

# 生物质与化石资源共热解开采的研究进展及应用前景

蒋海岩<sup>1,2\*</sup>, 尚晨浩<sup>1</sup>, 范昊天<sup>1</sup>, 袁士宝<sup>1,2</sup>, 胡清萍<sup>3</sup>, 申志兵<sup>4</sup>, 李乐泓<sup>1</sup>, 田 蕃<sup>1</sup>

1. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065;
2. 陕西省油气田特种增产技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580;
4. 西安石油大学化学化工学院, 陕西 西安 710065)

**摘要:**从共热解机理、影响协同机理的因素出发,对生物质与化石资源共热解相关研究进展进行了综述。其中共热解过程中生物质大分子(纤维素、半纤维素、木质素)化学键断裂,充当氢自由基供体并产生羟基自由基与化石资源发生协同效应,具有促进烃类小分子的结合、降低产物含氧率、提升产物品质的作用。对氢源充足及含水低、挥发性大、固体含量低等特性,探讨了适合共热解的生物质类型,并基于协同机理分析了关于生物质与油页岩、稠油和煤共热解的相关研究,发现生物质-油页岩热解与共热解前后产物 H/C 最高提升 10.6%;生物质-稠油共热解后,降黏率高达 97%和 98%;生物质-煤共热解后,实际产气比计算产气提升 8.8%,产液提升 6.5%,固相产率降低 10%。最后基于研究现状,建议从分子模拟方向进一步探索共热解机理,从多元混合物共热解体系来提高共热解效果。

**关键词:**生物质;共热解;油页岩;提高采收率;协同机理

中图分类号:TE345

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0025-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.005

## Research progress and application prospects of co-pyrolysis of biomass and fossil resources

JIANG Hai-yan<sup>1,2\*</sup>, SHANG Chen-hao<sup>1</sup>, FAN Hao-tian<sup>1</sup>, YUAN Shi-bao<sup>1,2</sup>, HU Qing-ping<sup>3</sup>, SHEN Zhi-bing<sup>4</sup>, LI Le-hong<sup>1</sup>, TIAN Fan<sup>1</sup>

- (1.College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
- 2.Shaanxi Key Laboratory of Special Oil and Gas Field Stimulation Technology, Xi'an 710065, China;
- 3.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
- 4.College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:**This paper reviews the research progress on the co-pyrolysis of biomass and fossil resources, starting from the mechanism of co-pyrolysis and the factors influencing the synergistic mechanism. During the co-pyrolysis process, the chemical bonds in the macromolecules of biomass (cellulose, hemicellulose, lignin) are broken, acting as hydrogen radical donors and generating hydroxyl radicals that interact synergistically with fossil resources. This results in the promotion of the bonding of small hydrocarbon molecules, reduction in product oxygen content, and improvement in product quality. The types of biomass suitable for co-pyrolysis are discussed based on their characteristics, such as low hydrogen source, low water content, high volatility, and low solid content. Additionally, research on the co-pyrolysis of biomass with oil shale, heavy oil, and coal is analyzed based on the synergistic mechanism. It was found that after biomass-oil shale co-pyrolysis, the H/C ratio of the product increased by up to 10.6%; after biomass-heavy oil co-pyrolysis, the viscosity reduction reached 97% and 98%; and after biomass-coal co-pyrolysis, the gas yield increased by 8.8%, liquid yield increased by 6.5%, and solid phase yield decreased by 10%. Finally, based on the current research, it is suggested to further explore the co-pyrolysis mechanism through molecular simulation and to improve the co-pyrolysis effect from a multi-component mixed system perspective.

**Key words:**biomass; co-pyrolysis; oil shale; enhanced oil recovery; synergistic mechanism

目前,低碳和零碳排放已成为评估石油和天然气开采技术可行性的重要指标,而现行的很多方法,

是以热能为驱动的开采过程,难以避免碳排放。生物质能源是世界上最大的可持续能源,典型的可利

收稿日期:2025-08-06;修回日期:2026-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52274039);国家油页岩开采研发中心开放基金(33550000-22-ZC0613-0255);陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JZ-28)

作者简介:蒋海岩(1978-),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为油热采提高采收率及配套技术,通讯联系人,upcjhy@126.com。

用生物质包括农业类,如稻草、麦秆等农作物残余物;林业类包括生木材、木屑等林业残余物;水生类包括螺旋藻、小球藻等藻类;生活废弃物类包括厨余垃圾等废弃物。其转化途径可以分为物理转化、传统化学转化和热化学转化,其中热化学转化技术以低成本、连续化生产工艺制取气、液、固产品,获得高附加值的芳烃化合物以及富氢燃料更具经济优势。当前生物质共热解技术已在固废处理方面展开研究,如废塑料与固体生物质共热解可生产替代燃料<sup>[1]</sup>、高热值油品<sup>[2-3]</sup>和轻质烃类<sup>[4]</sup>;生物质与烟煤共热解生产洁净气体、液体、固体燃料,生物质和城市生活垃圾共热解生产富氢合成气<sup>[5]</sup>。在生物质与化石资源共热解研究方面,部分学者从原料特性、协同作用等方面进行了研究,意在探索共热解行为特性和主导共热解产物品质的关键因素。共热解相较于单独热解具有以下优点:①产物油氢碳比增加,品质提升<sup>[6]</sup>;②改变气、液、固三相产率<sup>[7]</sup>;③固废处理,实现碳减排。

本文中从生物质热解特点、共热解协同机理出发,对可用于共热解的生物质与目前化石能源应用生物质共热解的现状做出了评价与分析,为寻求生物质共热解应用于油气开采的新方向具有参考价值,有利于加强生物质共热解的理论和应用研究,对化石资源开采技术转型具有一定的积极意义。

## 1 生物质共热解机理及其影响因素

### 1.1 生物质热解特点

生物质种类繁多,组成差异很大。主要成分由纤维素、半纤维素、木质素组成<sup>[8]</sup>。生物质的热解

是大分子(纤维素、半纤维素、木质素)发生化学键断裂和降解,生成生物油、可燃气体(微量 CO<sub>2</sub>)和固体炭,热解产物具有高含氧化合物、高含水量、高黏度、低热值的特征。生物质热解过程如图 1 所示。

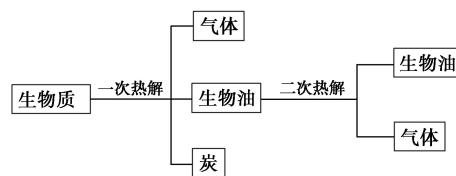


图 1 生物质二次热解过程示意

实验表明,生物质热解温度区间为 200~500℃。热解过程大体分为吸热阶段和放热阶段,吸热阶段可分为 2 步,第一步主要表现为原料的失水过程,失重较为微弱;第二步纤维素、半纤维素部分热解,在此过程中热解出大量的挥发分(一次热解),占整个失重区间的 60%~70%;放热阶段是残留物继续分解(二次热解),使纤维素、半纤维素、木质素及其他有机组分热解叠加,进一步产生气液两相<sup>[9-11]</sup>。

### 1.2 生物质共热解协同机理

与生物质大分子相似。生物质在地下共热解过程中会释放氢自由基、烯烃自由基与烷基自由基。烯烃自由基是由纤维素与半纤维素热解过程中发生解聚、开环、脱氧形成呋喃类化合物,经过二次反应,一部分呋喃经过开环、脱羧形成烯烃自由基。烷基自由基则是木质素的桥键和侧链的断裂产生(图 2)。在协同作用下氢自由基通过攻击沥青质中的弱 C—C 键引发自由基链式反应,大分子裂解为小分子,削弱了分子间氢键和 π-π 堆积作用,降低了胶体的体系稳定性<sup>[12]</sup>。

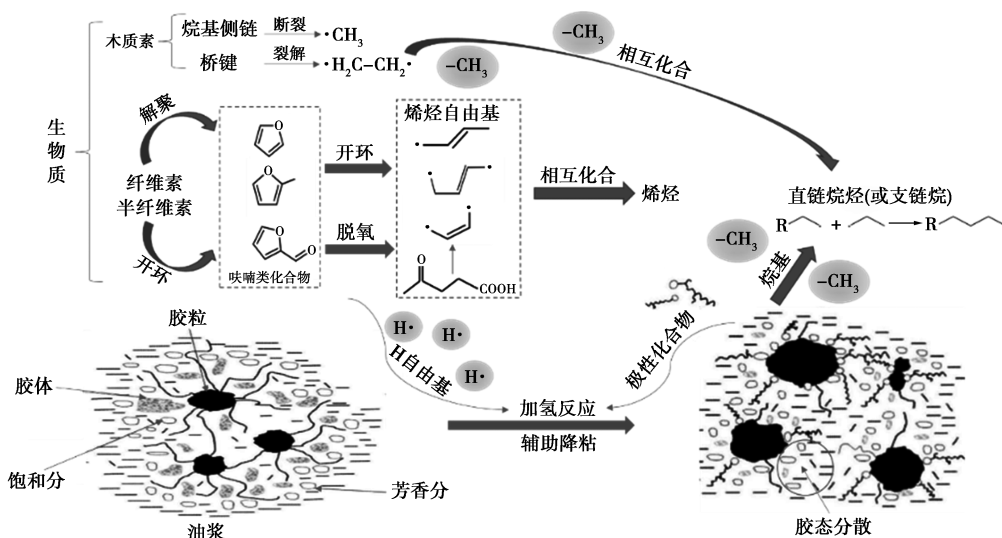


图 2 生物质辅助稠油改质降黏机理

油页岩、煤和稠油的单独热解温度区间在 300~600℃,共热解不仅是 2 个热解过程的简单加和,而是热解过程的相互协同、产物的相互结合。协同机理得益于自由基相互结合,对热解产物、产率、成分产生显著影响<sup>[7,12-13]</sup>,具体表现如下。

### (1) 充当氢自由基供体

部分学者认为生物质热解会产生大量氢自由基,具有原位供氢作用,也有学者认为供氢现象的产生是由于油页岩、稠油的高 H/C,有效的共热解材料一方具有富氢特征,如木屑、杨木与富氢 LD-PE (低密度聚乙烯) 共热解,LD-PE 裂解产生的氢自由基与生物质产生的呋喃类、醛类含氧化合物相互作用(表 1),提高了芳构化形成轻质芳烃的转化效果。因此高 H/C 不仅决定共热解过程中芳烃的形成而且还具有加速反应进程的作用<sup>[14]</sup>。油页岩、稠油、煤是以键能较大的 C—C、C—O 键为主有机大分子结构,而生物质由于较高的挥发分和较弱的 R—O—R、C—C 键能,共热解时生物质产生氢自由基首先析出,降低了共热解过程中的活化能,为反应提供热量,促进热解反应的进程。共热解体系中如果受氢体初始芳烃含量越低其与氢自由基结合程度越高,则大分子自由基裂解程度、氢自由基结合效率与气相或液相产物产率也越高。

表 1 生物质与油页岩共热解反应前后 H/C 变化

类别	掺混比	固有 H/C	共热解油 H/C	增长率/%	
农业类	玉米秸秆与抚顺油页岩 <sup>[15]</sup> 1:1	玉米秸秆	0.680	1.515	4.1
		油页岩	1.455		
	小麦秸秆与桦甸油页岩 <sup>[16]</sup>	小麦秸秆	1.790	1.738	2.8
		油页岩	1.690		
林业类	木屑与桦甸油页岩 <sup>[17]</sup>	木屑	1.620	1.749	10.6
		油页岩	1.580		

### (2) 产生羟基自由基

羟基自由基主要来自于木质素、纤维素和半纤维素<sup>[18]</sup>,羟基在共热解过程中扮演着加速共热解进程与脱氧的“角色”。油页岩、稠油、煤在热解过程中都会产生芳香族碳氢化合物、脂肪族链以及含氧化合物,羟基的加入能促进煤共热解时挥发分的释放、油页岩共热解时液态产物的生成、稠油共热解时促进其脱沥青化过程。与此同时,羟基还会与共热解过程中产生的小分子烯烃发生“双烯合成”反

应<sup>[19-20]</sup>,生成轻质芳烃,在更高的 H/O 碱性木质素与油页岩共热解实验中得到更多甲烷<sup>[21]</sup>。

共热解的协同作用可以促进裂解反应发生,使更多自由基产生并结合,生成更多轻质芳烃以及气体产物。生物质用于煤、油页岩和稠油的共热解可以进一步促进资源的高效转化利用。

## 2 生物质应用于化石资源共热解研究现状

在化石资源开采领域生物质共热解研究主要集中在油页岩、稠油和煤等方向。

### 2.1 生物质与油页岩共热解

油页岩中的干酪根是芳香烃、脂肪烃以及含氧官能团组成的三维聚合大分子有机物。在生物质与油页岩共热解会对热解油 H/C 的变化造成影响,如农业类、林业类生物质与油页岩的共热解反应前后 H/C 的变化。

生物质的存在增加了氢自由基,与油页岩热解产生的 C=O 发生加氢反应生成酚类和醇类物质,提升了芳香类物质浓度。其中油页岩与农业类生物质玉米秸秆和小麦秸秆共热解后热解油 H/C 分别增加了 4.1%与 2.8%,低于林业类生物质木屑与油页岩共热解油 10.6%的增长效果,是因为木屑会产生更多的羟基自由基与干酪根中的 C=O 结合,加强了对羟基、甲基、氢自由基等的吸收,抑制了 H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 的生成。导致 C<sub>10</sub>~C<sub>19</sub>长碳链增多,C<sub>2</sub>~C<sub>9</sub>小分子烃减少,油的 H/C 值升高。

可见,生物质与油页岩共热解过程可以减少焦油中含氧化合物的比例,提升热解产出油品的品质。

### 2.2 生物质与稠油共热解

稠油在高温条件下会发生裂解及聚合反应,主要是由芳烃及胶质聚合转化生成沥青质聚合反应为主,加剧裂解反应、抑制聚合反应的效果在稠油与生物质共热解方面得到了体现。

不同生物质与稠油共热解时的黏度和降黏率有所不同(图 3)<sup>[22]</sup>,其中降黏效果最明显的生物质是棉花秸秆及木屑,降黏率高达 97%和 98%,表现出林业类生物质更适用于稠油的共热解,其根本因素是棉花秸秆和木屑中的酚类、酸类、脂类和烷烃类有机物在热解过程中会生成氢自由基与羟基,促进稠油的脱沥青化过程,在降黏的同时,羟基还会与稠油中的含氧化合物发生反应,减少焦油中含氧化合物的比例,因此,共热解后可以看到黏度的降低以及油品品质的增加。

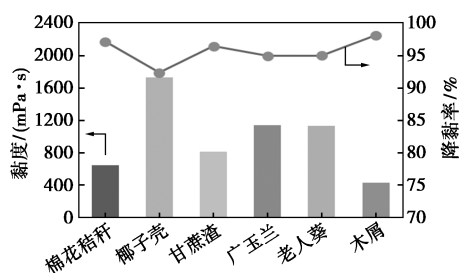


图 3 稠油与不同生物质共热解降黏效果变化

鉴于生物质的供应来源和成本等因素,棉花秸秆作为共热解材料相较于木屑等其他生物质具有更明显的优势。

### 2.3 生物质与煤共热解

低阶煤因含水量高、灰分多、热值低难以直接燃烧或气化,可通过共热解利用生物质的挥发性高和低阶煤的稳定性,实现两者的协同增效。生物质因含有较高的挥发分和较低的 C—C 键强度,在较低温度下即可开始热解,而煤的热解温度区间相对靠后,共热解过程中生物质率先释放出氢自由基、羟基与低阶煤中的碳氢化合物反应,同时为低阶煤提供热量,降低热解过程中的活化能,促进热解反应的进程。

通过共热解前后热解气体、热解液体(或焦油)和半焦产率评价共热解效果,不同低阶煤-生物质共热解后产物理论值与实际值见表 2。主要的效果是共热解促进了气体( $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  等)、焦油产率的提高,抑制了半焦与  $\text{CO}_2$  的生成,其中气相与焦油产率最高可达 8.8% 与 6.5%,半焦产率降低可达 10%。秸秆类的农业类生物质适应于稠油和煤的共热解,因此,将生物质应用于煤共热解具有较高的应用前景。

表 2 不同低阶煤-生物质共热解协同效应下的产物产率变化

类型	掺混比例	产物产量变化/%		
		$\Delta Y_g$	$\Delta Y_l$	$\Delta Y_{\text{char}}$
农业类	大雁褐煤-豆秸 <sup>[23]</sup>	3:7	+2.39	
	神府煤-葵花秸秆 <sup>[24]</sup>	4:1	+8.80	+6.50 -5.00
	宁东红石湾煤-玉米秸秆 <sup>[25]</sup>	3:1	+4.00	+6.00 -10.00
	依兰烟煤-玉米芯 <sup>[26]</sup>	1:3	-4.88	+1.63 -1.53
林业类	神木煤-木屑 <sup>[27]</sup>	4:1	+0.50	
	淖毛湖改质长焰煤-松木 <sup>[28]</sup>	4:1	+0.97	-1.50
	褐煤-甘蔗渣 <sup>[29]</sup>	4:1	+1.05	
	呼伦贝尔褐煤-核桃壳 <sup>[30]</sup>	1:1	+0.53	+2.00 -0.52

注: $\Delta Y(\Delta Y_g, \Delta Y_l, \Delta Y_{\text{char}})$ 表示热解气体、热解液体(或焦油)和半焦共热解实际产率和理论产率的差值。

### 3 生物质与化石资源共热解技术应用的前景展望

(1)就目前现有研究而言,生物质共热解技术在油气开采中展现出资源协同、环境友好、经济增效等多重优势。但大多数偏向于共热解对产物的影响,共热解中自由基相互作用、催化效应等机制尚未完全解析,现有动力学模型多基于单一原料假设。同时,其液体产物中烃类、酚类、含氧化合物共存,需后续精制(如加氢脱氧),增加成本。因此需要进一步研究共热解体系中的作用机理,如对共热解过程进行多组分动力学模拟,来对物质转化过程做出精确刻画,以期更加精准掌握热解过程和产物性能,进而增加对共热解产物的调控能力。

(2)当前的共热解研究多偏向于两两混合体系,而且化石资源开采共热解研究中生物质的选择主要以农林类生物质为主,因此,构建更加高效的多元混合物共热解体系以及探究更多可高效用于共热解的生物质意义重大。同时,未来仍需探究共热解的最优工艺参数,改良现有工艺路线,提高热解装置的成熟度,推进共热解技术的广泛应用。

### 4 结论

(1)共热解过程中存在协同机理,生物质充当氢自由基供体并产生羟基自由基,生物质与油页岩、稠油和煤等共热解,产物有“大变小,氧减少”的现象。共热解时选择合适的热解温度、升温速率以及掺混比是实现高效协同效应和优化产物分布的关键。

(2)生物质作为氢源具有低成本、低耗能、高减排的价值。根据生物质内部高挥发分含量、低水分含量、低灰分含量和低固定碳含量的对比,确定出可应用于与油页岩、稠油共热解的生物质优先选择农业类和林业类,还需要额外考虑低氮低硫等特征。

### 参考文献

- [1] Wang Z, Burra K G, Lei T, et al. Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2021, 84: 100899.
- [2] Jin Q, Wang X, Li S, et al. Synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic: Gas, tar, soot, char products and thermogravimetric study[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(1): 108-117.
- [3] Hossain M S, Ferdous J, Islam M S, et al. Production of liquid fuel

- from co-pyrolysis of polythene waste and rice straw[J].*Energy Procedia*, 2019, 160:116-122.
- [4] Kai X, Yang T, Shen S, *et al.* TG-FTIR-MS study of synergistic effects during co-pyrolysis of corn stalk and high-density polyethylene (HDPE) [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181:202-213.
- [5] Zhang J, Wang S Z, Wang Z Q, *et al.* Hydrogen-rich syngas produced from the co-pyrolysis of municipal solid waste and wheat straw[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(31):19701-19708.
- [6] Dai M, Yu Z, Fang S, *et al.* Behaviors, product characteristics and kinetics of catalytic co-pyrolysis spirulina and oil shale[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 192:1-10.
- [7] 邵佳晔. 碱性木质素与油页岩共热解及协同作用的研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2016.
- [8] 李晓娜, 潘超, 宋洋, 等. 典型塑料与生物质废弃物的共热解技术及高值化利用[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(9):1765-1778.
- [9] El-Sayed S A, Khass T M, Mostafa M E. Thermal degradation behaviour and chemical kinetic characteristics of biomass pyrolysis using TG/DTG/DTA techniques [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(15):17779-17803.
- [10] Parikka M. Global biomass fuel resources[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27(6):613-620.
- [11] Koppejan J. Database of biomass co-firing initiatives [C]. IEA, Bioenergy Task, 2013, 32:c2012-2013.
- [12] 高丽慧, 胡明, 柴娜, 等. 纤维素与褐煤共热解协同规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S2):740-747.
- [13] 郝泽光. 生物质与重油共热解/液化相互作用特性研究[D]. 太原:太原理工大学, 2022.
- [14] Jiang H, Deng S, Chen J, *et al.* Preliminary study on co-pyrolysis of spent mushroom substrate as biomass and Huadian oil shale [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(8):6342-6349.
- [15] 杜少枫, 江建波, 董海娜, 等. 油页岩与玉米秸秆共热解特性研究[J]. *广州化工*, 2022, 50(18):47-50.
- [16] 陈斌, 原梦雪, 邱禧荷, 等. 油页岩混合小麦秸秆分级共热解特性[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2022, 43(5):580-586.
- [17] Chen B, Han X, Mu M, *et al.* Studies of the co-pyrolysis of oil shale and wheat straw[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(7):6941-6950.
- [18] 张玉洁, 王焦飞, 白永辉, 等. 共热解过程中煤与生物质相互作用的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(7):3693-3702.
- [19] 田红, 廖正祝. 生物质与油页岩混合热解特性研究[J]. *洁净煤技术*, 2015, 21(3):93-97, 50.
- [20] 柏静儒, 孙灿辉, 陈晓琳, 等. 碱性木质素与油页岩共热解及协同作用的分析[J]. *化学工程*, 2017, 45(3):20-26.
- [21] 鲍振兴. 白音华煤与花生壳共热解行为研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- [22] 陈晓东. 生物质辅助稠油催化改质降黏研究[D]. 成都:西南石油大学, 2018.
- [23] 魏立纲, 张丽, 徐绍平. 自由落下床中生物质与煤共热解的协同效应对焦油组成的影响[J]. *燃料化学学报*, 2012, 40(5):519-525.
- [24] 任秀彬, 辛文辉, 周安宁. 煤与生物质固定床共热解产物分布及热解动力学研究[J]. *应用化工*, 2017, 46(8):1644-1649.
- [25] 范辉, 任倩, 冯彩云, 等. 宁东红石湾煤与生物质共热解协同机制[J]. *石油学报:石油加工*, 2019, 35(5):981-987.
- [26] 王建飞, 赵建涛, 李风海, 等. 生物质与烟煤程序升温共热解产物特性分析[J]. *化学工程*, 2015, 43(6):14-18.
- [27] 唐初阳, 张德祥, 鲁锡兰. 煤的理化性质对生物质和煤共热解焦油性质的影响[J]. *可再生能源*, 2016, 34(10):1548-1553.
- [28] 赵璐涵, 何选明, 李昊, 等. 改质长焰煤与松木共热解协同效应及动力学分析[J]. *煤炭转化*, 2019, 42(5):9-17.
- [29] 易霜, 何选明, 郑辉, 等. 甘蔗渣与褐煤共热解半焦的特性[J]. *化工进展*, 2016, 35(10):3149-3154.
- [30] He W J, Yin G J, Zhao Y B, *et al.* Interactions between free radicals during co-pyrolysis of lignite and biomass [J]. *Fuel*, 2021, 302:121098. ■

(上接第24页)

- [24] 郭潇东, 毛玉娇, 刘相洋, 等. Ni/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂氧空位对二氧化碳低温甲烷化的影响[J]. *化工进展*, 2024, 43(4):1840-1850.
- [25] Darouhegi R, Meshkani F, Rezaei M. Enhanced low-temperature activity of CO<sub>2</sub> methanation over ceria-promoted Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocatalyst[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 230:116194.
- [26] Fu H, Lian H. Optimizing low-temperature CO<sub>2</sub> methanation with aluminum-doped Ni/CeO<sub>2</sub> catalysts: Insights into reaction pathway adjustments and strong metal-support interactions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489:151021.
- [27] Zhao R, Xie Y, Li Z, *et al.* Unveiling the promotion effect of ethylenediamine on preparation of Ni/CeO<sub>2</sub> catalyst for low-temperature CO<sub>2</sub> methanation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 51:451-463.
- [28] Ullah S, Ahmed S M, Huang T, *et al.* Tailoring Ni/CeO<sub>2</sub> oxygen vacancies and metal dispersion via microfluidic synthesis techniques for enhanced low-temperature CO<sub>2</sub> methanation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515:163859.
- [29] Nguyen-Quang M, Samojeden B, Da Costa P, *et al.* Next generation of mixed oxide-based LDHs catalysts for low-temperature CO<sub>2</sub> methanation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 149:150122.
- [30] Zhang Y, Wang B, Ji Z, *et al.* Plasma-catalytic CO<sub>2</sub> methanation over NiFe<sub>n</sub>/(Mg, Al)O<sub>x</sub> catalysts: Catalyst development and process optimisation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465:142855. ■