

微波热解生物质的催化剂和吸收剂 研究进展

姚瑶, 何艳峰*, 刘金森, 马欣欣, 王雯, 刘广青

(北京化工大学生物质能源与环境工程研究中心, 北京 100029)

摘要:对目前存在的微波吸收剂、催化剂进行了分类,综述了不同的催化剂和微波吸收剂在生物质微波热解中的应用,并提出了存在的问题和对未来的展望。

关键词:微波热解;生物质;催化剂;吸收剂;进展

中图分类号:TK6;S216.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)02-0012-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.02.004

Progress of catalysts and absorbers for microwave assisted pyrolysis of biomass

YAO Yao, HE Yan-feng*, LIU Jin-miao, MA Xin-xin, WANG Wen, LIU Guang-qing

(Biomass Energy and Environmental Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The catalysts and absorbers for microwave assisted pyrolysis of biomass are classified. Their applications in microwave assisted pyrolysis of biomass are reviewed. The existing problems and prospects in the future are also put forward.

Key words: microwave assisted pyrolysis; biomass; catalysts; absorbers; prospect

随着化石能源的不断消耗及其使用所带来的环境污染问题日益严重,提高能源效率和发展可再生能源已经成为全球关注的焦点。在可再生能源中,储量丰富的生物质能源因其可再生性、清洁低碳性成为传统能源理想的替代能源。

采用热解技术将生物质转化为合成气、生物油等替代燃料,是生物质资源化利用的有效途径之一。然而传统热解方法存在着散热现象严重、温度不均匀,生物质能利用水平低等问题。而微波加热作为一种全新的加热方式,已经在很多领域得到应用,近年来,因其能够有效克服传统热解的缺点也开始应用于热解。该方法最大的优势是能够有效阻止二次反应的发生,具有独特的传热传质规律和更好的加热均匀性,可以实现物料的内外同时加热^[1]。因此不仅可以直接对较大体积物料进行热解转化,省却或简化预处理工序,而且能大幅提高热解产物的综合性能,降低能耗。

微波加热具有选择性,并不是所有物料都能吸收微波达到热解温度,所以必须加入一定量的微波吸收剂,才能使物料升温到热解所需温度。吸收剂可以加快物料的热解过程,但不能改变产物的组成。生物油有较强的酸性($\text{pH} = 2 \sim 4$)、高含氧量

(45% ~ 60%)、高含水率(15% ~ 30%)、低热值(18 ~ 22 MJ/kg)以及稳定性差等问题,所以选择催化剂提升生物油品位和反应过程的选择性也是需要考虑的重要因素,添加微波催化剂可以选择性地控制热解产物的分布,增加预期目标产物的产量,抑制酸类的生成,改进粗生物油品质。

本文中通过分析微波吸收剂和催化剂对微波热解过程和产物的影响,对近年来微波吸收剂和催化剂在微波热解过程中的应用现状进行了评述。

1 吸收剂对微波热解生物质的影响

物质吸收微波的能力与其介电常数有关,介电常数越大,微波吸收强度越强,物质越容易被微波加热,反之则越弱,不容易被加热。Namazi等^[2]分析了微波加热木质纤维素生物质内的温度分布,利用同轴探针技术测量样品的介电性能,结果发现,生物质吸收微波的能力较弱,介质损耗角正切值很小(如表1所示),难以单纯靠生物质中本身存在的微波吸收因子(水分与微量元素 Na^+ 、 K^+ 等)提升升温速率,需要加入一定量的吸收微波能力强的微波吸收剂适当强化生物质体系的微波吸收性能^[3]。微波吸收剂能够降低热解活化能,使生物质的升温

速率加快,提高生物质的热解效率,加入不同强度的微波吸收剂对生物质有不同的温度效应。添加微波吸收剂进行的微波热解过程是:输入较小的微波辐射,微波吸收剂颗粒保持加热,当反应器温度稳定时,吸收剂传热给生物质,生物质在直接和间接(微波辐射和吸收剂颗粒的热传导)的加热下开始热解,并且不断生成焦炭,焦炭吸收微波使反应持续进行。

表1 各类生物质的介质损耗角正切值(2.45 GHz)

生物质	木质素 ^[2]	纤维素 ^[2]	半纤维素 ^[2]	油棕榈纤维 ^[4]	油棕榈壳 ^[5]
tanδ	0.052	0.035	0.062	0.080	0.130
生物质	木头 ^[6]	杉木胶合板 ^[7]	白杨树皮 ^[7]	松木 ^[8]	
tanδ	0.11	0.01~0.05	0.22	0.19	

1.1 焦炭类吸收剂

微波热解的固体产物—热解半焦是一种微波吸收能力较强的微波吸收剂。焦炭作为微波吸收剂可以迅速提高热解温度,实现快速有效热解,同时促进液体和气体产物生成,降低生物油的含水率。

Salema 等^[9]研究了炭作为微波吸收剂对微波热解油棕生物质(壳和纤维)的影响,结果表明,加热速率和微波热解产物如生物油、焦炭和气体产量与生物质和微波吸收剂的比例有关,焦炭可以在短时间内促进热解温度的迅速提高,当生物质与催化剂的比例为1:0.5时,热解升温速度最快且达到的温度最高,生物油和气体产量最高,焦炭产量最低。

Undri 等^[10]发现,在没有添加炭时,热解温度较

低且木质颗粒的热解不完全,纤维素和半纤维素被热解为糖类和其衍生物;添加炭吸收剂后木屑可以在短时间内完成热解过程,同时纤维素和半纤维素热解生成的衍生物可以被进一步热解。炭促进了液体和气体产物的生成。

1.2 活性炭吸收剂

活性炭不仅可以作微波吸收剂,还起到了催化的作用。添加活性炭有利于热解气的产生。

Shra'ah 等^[11]研究了低温下纤维素的微波热解,结果表明,加入活性炭可以大大提高纤维素热解的产气量,同时加入去离子水可以显著增加生物油的产率。

1.3 碳化硅吸收剂

碳化硅具有抗氧化、耐高温性能好的特点,是一种非反应活性相的吸波物质,与催化剂配合能够有效利用微波能来提高催化氧化的效率。

赵延兵等^[12]的研究发现,SiC 的加入可以促进生物油的生成,提高热解产物中酮类化合物和醚类化合物的组分含量。SiC 用量的增加有利于酚类化合物和呋喃类化合物的组分含量上升,最高分别可达65.15%和15.27%。

1.4 其他

单种微波吸收剂的加入更多体现在提高生物质的热解转化率上,而对生物油的选择性的影响则微乎其微。张新伟等^[3]研究了复合微波吸收剂辅助生物质裂解制取生物油的影响,结果表明,复合微波吸收材料的加入能够改变生物质的微波升温行为,

(上接第11页)

[19] 刘敬肖,冷小威,史非,等.常压干燥制备TiO₂-SiO₂复合气凝胶的结构与性能[J].硅酸盐学报,2010,38(12):2296-2302.

[20] Wei Wei, Lu Xiaomeng, Jiang Deli, et al. A novel route for synthesis of UV-resistant hydrophobic titania-containing silica aerogels by using potassium titanate as precursor [J]. Dalton Transactions, 2014, 43(25):9456-9467.

[21] Kim Y N, Shao G N, Jeon S J, et al. Sol-gel synthesis of sodium silicate and titanium oxychloride based TiO₂-SiO₂ aerogels and their photocatalytic property under UV irradiation [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 231:502-511.

[22] Zhu Jianjun, Xie Jimin, Lue Xiaomeng, et al. Synthesis and characterization of superhydrophobic silica and silica/titania aerogels by sol-gel method at ambient pressure [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 342(1/2/3):97-101.

[23] Liu Jingxiao, Shi Fei, Bai Lunan, et al. Synthesis of TiO₂-SiO₂ aerogel via ambient pressure drying: Effects of sol pre-modification on the microstructure and pore characteristics [J]. Journal of Sol-Gel

Science and Technology, 2014, 69(1):93-101.

[24] 甘礼华,陈龙武,徐子颖.块状TiO₂气凝胶的形成过程及其对品质的影响[J].无机材料学报,2001,16(5):846-852.

[25] 卢斌,张丁日,宋森,等.常压干燥法制备铁掺杂二氧化钛气凝胶[J].人工晶体学报,2012,41(4):905-910.

[26] 王慧.SiO₂气凝胶及其复合材料的制备与性能研究[D].广州:华南理工大学,2009.

[27] Wang Huilong, Liang Wenzhen, Jiang Wenfeng. Solar photocatalytic degradation of 2-sec-butyl-4,6-dinitrophenol (DNBP) using TiO₂/SiO₂ aerogel composite photocatalysts [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 130(3):1372-1379.

[28] 刘朝辉,苏勋家,侯根良.Si含量对TiO₂/SiO₂复合气凝胶结构及光催化性能的影响[J].无机材料学报,2010,25(9):911-915.

[29] 林本兰,沈晓冬,崔升,等.锐钛矿型TiO₂气凝胶的制备和光催化性能研究[J].南京工业大学学报:自然科学版,2016,38(1):10-15.

[30] 林本兰.锐钛矿型TiO₂气凝胶结构优化与光催化性能研究[D].南京:南京工业大学,2014. ■

保证挥发分及时地移出,其中 SiC/Fe₃O₄ 具有较高的炭化温度,保留了更多的中间产物。当 SiC 和 Fe₃O₄ 以 8:2 的比例混合,热解温度为 650℃、加热功率为 600 W 的条件下,得到的生物油收率最高(高达 46.8%),而且生物油中呋喃类、醚类、酮类含量显著提升,对于获得高收率生物油有一定的促进意义。

2 催化剂对微波热解生物质的影响

许多研究表明,碳催化剂、沸石分子筛、金属类吸收/催化剂、酸含有极性分子,所以是良好的微波能吸收材料,并且还可以对生物质热解起到催化作用,催化作用表现为降低裂解温度、改变气液固产物比例及产物化学组成等。不同催化剂因其性质和分子结构不同,对生物质裂解的催化影响不同。

2.1 碳催化剂

活性炭不仅是微波吸收剂,还是良好的催化剂。

Bu 等^[13]用微波热解道格拉斯冷杉木屑,研究了活性炭负载铁作为催化剂对改善生物油品质的影响。结果表明,呋喃、苯酚、愈创木酚、酮和醚等主要成分占生物油质量分数 80%~87%。催化剂的加入促进了纤维素的破碎,使得热解后生物油中醚类和酚类含量增加,愈创木酚含量减少。

2.2 沸石分子筛

沸石分子筛是结晶态的硅酸盐或硅铝酸盐,因为沸石分子筛具有优异的酸催化活性、规则的孔道、有限的结焦失活和高的热稳定性,对微波热解生物质催化反应有着显著的促进作用^[14]。

柯改利^[15]采用离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑氯([Bmim]Cl)为添加剂,碱性的分子筛、酸性的无机酸及金属氯化物均能不同程度地缩短裂解反应时间,可以缩短至 60%左右。随着分子筛有效孔径的增大,微波热解固体产率增大,而气体及液体产率减小。

Wang 等^[16]研究了 ZSM-5 作为催化剂时道格拉斯冷杉木屑的微波热解性能,比较了催化剂添加前后热解产生的生物油的性质。结果发现,添加 ZSM-5 促进了芳香烃和酚类物质的产生,有利于提高生物油品质。沸石分子筛极易结焦,对分子筛改性可降低其结焦率,大多数反应中 Zn/ZSM-5 比 ZSM-5 有更低的结焦率,而且添加催化剂减少了生物油产量,增加了气体产量。

2.3 金属类催化剂

微波辅助生物质热解过程中使用的金属催化剂

种类大致可分为碱金属类、碱土金属类、金属氧化物类。

生物质自身含有一定量的碱金属盐和碱土金属盐,尤其钾盐和钙盐含量较高,外加金属盐可以有效改变生物质中的无机盐分布,从而影响生物质热裂解产物的分布。大部分的研究表明,金属类催化剂可以提高固体产物产率,降低热解油产率,对简化生物油组分有较好效果。这是因为金属类催化剂能够催化生物油中大分子质量组分重聚生成焦炭和气体,同时分布在生物质颗粒空隙中金属盐颗粒在一定程度上影响了生物质本身的空隙结构,给生物质颗粒升温带来了阻力,降低了颗粒的升温速率,促进焦炭的生成;堵塞了挥发分的析出通道,从而增大了挥发分发生二次分解得到更多小分子气体的可能,使热解油产量降低^[17]。

2.3.1 碱金属类吸收/催化剂

应用于微波辅助生物质热解的碱金属类吸收、催化剂主要有 Na、K 的碳酸盐、氯化物、碱和硅酸盐。强碱性化合物可以使原料大分子链间和碳碳间作用力减弱,减少热解活化能。

Chen 等^[18]研究 8 种添加剂 [NaOH, Na₂CO₃, Na₂SiO₃, NaCl, TiO₂, HZSM-5, H₃PO₄, Fe₂(SO₄)₃] 对松木锯末微波热解的催化作用。8 种添加剂都显著增加了固体产物的产率,或多或少地降低了气体产物的产率,而对液体产率的影响不是很显著。4 种钠的添加剂使气体 H₂、CH₄、CO 和 CO₂ 更快产生,所有添加剂使 CH₄ 和 CO₂ 的量减少,Na₂SiO₃ 使 CO 含量减少,NaCl、NaOH、Na₂CO₃ 和 NaSiO₃ 能够明显提高氢气产率。

芦超等^[19]对木屑微波热解制取生物油工艺条件进行了探讨,与沸石、Al₂O₃、CaCO₃ 相比,K₂CO₃ 为催化剂时所得液相产物的质量最高。

2.3.2 碱土金属类催化剂

碱土金属类催化剂主要有 CaCl₂、MgCl₂、MgO 和 CaO 等,它们可以有效简化生物油成分,MgO、CaO 的加入更有助于合成气的生成。

李攀等^[20]采用 NaCl、K₂CO₃、MgCl₂ 为添加剂进行了微波热解农业废弃物棉秆的实验,结果发现,添加 MgCl₂ 后热解油和热解碳产率较高,对生物油成分的简化更为明显,有助于固体产物比表面积的增加和微孔含量的提高,对热解炭孔特性的优化有较好效果,对于改善热解产品品质的效果要优于 NaCl 和 K₂CO₃。

但是 Wan 等^[21]得出了不同的结论,他们研究

催化剂对微波热解玉米秸秆和山杨木块的产物的影响,发现 $MgCl_2$ 提高了生物油产量,抑制了焦炭产量或气体产量,尤其是氯盐可以简化最终生物油的化学组成,并且提高裂解过程的产物选择性。

2.3.3 金属氧化物催化剂

金属氧化物作为催化剂的优势在于可以高效吸收微波能,增强物质的加热速率和促进生物质的挥发性。常见的酸性金属氧化物主要有 Al_2O_3 、 TiO_2 和 CeO_2 等;碱性金属氧化物主要有 MgO 和 CaO 等;两性氧化物有 ZnO 等。催化剂表面的酸性中心可以促进有机分子的脱水反应和脱羧基反应,使有机大分子裂解为小分子,同时增加生物油产率和生物油含水量;碱性中心可以有效促进碳氢键的断裂,促进脱氢反应,使小分子气体的产率增大^[14]。

Torri 等^[22]筛选了 31 种催化剂(金属盐、金属氧化物, HZSM-5 和金属混合物),研究其对于微波热解松木屑产物的影响。结果表明,采用金属氧化物 ZnO 、 CuO 、 Fe_2O_3 作为催化剂会大量减少生物油中非挥发性物质含量,减少生物油产量,增加了气体中挥发性和半挥发性气体产量。

安徽理工大学^[23]采用不同过渡金属氧化物作

催化剂分别制取生物油、氢气的微波热解试验表明, Fe_2O_3 、 Co_3O_4 、 NiO 作催化剂对生物质原料具有良好的脱氧效果,可降低液相产物中酸、醛、酮含量,能大幅提高芳香族化合物产率; $NiO/HZSM-5$ 的加入能使生物油产量略有提高; NiO/PG 有助于提高玉米芯热解气化产物的产率和气体组成中氢气的体积分数。

2.4 酸

柯改利^[15]以甲基纤维素、定性滤纸以及重庆片区的花生壳作为研究对象,离子液体为添加剂,研究无机酸对生物质热解产物分布的影响时发现,酸催化剂可以使反应时间缩短约 60%, HNO_3 可以促进醋酸甲酯、正丁醇等小分子物质的生成。无机酸的存在可以降低生物质组分中的灰分,从而使挥发分数量增加,促进液体生物质油及气体产物的生成。

表 2 汇总了不同催化剂/吸收剂存在时微波热解生物质的产物组成,由表 2 可知,不同的催化剂/吸收剂对生物质微波热解的产物分布的影响结果是不一样的,这与添加剂本身的特性有关,同时也受到生物质组分分布的影响,因此在实际过程中应根据目标产物调整实验条件和选择合适的添加剂。

表 2 不同催化剂/吸收剂存在时微波热解生物质的产物组成情况

催化剂/吸收剂 种类	生物质 原料	操作条件	液体产 量/%	气体产 量/%	固体产 量/%	影响
碱金属类催化剂	木屑 ^[24]	催化剂 K_2CO_3 10%, 反应温度 550℃	18.00	57.65	24.35	极大促进了热解气的生成,得到较高的 H/C 气体,生物油含水率极高
	松木屑 ^[18]	催化剂 NaOH 10%, 反应温度 470℃	20.00	44.00	36.00	促进了固体产物的生成,降低了热解气的产率
碱土金属类催化剂	木屑 ^[24]	催化剂 CaO 10%, 反应温度 550℃	39.37	34.83	25.80	促进了热解气的生成
	木屑 ^[24]	催化剂 MgO 10%, 反应温度 550℃	34.70	40.35	24.95	促进了热解气的生成
金属氧化物吸收剂	松木屑 ^[25]	催化剂 MnO_2 2%, 微波功率 800 W, 反应时间 53 min, 反应温度 580~620℃	轻油 10.04, 重油 12.93, 水相残留物 16.57	30.74	29.72	促进了裂解重油量和总油的生成
	松木屑 ^[23]	催化剂 $Fe_2O_3/HZSM-5$, 微波吸收剂 SiC 颗粒, 微波功率为 800 W, 反应时间 12 min	41.00	37.00	22.50	降低了液相产物中的酸类、醛类和酮类的产率,促进了芳香族化合物、糠醛的生成
沸石分子筛催化剂	松木屑 ^[23]	催化剂 HZSM-5, 微波吸收剂 SiC 颗粒, 微波功率为 800 W, 反应时间 12 min	36.14	42.37	21.50	降低了液相产率
焦炭类吸收剂	微晶纤维素 ^[26]	吸收剂生物焦 10%, 微波功率 1000 W, 温度 600℃	30.60	41.40	28.00	降低了生物油产率,促进了气体和焦炭的生成
酸类催化剂	稻壳 ^[27]	催化剂磷酸 10%, 微波吸收剂 3%, 微波功率 1.9 kW, 裂解时间 5.5 min	31.00	32.00	33.00	促进了生物油、糠醛的生成

3 前景与展望

微波热解生物质具有明显的优越性,不仅能耗低、热效率高而且热解产品品质好,污染物排放低,该技术有广泛的应用前景和巨大的潜力。吸收剂对于增强生物质吸收微波的能力不可或缺,催化剂在提高反应过程的选择性中起到了至关重要的作用。虽然众多的微波吸收剂、催化剂为微波热解生物质的应用提供了多样性选择,可以提高生物质热解效率或提高目标产物品质及产量,但起到显著性作用有限并仍处于开发阶段,今后可以主要从以下几方面突破。

(1) 深入研究复合型吸收剂、催化剂,加强对目标产物的选择性,得到更多的目标产物。

(2) 大力研究农村废弃生物质的微波热解过程,废弃生物质不仅价廉易得,还能解决焚烧的污染问题,降低成本,提高生物油产率。

(3) 加强各种微波吸收剂、催化剂的机理研究及分析对生物质热解的具体影响,优化反应条件,寻求选择性高、稳定性好、成本低的微波吸收剂、催化剂,提高生物油品质,改善其燃烧性能。

(4) 设计开发更节能高效的微波加热反应器和转化工艺技术,完善微波加热的测温技术,准确测定微波场中温度场的分布情况。

参考文献

[1] 赵希强,宋占龙,王涛,等.微波技术用于热解的研究进展[J].化工进展,2008,27(12):1873-1881.

[2] Namazi A B, Allen D G, Jia C Q. Probing microwave heating of lignocellulosic biomasses[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 112:121-128.

[3] 张新伟,王鑫,陈平,等.复合微波吸收剂辅助生物质裂解制取生物油研究[J].当代化工,2014,43(8):1407-1410.

[4] Salema A A, Yeow Y K, Ishaque K, et al. Dielectric and properties and microwave heating of oil palm biomass and biochar[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 50:366-374.

[5] Appleton T J, Colder R I, Kingman S W, et al. Microwave technology for energy-efficient processing of waste[J]. Energy, 2005, 814:85-113.

[6] Torgovnikov G I. Dielectric properties of wood and wood-based materials[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993.

[7] Mushtaq F, Mat R, Ani F N. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39:555-574.

[8] Vos B, Mosman J, Zhang Y, et al. Impregnated carbon as a susceptor material for low loss oxides in dielectric heating[J]. Mater, 2003, 38:173-182.

[9] Salema A A, Ani F N. Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass[J]. Bioresource Technology, 2011, 102:3388-3395.

[10] Undri A, Abou-Zaid M, Briens C, et al. Bio-oil from pyrolysis of wood pellets using a microwave multimode oven and different microwave absorbers[J]. Fuel, 2015, 153:464-482.

[11] Shra'ah A A, Helleur R. Microwave pyrolysis of cellulose at low temperature[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014, 105:91-99.

[12] 赵延兵,王鑫,佟明友.微波热解工艺参数影响气液产物组成的研究[J].可再生能源,2013,31(10):92-97.

[13] Bu Q, Lei H W, Wang L, et al. Biofuel production from catalytic microwave pyrolysis of Douglas fir pellets over ferrum-modified activated carbon catalyst[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 112:74-79.

[14] Gayubo A G, Aguayo A T, Atutxa A, et al. Deactivation of a HZSM-5 zeolite catalyst in the transformation of the aqueous fraction of biomass pyrolysis oil into hydrocarbons[J]. Energy & Fuels, 2004, 18(6):1640-1647.

[15] 柯改利.离子液体-催化剂作用下生物质微波裂解实验研究[D].重庆:重庆大学,2012.

[16] Wang L, Lei H W, Ren S J. Aromatics and phenols from catalytic pyrolysis of Douglas fir pellets in microwave with ZSM-5 as a catalyst[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012, 98:194-200.

[17] 谭洪,王树荣.金属盐对生物质热解特性影响试验研究[J].工程热物理论,2005,26(5):742-744.

[18] Chen M Q, Wang J, Zhang M X, et al. Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2008, 82:145-150.

[19] 芦超,乔磊,高新航,等.木屑微波热解制取生物油工艺条件探讨[J].化工技术与开发,2015,44(1):15-17.

[20] 李攀,王贤华,龚维婷,等.金属盐添加剂对生物质微波热解特性的影响[J].农业机械学报,2013,44(6):162-167.

[21] Wan Y Q, Chen P, Zhang B, et al. Microwave-assisted pyrolysis of biomass catalysts to improve product selectivity[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 86(1):161-167.

[22] Torri C, Reinikainen M, Lindfors C, et al. Investigation on catalytic pyrolysis of pine sawdust: Catalyst screening by Py-GC-MIP-AED[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010, 88:7-13.

[23] 曹巍巍,杨忠连,陈明强,等.3种过渡金属氧化物对生物质微波快速催化热解产物的影响[J].可再生能源,2014,32(5):703-708.

[24] 赵延兵,王鑫,佟明友,等.微波低温催化热解木屑制取可燃燃气研究[J].林产化学与工业,2015,35(2):79-85.

[25] Moen J, Yang C Y, Zhang B, et al. Catalytic microwave assisted pyrolysis of aspen[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(4):70-75.

[26] 王鑫.纤维素微波热解基础研究[J].可再生能源,2015,33(1):111-117.

[27] 王质斌,王宇迪,赖志彬,等.磷酸对微波催化裂解稻壳制备生物油性质的影响[J].农产品加工:学刊,2012,(8):64-75. ■