

# 生物质微波热解制气研究进展

季科<sup>1,2</sup>, 王心竹<sup>1,2</sup>, 郭健翔<sup>1,2\*</sup>, 毕学军<sup>1</sup>, 刘冰冰<sup>1</sup>, 孙晋飞<sup>1,2</sup>,  
李闻卓<sup>1,2</sup>, 刘益民<sup>3</sup>

1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033
2. 山东省余热利用与节能装备技术重点实验室, 青岛 266033
3. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100120

**摘要** 生物质微波热解具有反应速率快、易于控制、安全无污染等优点,但在制气方面存在产率不高、热值较低等问题,严重制约了生物质能的全面与高效利用。简述了微波热解原理,梳理了微波辅助热解技术在提升产气产率及热值、高效脱除焦油、抑制污染物生成和降低系统能耗4个方面的国内外最新研究现状,评述了当前实验用焦油模型化合物存在的局限性以及焦油在转化与脱除过程中所面临的问题,并给出了科学合理的建议。

**关键词** 生物质微波热解;合成气产率;焦油;污染物;系统能耗

随着“2030年碳达峰,2060年碳中和”目标的提出和实施<sup>[1]</sup>,中国将迎来广泛而深刻的能源变革,传统的化石能源因其不可再生和环境污染等问题已不能满足社会发展的需求。发展可再生能源被认为是实现资源和环境可持续发展的有效途径。在可再生能源中,储量丰富的生物质能源因其可再生性强、环境友好且可持续发展而成为传统化石能源理想的替代品,引起国内外的广泛关注和利用。目前,生物质能源是仅次于石油、煤炭和天然气的第4大供应能源<sup>[2]</sup>,占世界一次能源供应总量的10%<sup>[3]</sup>。据国际能源署预测,生物质能源将成为2018—2023年增长最快的可再生能源,预计2023

年生物质能源将满足全球约3%的电力需求;同时认为,中国生物质能源的发展前景十分乐观,预计占全球生物能源的37%<sup>[4]</sup>。

生物质本身通常被认为是零碳排放能源,即生物质燃烧或转换产生的CO<sub>2</sub>与其在生长过程中吸收的CO<sub>2</sub>相当,甚至可以通过利用碳捕集、利用与封存(CCUS)等新型技术达到负碳排放的目的,对于解决由温室效应引起的全球气候变暖具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。生物质是唯一可以转化为固体、液体和气体三态产物的可再生能源<sup>[8-11]</sup>,相对于生物质液体产物和固体产物而言,由于气体产物成分较为复杂,且产率相对较低,致使相关的研究成果转化较

收稿日期:2021-08-18;修回日期:2021-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1100302)

作者简介:季科,博士研究生,研究方向为生物质能源转化与利用,电子信箱:499020047@qq.com;郭健翔(通信作者),教授,研究方向为新能源、可再生能源多源互补供热系统,电子信箱:jianxianguo@163.com

引用格式:季科,王心竹,郭健翔,等. 生物质微波热解制气研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(24): 54-64; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.24.007

少。目前,根据气体产物的成分及用途需求,其应用研究归类主要集中在热解气、燃气和合成气这3个方面,其中,热解气则是通过热解方式直接获得的混合气体,主要成分为CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>及轻质烃等,同时还包含一些焦油等杂质,其应用方式主要被作为中低热值气体燃料;燃气则是基于热解制气技术,通过优选热解原料及调控操作条件等手段对其进行提质,以达到制取高热值气体的目的,其成分主要为CO、H<sub>2</sub>及甲烷等可燃成分;合成气则被定义为CO和H<sub>2</sub>的混合气体,其含量在热解气中占比往往较大,其品质的好坏则以合成气中H<sub>2</sub>和CO体积比进行衡量。

现阶段利用生物质制气主要通过生化转换和热化学转换2条途径实现<sup>[12-13]</sup>,气体产物成分以H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>等为主,可以应用于供热、发电、合成化学制品(如甲醇、二甲醚、氨)等<sup>[14-15]</sup>。生化转换主要是指利用农作物秸秆、城市污水等废弃物结合厌氧消化技术生产甲烷的工艺,该技术在国内外已有很多成功的应用示范项目,生化转换技术虽然清洁环保,但是投资较大、产能低,还会产生残留固体废物,因此,限制了该技术的进一步推广和发展<sup>[16]</sup>。热化学转换则是通过利用外加热能切断生物质大分子的化学键,使之转化为分子量较小的合成气技术,具体包括热解和气化2种方式,热解是一种非常有应用前景的方法,与气化相比,因其在无氧或缺氧的条件下进行,气体产物不涉及被气化剂物质稀释,进而能够大幅提升气体产物中可燃气体组分含量及热值<sup>[17]</sup>。其中,微波辅助热解技术(MAP)作为当前生物能源热化学转化技术的重要研究方向,融合了微波加热和生物质热解的各自优势,具有升温快、加热均匀、易于控制、节约能耗和安全无污染等优点<sup>[18-21]</sup>,是目前公认的比传统生物质热解技术更有效、更稳定的方法之一。

## 1 微波热解原理

微波热解是一种依赖于微波特有的介电加热方式,与传导、对流和辐射等由外向内的传统加热方式不同,该法通过利用穿透性极强的电磁波

(频率范围为0.3~30 GHz,波长范围为0.01~1 m)与物料中的带电粒子发生相互作用,粒子间经过剧烈碰撞、摩擦和挤压进行产热,其热量从原料的内部向外部扩散<sup>[21-22]</sup>,如图1<sup>[22]</sup>所示。即微波热解是一种由内向外的体积式加热方式,其本质是微波在物料中的能量耗散。

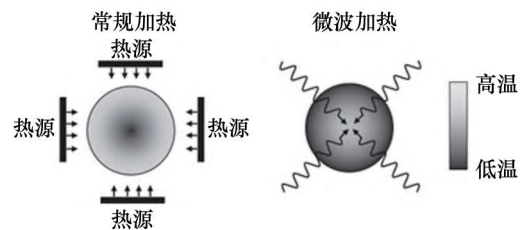


图1 常规加热方式和微波加热方式的对比

## 2 微波热解制气研究现状

目前,微波辅助生物质热解转化与利用大多处于基础性研究阶段,虽然微波热解生物质产气产率及产物性能显著提高已经得到证实,但对于建立完善的高效利用体系还面临着很多困难。

### 2.1 产气产率及热值的提升

从利用生物质热解气的角度考虑,如何最大限度地提升产气产率及热值至关重要。现阶段,针对热解气产量及品质的研究主要集中在热解原料(种类、粒径和含水率等)、热解反应条件(热解温度、升温速率和微波功率等)、微波热解辅助介质(微波吸收剂和催化剂)等基础层面。

#### 2.1.1 常规微波热解研究

Hong等<sup>[23]</sup>对比了螺旋藻、小球藻和紫菜在不同微波热解温度和升温速率下的气体产物收率,发现紫菜气体产率最高可达87.1%,相比于其他2种更适合作为气体产物的原料。Sait等<sup>[24]</sup>分别以沙特阿拉伯枣椰树的种子、叶子以及茎秆为原料,考察了不同原料部位(含水率及结构差异)对微波热解气体产物产率和组分的影响,结果发现,因不同原料部位的介电常数和介电损耗因子不同,造成微波吸收能力各异,最终导致气体产物收率不同,且H<sub>2</sub>/CO组分比例也会随之改变。郑照强等<sup>[25]</sup>系统研究了微波热解温度、热解功率和添加剂对微波热解紫

茎泽兰固、液、气产物得率的影响,并得到各种形态产物调控规律。研究发现,以合成气为目标产物,设置热解温度为700℃、微波功率为1500 W时,合成气体积百分比含量高达81.99%,且热值在20.75~22.74 MJ/Nm<sup>3</sup>,其中合成气主要成分为H<sub>2</sub>和CO。彭好义等<sup>[18]</sup>利用自行设计的钟罩式生物质微波热解实验装置研究了杨木的微波热解产气特性,着重探讨了微波功率和热解终温对热解过程产气成分、产气产率和热值的影响规律,与此同时还引入了热解气化效率的概念,研究结果表明,提高微波功率和热解终温均可提升热解产气率,增大产气热值峰值,提高热解气化效率。Mao等<sup>[26]</sup>在连续螺旋反应器中对糠醛渣进行了微波辅助热解实验,重点研究了高岭土、CaO和K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>这3种添加剂对热解气体产率的影响,结果显示3种添加剂都能促进H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>产率的提升,且CaO还能降低CO<sub>2</sub>的产率,同时指出气体产率的变化主要是由反应平衡动力学决定的。Shi等<sup>[27]</sup>以竹子、软木、松木、红木4种生物质为原料,研究了添加剂活性炭对微波辐照下富氢合成气产量的影响,发现活性炭重整与微波辅助热解的耦合不仅提高了气体产物产率,降低了生物油产率,还进一步促进了H<sub>2</sub>生成的选择性,极大提高了产物的整体低位热值(LHV)。

### 2.1.2 微波共热解研究

研究表明,生物质与其他原料共热解不仅可以提高热解产物的理化性质,而且可以有效地实现废弃物的循环利用<sup>[28]</sup>。较之单一生物质微波热解,微波辅助方式下的共热解有助于进一步增强不同原料之间的协同作用,以实现热解效率和产物品质的充分提升。

Li等<sup>[29]</sup>首次对木屑和油砂进行了微波辅助共热解研究,主要考察了共热解温度、混合比、原料与微波吸收比等因素对产物分布的影响,探讨了微波辐照下二者的协同效应。实验结果显示,与常规共热解相比,微波共热解的气体产率提高了10.9%,液体产率降低了近8.3%,研究表明,微波辅助热解是一种简单、有效、可替代的解决方案,可以提高共热解过程的能源效率,最大限度地利用资源。黎静等<sup>[30]</sup>也对微波场下油砂和木屑的共热解过程开展

了相关研究,研究结果进一步证实,共热解过程中得到的液相产物收率表现出负协同效应,而气体产物收率则表现出正协同效应。Zhou等<sup>[31]</sup>研究了微波辅助下红木废料和纺织染色污泥共热解过程中热解温度和原料混合比对产物组分和产量的影响,结果显示温度和红木废料比例的提升能够有效抑制生物炭及焦油等物质的产生,有利于气体产率的显著增加,当微波热解温度为650℃、红木废料占比为60%时,CO、CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>的含量占比达到最大,两者表现出最优协同作用。

### 2.1.3 新型微波热解工艺技术研究

近年来,一些专家结合生物质原料预处理、有氧辅助以及系统优化送料等技术对生物质微波热解制气进行了探索研究,且许多研究成果经过科学评估证明其具有可行性与高效性。

张理等<sup>[32]</sup>研究了水洗、烘焙和水洗-烘焙联合预处理技术对稻壳微波热解产物特性的影响。研究发现,烘焙和联合预处理技术均能提高稻壳微波热解气体产物的品质。其中,气体产物中CO<sub>2</sub>含量降低,CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>的产量显著增加,燃气低位热值最高可达到13.35 MJ/m<sup>3</sup>。赵振伟等<sup>[33]</sup>在综述烘焙对提升纤维素类生物质热解气性能的影响中明确指出,经烘焙处理的生物质原料可明显促进热解气化反应过程,产气中可燃气体组分含量、产气产量以及热值均能得到较大提升。曲磊等<sup>[34]</sup>又着重研究了烘焙方式(常规烘焙、微波烘焙和湿烘焙)及烘焙温度对生物质原料(棉秆)进行预处理后的产物性质、质量及能量产率的影响,以期为热解原料的高效改善提供选择性参考,通过分析实验数据可知,不同烘焙方式对棉秆品质的影响主要表现在240℃以下,其中微波烘焙的提质效果较好;当烘焙温度超过240℃时,烘焙温度的影响更加显著,而且越来越多的能量从固体产物向气体或液体产物转移。王鑫等<sup>[35]</sup>将有氧热解与微波加热相结合,深入研究了微波氧化热解落叶松的产物产出规律及产物特性。研究表明,氧的引入极大改善了微波加热行为,促进了木材微波热解转化,当氧与碳物质的量比值 $n(O)/n(C)$ 从0升至0.22时,气体产率最高可达75.55%,明显优于无氧微波热解的19.37%;同时,

燃气产率也从 $0.16 \text{ m}^3/\text{kg}$ 升至 $0.82 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,但燃气热值呈下降趋势。因此,在有氧辅助微波热解过程中合理控制氧的引入量对于平衡燃气产率与燃气热值至关重要。吴爽等<sup>[36]</sup>比较了大型海藻角叉菜在有氧、无氧、金属氧化物等条件下的微波热解制气性能,研究发现,以 $\text{Fe}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}$ 作为氧载体与角叉菜发生异相氧化热解反应时,热解气体产率、燃气产率及燃气组分均有明显提高,其中气体产率提高近30%, $\text{H}_2/\text{CO}$ 物质的量的比可达1.13,且 $\text{Fe}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}$ 经15次循环实验后无明显烧结和失活现象。Zhou等<sup>[37]</sup>针对目前微波热解技术存在的不足,结合实际规模化生产需求研发了一款连续微波辅助热解(CMAP)系统,如图2<sup>[37]</sup>所示。系统研究以木屑作为生物质原料,得出了在 $800^\circ\text{C}$ 的处理温度下,CMAP系统可达到 $0.80 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 的气体产率和 $18.0 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ 的低位热值,远优于传统制气方式。Luo等<sup>[38]</sup>进一步探讨了连续微波热解(CMP)的能量转化机理和高效热解机制。分析结果表明,连续微波热解性能的提升主要是由于生物质的连续输入促进后续原料被瞬间加热到高温,同时螺旋机的输送和混合功能也增加了原料与热解产物之间的传质和传热,促进了二次重整反应,减少了热能的损失。

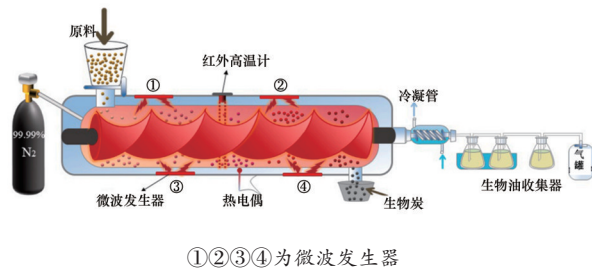


图2 连续微波辅助热解系统

## 2.2 焦油的转化与脱除

尽管微波热解技术较传统热解技术更有利于生成 $\text{H}_2$ 和 $\text{CO}$ <sup>[39]</sup>,大幅降低焦油产率<sup>[40]</sup>,提高气体产率<sup>[41]</sup>,但以气体为目标产品的生产过程中仍然会产生一定量的焦油,焦油是一种大分子黏性液体,往往容易造成管路堵塞、设备腐蚀和催化剂失活等不利影响,同时还会降低生物质整体转化率<sup>[42-45]</sup>。

### 2.2.1 焦油模型的选择

生物质热解(气化)生成的焦油成分以甲苯、萘、苯酚等物质为主<sup>[46]</sup>,而本身重质成分含量相对较少。基于真实热解焦油成分的复杂性和现有实验条件的局限性,多数研究人员仅以苯、甲苯或萘等单一组分(简单混合组分)作为焦油模型化合物对其进行研究。例如,Chen等<sup>[47]</sup>以甲苯为焦油模型化合物,研究了生物质焦油的微波热解机理。Chun等<sup>[48]</sup>以苯为焦油模型化合物,对其进行了微波热解燃料气体转化实验研究。黄荐等<sup>[49]</sup>构建以萘、甲苯、苯酚的混合物作为焦油模型化合物的热解实验系统,考察了温度、压力、停留时间以及气氛对焦油热解过程的影响。

虽然选择具有代表性的焦油模型化合物对于研究焦油高效转化具有很好的指导意义,但要想全面深入了解实际生物质焦油组分、分布以及不同组分之间相互作用等因素对焦油转化率、裂解气收率、裂解气组成等指标的影响规律还远远不够,为此,在后续的研究中还应加强对真实焦油样品而非模型化合物的实验研究。

### 2.2.2 常规焦油转化与脱除技术

目前,把生物质热解过程中产生的焦油进行二次裂解或重整为燃气被认为是解决此类问题最有效的方法<sup>[50-51]</sup>。其中,通过控制温度、添加催化剂等方式,生物质焦油脱除效率一般为35%~90%,最高甚至可达99.99%。温度控制法旨在通过营造高温环境,使热解过程中产生的焦油发生深度裂化进而转为分子质量较小的燃料气体,此法在生物质焦油的脱除和转化中已得到广泛研究。例如,Chen等<sup>[47]</sup>便研究了不同微波加热温度对焦油(甲苯)裂解和气体产物组成的影响。同时,还对常规加热条件下的焦油裂解进行了比较分析。结果表明,在微波和常规加热过程中,焦油的裂解效率随着温度的升高而增大,且微波加热方式的效果总是优于常规方式。而催化裂解/重整则是通过在热解过程中加入催化剂降低焦油裂解所需的活化能。Dong等<sup>[52]</sup>以负载镍稻壳炭(Ni/RHC)为催化剂,同时结合微波热解方式对生物质焦油裂解重整高品质合成气进行了研究。当微波热解温度设定为 $700^\circ\text{C}$ ,镍的

负载量为 10.42% 时, CO 和 H<sub>2</sub> 的产率分别为 274.0 和 248.9 mL/g, 焦油转化率可达 97.3%。实验结果表明, 与传统加热方式相比, Ni/RHC 催化剂在焦油去除和合成气产率提升方面体现了较大优势, 尤其是在低温工况下。随后, 该团队还相继研究了以活性炭负载铁离子为催化剂对微波热解毛竹过程中焦油转化率的影响。结果表明, 催化剂中的铁离子能够有效提高焦油转化活性, 促进高质量合成气的生成, 其中 H<sub>2</sub>/CO 最高可达 1.04, 同时, 该催化剂的加入还提升了反应体系的整体热效率<sup>[53]</sup>。Chen 等<sup>[47]</sup>利用自行设计的微波管式炉同时结合 3 种不同催化剂 (SiC、RHC 和 Ni/RHC), 对生物质焦油进行了微波催化裂解 (MCR) 与常规催化裂解的比较实验研究, 研究结果表明, 微波加热方式的裂解效率要高于常规加热, 且当温度为 800℃, 催化剂采用 Ni/RHC 时, MCR 和常规模式的焦油转化效率峰值分别为 95.12% 和 88%。Xin 等<sup>[54]</sup>在小型固定床反应器中研究了橄榄石 (煅烧) 作为催化剂对微波辅助加热催化重整焦油制氢的影响。结果表明, 在 900℃ 下煅烧 4 h 的橄榄石催化剂表现出更好的焦油转化效果; 同时还指出, 在相同的微波加热条件下, 橄榄石催化剂在焦油重整制氢中的效果明显优于木炭催化剂, 焦油转化率提高约 8%, 氢气浓度提高约 10%。Chun 等<sup>[48]</sup>也通过调控微波加热温度 (500~850℃) 及改变催化剂载体种类, 把焦油转化效率提升至 99% (温度设定为 750℃, 载体为活性炭)。Li 等<sup>[55]</sup>设计并搭建了一台小型微波催化重整装置, 并测试了不同参数设置条件下的生物质焦油模型 (甲苯) 转化效率, 根据测试结果可知, 该装置在处理焦油含量低于 10 g/Nm<sup>3</sup> 的气体时, 其焦油转化效率可达 99.99%, 较常规方式得到较大提升。尽管上述方法在生物质焦油裂解或转化方面显示了优越的性能, 但在能耗、经济及稳定性上仍然存在着一定欠缺。例如, 催化温度普遍在 650℃ 以上才能具有较高的焦油转化效率, 镍铬等贵金属价格昂贵致使热解成本升高以及催化焦油积炭导致催化剂失活等<sup>[56]</sup>。因此, 未来还需在焦油处理过程的能源与经济效益、催化失活机理、催化剂高效回收以及新型催化剂研发等方面进行深入探究。

### 2.2.3 新兴焦油转化与脱除技术

一些新兴的热化学转化法在抑制焦油产生、选择性脱除焦油等方面体现出了巨大的潜力。例如, Beneroso 等<sup>[57]</sup>提出了一种能够有效抑制焦油产生的微波热解制气新工艺——微波加热两步法。该方法基于微波加热方式对其原料 (该研究以生物质废弃物为原料) 进行分步热解: 第一步是在 400~800℃ 的温度下, 利用炭基吸液剂对生物废弃物进行微波热解生产合成气、焦炭以及焦油等; 第二步则是利用上一步产生的焦炭以 0.3:1 的质量百分比比例作为床料, 同时协同另一个微波加热系统将温度控制在 800℃, 进而能够将其焦油转化为合成气, 极大地降低了焦油产量, 其中系统产气率可达 54%, H<sub>2</sub> 和 CO 的体积分数占比高达 90% 以上。但该技术也存在着整体能耗偏高的弊端。王鑫等提出了将微波加热与有氧热解相结合的新技术路线 (图 3)<sup>[55]</sup>, 此法通过氧气与生物质的异相氧化反应, 使放热的氧化反应和吸热的微波裂解反应同步进行, 进而改变微波传热传质由内向外同向传输不利于裂解的行为, 从根源上消除焦油产生的内生动力, 促进生物质的均匀加热和充分热解。

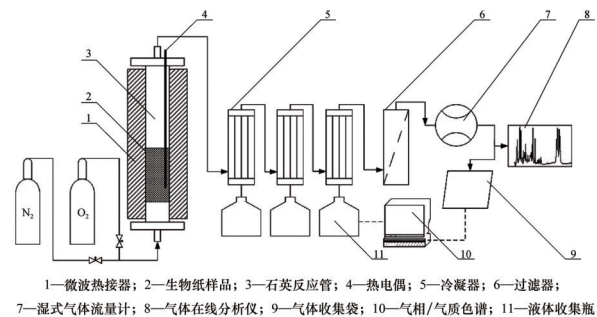


图3 生物质有氧辅助微波热解流程示意

### 2.3 污染物的抑制

由于生物质中含有相对较多的氮元素及少量硫、氯等元素, 在热解过程中往往会转化为氮氧化物、硫化物以及醛类、酚类等含氧有害物质, 极易引起环境污染问题<sup>[58-60]</sup>。随着国内外生态环境形势的日趋严峻及环保要求日益严苛, 在保证生物质燃气品质的前提下, 如何高效抑制及消除污染物也将成为亟需关注的问题。

目前, 生物质微波热解制气研究中仍以提升产

气产率及热值为主要研究方向,然而对于热解产物的二次污染物释放规律及控制策略研究极少。Gao等<sup>[61]</sup>比较了软木、树皮和浸渍木材在微波热解过程中生成的多氯代二苯并二恶英(PCDDs)、二苯并呋喃(PCDFs)和萘(PCNs)这3种污染物的排放及分布规律,在污染物排放量上,研究发现热解产物中PCDDs、PCDFs和PCNs的浓度范围为0.52~43.7 ng/kg,且树皮热解产物中PCDDs、PCDFs和PCNs含量最高,其次是浸渍木材,软木最少;在污染物分布上,结合实验数据分析可知,3种污染物主要集中在液相产物中,约占污染物总量的68%,且氯含量相对较高,与之相比,气体产物中污染物含量相对较低。Gao等<sup>[62]</sup>继续以树皮和浸渍木材为原料,深入研究了PCDDs、PCDFs和PCNs这3种污染物在木质生物质微波热解产物中(包含气体产物)的异构体分布规律,结果表明,微波热解产物中的异构体分布具有更高的选择性;同时还指出,鉴于该过程中出现了热力学稳定性较低的1-MoCDD、4-MoCDF等异构体,表明动力学因素在生物质微波热解过程中可能也发挥了重要作用。上述研究充分证实了生物质微波热解气态产物具有良好的资源性和安全性,与此同时,还为系统研究微波热解过程中持久性有机污染物的形成机制提供了重要的理论支撑。Gautam等<sup>[63]</sup>研究了加热机制对污染物组分及有害物质分布的影响,并分别在间歇式微波反应器和快速热解反应器中对3种大型藻类进行了热解实验。结果显示,大型海藻中的氮在微波辅助热解方式下转化为氨和杂环含氮有机物,而在快速热解方式下主要转化为胺类含氮有机物,同时得知,硫在2种热解过程中都以SO<sub>2</sub>气体的形式被检测到,且微波热解过程中的有机相更易捕获SO<sub>2</sub>。在污染物控制方面,有科研人员研究了添加剂(无机矿物质)对有害物质的污染控制机制。例如,Mao等<sup>[64]</sup>研究了微波辅助加热下温度和添加剂(高岭土、CaO和K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)对糠醛渣热解产气中氮、硫、氯分布的影响,结果显示随着温度的升高,HCN/NH<sub>3</sub>的相对比例(RP)达到13.67,挥发物中H<sub>2</sub>S和氯的RP分别从1.17%、5.97%上升至2.75%、9.00%,高岭土的添加促进了NH<sub>3</sub>、HCN和H<sub>2</sub>S的生

成,而CaO和K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的添加则能够有效抑制H<sub>2</sub>S的生成,该研究成果为今后有效控制污染物的生成提供了一定的参考依据。

相比于污水污泥和煤在微波热解过程中污染物的有关研究<sup>[64-67]</sup>,生物质在该领域还处于初步探索阶段,人们对有害物质形成机理、分布规律及控制策略的认识还比较匮乏,这便严重制约了生物质微波热解制气的安全高效发展,为此,在后续工作中可以围绕以下几个方向开展相关研究,如揭示氮、硫、氯等在微波热解生物质过程中的转化机理;明确微波场环境下相关因素对有害物质释放规律的影响;开展生物质微波热解过程中有害物质控制机制研究并提出有害物质前驱物向无害物质选择性转化的技术措施。

## 2.4 系统能耗的降低

单从技术层面来讲,微波辅助热解技术在生物质制气方面具有提质增速的效果,然而从整个系统能源消耗和能量产出角度进行考量,部分专家学者对于其节能特性存在异议,认为现阶段该技术的系统能源效率还处于低位水平<sup>[68]</sup>,并且已有部分研究发现微波辐射加热过程中的能量转化效率(电能转化为热能)主要介于20%~60%<sup>[69]</sup>。同时,结合以往实验数据统计可知其整体能源效率大多为负,即通过微波辅助热解技术提高的产品收率不足以弥补来自微波系统的能量输入<sup>[70-71]</sup>。造成这种现象的主要原因是由于微波在加热生物质过程中的能量损耗相对较大,而这种能量损耗主要集中在电能转换为电磁能及电磁能转换为热能2个关键环节。

为降低这2个关键环节的能量损耗,国内外研究人员一方面通过不断优化微波加热器(系统)设计,继而提高电能向电磁能的转化效率,经过持续不断的技术创新,目前该转化效率普遍可达90%~95%,较之前的70%~80%已有显著提升<sup>[72]</sup>。另一方面则通过改善物质(混合物)的介电响应能力,进而提高热解原料的介电特性<sup>[73]</sup>,其中,影响介电特性的因素主要包括热解原料属性和微波热解调控参数。

### 2.4.1 改善热解原料属性

以往对于热解原料属性优化的着力点,多从含

水量及堆积密度等物性参数方面进行考虑,但由于生物质原料属于低损耗材料,微波能转化为热效率很低<sup>[74]</sup>,仅靠改变生物质固有属性对提升介电特性极其有限。为此,早在研究初期,就有部分学者提出加入微波吸收剂可以提高电磁能向热能的转换效率,降低能源需求和成本<sup>[75]</sup>。碳材料作为一类具有良好介电特性的物质<sup>[76-77]</sup>,已在生物质微波热解领域得到充分研究和广泛应用。Ellison等<sup>[78]</sup>便研究了生物炭的添加对磨碎木屑介电特性的影响,通过分析测量数据发现,混合物的介电常数和介电损耗因子都会随着生物炭含量的增加呈现二次幂增长趋势。Beneroso等<sup>[79]</sup>详细研究了在生物质废弃物中加入生物炭后对其介电特性的影响,并以测量参数介电损耗正切值  $\tan\delta$  作为依据对能量转化效率(该能量转化指微波能转化为热能,后同)进行表征。研究结果表明,加入吸波剂生物炭后的能量转化效率比未加入时高出近20倍,且随着温度的升高,这一差距还将继续拉大。除碳材料外,还有一些新材也被用作吸波剂来提升热解原料的介电特性。Ellison等<sup>[80]</sup>利用膨润土作为吸波剂对生物质(乌桕)进行了微波强化热解,同时借助矢量网络分析仪测量了不同含水率膨润土与生物质混合物的介电特性参数。结果表明,膨润土是一种很好的生物质热解微波吸收剂,可大幅提高生物质等低损耗材料的电磁加热效率。Liu等<sup>[81]</sup>结合水热炭化技术成功地合成了一种新型的葡萄糖基碳核壳复合物  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}@\text{C}$ ,并利用X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和矢量网络分析仪对样品的结构、形态和微波吸收性能进行了表征。测试结果表明,在热解原料中引入  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}@\text{C}$  可以增强其介电损耗,进而提高原料的微波吸收性能及阻抗匹配性能。

#### 2.4.2 调控微波热解参数

大量研究都已证实物质的介电特性在很大程度上还取决于微波频率和热解温度等调控参数<sup>[82-83]</sup>。例如, Salema等<sup>[84]</sup>的研究便充分证明了热解原料(油棕榈纤维、油棕榈壳和棕榈壳生物炭)的介电特性受微波频率影响较大。随后, Tripathi等<sup>[85]</sup>也以油棕榈壳和棕榈壳生物炭为原料,在0.5~

20 GHz的微波频率范围内,对2种生物质原料的介电特性及其穿透深度、弛豫时间和静态介电常数进行了研究,同样发现上述2种热解原料的介电特性受微波频率影响非常之大。而Li等<sup>[86]</sup>的实验研究则表明温度对热解原料(生物质核桃壳与锰矿混合物)介电性能具有显著影响。

为了进一步明确相关调控参数对介电特性的影响规律,科研人员对此进行了更深入的研究。Salema等<sup>[87]</sup>采用油棕榈壳、空果串、稻壳、椰子壳和木材5种生物质为原料,通过改变温度(室温~700℃)和微波频率(397、912、1429、1948、2466和2986 MHz)对其介电特性进行实验研究。结果发现,介电特性随温度的升高呈现先降低后上升的趋势,当热解温度处于24~450℃时,先后由于水分的脱除和挥发分的分解,介电特性(介电常数和损耗因子)不断降低,当温度超过450℃时,介电特性则急剧上升;另外,介电特性随频率的增加而呈现下降趋势,尤其在高温阶段(450~700℃)体现出了更强的频率依赖性,当温度处于500~650℃时,频率设定为2986 MHz时的介电数值几乎是397 MHz时的一半。这与最近的研究结论相一致<sup>[88]</sup>。Li等<sup>[89]</sup>通过电磁分析研究了温度对玉米秸秆介电特性的影响机制,认为高热解温度有利于提高介电损耗,究其原因主要是因为导电损耗和界面极化损耗都会随着热解温度的升高而逐渐增强。Mathiarasu等<sup>[90]</sup>首次以卡兰种子为生物质原料,在(25±1)℃的温度条件下,研究了不同频率对其介电损耗正切值(该值表征了微波能转换为热能的效率)的影响,如图4<sup>[90]</sup>所示,损耗正切值随频率增加逐渐增大,且在

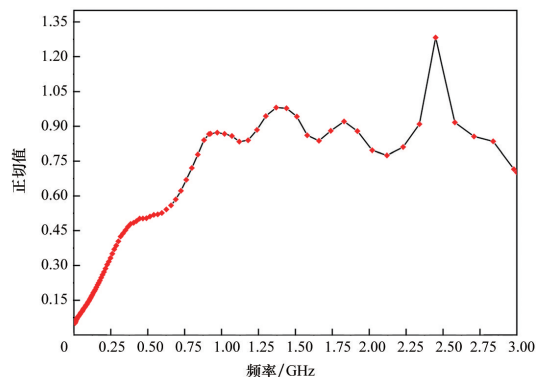


图4 卡兰种子损耗正切值与频率的关系

2.45 GHz时达到最大值1.3。因此,微波设定为2.45 GHz时,更有助于促进微波能向热能的转化。以上研究可为微波加热系统能耗的进一步降低提供参考。

### 3 结论

虽然关于微波热解生物质的研究很多,但以可燃气体为目标产物的研究体系仍不完善,特别是制备高产率、高热值、低焦油及绿色环保的生物质燃气。为此,今后还需要对以下4个方面加强研究。

1) 加快推进理论实验向工业应用研究转化。目前,实际工业微波加热设备往往在896~922 MHz下运行,而在现阶段的微波热解制气研究中,其频率多数设定为实验室常规频率2.45 GHz,这种差异性研究极大地制约了商业化应用推广。为此,在后续研究中应当大量开展符合实际生产需求的中试试验,使其尽快实现大规模工业化应用。

2) 基于实际样品开展焦油的转化与脱除研究。在目前的焦油处理研究中,多采用具有代表性的模型化合物,因其模型化合物较实际焦油样品组分相对单一,在一定程度上则会影响研究结果的准确性与可靠性。因此,日后应以真实焦油样品为研究对象开展相关研究。此外,继续开发成本低廉、稳定性耐久性优良的催化剂仍是焦油转化与脱除技术未来发展的重要方向之一。

3) 在保证产气产率及热值的基础上,如何高效抑制污染物的生成也将成为之后研究微波热解制气的关注点。截至目前,多数文献对如何高效产气进行了深入研究,但对污染物的有效防控少有涉及。因此,未来亟需对生物质微波热解过程中有害物质的转化机理、释放规律以及控制策略进行深入研究,以便进一步提高气体产物品质。

4) 继续优化微波顶层反应器设计,确保在最大限度提升产气产率及品质的情况下,尽可能减少系统能耗,降低设备运行成本,提高经济性。

### 参考文献(References)

[1] The State Council of the People's Republic of China. Chi-

- na's commitment to reduce emissions inspires global climate action[EB/OL]. [2020-10-12]. [http://www.gov.cn/xinwen/content\\_5550452.htm](http://www.gov.cn/xinwen/content_5550452.htm).
- [2] Bui H H, Tran K Q, Chen W H. Pyrolysis of microalgae residues—A Kinetic study[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 199: 362-366.
- [3] Liu C, Wu S L, Zhang H Y, et al. Catalytic oxidation of lignin to valuable biomass-based platform chemicals: A review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 191: 181-201.
- [4] 李佩聪. 生物质发电的未来展望[J]. *能源*, 2018(增刊1): 159-161.
- [5] 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析[J]. *热力发电*, 2021, 50(1): 7-17.
- [6] 贾爽, 应浩, 孙云娟, 等. 生物质水蒸气气化制取富氢合成气及其应用的研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(2): 497-504.
- [7] 赵振伟, 陈雷, 伊晓路, 等. 烘焙提升纤维素类生物质热解气化性能的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(5): 2509-2516.
- [8] Liu W J, Li W W, Jiang H, et al. Fates of chemical elements in biomass during its pyrolysis[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(9): 6367-6398.
- [9] Zhao X, Zhou H, Zhao M, et al. Biomass-based chemical looping technologies: The good, the bad and the future[J]. *Energy and Environmental Science*, 2017, 10:1885-1910.
- [10] Chen L, Yu Z S, Xu H, et al. Microwave-assisted co-pyrolysis of *Chlorella vulgaris* and wood sawdust using different additives[J]. *Bioresour Technology*, 2019, 273: 34-39.
- [11] Kwon E K, Kim S, Lee J. Pyrolysis of waste feedstocks in CO<sub>2</sub> for effective energy recovery and waste treatment [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2019, 31: 173-180.
- [12] Chen W, Lin B, Huang M, et al. Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review[J]. *Bioresour Technology*, 2015, 184: 314-327.
- [13] Kumar G, Shobana S, Chen W H, et al. A review of thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuels: Chemistry and processes[J]. *Green Chemistry*, 2017, 19: 44-67.
- [14] Septien S, Escudero Sanz F J, Salvador S, et al. The effect of pyrolysis heating rate on the steam gasification reactivity of char from woodchips[J]. *Energy*, 2018, 142: 68-78.
- [15] 董新新, 金保昇. 生物质燃气变换-甲烷化双功能催化剂研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(12): 5360-5371.
- [16] 姚彬, 张文存, 朱瑞龙. 生物质能源制备合成气的技术探讨及研究现状[J]. *现代化工*, 2021, 41(5): 54-58.
- [17] Zhang S P, Dong Q, Zhang L, et al. High quality syngas production from microwave pyrolysis of rice husk with

- char-supported metallic catalysts[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 191: 17-23.
- [18] 彭好义, 李志晴, 沈贞, 等. 杨木微波热解产气特性实验研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(4): 235-242.
- [19] 曾媛, 王允圃, 张淑梅, 等. 生物质微波热解制备液体燃料和化学品的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 3151-3162.
- [20] 辛子扬, 葛立超, 冯红翠, 等. 生物质微波热解利用技术综述[J]. *热力发电*, 2019, 48(7): 19-31.
- [21] 王允圃, 吴秋浩, 曾子鸿, 等. 微波快速催化热解生物质制备富烃燃油的研究进展[J]. *现代化工*, 2018, 38(3): 23-27.
- [22] 李攀, 师晓鹏, 宋建德, 等. 生物质微波催化热解制备高值产品的研究进展[J/OL]. *化工进展*[2021-10-17]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0303>.
- [23] Hong Y, Chen W R, Luo X, et al. Microwave-enhanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for syngas production[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 237: 47-56.
- [24] Sait H H, Salema A A. Microwave dielectric characterization of Saudi Arabian date palm biomass during pyrolysis and at industrial frequencies[J]. *Fuel*, 2015, 161: 239-247.
- [25] 郑照强. 紫茎泽兰微波热解行为及产物综合利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [26] Mao X, Kang Q H, Liu Y, et al. Microwave-assisted pyrolysis of furfural residue in a continuously operated auger reactor: Characterization and analyses of condensates and non-condensable gases[J]. *Energy*, 2019, 187: 583-584.
- [27] Shi K Q, Yan J F, Luo X, et al. Production of H<sub>2</sub>-rich syngas from lignocellulosic biomass using microwave-assisted pyrolysis coupled with activated carbon enabled reforming[J]. *Frontiers in chemistry*, 2020, 8: 3.
- [28] Wang G Y, Dai Y J, Yang H P, et al. A review of recent advances in biomass pyrolysis[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(12): 15557-15578.
- [29] Li H, Li J, Fan X L, et al. Insights into the synergetic effect for co-pyrolysis of oil sands and biomass using microwave irradiation[J]. *Fuel*, 2019, 239(3): 219-229.
- [30] 黎静. 微波场强化油砂与木屑共热解研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [31] Zhou C B, Zhang Y W, Liu Y, et al. Co-pyrolysis of textile dyeing sludge and red wood waste in a continuously operated auger reactor under microwave irradiation[J]. *Energy*, 2021, 218: 119398.
- [32] 张理, 张书平, 董庆, 等. 水洗-烘焙联合预处理对稻壳微波热解产品特性的影响[J]. *化工进展*, 2015, 34(9): 3286-3290.
- [33] 赵振伟, 陈雷, 伊晓路, 等. 烘焙提升纤维素类生物质热解气化性能的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(5): 2509-2516.
- [34] 曲磊, 聂士伟, 胡国荣, 等. 烘焙方式对生物质燃料特性的影响[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 364-369.
- [35] 王鑫, 张彪, 赵丽萍, 等. 有氧辅助微波热解落叶松木材的特性及产物分布[J]. *林产化学与工业*, 2020, 40(4): 24-32.
- [36] 吴爽, 冯娅婷, 秦智榛, 等. 铁铜钛金属氧化物辅助微波热解角叉菜制气研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2020, 48(3): 54-59.
- [37] Zhou N, Zhou J W, Dai L L, et al. Syngas production from biomass pyrolysis in a continuous microwave assisted pyrolysis system[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123756.
- [38] Luo J, Sun S C, Chen X, et al. In-depth exploration of the energy utilization and pyrolysis mechanism of advanced continuous microwave pyrolysis[J]. *Applied Energy*, 2021, 292: 116941.
- [39] 陈权. 生物质三组分微波热解研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [40] Sun J, Wang Q, Wang W, et al. Exploiting the photocatalytic effect of microwave-metal discharges for the destruction of a tar model compound[J]. *Energy Fuels*, 2018, 32: 241-245.
- [41] 董庆. 基于微波加热的竹材生物质热解机理及特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [42] Rakesh N, Dasappa S. A critical assessment of tar generated during biomass gasification: Formation, evaluation, issues and mitigation strategies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 1045-1064.
- [43] Liu W J, Li W W, Jiang H, et al. Fates of chemical elements in biomass during its pyrolysis[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(9): 6367-6398.
- [44] Wang Y, Jiang L, Hu S, et al. Evolution of structure and activity of char-supported iron catalysts prepared for steam reforming of bio-oil[J]. *Fuel Process Technol*, 2017, 158: 180-190.
- [45] Guan G, Kaewpanda M, Hao X, et al. Catalytic steam reforming of biomass tar: prospects and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 450-461.
- [46] 冯冬冬. 多活性位焦炭原位催化裂解生物质焦油的反应机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [47] Chen G Y, Li J, Cheng Z J, et al. Investigation on model compound of biomass gasification tar cracking in microwave furnace: Comparative research[J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 249-257.
- [48] Chun Y N, Song H G. Microwave-induced cracking and reforming of benzene on activated carbon[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2019, 135: 148-155.

- [49] 黄荐, 高瑞, 许建良, 等. 焦油热解反应模拟研究[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(3): 587-593.
- [50] Guo F, Peng K, Liang S, et al. Evaluation of the catalytic performance of different activated biochar catalysts for removal of tar from biomass pyrolysis[J]. Fuel, 2019, 258: 116204.
- [51] Guo F Q, Jia X P, Liang S, et al. Development of biochar-based nanocatalysts for tar cracking/reforming during biomass pyrolysis and gasification[J]. Bioresource Technology, 2019, 298: 122263.
- [52] Dong Q, Li H, Zhang S, et al. Biomass tar cracking and syngas production using rice husk char-supported nickel catalysts coupled with microwave heating[J]. RSC Advances, 2018, 8(71): 40873-40882.
- [53] Dong Q, Niu M M, Bi D M, et al. Microwave-assisted catalytic pyrolysis of moso bamboo for high syngas production[J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 145-151.
- [54] Xin S Z, Zhang Y H, Duan L H. Microwave-assisted calcined olivine catalyst steam reforming of tar for hydrogen production[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020: 1-8.
- [55] Li J, Jiao L G, Tao J Y, et al. Can microwave treat biomass tar? A comprehensive study based on experimental and net energy analysis[J]. Applied Energy, 2020, 272: 1-11.
- [56] 马帅, 胡笑颖, 董长青, 等. 生物质焦油模型化合物脱除研究进展[J]. 林产化学与工业, 2019, 39(4): 1-8.
- [57] Beneroso D, Bermudez J M, Arenillas A, et al. Microwave-induced cracking of pyrolytic tars coupled to microwave pyrolysis for syngas production[J]. Bioresource Technology, 2016, 218: 687-691.
- [58] 王嫣云. 页岩气开发油基钻屑-单组份生物质共热解特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [59] 黄思雨, 王嫣云, 周博逊, 等. 页岩气开发油基钻屑-单组份生物质共热解特性[J]. 环境科学研究, 2019, 32(6): 1074-1080.
- [60] 周建强. 麦秆热解过程中有机氮转化机理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [61] Gao Q J, Budarin V L, Cieplik M K, et al. PCDDs, PCDFs and PCNs in products of microwave-assisted pyrolysis of woody biomass-distribution among solid, liquid and gaseous phases and effects of material composition[J]. Chemosphere, 2016, 145: 193-199.
- [62] Gao Q J, Budarin V L, Cieplik M K, et al. Mechanistic evaluation of polychlorinated dibenzo-p-dioxin, dibenzofuran and naphthalene isomer fingerprints in microwave pyrolysis of biomass[J]. Chemosphere, 2016, 150: 168-175.
- [63] Gautam R, Shyam S, Reddy B R, et al. Microwave-assisted pyrolysis and analytical fast pyrolysis of macroalga: Product analysis and effect of heating mechanism[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2019, 3: 3009-3020.
- [64] 张军. 微波热解污水污泥过程中氮转化途径及调控策略[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [65] Zhang J, Tian Y, Cui Y N, et al. Key intermediates in nitrogen transformation during microwave pyrolysis of sewage sludge: A protein model compound study[J]. Bioresource Technology, 2013, 132: 57-63.
- [66] Liu T T, Guo Y C, Peng N N, et al. Nitrogen transformation among char, tar and gas during pyrolysis of sewage sludge and corresponding hydrochar[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 126: 298-306.
- [67] 权熙, 张军, 尹琳琳, 等. 污泥微波热解与传统热解过程硫转化途径解析[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(4): 110.
- [68] Yang Z, Qian K, Zhang X, et al. Process design and economics for the conversion of lignocellulosic biomass into jet fuel range cycloalkanes[J]. Energy, 2018, 154: 289-297.
- [69] Sun J, Wang W L, Yue Q Y, et al. Review on microwave-metal discharges and their applications in energy and industrial processes[J]. Applied Energy, 2016, 175: 141-157.
- [70] Helen T, Gislaine F, Thamarys S, et al. Utilising biomass in biotechnology[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2020.
- [71] Peng L Y, Appels L, Su H J. Combining microwave irradiation with sodium citrate addition improves the pretreatment on anaerobic digestion of excess sewage sludge[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 213: 271-278.
- [72] Guo F Q, Dong Y C, Tian B L, et al. Applications of microwave energy in gas production and tar removal during biomass gasification[J]. Sustainable Energy Fuels, 2020, 4: 5927-5946.
- [73] Menendez J A, Arenillas A, Fidalgo B, et al. Microwave heating processes involving carbon materials[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 91(1): 1-8.
- [74] Motasemi F, Muhammad T A. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 28: 317-330.
- [75] Rpbinson J P, Snape C E, Kingman S W. Developing high power microwave processing as an effective technology for the thermo-chemical conversion of biodegradable municipal waste: Technology research and innovation fund project report[R]. Nottingham: University of Nottingham, 2010.
- [76] 张彦军, 郑闰, 张超凡, 等. 煤炭微波热解技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 205-211.
- [77] Liang X H, Liu W, Cheng Y, et al. Review: Recent pro-

- cess in the design of carbon-based nanostructures with optimized electromagnetic properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 749: 887–899.
- [78] Ellison C, Trabelsi S, Boldor D, et al. Dielectric properties of biomass/biochar mixtures at microwave frequencies[J]. *Energies*, 2017, 10(4): 502.
- [79] Beneroso D, Albero O A, Arenillas A, et al. Dielectric characterization of biodegradable wastes during pyrolysis [J]. *Fuel*, 2016, 172: 146–152.
- [80] Ellison C, Mckeown M S, Trabelsi S, et al. Dielectric characterization of bentonite clay at various moisture contents and with mixtures of biomass in the microwave spectrum[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2018, 52(1): 3–15.
- [81] Liu Y R, Lin Y, Yang H B. Facile fabrication for core-shell BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>@C composites with excellent microwave absorption properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 805: 130–137.
- [82] Mitani T. Recent progress on microwave processing of biomass for bioenergy production[J]. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2018, 61(2): 113–120.
- [83] Motasemi F, Afzal M T, Salema A A. Microwave dielectric characterization of hay during pyrolysis[J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 61: 492–498.
- [84] Salema A A, Ishaque K, Ani F N, et al. Dielectric properties and microwave heating of oil palm biomass and biochar[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 50: 366–374.
- [85] Tripathi M, Sahu J N, Ganesan P, et al. Effect of microwave frequency on dielectric properties of oil palm shell (OPS) and OPS char synthesized by microwave pyrolysis of OPS[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, 112: 306–312.
- [86] Li K Q, Chen J, Chen G, et al. Microwave dielectric properties and thermochemical characteristics of the mixtures of walnut shell and manganese ore[J]. *Biore-source Technology*, 2019, 286: 121381.
- [87] Salema A A, Ani F N, Mouris J, et al. Microwave dielectric properties of Malaysian palm oil and agricultural industrial biomass and biochar during pyrolysis process[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 166: 164–173.
- [88] Nizamuddin S, Mubarak N M, Tiripathi M, et al. Chemical, dielectric and structural characterization of optimized hydrochar produced from hydrothermal carbonization of palm shell[J]. *Fuel*, 2016, 163: 88–97.
- [89] Li J F, Zhang N, Zhao H T, et al. Cornstalk-derived macroporous carbon materials with enhanced microwave absorption[J/OL]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020[2020–10–19]. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04571-5>.
- [90] Mathiarasu A, Pugazhavadivu M. Studies on dielectric properties and microwave pyrolysis of karanja seed[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021(3): 1–11.

## Progress in microwave pyrolysis of biomass for gas production

Ji Ke<sup>1,2</sup>, WANG Xinzhu<sup>1,2\*</sup>, GUO Jianxiang<sup>1,2\*</sup>, BI Xuejun<sup>1</sup>, LIU Bingbing<sup>1</sup>, SUN Jinfei<sup>1,2</sup>, LI Wenzhuo<sup>1,2</sup>, LIU Yimin<sup>3</sup>

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China
2. Shandong Key Laboratory of Thermal Utilization and Energy Saving Equipment Technology, Qingdao 266033, China
3. National Research Center for Building Engineering Technology, Beijing 100120, China

**Abstract** As one of the leading technologies in the field of the biomass thermochemical treatment, the biomass microwave pyrolysis enjoys the advantages of fast reaction rate, easy control, safety and no pollution. However, there are some problems in the gas production, such as low yield and low calorific value, which seriously restricts the comprehensive and efficient utilization of the biomass energy. In this paper, the principle of the microwave-assisted pyrolysis is introduced. From the latest researches at home and abroad, four aspects of the microwave-assisted pyrolysis technology are highlighted: improving the gas production yield and the calorific value, effectively removing the tar, inhibiting the pollutant generation and reducing the system energy consumption. On this basis, the limitations of the tar model compounds and the problems in the tar conversion and removal are reviewed in detail. In view of the above problems, some scientific and reasonable suggestions are given. Combined with the development trend of the microwave pyrolysis gas production technology, the main development directions based on the future industrial applications such as accelerating the transformation from the theoretical and experimental research to the industrial application research are put forward.

**Keywords** biomass microwave pyrolysis; syngas yield; tar; pollutant; system energy consumption ●



(责任编辑 王志敏)