弃物等多种来源提取^[3]。不同来源的生物质在化学组成和结构上存在显著差异,这对后续

芳烃的生成有着重要影响。纤维素($C_6H_{10}O_5$)_n在320℃可转化为无定形固体,在热解过程中会产生呋喃,如图1所示;半纤维素($C_5H_8O_4$)_m热解区间主要集中于240~350℃,分子结构中的多种自由基团使其反应活性极强,在热解过程中极易分解,主要热解产物是酸类、酮类、呋喃类等。Chen等^[4]发现木质素在200℃以下先软化,在200~600℃时,醚键断裂,生成酚类等物质。随着温度升高,会引发芳香环开环及缩合交联反应,同时木质素衍生的酚类化合物通过加氢脱氧过程转化为芳烃,半纤维素在225℃焙烧条件下初始降解30 min,在275℃条件下完全降解30 min,纤维素在高软化程度下降解显著;木质素作为天然含芳香环物质,具备转化为高价值芳香烃化学品的潜力。

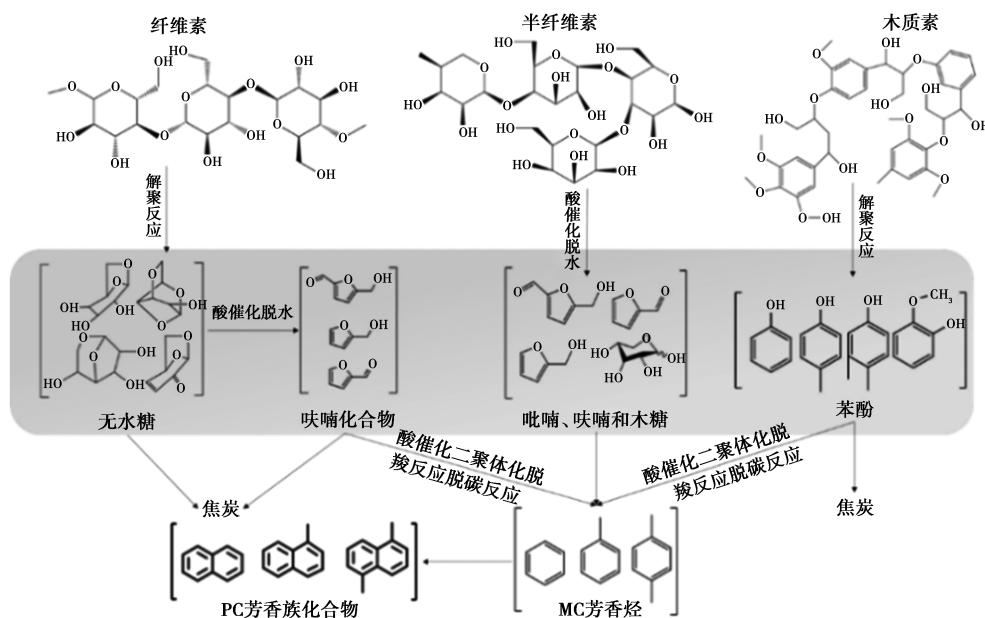


图1 纤维素、半纤维素、木质素热解的反应途径

不同生物质原料中,纤维素、半纤维素和木质素的含量存在显著差异。纤维素具有较高的O/C比,热解后挥发分含量较多,使生物油稳定性欠佳;而木质素H/C比相对较高,经催化裂解后,对芳香类产物展现出良好的选择性。

2 生物质烘焙预处理对芳烃产物影响

2.1 单一烘焙预处理

烘焙处理可以优化生物质的原料质量和热转化行为,烘焙温度的精准调控与预处理的脱氧效果和芳香族化合物的产量呈现显著的相关性,对生物质原料进行烘焙预处理可以有效改善生物质热解挥发分的组成,进而影响芳烃的生成,有效提高芳烃收率^[5]。近年来,200~300℃下烘焙预处理对芳烃产

率的影响结果已被许多学者验证,如表1所示。

表1 生物质经过烘焙预处理后对芳烃产量的影响

原料	烘焙温度/℃	热解温度/℃	结果
松木 ^[4]	225~325	550	随着温度的升高芳烃含量从1.78%增加到12.26%
玉米秸秆 ^[6]	200~260	—	芳烃类物质含量从47.76%增加到91.72%,而酚类物质含量从47.46%减少到4.36%
中药渣 ^[7]	260~290	—	BTEX的含量从69.8%增加到74.1%。甲苯、二甲苯和萘含量最高,分别占27.2%~29.3%、19.2%~19.5%和11.8%~12.2%
杨木 ^[8]	220	850	轻质芳烃的产率达到最大值,为 7.83×10^7 a. u./mg

Jeantelot 等^[9]发现在 325℃ 的焙烧下改变了木质素的化学性质,促进了酚类化合物更容易生成芳烃。Dai 等^[10]探究烘焙预处理温度对松木催化热解产物的影响,结果表明,随着烘焙温度的升高,生物油中酸、醛等含氧化合物急剧下降,芳烃类明显增多。

2.2 耦合预处理

生物质耦合预处理技术是将 2 种或多种单一预处理技术结合,通过耦合预处理互补单一技术的局限性,并产生协同作用优化生物质特性,该技术能显

著提升后续高温气化热解效率及芳烃选择性。

2.2.1 烘焙预处理后催化热解

催化快速热解是从固体生物质中生产可再生芳烃的最有前途的技术之一。经过烘焙后生物质结构更稳定,为后续催化反应提供更适宜的原料基础。如表 2 所示,催化剂的介入可显著促进生物质热解中间产物的脱氧、环化及芳构化反应。催化作用还能抑制结焦和重质芳烃的过度生成,提升整个工艺的经济性和稳定性。

表 2 生物质经过烘焙后催化热解对芳烃产生的影响

生物质	烘焙温度/℃	催化剂	原料:催化剂	热解温度/℃	结论
马尾松 ^[11]	200	Zn-HZSM-5	3:1	650	耦合处理后 BTX 的选择性为 65.1%,高于烘焙单独处理时的 33.84%和催化剂单独使用的 47.36%
芒草 ^[12]	280	ZSM-5 CaO+MoO ₃	1:3:2	600	3 种催化剂结合 BTX 的选择性最高选择性为 70.69%,收率为 51.07%
毛竹 ^[13]	220	HZSM-5	3:1	850	芳烃的最大收率为 25.46×10 ⁷ a. u./mg
甘蔗渣 ^[14]	260	HZSM-5	—	500	芳烃含量从 12.42%增加到 51.27%
竹子 ^[15]	250	HZSM-5	1:2	850	BTX 的最大产量为 4.39×10 ⁸ a. u./mg

经烘焙后的生物质在催化热解过程中,通过催化剂(如 ZSM-5 分子筛、金属改性催化剂等)的定向调控,能够实现热解反应路径的精准调控。Lu 等^[16]将 Fe/SiO₂ 复合型催化剂用于热解时,生物油中的芳烃量会随着 Fe/SiO₂ 的增加而增加。为了加强烘焙过程中的脱氧效果,Tian 等^[17]使用 MoO₃/ZSM-5 双催化体系对烘焙预处理芒草(280℃)在 550℃ 进行催化热解,ZSM-5/芒草/MoO₃ 质量比为 3:1:2 时,芳烃收率达到 91.38%,苯、甲苯和二甲苯(BTX)选择性突出,达到 52.24%。

2.2.2 烘焙与酸预处理耦合

酸预处理通过溶解半纤维素破坏木质纤维素结构,改善孔隙度与结晶度,从而提高酶解效率;同时去除碱金属和碱土金属(AAEMs),促进左旋葡聚糖及芳香族等高附加值化合物生成,有效改善生物油品质^[18]。将烘焙预处理与酸洗预处理耦合,通过协同效应实现生物质的综合改性。陈东雨等^[19]将盐酸洗涤与烘焙耦合预处理甜高粱秸秆,发现其对酸类产物的抑制作用较单独酸洗、烘焙明显提高。Cen 等^[20]研究发现烘焙与酸预处理顺序对生物质热解也有影响,先酸洗再烘焙比先烘焙再酸洗,金属去除率更高,可提高生物油中相对糖含量及气体热值、气态产物收率。夏美玲^[21]使用硝酸对油茶壳生物质预处理最佳固液比为 1:3 时制备的生物炭对生

物油中芳烃含量产生的影响结果如表 3 所示,总芳烃相对含量在催化剂与原料比为 1:4 时,热解/催化温度分别为 600、450℃ 时,总芳烃产物产率达 98.82%。

表 3 使用 HNO₃ 对油茶酸处理后在进行催化热解对芳烃的影响

热解温度/℃	催化温度/℃	催化剂:原料	单环芳烃相对含量/%	总芳烃化合物相对含量/%
450	450	1:8	66.86	—
450	450	1:4	—	69.21
450	600	1:4	78.82	—
600	450	1:4	—	98.82

2.2.3 烘焙-酸洗-催化热解耦合

对生物质烘焙预处理后,利用催化剂孔径特性以及适宜的酸度参与热解反应,提升芳烃的选择性,且可改善芳烃产物分布—多环芳烃的含量相对降低,而单环芳烃的含量则有所增加。Cen 等^[22]研究了酸浸和烘焙预处理和形状选择催化快速热解对芳烃生产的影响。结果表明,轻质生物油中的酸类和酚类对稻秆中碱和碱土金属的脱除具有协同作用,可以促进挥发性物质的生成,再经过催化后升级成 BTX。预处理样品中,经过烘焙酸洗耦合的样品对 BTX 的选择性最高达到 64.6%。浸出和焙烧联合预处理比单独酸洗或烘焙预处理更能有效地提高

BTX 的收率。Sun 等^[23]使用 SBO(由 6 种含氧化合物制备:乙酸、羟基丙、糠醛、丙酮、苯酚和愈创木酚)对小麦秸秆酸洗后再进行烘焙预处理,然后使用 CaO/ZSM-5 双催化热解,总烃收率提高到 82.42%,芳烃收率提高到 79.91%,单环芳烃高达 68.38%,BTX 含量达到 49.39%。Yang 等^[24]使用酸处理玉米秸秆再进行催化热解,MAHs(单环芳烃)的选择性达到 77.0%。Li 等^[25]使用乙酸耦合烘焙对杨木进行预处理,在乙酸浓度为 1.5 mol/L 时,BTX 含量从原生杨木催化热解的 82.24 mg/g 增加到 97.48~103.83 mg/g。这种耦合处理方式不仅提高了芳烃的产率,还改善了芳烃产物分布。

综上所述,耦合处理通过协同优化生物质原料特性,为后续高温热解中芳烃的定向生成创造了有利条件。耦合处理后生物质热解生成的芳烃产物中,多环芳烃的含量相对降低,而单环芳烃的含量增加,这对于提高芳烃产品的附加值具有重要意义,有

效提升了生物质能源转化效率,是生物质能源利用领域极具潜力的重要发展方向。

3 反应机理

单一烘焙预处理在提升芳烃选择性方面仍存在明显局限,难以实现理想调控效果。为此,耦合处理技术成为突破这一瓶颈的关键手段,核心在于精准调控生物质中纤维素、半纤维素和木质素 3 大组分在预处理过程中的结构演变与反应路径,从而实现芳烃产物选择性的高效强化。

Zheng 等^[26]研究表明,残留的 AAEMs 对生物质热解生成的芳烃负面影响较大,会增强纤维素上金属离子(Ca²⁺)对吡喃糖环的均裂裂解,产生轻含氧产物;还会催化左旋葡聚糖二次降解(与 Na⁺形成配合物发生逆转式醛醇反应生成醛、酮,或脱水形成二氢糖),所以纤维素中 AAEMs 浓度增加会降低芳烃和烯烃产量(图 2)。

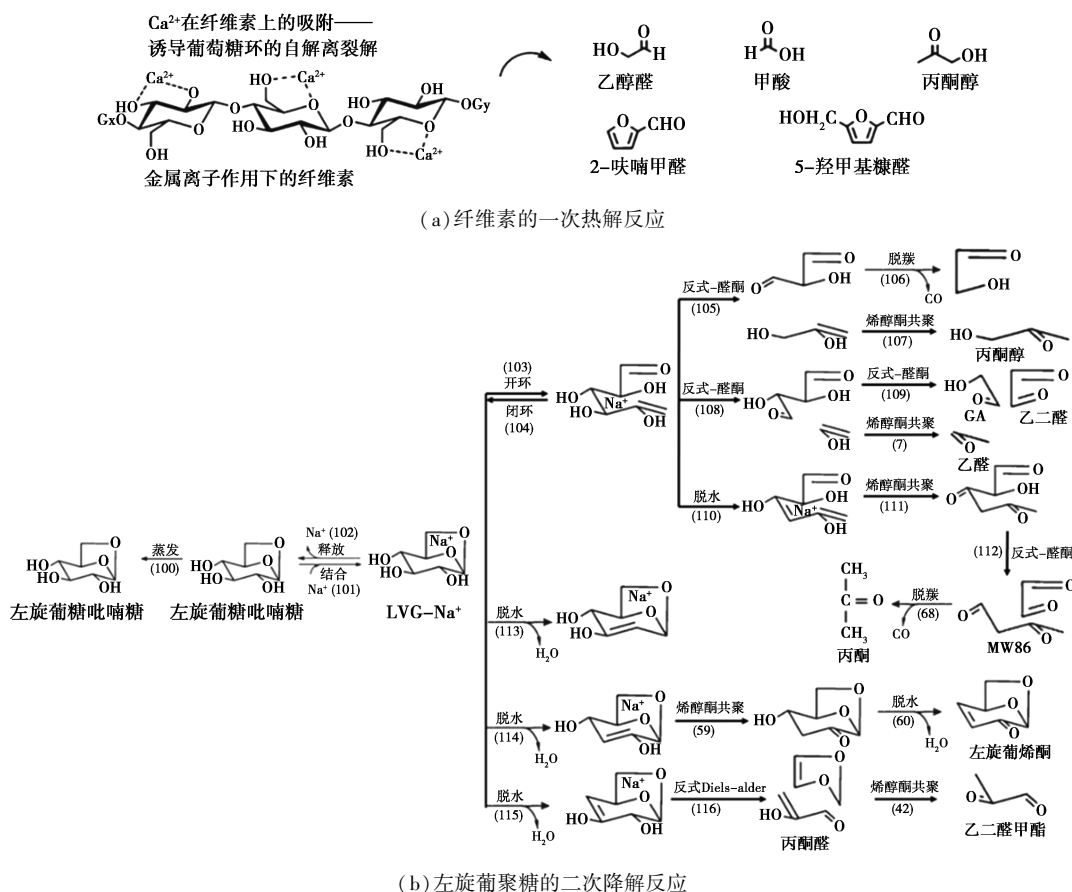


图 2 AAEMs 存在下纤维素的初级热解反应和左旋葡萄糖的二次降解反应的机理

催化剂在生物质烘焙-催化热解耦合体系中有着关键的作用,促进木质素芳香单元断裂重排,催化纤维素、半纤维素降解产物环化、脱氢等反应,提升芳烃产率与选择性。常用 HZSM-5 和 ZSM-5 沸石

催化剂:ZSM-5 为 Na 型,HZSM-5 经离子交换将 Na⁺ 置换为 H⁺ 具有较强的酸性,对裂解、异构化、芳构化等反应至关重要;催化剂中存在具有活性的布朗斯特德酸位点,为芳烃的形成提供了合理的促

进机制。

Hong 等^[12]研究采用烘焙脱氧预处理(TDP)和催化快速热解(CFP)与双催化剂相结合的方法,提高了芒草衍生的 BTX 的收率,其中呋喃是生成 BTX 化合物不可或缺的中间体,而 ZSM-5 会促进呋喃向芳烃的转化,烯丙烯可以通过低聚生产大量烯烃,通过 ZSM-5 的芳构化转化为芳烃(图 3)。Chen 等^[27]研究在 Fe/CaO 或 CaO 和 ZSM-5 双催化剂存在下

棉秆热解的可能反应途径如图 4 所示。CaO 在生物质热解过程中既充当催化剂又充当反应物,有利于乙酸和左旋葡糖苷分别通过酮化反应和脱水反应脱氧为丙酮和糠醛。同时, CaO 倾向于将大分子或高氧含量的环戊酮裂解或脱氧为小分子或低氧含量的环戊酮。由于大分子或高氧含量的含氧化合物的减少有利于它们扩散到 ZSM-5 的活性位点并随后转化为 BTX。

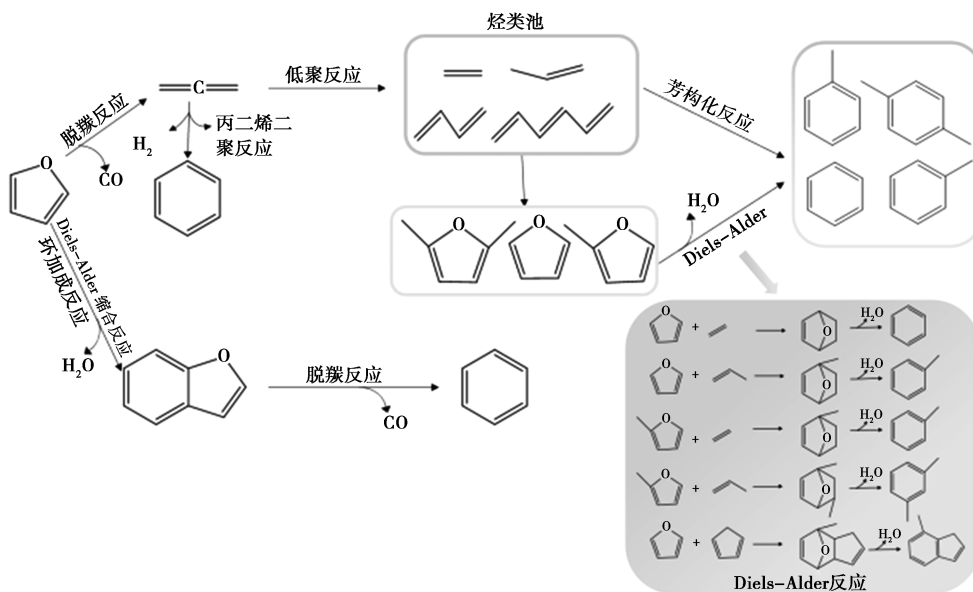


图 3 在 ZSM-5 催化剂上将呋喃转化为芳香烃的反应路径

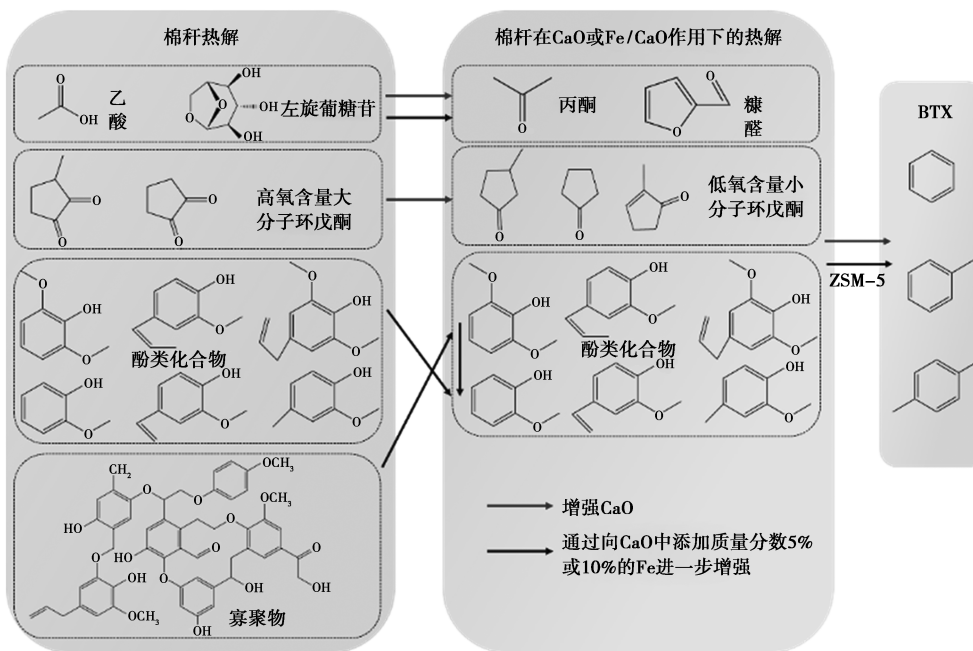


图 4 棉秆用 CaO 或 Fe 改性的 CaO 催化剂和 ZSM-5 催化热解的可能反应路径

Delmiro 等^[28]研究表明 HZSM-5 能有效地促进脱氧和脱氮,特别是在将更大负荷的 HZSM-5 加热到更高的温度(400~600℃)和更高的催化剂酸度的

情况下,通过可冷凝热解蒸气进行脱氧和脱氮裂解生成碳氢化合物,进而发生环化和芳构化反应,如图 5 所示。

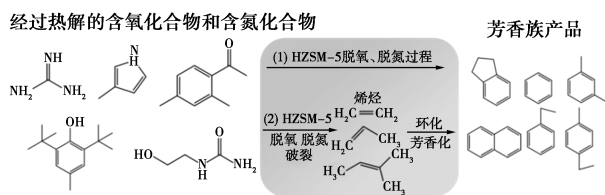


图 5 使用 HZSM-5 的常规热解产物的脱氧和脱氮

总的来说,生物质烘焙预处理通过精准调控温度和反应氛围,实现了原料从“高氧、高水、低能”到“低氧、低水、高能”的转变,为生物质的转化与利用奠定了重要基础,而耦合处理技术则进一步克服了单一烘焙在芳烃选择性提升上的不足,为生物质定向转化为高附加值芳烃产物提供更优的路径。

4 结论与展望

围绕生物质烘焙预处理对热解制芳烃的影响展开综述,重点探讨了单一烘焙预处理、烘焙预处理后催化热解、烘焙耦合酸预处理、烘焙-酸洗-催化热解耦合 4 种处理方式的作用,还涉及生物质原料特性、不同处理方式下的反应结果及反应机理等内容。这些处理方式通过脱除水分、灰分、杂质,降低氧含量,优化催化剂作用等,有效提升了芳烃的产率和选择性,但目前仍存在烘焙温度精准调控难度大、耦合处理协同机制有待深化、催化剂稳定性与寿命需提升等问题。

综合我国国情,为促进“双碳”目标的实现,未来研究可以从以下方面展开。

(1) 深入探究烘焙预处理对生物质各组分结构的影响机制,精准把握温度等参数对芳烃生成的调控规律,优化单一烘焙工艺。

(2) 加强对烘焙与酸预处理、催化热解等耦合处理协同作用的研究,明确各步骤间的相互作用及最优组合方式,进一步提高芳烃产率与品质。

(3) 研发高效稳定的催化剂,通过改进制备方法、进行金属改性等方式,提升催化剂的选择性、抗失活性能,延长使用寿命。

(4) 构建综合评价体系,对烘焙及耦合处理工艺的经济性、技术可行性进行全面评估,推动相关技术的工业化应用,实现生物质资源的高效高值化利用,减少对化石能源的依赖。

参考文献

[1] Zhang J, Gu J, Shan R, *et al.* Advances in thermochemical valorization of biomass towards carbon neutrality[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 212: 107905.

- [2] Qi W, Yang W, Xu Q, *et al.* Comprehensive research on the influence of nonlignocellulosic components on the pyrolysis behavior of hinese Distiller's Grain[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(8): 3103-3113.
- [3] Farhan A, Zahid M, Tahir N, *et al.* Investigation of boron-doped graphene oxide anchored with copper sulphide flowers as visible light active photocatalyst for methylene blue degradation[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 9497.
- [4] Chen X, Wang H, Yang R, *et al.* Effect of severe torrefaction by superheated steam on pinewood pyrolysis kinetics and pyrolytic oil compounds[J]. Renewable Energy, 2024, 227: 120563.
- [5] Thengane S K, Kung K S, Alberto G B, *et al.* Advances in biomass torrefaction: parameters, models, reactors, applications, deployment, and market[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 93: 101040.
- [6] 薛俊杰. 烘焙预处理对玉米秸秆气化产物的影响机制[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
- [7] Tang S, Zhou S, Li G, *et al.* Combination of torrefaction and catalytic fast pyrolysis for aromatic hydrocarbon production from herbaceous medicine waste[J]. Energy, 2023, 270: 126911.
- [8] 顾勇. 生物质湿法烘焙脱氧脱灰预处理耦合催化热解制备轻质芳烃[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
- [9] Jeantelot G, Folkner S P, Manegold J I S, *et al.* Selective hydrodeoxygenation of lignin-derived phenols to aromatics catalyzed by Nb₂O₅-supported iridium[J]. ACS Omega, 2022, 7(35): 31561-31566.
- [10] Dai L, Wang Y, Liu Y, *et al.* Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 107: 20-36.
- [11] Huang M, Ma Z, Zhou B, *et al.* Enhancement of the production of bio-aromatics from renewable lignin by combined approach of torrefaction deoxygenation pretreatment and shape selective catalytic fast pyrolysis using metal modified zeolites[J]. Bioresource Technology, 2020, 301: 301122754.
- [12] Hong T, Lei C, Zhang J H, *et al.* Increasing the bio-aromatics yield in the biomass pyrolysis oils by the integration of torrefaction deoxygenation pretreatment and catalytic fast pyrolysis with a dual catalyst system[J]. Renewable Energy, 2022, 187: 561-571.
- [13] Hu Z, Zhu L, Cai H, *et al.* Enhancement of the production of bio-aromatics from bamboo pyrolysis: Wet torrefaction pretreatment coupled with catalytic fast pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 169: 105818.
- [14] Liao R, Tian X, Fan L, *et al.* Effect of torrefaction pretreatment on catalytic pyrolysis of bagasse: A study on torrefaction method and atmosphere[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 507: 160842.
- [15] Zhu L, Huang M, Ma Z, *et al.* Valorisation of waste biomass and plastics toward light aromatics: Co-catalytic fast pyrolysis of torrefied bamboo and polyethylene over alkali and acid treated hierarchical HZSM-5[J]. Fuel, 2023, 349: 128734.
- [16] Lu Q, Yuan S, Liu C, *et al.* A Fe-Ca/SiO₂ catalyst for efficient production of light aromatics from catalytic pyrolysis of biomass[J]. Fuel, 2020, 279: 118500.

- mored hybrid polyimide separators for advanced and safe lithium-ion batteries[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(18):6250–6257.
- [23] Song X Y, Huang W C, Ge R B, *et al.* Electrospun nanofibers constituted of a polyimide core decorated with polyhedral oligomeric silsesquioxanes and a TiO₂ shell as separators for lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(18):21565–21577.
- [24] Deng J, Cao D, Yang X, *et al.* Cross-linked cellulose/carboxylated polyimide nanofiber separator for lithium-ion battery application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433(3):133934.
- [25] Liu J D, Cao D L, Zhang Q Z, *et al.* Covalent organic framework-coated polyimide ion-track-etched separator with high thermal stability for developing lithium-ion batteries with long lifespans[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(30):39367–39378.
- [26] Song X Y, Huang W C, Wang H, *et al.* Polyimide/metal-organic framework-5 separator with excellent electrolyte wettability and thermal stability for high performance lithium-ion battery[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(10):6312–6325.
- [27] Mucche Z B, Nikodimos Y, Tekaligne T M, *et al.* Thermally stable 3D cross-linked fluorinated polyimide/PVDF-HFP hybrid separator for lithium battery applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476:146400.
- [28] Song C, Luo J, Gao C, *et al.* Halloysite nanotubes enhanced polyimide/oxidized-lignin nanofiber separators for long-cycling lithium metal batteries[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 273(2):132640.
- [29] Li X G, Liu K F, Dong N X, *et al.* A dendrite-blocking polyimide-meta-aramid separator with ultrahigh strength and thermostability for high-security lithium-ion battery[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481:148525.
- [30] Sun G H, Cui J Q, Zhang Q S, *et al.* Polybenzimidazolium-reinforced polyimide separators to inhibit dendrites for high-security lithium-ion batteries[J]. *Science China Chemistry*, 2025, 68(7):3221–3229. ■

(上接第 35 页)

- [17] Tian H, Zhu R, Chen L, *et al.* Aromatic hydrocarbons rich bio-oil production from Miscanthus pyrolysis by coupling torrefaction and MoO₃/ZSM-5 dual catalysis process[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 204:117314.
- [18] Jiang M, Su Y, Qi P, *et al.* Rice husk pyrolysis polygeneration of levoglucosan-rich bio-oil and functional bio-char: Roles of hydrothermal pretreatment and acidic hydrothermal pretreatment on products[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(22):28947–28958.
- [19] 陈东雨, 张婷, 黄顺朝, 等. 盐酸洗涤与烘焙预处理对甜高粱秸秆热解生物油组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11):222–229.
- [20] Cen K, Li X, Jia D, *et al.* Effects of pretreatment sequence of torrefaction deoxygenation and acid washing on biomass pyrolysis polygeneration[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 225:120615.
- [21] 夏美玲. 酸碱预处理油茶壳生物炭的制备及其催化废食用油制备富芳烃生物油的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [22] Cen K, Zhuang X, Gan Z, *et al.* Effect of the combined pretreatment of leaching and torrefaction on the production of bio-aromatics from rice straw via the shape selective catalytic fast pyrolysis[J]. *Energy Reports*, 2021, 7:7732–7739.
- [23] Sun C, Zhou Z, Tian H, *et al.* Catalytic pyrolysis of wheat straw based on dual catalyst CaO/ZSM-5 with acid washing and torrefaction pretreatment to enhance aromatic yield in bio-oils[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 117:101836.
- [24] Yang D, Huang J, Hu Z, *et al.* Catalytic pyrolysis of lignin to aromatic hydrocarbons over Nb/Al oxide catalyst[J]. *Energy*, 2024, 302:131764.
- [25] Li Y, Zhu L, Dominic Y, *et al.* Catalytic pyrolysis of poplar sawdust pretreated with combined leaching and torrefaction over Fe-Ni/ZSM-5 for aromatic-rich bio-oil production[J]. *Renewable Energy*, 2024, 227:120517.
- [26] Zheng A, Jiang L, Zhao Z, *et al.* Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass for aromatic production: chemistry, catalyst and process[J]. *WIREs Energy and Environment*, 2017, 6(3):1–18.
- [27] Chen X, Liu Z, Chen W, *et al.* Catalytic pyrolysis of cotton stalk to produce aromatic hydrocarbons over Fe modified CaO catalysts and ZSM-5[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 166:105635.
- [28] Delmiro T M, Calixto G Q, Viegas C V, *et al.* Renewable aromatic hydrocarbons from flash catalytic pyrolysis of *Monoraphidium* sp. lipid extract[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2021, 15:100799. ■

(上接第 40 页)

- [22] Lee K S, Tseng T S, Liu Y W, *et al.* Enhancing the performance of dark fermentative hydrogen production using a reduced pressure fermentation strategy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(20):15556–15562.
- [23] Al-mohammedawi H H, Znad H. Impact of metal ions and EDTA on photofermentative hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* using a mixture of pre-treated brewery and restaurant effluents[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 134:105482.
- [24] Zhou Y H, Deng H, Wang X H, *et al.* Effects of Zn²⁺ and Mn²⁺ on the photo-fermentative performance of HY01 in biohydrogen production from xylose fermentation[J]. *International Journal of Green Energy*, 2024, 21(8):1829–1834.
- [25] Karthikeyan B, Velvizhi G. A state-of-the-art on the application of nanotechnology for enhanced biohydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52:536–554.
- [26] Gadhe A, Sonawane S S, Varma M N. Enhancement effect of hematite and nickel nanoparticles on biohydrogen production from dairy wastewater[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(13):4502–4511.
- [27] 辛红梅. Fe₃O₄ 纳米颗粒对废水厌氧发酵产氢的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [28] Ottaviano L M, Ramos L R, Botta L S, *et al.* Continuous thermophilic hydrogen production from cheese whey powder solution in an anaerobic fluidized bed reactor: Effect of hydraulic retention time and initial substrate concentration[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(8):4848–4860.
- [29] 屈皓, 李玉霞, 刘玉香. 生物质光发酵制氢技术研究进展[J]. *现代化工*, 2025, 45(1):56–61.
- [30] Wang Y, Jing Y Y, Lu C Y, *et al.* A syntrophic co-fermentation model for bio-hydrogen production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317:128288. ■