

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2024.03.001

生物质预处理催化热解制备液体燃料研究进展

Research progress on preparation of liquid fuels by catalytic pyrolysis of
pretreated biomass

苏盼盼, 王学涛*, 邢利利, 李浩杰, 刘梦杰
SU Panpan, WANG Xuetao*, XING Lili, LI Haojie, LIU Mengjie

(河南科技大学 能源与动力工程系, 河南 洛阳 471003)

(Department of Energy and Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

摘 要: 随着能源需求的不断增长和环境问题的日益突出, 生物质催化热解制备液体燃料技术成为一种可持续发展的能源利用方式。生物质直接热解生成的生物油成分复杂、热值低、含氧量高、酸性强, 制约了生物油的应用。从热解机理、生物质预处理、催化剂和预处理和催化耦合技术等方面综述了影响生物油品质的主要因素。指出预处理技术普遍存在时间长的缺点, 使用催化剂会导致生物油产率的降低, 而预处理和催化耦合技术有望突破这 2 项技术难点; 生物质快速热解定向制备富烃生物油、催化剂的选择与优化、预处理和催化耦合技术将是生物质快速热解制备高品质液体燃料的主要研究方向。

关键词: 新能源; 生物质; 催化热解; 催化剂; 液体燃料; 预处理; 催化剂; 富烃生物油

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2024)03-0001-11

Abstract: With the increasingly growing demand on energy and prominent environmental crisis, catalytic pyrolysis of pretreated biomass has become a decent technical rout for the preparation of liquid fuels, a sustainable resource. However, the bio-oil generated from the direct pyrolysis of biomass has a complex composition, low calorific value, high oxygen content and strong acidity, which restricts its application. Thus, the main factors affecting the quality of bio-oil are analyzed from the pyrolysis mechanism, biomass pretreatment, catalyst selection and the coupling of pretreatment and catalytic pyrolysis. Pretreatment process will prolong the preparation time, and catalyst will lower the production of bio-oil. The coupling technology is a promising solution to the difficulties mentioned. To prepare high-quality liquid fuels by biomass pyrolysis rapidly, the following researches should target on how to make directional preparation on hydrocarbon-rich bio-oil by biomass pyrolysis, select and optimize the catalysts, and couple the pretreatment process with catalytic pyrolysis.

Keywords: new energy; biomass; catalytic pyrolysis; catalyzer; liquid fuel; pretreatment; catalyst; hydrocarbon-rich bio-oil

0 引言

随着我国经济的快速发展, 各行各业对能源的需求量急剧增加。现存的能源难以维持人类的持续发展, 寻找可替代的新型能源迫在眉睫。生物质能是众多新型能源中目前唯一一个在自然界中可再生的含碳能源, 是化石燃料的潜在替代品^[1]。目前, 生物质能较为常用的利用方式是热转化, 而热解是最具前途的热转化技术之一。生物油是热解的最主要液体产物, 具有能量密度高、易于储存和

运输等优点, 但其成分复杂、pH 值低、含水量高、黏度大、稳定性差^[2-3], 通常只能用作低级液体燃料。在热解过程中加入催化剂能够提高目的产物的选择性以及生物油的化学稳定性和热稳定性, 从而获得高品质的液体燃料和高附加值化学品, 但可能导致产率下降; 同时, 生物预处理大多数是耗时的, 会导致额外的能量损耗和更高的成本。

Zhang 等^[4]综述了木质素不同预处理方法的研究进展, Wang 等^[5]对木质纤维素生物质催化热解生产生物油进行了综述, Zhang 等^[6]研究了使用氢氧化钠催化乙醇进行预处理对甘蔗渣酶解糖化的影响, Qiu 等^[7]对生物质催化热解制备高品质液体燃料和化学品进行了全面综述。这些研究大部分集中于

基金项目: 国家自然科学基金项目(50806020)
National Natural Science Foundation of China(50806020)

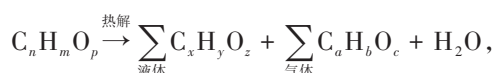
通过预处理和催化热解单向提高生物油品质,未见预处理与催化热解耦合对定向制备液体燃料影响的研究。本文从生物质热解机理、预处理方式和催化剂类型等方面全面综述影响生物质热解的主要因素,以期高效制备高品质生物燃料提供参考。

1 生物质催化热解制备液体燃料机理

生物质是由纤维素、半纤维素和木质素构成的十分复杂的聚合化合物,直接对其进行热解机理分析难度极高,因此通常用三组分研究来代替热解机理研究。生物质的热解通常可以用以下方程表示



或



其中生物质表示为纤维素、半纤维素和木质素聚合物 $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_p$ 的化合物,三组分聚合物的分子式如图 1 所示。

纤维素是通式为 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ 的多糖,晶体结构是由几千个 $\beta(1 \rightarrow 4)$ 构成的 D-葡萄糖单元。纤维素中葡萄糖单元的葡萄糖环以 C1—O 的形式裂解打开,开环产物可以通过 C2—C3 键断裂形成 2C 和 4C 产物,也可以通过 C6 羟甲基解离进一步分解^[9]。Yang 等^[10]通过热裂解-气相色谱-质谱联用(Py-GC/MS)试验测定产物分布,以研究纤维素的热解机理,发现纤维素快速热解的主要产物主要分为 3 类,即低分子量(LMW)化合物(C1—C4)、呋喃和无水糖。典型的热解产物结构式如图 2 所示^[10]。

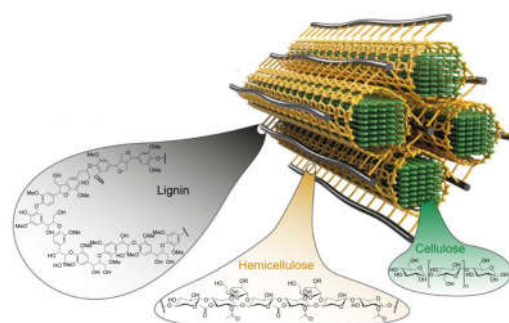


图 1 纤维素、半纤维素和木质素聚合物分子结构(截图)^[8]

Fig. 1 Molecular structures of cellulose, hemicellulose, lignin polymers(screenshot)^[8]

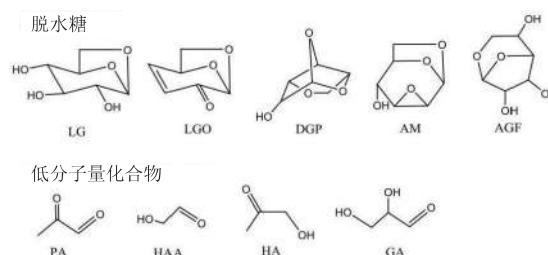


图 2 纤维素热解典型产物的化学结构(截图)^[10]

Fig. 2 Chemical structures of typical products of cellulose pyrolysis(screenshot)^[10]

半纤维素是具有通式 $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4)_n$ 的复合多糖,在大多数研究中,半纤维素快速热解采用市售木聚糖进行模拟。Gao 等^[11]研究了木聚糖基半纤维素的热解行为,发现高温可促进木聚糖转化,提高生物油的产率,但如果温度过高($> 500\text{ }^\circ\text{C}$),木聚糖会发生剧烈分解,形成低分子量化合物(如羟基乙醛、乙酸和 1-羟基-2-丙酮等)。木聚糖中低温热解途径如图 3 所示^[12]。

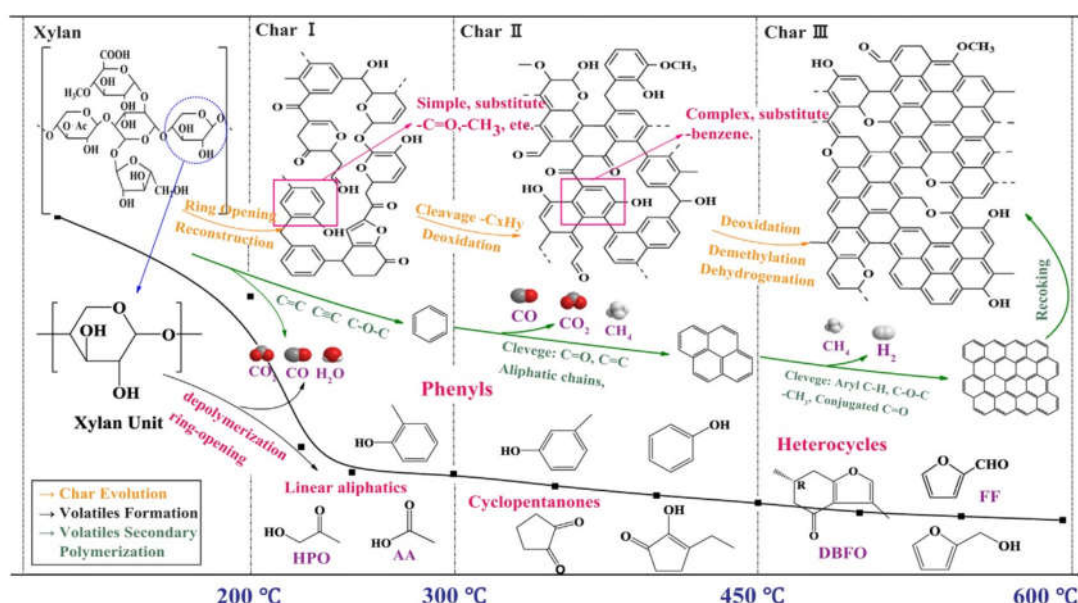


图 3 木聚糖中低温热解途径(截图)^[12]

Fig. 3 Pyrolysis of xylan at intermediate and low temperatures(screenshot)^[12]

木质素是一种复杂的三维交联酚类聚合物,近似的化学式可写成 $(C_{31}H_{34}O_{11})_m$ 。木质素大分子由3种不同的苯基丙烷单元合成。木质素结构中常见的一些苯基丙烷键如图4所示^[13]。Yang等^[14]用二维微扰红外光谱法研究了木质素的热解机理,发现温度低于250℃时,C—OH的变化早于C=O,对应酮-烯醇异构化反应。在缩合过程中,苯环的脱羟、脱氢和脱烷基作用增强。目前,对木质素的研究大多数也用模型化合物代替且大都聚焦于二聚体模型化合物的热解,通过对其热解机理的延伸,进一步解释天然木质素的热解。

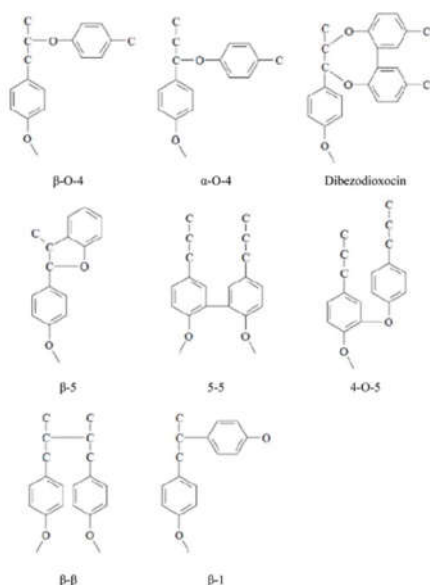


图4 常见的苯基丙烷键(截图)^[13]

Fig. 4 Common phenylpropane bonds (screenshot)^[13]

目前,一般采用建立热解机理模型或试验结合密度泛函理论探讨生物质热解机理。纤维素、半纤维素和木质素热解机理有一定的差别,纤维素的热解反应符合随机裂解机理,而半纤维素和木质素的热解反应符合顺序裂解机理^[15]。Liu等^[16]创新性地引入固体基质原位傅里叶变换红外光谱反褶积技术,对生物质热解过程中官能团的实时演化和热力学进行识别与量化,建立了一种在分子水平上评价生物质热解机理的新方法。

2 预处理对产物的影响

生物质预处理是指在制备生物油及生物气时对生物质预先进行技术处理,主要是改变生物质原料的灰分、粒度、水分、硬度等。对生物质进行预处理可在一定程度上降低制备生物质产物的成本,还可以选择性地提高产物产率。用于生物质热解的预处理方法分为物理法(粉碎、干燥),化学法(酸处理、碱处理),生物法(真菌、酶)和物理-化学法(烘

焙、水热处理)。

2.1 物理法

2.1.1 粉碎

热解过程中的传热主要受生物质粒径的影响,更小的生物质尺寸可以降低生物质组分的聚合度和结晶度;同时,粒径会影响生物油的产量和理化性质^[17-18]。Encinar等^[19]以橄榄和葡萄为原料,在自制的热解反应器上进行试验研究,发现不同粒径(0.4~2.0 mm)下,随着粒径的增加,糠醛的产率逐渐增加,粒径为2.0 mm时达最大值。Shen等^[20]研究发现,粒径从1.5 mm减小到0.3 mm,生物油产率增加,生物油的组分也有所改变。Xiao等^[21]以稻秸和松木屑以为原料,研究了生物粒径对热解的影响,由于稻秸和松木屑颗粒呈现针状或粒状,颗粒空间较大,粒径越小,生物质颗粒内部与表面的温差越小,热解系数越高,达到最大失重速率的温度也越低;同时,随着稻秸和松木屑粒径的减小,初始和最终热解温度以及最大失重率温度均降低。虽然较小的生物质颗粒有利于传热,可提高生物油的收率,但过小的生物质粒径会加速生物质的二次裂解,导致生物油产率降低。因此,生物质的粒径大小并没有统一的要求,主要在于生物质原料的种类以及热解反应器的选择。

2.1.2 干燥

生物质原料中的水分是影响生物质热解的关键因素。水分在生物质中含量最高,如果直接热解,会引起水分的蒸发,导致能量损失,同时降低生物油的热值和质量^[22],因此原料的干燥是非常必要的,但不必完全干燥,适当的水分有利于提高液体收率和质量。

Lu等^[23]以杨木、玉米秸秆以及氢氧化钙为原料研究了热风干燥方法对生物质的影响,发现当干燥时间增加时,含水率和干燥密度逐渐减小,而压缩强度则增大。Wang等^[24]利用3种不同的生物质原料对比了微波干燥和普通烘箱干燥,微波干燥后生物质比表面积显著增加,可提高固体炭和液体油产率,降低气体产物产率,生物油含水率降低,平均分子量、黏度和热值均增加。Wang等^[25]提出了一种预热解与微波热解的分段热解方法,与常规干燥预处理方法相比,这种方法可缩短预处理时间,同时可保留表面官能团的多样性,改善重金属的浸出毒性,从而获得高质量的污泥基生物炭。微波干燥可提高生物质产品质量,相较于其他干燥方式效率较高,发展潜力巨大,但耗能较大、成本高且操作不便,未来可以考虑将传统的干燥方式与微波干燥相结合,以提高生物质产品品质。

2.2 化学法

2.2.1 酸处理

经常用于酸洗的溶液主要是无机酸和有机酸。酸处理能去除生物质原料中的碱金属,降低金属离子在热解过程中的促进作用,从而产生低含酸量、低灰分、低含氧量和高含糖量的优质生物油^[26]。Wang 等^[27]研究发现,酸处理后的生物油产率比未经处理的高,同时酸处理对生物油的高位热值(HHV)、含水率、pH 值、黏度等都有一定程度的影响。半纤维素和木质素在酸性环境中会被降解^[28],结晶度降低,反应活性增强^[29],进而大幅降低热解过程中羧酸和醛酮的形成速率^[30]。Zhou 等^[31]利用 Py-GC/MS 对比分析了玉米秸秆酸洗前后热解产物的分布情况,发现酸洗后可去除玉米秸秆中的碱金属,使得玉米秸秆焦含量显著降低,糖含量显著提高,其中以左旋葡聚糖最为明显;乙烯基酚和其他简单酚类物质的聚合反应增强,导致秸秆结块。酸预处理同时改变了玉米秸秆的微商热重(DTG)模式和关键动力学参数,动力学分析表明,纤维素与木质素在酸浸玉米秸秆中有较强的缩合反应。Dai 等^[32]对甲酸处理过的竹木屑展开研究,发现酸处理可以降低挥发分、灰分和氢气的含量,且预处理之后产生的生物油热值高于未预处理的原始样品,酸类、酚类和酮类物质含量降低,但糖类物质含量增加,其中葡萄糖尤为明显。

酸预处理主要是通过减少生物油中的酸类、羧类、醛类和酮类,增加糖类物质来提高生物油品质,不同的酸处理得到的产物组分有一定差距。目前,只有少数研究探讨了木质纤维素中酸性化合物、生物质聚合物和其他无机元素之间潜在的相互作用。因此,深入研究酸在热解中的作用、反应机理和反应动力学,可以全面了解酸与无机材料之间的化学反应及其对生物质分子结构的影响。

2.2.2 碱处理

碱处理可以破坏木质纤维素的结构,增加生物质的孔隙率和内表面积,破坏木质素与其他碳水化合物之间的化学键。Lu 等^[33]采用 NaOH, Na₂CO₃ 和 Ca(OH)₂ 等 3 种碱基化合物对甘蔗渣进行预处理, Ca(OH)₂ 的效果最好。碱预处理促进了甘蔗渣细胞壁的解聚,通过释放更多的 4-乙烯基酚(4-VP)前驱体进一步脱羧生成 4-VP。Li 等^[34]采用离子交换法对松木进行碱处理,低温热解时碱金属提高了气体和生物炭的产量,降低了生物油的产率,但在高温热解时呈现相反趋势。

Alayont 等^[35]分别用酸、碱对生物质进行预处理。采用气相色谱-质谱(GC-MS)、傅里叶变换红

外光谱(FT-IR)、元素谱、氢核磁共振和扫描电镜等分析方法对热解后得到的产物进行表征,结果表明,碱性和酸性预处理均能提高液产物的产率,有利于生物炭的生成。从热解得到的液相产物含量看,碱性预处理对单芳烃的生成更有效,而酸性预处理对脂肪族的生成更有效。酸处理和碱处理都对生物油的产率有一定的促进作用,但酸处理和碱处理对生物油组分的影响还需要进一步的试验研究。

2.3 生物法

生物法是利用细菌、真菌和酶对生物质进行预处理,通过一些小分子物质选择性降解木质素,改变生物质的组成和结构,从而影响生物质热解。白腐真菌和褐腐真菌常用于生物预处理中。Majeke 等^[36]发现酶预处理可使后续热解过程中生物油的质量收率提高了 17.5%~82.3%。在特定情况下,酶预处理还可以使生物油中酚的总产量提高 43%,促进木质素在热解中向酚类物质增值。Schilling 等^[37]使用褐腐真菌预处理不同类型木材后,糖化率提高了 3 倍。

与物理和化学预处理方法不同,生物预处理不涉及高温或压力,不需要酸、碱或任何活性物质,处理过程中也不会产生任何不良产品,缺点是对整个过程的控制有限且耗时长。

2.4 物理-化学法

2.4.1 烘焙

烘焙也是常用的生物质预处理方法之一,烘焙虽然是一种耗能工艺,但处理后的原材料有更高的能量密度、可磨性、热值以及更低的吸水率^[38-39],可有效提高芳烃的收率,降低生物油中有机酸的含量^[40]。然而,烘焙过程中的交联和炭化反应会显著降低生物油的产率,提高焦炭的产率^[41]。Chen 等^[42]通过稻壳的 DTG 试验发现,烘焙温度逐渐升高时,稻壳的失重减小,DTG 曲线上的肩峰逐渐消失。气体的红外光谱显示了单个挥发组分的生成特性,稻壳烘焙后可以生产出低含水率、高热值、低酸含量的高品质生物油。陈东雨等^[43]采用盐酸洗涤与烘焙 2 种预处理相结合的方式对甜高粱秸秆进行热解前处理,发现酸洗-烘焙对酸类的抑制作用较单独酸洗、烘焙明显提高,同时对 D-阿洛糖的生成有促进作用。

2.4.2 水热处理

水热预处理是一种绿色、经济的预处理工艺,通常在 150~260 °C 范围内进行。水热预处理可以脱离大部分半纤维素和部分氧,提高生物质的碳氢有效比,阻断木质素中不稳定的化学键(乙酰基、糖苷

键和醚键),改变生物质的结晶度,降低生物质中碱金属含量,从而提高生物油中芳香族的含量^[44]。Liu等^[45]在160~250℃下对污水中悬浮物(SS)进行水处理,随后在550℃下进行热解试验,经过水热处理后,SS的热稳定性得到改善,N含量降低,芳香性增强,生物油中含N和含O化合物,尤其是酸类和酰胺类化合物明显降低,脂肪烃和芳香烃的产率分别提高了9.53%和23.18%。Zhuang等^[46]对3种典型工业生物废弃物(草药茶废废弃物(HTW)、青霉素菌丝废弃物(PMW)和SS)比较水热处理前后NO_x前体的形成特征,发现水热预处理影响了不同热解阶段NO_x前驱物的形成途径,使其总产率降低了36.14%~85.02%(HTW)、56.68%~92.78%(PMW)和66.14%~95.24%(SS),脱氮是减弱初级热解阶段NO_x前驱物来源的原因之一,而水热预处理过程中的氮官能团稳定是抑制二次反应阶段NO_x前驱物形成的另一个因素。物理-化学预处理法在改善生物质理化性质方面具有显著的优势,它可以将生物质转化为更合适的原料,制备高品质的生物油。水热预处理和烘焙等物理-化学方法可以有效去除水分、氧气、有机酸、灰分、有害矿物、碱金属和碱土金属等对热解过程有重要影响的物质。各种预处理方法都具有一定的优势,可以改善生物质的性质,从而影响热解过程和生物油的组成。

然而,所有的预处理方法中只有粉碎和干燥等少数技术已在中试规模上应用,大多数技术仍处于开发阶段。

3 催化剂对液体燃料的影响

为了提高生物液体燃料的品质,催化热解常用来改善产物性能^[47]。生物质催化热解过程中,主要的化学反应包括脱氧、热解、芳构化、酮化、醇醛缩合和催化裂化^[48]。在众多催化剂中,沸石催化剂的芳烃收率更高,但会生成更多焦炭从而影响生物油的产率。最近的研究中发现H₂可以抑制焦炭形成^[49]。催化快速热解的主要反应途径如图5所示^[50]。

3.1 碱金属

碱金属对生物质热解具有显著的催化作用,常以金属离子的形式参与热解,热解过程中发生脱水反应,不同的金属离子与生物质中的含氧物质发生化合反应,从而对反应产物产生影响。Dalluge等^[51]发现碱性添加剂促进了脱羧或脱羰基以及不饱和烷基支链的去除,在热解过程中添加碱金属会比碱土金属产生更多的焦炭。加入碱金属后木质素的挥发性芳烃增加,烯基侧链减少,轻氧合物增加,表

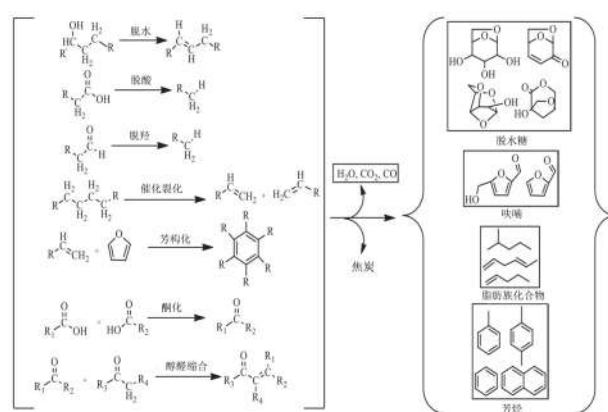


图5 催化快速热解的主要反应途径(截图)^[50]

Fig. 5 Main reaction pathways of fast catalytic pyrolysis (screenshot)^[50]

明碱金属的加入改变了木质素结构内化学键的裂解。Eibner等^[52]将7种硝酸盐直接浸渍在生物质上进行热解试验,证明金属盐可以抑制左旋葡萄糖的生成;同时,金属阳离子可以促进1-羟基-(1R)-3,6-二氧双环[3.2.1]辛烷-2-酮(LAC)的生成,其中Zn离子的促进作用最为明显;生物油中氧含量降低,增加了生物油的稳定性,这主要得益于Ni离子的脱羰基反应。

使用碱金属催化热解时,金属可以在纤维素的分解过程中诱导吡喃糖环的裂解,金属与氧原子的相互作用有助于削弱氢键。Leng等^[53]发现无机盐在低温热解条件下会降低糖苷键和羟基的稳定性,导致糖苷键断裂,产生小分子物质并抑制左旋葡萄糖形成的开环反应。碱金属还可增加生物油的碳氧(C/O)比,使得生物油成为更有价值的生物燃料,但会降低生物油产率^[54]。然而,用金属盐浸渍生物质不可避免地带来了阴离子,阴离子保留在处理过的原料中并在热解过程中在较高温度下分解。一些挥发性碱/碱土金属(AAEM),如钾和钠,可能形成高质量负载的气溶胶并导致潜在的腐蚀性组分沉积在反应堆表面。因此,需要有效的去除系统来避免上述环境和技术问题。

3.2 金属氧化物

金属氧化物是生物质热解的经典催化剂,包括酸性、碱性和过渡金属氧化物。这些催化剂具有低成本、良好的稳定性和脱氧性能。金属氧化物的氧化还原性质一般来源于其独特的多价化学性质,研究表明这可能有利于生物质的催化热解^[55]。SiO₂因具有弱酸性,从而被广泛用于生物质催化热解中;Fe/SiO₂复合型催化剂用于热解时,生物油中的氧大部分以CO₂的形式去除,同时生物油中的芳烃量会随着Fe/SiO₂的增加而增加^[56]。Al₂O₃也常用于快速热解,但因其高酸性会导致结焦,C等中性载体通常

会比 Al_2O_3 载体生成更少的焦炭^[57]。在原位催化热解的过程中,金属沉积会降低催化剂的酸度和比表面积,导致催化剂中毒^[58]。 MgO 具有热稳定性和与酸反应性,是用于生物质非原位催化热解的有效化学品,它以不同的方式改善生物油的质量,可以获得富含高稳定性和高热值的单芳香族烃、环状烃和脂肪族烃的生物油。 MgO 还可通过催化剂碱性位点上的酮化和羟醛缩合反应进行脱酸^[59]。 CaO 在去除氧方面更有效,这是由于其与 MgO 相比具有强碱性^[60]。Chireshe 等^[61]通过比较 MgO 和 CaO 催化的桉树木材热解产物的组成和热值证实了这个结论;另一方面,虽然 CaO 可促进焦炭形成并略微增加环戊烷酮和烯烃,但氧化镁表现出更强的断链活性,显著提高烯烃产率^[60]。常用金属氧化物催化剂如图 6 所示^[62]。

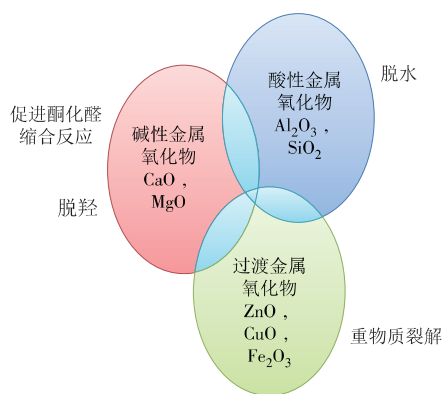


图 6 金属氧化物催化剂^[62]

Fig. 6 Metal oxide catalysts^[62]

3.3 分子筛

分子筛因特殊的孔隙结构、表面酸性和可重复利用特点,在脱氧和芳基化方面具有很强的优势,在生物质催化热解和生物油升级方面引起了广泛关注。沸石分子筛因具有均匀的孔径以及更高的生物油产率而广泛应用于快速热解,其中以 ZSM-5 沸石分子筛最为典型。相关研究表明,ZSM-5 可增加生物油中芳烃和酚的含量^[63],降低酸、醇的能力比其他催化剂更强^[64]。而在 ZSM-5 中掺杂金属催化剂表现出更好的催化热解特性,因此成为人们研究的一大热点。图 7 为典型的 ZSM-5 催化剂改性方法^[18]。

在 ZSM-5 分子筛中引入 Fe 离子,Fe/ZSM-5 可以保持 ZSM-5 的原有结构,Fe 会促进灰分的生成,阻碍其他氧合物进一步聚合反应^[65]。Fe 在反应中会增加苯、甲苯和二甲苯的产率并抑制多环芳烃(PAHs)的形成^[65]。在 ZSM-5 中引入 Zn 离子,Zn 通过促进 CH_4 的活化提高生物油的产量,而提高生物油的品质则是通过 ZSM-5 骨架在反应中脱氧实现

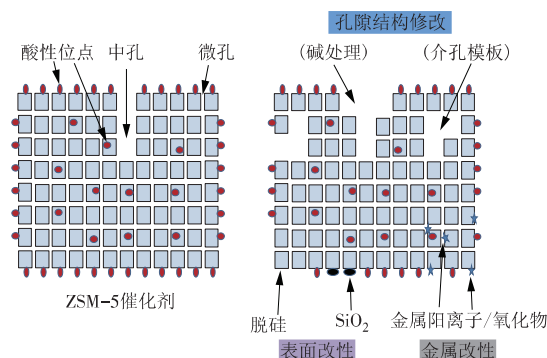


图 7 典型 ZSM-5 催化剂改性方法(截图)^[18]

Fig. 7 Modification of typical ZSM-5 catalysts(screenshot)^[18]

的^[66]。研究表明,Zn 具有更强的脱氧和芳构化能力^[67]。随着催化快速热解研究的深入,在分子筛中引入双金属催化剂逐渐成为研究方向,双金属表现出比单金属更好的催化性能,催化活性和产物选择性可以通过 2 种金属的协同作用实现^[68];同时,可通过烧结提高催化剂的稳定性和寿命^[69],但可能导致液体燃料产率降低。

4 预处理下生物质的催化热解

生物质预处理和生物质催化热解都得到了广泛研究,但单一的处理技术存在缺陷,预处理技术和催化热解耦合技术既可以避免各自的缺点,还可以改变热解产物的特性。

前文提到分子筛催化剂常用于催化热解中,生物油的产量和品质都有一定的提高,但存在易积炭失活的问题,从而限制其在实际中的应用,这一问题在 Binnal 等^[70]的研究中得到了很好的解决。Binnal 等^[70]将微波辅助酸预处理(MAAP)和 ZSM-5 催化剂结合,在试验室规模反应器中研究甘蔗渣的热解,生物油产率最高为 43.84%,生物炭产率最低为 17.65%,生物炭的产率较未处理大概降低 10%。Veksha 等^[71]研究了 KOH 添加和空气预处理对生物油与白杨木混合物共热解(热解温度为 600 °C)的影响,在共热解下生物炭质量增加 16%。共热解前进行空气预处理或添加 KOH 均可进一步提高生物炭产率。预处理与催化耦合制备生物油相关研究见表 1。

酸洗预处理常用于生物质催化热解中,一方面酸处理可以定向选择产物,另一方面酸洗预处理和催化热解的耦合作用对热解产物,尤其是生物油的提质升级有较好的促进作用。在催化热解中,温度也是影响产物生成的一大因素,其对催化快速热解的影响明显高于生物质预处理^[78-79],这与 Xin 等^[73]得到的结论是一致的。

表 1 预处理与催化耦合技术制备生物油
Table 1 Preparation of bio-oil by the coupling of pretreatment and catalytic pyrolysis

原料	催化剂	预处理条件	热解条件	主要结论
碱木质素	H ₃ PO ₄	盐酸, 50 °C, 60 min	550 °C, 催化剂与木质素的质量比为 0.7	苯酚质量浓度较未处理的提高了将近 11 倍(从 0.6 mg/mL 增加到 7.0 mg/mL) ^[72]
松木	HZSM-5	醋酸, 30 °C, 4 h 烘焙, 260 °C	500 °C, 催化剂与松木的质量比为 6:1	酸浸预处理提高了左旋葡聚糖的含量, 烘焙预处理提高了儿茶酚类的含量, 催化温度的升高和催化剂负载量的增加均促进了芳香烃的生成 ^[73]
稻壳	ZSM-5	酸浸醋酸, 2 h 烘焙, 210, 240, 270 °C	550 °C, 催化剂与松木的质量比为 19:1	耦合浸出和烘焙进一步提高了生物油中苯、甲苯和二甲苯 (BTX) 化合物的相对含量 ^[74]
芒草	ZSM-5	烘焙脱氧, 280 °C	600 °C	芳烃质量分数最高可达 66.29%, 生物 BTX 的选择性随着焙烧温度的升高而提高 ^[75]
松木	HZSM-5	烘焙, 220, 250, 280 °C	550 °C, 15 min	芳烃含量进一步提高, 随着反应温度的升高, 生物油产率下降, 生物炭产率增加 ^[76]
南松	HZSM-5	烘焙, 150, 175, 200, 225 °C	40~900 °C, 木质素与催化剂的质量比为 1:4	烘焙对木质素产生负面影响, 使得生物油中的芳烃产率下降 ^[77]

5 结论和展望

生物质快速热解是一个复杂的过程, 本文从热解机理、生物质预处理和催化剂等方面综述了影响生物油品质的主要因素, 分析了不同预处理方式对生物油的性质及产率的作用, 以及添加不同催化剂对生物油成分及品质的影响。主要结论如下。

(1) 生物质热解机理的研究目前大多仍停留在单个组分的研究, 且以模型化合物的形式进行。其中木质素的化学结构复杂, 热解温度范围宽, 快速热解机理比纤维素和半纤维素都要复杂, 因此, 了解热解机理可以选择更合适的生物质原料制备目标产物。

(2) 原料预处理可以改变生物质的结构, 从而改变生物油的组成和性质。强酸用于生物质预处理时, 可能会钝化生物质中碱金属的活性, 减缓木质素的解聚和挥发速度, 还可能腐蚀设备, 从而导致更高的生产成本。可使用含有金属的酸性化合物用于生物质预处理, 目前硫酸亚铁表现出优异的预处理性能, 更多适用于预处理的化合物还有待探索。

(3) 添加催化剂在提高生物油品质的同时可能会导致产率降低, 催化热解的关键是探索如何在生物油产量下降较小的情况下提高生物油品质, 脱羧可能是催化热解工艺中平衡生物油质量和产率的最佳方法。沸石分子筛在提高生物油品质方面表现出良好的性能, 对分子筛进行金属负载和表面改性的研究已取得了一定的进展, 但哪种金属对催化热解的促进作用较为突出目前尚不明确, 因此金属协同优化分子筛和分子筛再生是今后的研究方向。

(4) 催化热解与预处理技术的耦合已被证明是将低能量密度的含氧化合物转化为高能量密度的

脂肪族和芳香族烃的有效方法。在生物质催化与预处理集成方面展开研究, 使生物油改质技术更高效、更节能和更具成本效益, 从固体废物的高价值利用的角度来看, 利用木质纤维素类生物质和富氢废塑料或废橡胶作为共热解原料生产液体燃料和精细化学品, 有望使生物油成为现实的直接燃料。

参考文献:

[1] NGUYEN X P, HOANG A T, OLCER A I, et al. Biomass-derived 2, 5-dimethylfuran as a promising alternative fuel: An application review on the compression and spark ignition engine[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 214: 106687.

[2] SHARIFZADEH M, SADEQZADEH M, GUO M, et al. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 71: 1-80.

[3] HASSAN N S, JALIL A A, HITAM C N C, et al. Biofuels and renewable chemicals production by catalytic pyrolysis of cellulose: A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18(5): 1625-1648.

[4] ZHANG Y, DING Z L, HOSSAIN M S, et al. Recent advances in lignocellulosic and algal biomass pretreatment and its biorefinery approaches for biochemicals and bioenergy conversion [J]. Bioresource Technology, 2023, 367: 128281.

[5] WANG Y, AKBARZADEH A, CHONG L, et al. Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: A review [J]. Chemosphere, 2022, 297: 134181.

[6] ZHANG J J, XIE J, ZHANG H D. Sodium hydroxide catalytic ethanol pretreatment and surfactant on the enzymatic saccharification of sugarcane bagasse [J]. Bioresource Technology, 2021, 319: 124171.

[7] QIU B B, TAO X D, WANG J H, et al. Research progress

- in the preparation of high-quality liquid fuels and chemicals by catalytic pyrolysis of biomass: A review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 261: 115647.
- [8] BRETHAUER S, SHAHAB R L, STUDER M H. Impacts of biofilms on the conversion of cellulose [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104: 5201–5212.
- [9] DAI G X, WANG K, WANG G Y, et al. Initial pyrolysis mechanism of cellulose revealed by in-situ DRIFT analysis and theoretical calculation [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 208: 273–280.
- [10] YANG X X, FU Z W, HAN D D, et al. Unveiling the pyrolysis mechanisms of cellulose: Experimental and theoretical studies [J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 1120–1130.
- [11] GAO Z X, LI N, WANG Y Q, et al. Pyrolysis behavior of xylan-based hemicellulose in a fixed bed reactor [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020, 146: 104772.
- [12] YANG H P, LI S J, LIU B, et al. Hemicellulose pyrolysis mechanism based on functional group evolutions by two-dimensional perturbation correlation infrared spectroscopy [J]. *Fuel*, 2020, 267: 117302.
- [13] DOUVARTZIDES S, CHARISIOU N D, WANG W, et al. Catalytic fast pyrolysis of agricultural residues and dedicated energy crops for the production of high energy density transportation biofuels. Part II: Catalytic research [J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 315–338.
- [14] YANG H P, DONG Z G, LIU B, et al. A new insight of lignin pyrolysis mechanism based on functional group evolutions of solid char [J]. *Fuel*, 2021, 288: 119719.
- [15] WĄDRZYK M, JANUS R, LEWANDOWSKI M, et al. On mechanism of lignin decomposition—investigation using microscale techniques: Py-GC-MS, Py-FT-IR and TGA [J]. *Renewable Energy*, 2021, 177: 942–952.
- [16] LIU R J, LIU G J, YOUSAF B, et al. Novel investigation of pyrolysis mechanisms and kinetics for functional groups in biomass matrix [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111761.
- [17] ALVIRA P, TOMAS-PEJO E, BALLESTEROS M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(13): 4851–4861.
- [18] 仇利, 姚宗路, 赵立欣, 等. 生物质热解制备高品质生物油研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(1): 139–150.
- JI Li, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Research progress on preparation of high-quality bio-oil from biomass pyrolysis [J]. *Chemical Industry Progress*, 2021, 40(1): 139–150.
- [19] ENCINAR J M, BELTRAN F J, RAMIRO A, et al. Catalyzed pyrolysis of grape and olive bagasse. Influence of catalyst type and chemical treatment [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, 36(10): 4176–4183.
- [20] SHEN J, WANG X S, GARCIA-PEREZ M, et al. Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass [J]. *Fuel*, 2009, 88(10): 1810–1817.
- [21] XIAO R R, YANG W, CONG X S, et al. Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis [J]. *Energy*, 2020, 201: 117537.
- [22] 胡海涛, 李允超, 王贤华, 等. 生物质预处理技术及其对热解产物的影响综述 [J]. *生物质化学工程*, 2014, 48(1): 44–50.
- HU Haitao, LI Yunchao, WANG Xianhua, et al. Review of biomass pretreatment technology and its effect on pyrolysis products [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2014, 48(1): 44–50.
- [23] LU Z G, MA C, ZHAO Z Y, et al. Effects of hot air drying time on properties of biomass brick [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109: 487–496.
- [24] WANG X H, CHEN H P, LUO K, et al. The influence of microwave drying on biomass pyrolysis [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(1): 67–74.
- [25] WANG C Q, WANG W L, LIN L T, et al. A stepwise microwave synergistic pyrolysis approach to produce sludge-based biochars: Feasibility study simulated by laboratory experiments [J]. *Fuel*, 2020, 272: 117628.
- [26] HOANG A T, NIZETIC S, ONG H C, et al. Acid-based lignocellulosic biomass biorefinery for bioenergy production: Advantages, application constraints, and perspectives [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113194.
- [27] WANG H, SRINIVASAN R, YU F, et al. Effect of acid, alkali, and steam explosion pretreatments on characteristics of bio-oil produced from pinewood [J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(8): 3758–3764.
- [28] 段得振, 吴力克, 边聪聪, 等. 一种微生物菌肥制作方法、制得的微生物菌肥及复合微生物制剂: CN105110826A [P]. 2015–12–02.
- [29] FOSTON M, RAGAUSKAS A J. Changes in lignocellulosic supramolecular and ultrastructure during dilute acid pretreatment of populus and switchgrass [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2010, 34(12): 1885–1895.
- [30] FENG Y, LI G Y, LI X Y, et al. Enhancement of biomass conversion in catalytic fast pyrolysis by microwave-assisted formic acid pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 520–527.
- [31] ZHOU S Y, XUE Y, CAI J M, et al. An understanding for improved biomass pyrolysis: Toward a systematic comparison of different acid pretreatments [J]. *Chemical*

- Engineering Journal, 2021, 411: 128513.
- [32] DAI L L, WANG Y P, LIU Y H, et al. Microwave-assisted pyrolysis of formic acid pretreated bamboo sawdust for bio-oil production[J]. Environmental Research, 2020, 182: 108988.
- [33] LU Q, ZHANG Z X, YE X N, et al. Catalytic fast pyrolysis of alkali-pretreated bagasse for selective preparation of 4-vinylphenol[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019, 143: 104669.
- [34] LI J H, BURRA K G, WANG Z W, et al. Effect of alkali and alkaline metals on gas formation behavior and kinetics during pyrolysis of pine wood[J]. Fuel, 2021, 290: 120081.
- [35] ALAYONT S, KAYAN D B, DURAK H, et al. The role of acidic, alkaline and hydrothermal pretreatment on pyrolysis of wild mustard (*Sinapis arvensis*) on the properties of bio-oil and bio-char [J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 17: 100980.
- [36] MAJEKE B M, COLLARD F X, TYHODA L, et al. The application of enzymatic pretreatment with subsequent pyrolysis to improve the production of phenols from selected industrial (technical) lignins [J]. Waste and Biomass Valorization, 2022: 1-7.
- [37] SCHILLING J S, AI J, BLANCHETTE R A, et al. Lignocellulose modifications by brown rot fungi and their effects, as pretreatments, on cellulolysis [J]. Bioresource Technology, 2012, 116: 147-154.
- [38] KAN T, STREZOV V, EVANS T J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 1126-1140.
- [39] 方书起, 蒋璐瑶, 李攀, 等. 预处理生物质催化热解制取生物油的研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(4): 41-50.
- FANG Shuqi, JIANG Luyao, LI Pan, et al. Research progress on catalytic pyrolysis of pretreated biomass to produce bio-oil[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(4): 41-50.
- [40] 蒋丽群, 郑安庆, 王小波, 等. 生物质定向快速热解制备左旋葡聚糖和芳烃的研究进展[J]. 新能源进展, 2018, 6(5): 402-409.
- JIANG Liqun, ZHENG Anqing, WANG Xiaobo, et al. Research progress on preparation of L-glucans and aromatic hydrocarbons by directed rapid pyrolysis of biomass[J]. New Energy Progress, 2018, 6(5): 402-409.
- [41] BOATENG A A, MULLEN C A. Fast pyrolysis of biomass thermally pretreated by torrefaction [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 100: 95-102.
- [42] CHEN D Y, ZHOU J B, ZHANG Q S. Effects of torrefaction on the pyrolysis behavior and bio-oil properties of rice husk by using TG-FTIR and Py-GC/MS[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 5857-5863.
- [43] 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.
- CHEN Dongyu, ZHANG Ting, HUANG Shunchao, et al. Effect of hydrochloric acid washing and baking pretreatment on the pyrolysis of bio-oil components of sweet sorghum straw [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 222-229.
- [44] DAI L L, WANG Y P, LIU Y H, et al. Bridging the relationship between hydrothermal pretreatment and co-pyrolysis: Effect of hydrothermal pretreatment on aromatic production [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 36-43.
- [45] LIU Y L, ZHAI Y B, LI S H, et al. Production of bio-oil with low oxygen and nitrogen contents by combined hydrothermal pretreatment and pyrolysis of sewage sludge [J]. Energy, 2020, 203: 117829.
- [46] ZHUANG X Z, SONG Y P, WANG X M, et al. Pyrolysis of hydrothermally pretreated biowastes: The controllability on the formation of NO_x precursors [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 393: 124727.
- [47] HU X, GUNAWAN R, MOURANT D, et al. Upgrading of bio-oil via acid-catalyzed reactions in alcohols: A mini review [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 155: 2-19.
- [48] 李承宇, 张军, 袁浩然, 等. 纤维素热解转化的研究进展 [J]. 燃料化学学报, 2021, 49(12): 1733-1751.
- LI Chengyu, ZHANG Jun, YUAN Haoran, et al. Research progress on pyrolysis of cellulose [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(12): 1733-1751.
- [49] PERALTA M A, SOOKNOI T, DANUTHAI T, et al. Deoxygenation of benzaldehyde over CsNaX zeolites [J]. Journal of Molecular Catalysis A, Chemical, 2009, 312(1-2): 78-86.
- [50] RAHMAN M M, LIU R H, CAI J M. Catalytic fast pyrolysis of biomass over zeolites for high quality bio-oil: A review [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 180: 32-46.
- [51] DALLUGE D L, KIM K H, BROWN R C. The influence of alkali and alkaline earth metals on char and volatile aromatics from fast pyrolysis of lignin [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 127: 385-393.
- [52] EIBNER S, BROUST F, BLIN J, et al. Catalytic effect of metal nitrate salts during pyrolysis of impregnated biomass [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 113: 143-152.
- [53] LENG E W, WANG Y, GONG X, et al. Effect of KCl and CaCl₂ loading on the formation of reaction intermediates

- during cellulose fast pyrolysis [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2263–2270.
- [54] ZHU C, MADUSKAR S, PAULSEN A D, et al. Alkaline-earth-metal-catalyzed thin-film pyrolysis of cellulose [J]. ChemCatChem, 2016, 8(4): 818–829.
- [55] LIU C J, WANG H M, KARIM A M, et al. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass [J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43(22): 7594–7623.
- [56] LU Q X, YUAN S F, LIU C X, et al. A Fe–Ca/SiO₂ catalyst for efficient production of light aromatics from catalytic pyrolysis of biomass [J]. Fuel, 2020, 279: 118500.
- [57] MORTENSEN P M, GRUNWALDT J D, JENSEN P A, et al. A review of catalytic upgrading of bio-oil to engine fuels [J]. Applied Catalysis A, General, 2011, 407 (1–2): 1–19.
- [58] KALOGIANNIS K G, STEFANIDIS S D, LAPPAS A A. Catalyst deactivation, ash accumulation and bio-oil deoxygenation during ex situ catalytic fast pyrolysis of biomass in a cascade thermal-catalytic reactor system [J]. Fuel Processing Technology, 2019, 186: 99–109.
- [59] WANG J, ZHANG B, ZHONG Z P, et al. Catalytic fast co-pyrolysis of bamboo residual and waste lubricating oil over an ex-situ dual catalytic beds of MgO and HZSM-5: Analytical PY–GC/MS study [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 139: 222–231.
- [60] LIN X N, ZHANG Z F, ZHANG Z J, et al. Catalytic fast pyrolysis of a wood-plastic composite with metal oxides as catalysts [J]. Waste Management, 2018, 79: 38–47.
- [61] CHIRESHE F, FRANÇOIS-XAVIER C, GÖRGENS J F. Production of an upgraded bio-oil with minimal water content by catalytic pyrolysis: Optimisation and comparison of CaO and MgO performances [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020, 146: 104751.
- [62] CHEN X, CHE Q F, LI S J, et al. Recent developments in lignocellulosic biomass catalytic fast pyrolysis: Strategies for the optimization of bio-oil quality and yield [J]. Fuel Processing Technology, 2019, 196: 106180.
- [63] BAKAR M S A, TITILOYE J O. Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 103: 362–368.
- [64] NI S, LIU R H, RAHMAN M M, et al. A review on the catalytic pyrolysis of biomass for the bio-oil production with ZSM-5: Focus on structure [J]. Fuel Processing Technology, 2020, 199: 106301.
- [65] SUN L Z, ZHANG X D, CHEN L, et al. Comparison of catalytic fast pyrolysis of biomass to aromatic hydrocarbons over ZSM-5 and Fe/ZSM-5 catalysts [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, 121: 342–346.
- [66] HE P, SHAN W, XIAO Y, et al. Performance of Zn/ZSM-5 for in situ catalytic upgrading of pyrolysis bio-oil by methane [J]. Topics in Catalysis, 2015, 59(1): 86–93.
- [67] CHE Q F, YANG M J, WANG X H, et al. Influence of physicochemical properties of metal modified ZSM-5 catalyst on benzene, toluene and xylene production from biomass catalytic pyrolysis [J]. Bioresource Technology, 2019, 278: 248–254.
- [68] KUMAR R, STREZOV V, LOVELL E, et al. Bio-oil upgrading with catalytic pyrolysis of biomass using copper/zeolite–nickel/zeolite and copper–nickel/zeolite catalysts [J]. Bioresource Technology, 2019, 279: 404–409.
- [69] XUE S, LUO Z Y, ZHOU Q G, et al. Regulation mechanism of three key parameters on catalytic characterization of molybdenum modified bimetallic micro-mesoporous catalysts during catalytic fast pyrolysis of enzymatic hydrolysis lignin [J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125396.
- [70] BINNAL P, RAJASHEKHARA S, MANJUNATH S, et al. ZSM-5 catalyzed copyrolysis of sugarcane bagasse with LDPE: Influence of microwave-assisted acid pretreatment of sugarcane bagasse on yield and composition of gasoline range oil [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020: 1–17.
- [71] VEKSHA A, ZAMAN W, LAYZELL D B, et al. Enhancing biochar yield by co-pyrolysis of bio-oil with biomass: Impacts of potassium hydroxide addition and air pretreatment prior to co-pyrolysis [J]. Bioresource technology, 2014, 171: 88–94.
- [72] DUAN D L, LEI H W, WANG Y P, et al. Renewable phenol production from lignin with acid pretreatment and ex-situ catalytic pyrolysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 331–340.
- [73] XIN X, PANG S S, MIGUEL MERCADER F, et al. The effect of biomass pretreatment on catalytic pyrolysis products of pine wood by Py–GC/MS and principal component analysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019, 138: 145–53.
- [74] ZHANG S P, ZHU S G, ZHANG H L, et al. Catalytic fast pyrolysis of rice husk: Effect of coupling leaching with torrefaction pretreatment [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 133: 91–96.
- [75] TIAN H, CHEN L, HUANG Z J, 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.
- [76] CHEN D Y, LI Y J, DENG M S, et al. Effect of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood [J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 615–622.

[77]MAHADEVAN R, ADHIKARI S, SHAKYA R, et al. Effect of torrefaction temperature on lignin macromolecule and product distribution from HZSM-5 catalytic pyrolysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, 122: 95-105.

[78]方书起, 蒋璐瑶, 李攀, 等. 不同预处理生物质的热解及催化热解特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 69-74.

FANG Shuqi, JIANG Luyao, LI Pan, et al. Pyrolysis and catalytic pyrolysis characteristics of different pretreated biomass[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 69-74.

[79]范德锴, 付洁, 刘洋, 等. 纤维素热解制备高值化学品的研究综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(5): 24-31.

FAN Dekai, FU Jie, LIU Yang, et al. Review on the preparation of high-value chemicals from cellulose pyrolysis[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(5): 24-31.

(本文责编:刘芳)

收稿日期:2023-08-10;修回日期:2023-09-06
上网日期:2023-09-28;附录网址:www.iienenergy.cn

作者简介:

苏盼盼(1999),女,硕士生,从事清洁高效燃烧及污染物控制等方面的研究,supanpan990325@163.com;

王学涛*(1976),男,教授,博士生导师,博士,从事清洁高效燃烧、废弃物资源化利用等方面的研究,wxt7682@163.com。

*为通信作者。

“新能源主动支撑电力系统频率和电压的运行控制技术”专刊征稿启事

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”目标的重大举措之一。2022年我国风电、光伏装机容量首次超过水电,成为第二大电源主体。大规模风电、光伏多点集群化接入电网,导致电力系统的旋转备用容量、有功无功支撑能力、转动惯量水平、电网强度、振荡阻尼能力不足,弱电网特征明显,频率电压失稳风险增大,停电事故频发。例如,频率失稳导致的英国“8·9”大停电事故、新能源大规模脱网导致的澳大利亚“9·28”大停电事故、直流双极闭锁导致的华东电网“9·19”锦苏直流双极闭锁事故等。简言之,新能源亟需承担同步发电机角色,具备电网主动支撑能力。

纵观国内外能源领域,新能源频率电压主动支撑技术正成为全球研究热点,然而,含高比例风电、光伏的电力系统惯量、阻尼、调频/调压主参数、有功/无功时变储备、频率/电压调节能力/裕度、协同控制方法、优化运行技术等有待深入研究,尤其是系统惯量-频率和无功-电压的关键影响因素与时空耦合特征不明、频率和电压强度量化与评估体系不足、惯量和无功主动支撑机理与预防性安全调控手段欠缺,亟需多学科交叉融合,共同探究新能源主动支撑电力系统频率和电压的运行控制技术。

鉴于当前的问题与机遇,《综合智慧能源》特推出“新能源主动支撑电力系统频率和电压的运行控制技术”专刊,邀请天津大学葛磊蛟副教授、中南大学刘绪斌副教授、中国电力科学研究院有限公司仲悟之正高级工程师、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院朱光明正高级工程师和南瑞继保电气有限公司李钢高级工程师任特约主编,共同探讨新能源主动支撑电力系统频率和电压的运行控制相关前沿成果、关键技术、亟待解决的核心问题以及未来的发展趋势,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)弱电网条件下电力系统频率电压影响因素与强度量化评估;
- (2)高比例新能源电力系统的频率电压强度安全预警技术;
- (3)新能源主动支撑电力系统的调节能力评估技术;
- (4)新能源主动支撑电力系统频率和电压控制技术;
- (5)新能源主动支撑电力系统稳定运行的安全调控技术;
- (6)新能源主动支撑电力系统运行的示范应用技术;
- (7)新能源主动支撑电力系统的其他相关技术;
- (8)人工智能助力高比例新能源电力系统安全稳定运行技术。

二、时间进度

专刊拟于2024年4月25日截稿,2024年择期优先出版。

三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。(2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用Word软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net或www.iienenergy.cn)下载中心下载论文模板。(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.iienenergy.cn),完成在线全文投稿,欢迎推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:legendglj99@tju.edu.cn(葛教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755 13801175292。