

生物质气化过程焦油裂解脱除技术

姚锡文, 刘清华, 周浩东, 许开立
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了明晰近年来生物质气化焦油裂解脱除技术的研究现状, 针对生物质气化过程中焦油的产生机理及其热化学脱除等问题, 采用文献研究、归纳总结和对比分析等方法对不同生物质气化炉气化技术及控制焦油原始排放方面的特点等进行了综述研究, 分析了焦油热裂解脱除技术和催化裂解技术的发展, 对比分析了不同焦油裂解催化剂的优缺点, 指明了目前催化剂发展的主要方向, 并指出将焦油催化裂解和物理脱除等方法集成到一起, 如焦油催化裂解、重整、气液分离、电捕焦油等, 是实现生物质气化工艺优化的一条有效途径。

关键词: 生物质气化; 焦油; 热裂解; 催化裂解; 燃气净化

中图分类号: TK 6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2024)06-0890-07

Tar Cracking Removal Technology in Biomass Gasification Process

YAO Xi-wen, LIU Qing-hua, ZHOU Hao-dong, XU Kai-li

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, E-mail: kaili_xu@aliyun.com)

Abstract: In order to grasp the research status and development of tar cracking technology during biomass gasification in recent years and aim at the production mechanism and thermochemical removal of tar during biomass gasification process, this study reviewed the characteristics of the gasification technology of different biomass gasifiers together with the characteristics of controlling the original emission of tar by means of literature research, summary and comparative analysis. The development of tar thermal cracking and catalytic cracking technology was analyzed, and the advantages and disadvantages of different tar cracking catalysts were compared and analyzed. The main direction of catalyst development was pointed out. The integration of tar catalytic cracking and physical removal (such as tar catalytic cracking, reforming, gas-liquid separation and electric tar capture) would be an effective approach to optimize the biomass gasification process.

Key words: biomass gasification; tar; thermal cracking; catalytic cracking; syngas purification

生物质能是地球上唯一能在其生长过程中以化学键形式储存太阳能的资源, 这种储存的能量可以通过生物质的热化学转化来利用。气化是生物质能利用的关键技术, 生物质气化是以空气、氧气或水蒸气等作为气化剂, 在高温下将生物质转化为燃气的过程。生物质气化主要包含干燥、热解、氧化和还原等过程, 生成含 CO, H₂, CH₄

等可燃气体的合成气。从生物质气化的应用现状来看, 生物质气化燃气在净化方面仍面临着许多问题, 在气化过程中不可避免地产生焦油、颗粒物和有毒气体等杂质, 在后续应用中造成严重问题, 其中焦油脱除是该技术面临的最大挑战之一^[1]。焦油的成分十分复杂, 主要是由多环芳烃以及苯的衍生物等组成, 气化过程中焦油产物所含

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004055); 辽宁省自然科学基金资助项目(2021-MS-103)。

作者简介: 姚锡文(1987-), 男, 山东五莲人, 东北大学副教授, 博士生导师; 许开立(1965-), 男, 山东聊城人, 东北大学教授, 博士生导师。

的能量通常占气体产物总能量的5%~15%^[2]。

不同生物质燃气应用对燃气的质量要求见表1,由此可见生物质燃气必须经高度净化后才能应用。目前,工业上处理焦油的方法可分为物理法和热化学法两大类。物理法包括水或油洗法(湿法)、过滤法(干法),常用的设备有旋风分离器、喷淋净化器、袋式除尘器、文丘里洗涤器、静电除尘器等,主要是将焦油从生物质粗燃气中物理去除,并不能将焦油本身的能量加以利用,且会造成二次污染^[3]。

表1 不同应用对燃气的质量要求

杂质	单位	内燃机	燃气轮机
颗粒物	mg/m ³	<50	<30
粒度	μm	<10	<5
焦油	mg/m ³	<100	<5
碱金属	mg/m ³	—	<0.24

焦油热化学转化通常包括焦油的热裂解和催化裂解,其主要原理是在高温或含有催化剂的条件下,通过一系列复杂的化学反应,使大分子的焦油成分转化为小分子可燃气体。在生物质气化过程中增设焦油裂解工艺,将焦油高温裂解或催化裂解为可燃气体,是焦油脱除的有效技术手段,不仅比物理法去除焦油具有更优越的性能^[4],而且避免了物理法去除焦油时所产生的二次污染。针对生物质气化过程中焦油的产生及其热化学脱除等核心问题,本文首先对目前生物质气化技术的发展情况以及焦油分类等内容进行介绍,然后对焦油的热化学脱除法进行综述研究,重点对焦油热裂解和催化裂解脱除技术的发展现状及存在的问题展开了探讨,并指明了寻找和使用廉价、高效、选择性强的催化剂以及提高现有气化反应催化剂的催化效率,是今后热化学法脱除生物质气化焦油的研究方向及发展趋势。

1 生物质气化技术及焦油产生

1.1 生物质气化技术

目前,在生物质气化过程中,最常用的气化装置有固定床气化炉、流化床气化炉和气流床气化炉,此外还有回转窑气化炉和等离子体气化炉等。固定床气化炉主要有上吸式和下吸式两种,如图1所示^[5]。在上吸式气化炉中,生物质原料相对于气化剂向下移动,产生的燃气向上移动,并

从上部排出(逆流);而在下吸式气化炉中,生物质原料和气化剂的流动方向相同,都是由上向下移动,燃气从下部排出(顺流)。固定床气化炉的单机容量通常较小,一般每小时处理生物质2.5 t以内,产气量5 000 m³/h以下。与上吸式气化炉相比,下吸式气化炉适用于20~200 kW规模,产生的燃气中焦油含量较低,而上吸式气化炉适用规模可达250 kW,但是产生的燃气中焦油和灰分的含量较高,燃气在进入设备之前必须经过气体净化。

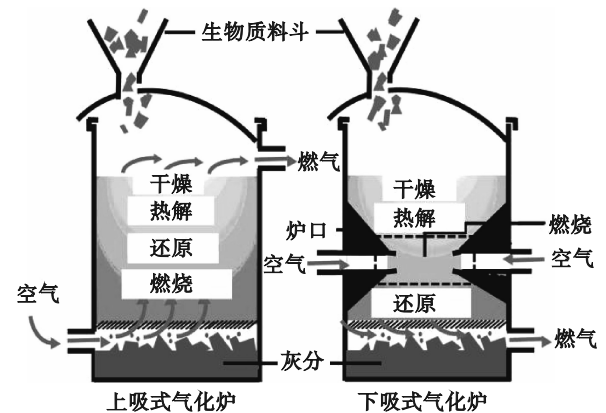


图1 上吸式气化炉和下吸式气化炉

Fig. 1 Schematic of updraft and downdraft fixed bed gasifiers

与固定床相比,流化床中发生的气化反应与固定床基本是一样的,但流化床和气流床气化炉可以促使固体生物质和气化剂充分接触,提高了反应速率和转化效率^[6],而且流化床适用于大规模生产(≥ 1 MW)。鼓泡流化床(图2a)、循环流化床(图2b)和双流化床气化炉(图3)是流化床气化炉的3种主要形式。鼓泡流化床的气体流速较低,气化反应发生在鼓泡流化状态的气化炉。由于气流和气泡的上升作用,床内颗粒在垂直方向湍动剧烈,而水平方向湍动较慢,这对入炉的生物质原料分散不利,影响床内燃料的均匀分布,大容量的气化炉可以考虑多使用均匀的颗粒燃料。循环流化床气化炉具有气流速率大(4~7 m/s)、固体颗粒高倍率循环的特点。鼓泡流化床和循环流化床气化炉示意图分别如图2a和图2b所示^[5]。鼓泡流化床燃气中焦油含量低,但燃气的温度较高,飞灰中含碳量高,而与鼓泡流化床相比,循环流化床燃气中具有中等含量的焦油,而且通常存在腐蚀和磨损严重等问题。双流化床气化炉的工艺原理如图3所示,其明显优势是通过流化床的强大运输能力可以使生物质颗粒在2个炉膛内传输,整个气化系统不使用昂贵的氧气,仅用空气

鼓风燃烧,即可获得高品质的生物质燃气.与循环流化床相比,其燃气中同样含有中等含量的焦油,使用前必须进行气体净化^[7].

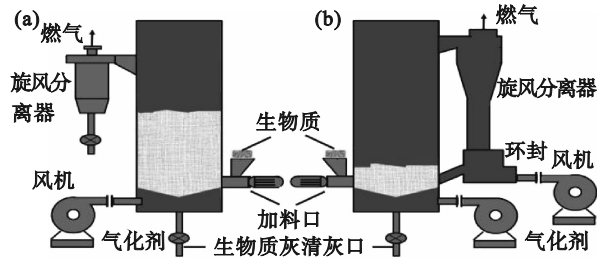


图2 鼓泡流化床和循环流化床气化炉

Fig. 2 Bubbling and circulating fluidized bed gasifiers

(a)—鼓泡流化床; (b)—循环流化床.

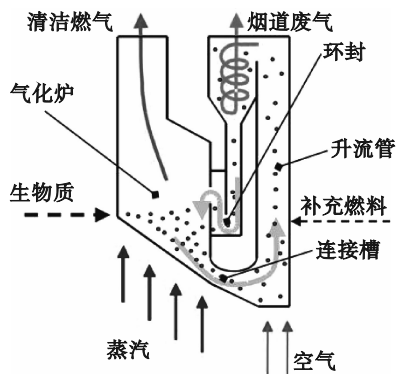


图3 双流化床气化炉的工艺原理

Fig. 3 Schematic of dual fluidized bed gasifier

相对于固定床和流化床而言,气流床反应器结构较简单,需要的炉膛容积小,气化效率较高,燃气中基本不含焦油.但是其常在 $1\ 300\sim 1\ 500\ ^\circ\text{C}$ 高温下工作,使得反应器出口处的燃气温度比固定床和流化床气化炉高很多,这就需要更大的换热面积来进一步回收燃气产生的余热,否则容易造成较大热损失,而换热器表面易被高温燃气中的飞灰熔融黏结,发生结渣现象^[8].

等离子体气化技术是近年来兴起的一种气化技术.等离子体是一种高温电离气流,由放电产生,通常用“电弧”表示.等离子体中含有大量的高温自由基、粒子可以降低化学反应过程的活化能,显著促进化学反应的进行,使大分子的有机物分解成小分子可燃气体.其气化所需的温度较高,最高可达 $10\ 000\ ^\circ\text{C}$,温度上升取决于氧化剂(空气/氧气/水蒸气)、能量流和提供等离子体的条件,而在没有氧化剂的情况下,等离子体气化过程类似于更高温下的热解过程.相比于传统的固定床或流化床气化技术,等离子体气化因

其具有较高的反应温度而使得反应原料的选取具有更高的灵活性,同时物料的热分解反应也更加彻底.相比传统气化技术,等离子体气化具有无需原料预处理、低污染物排放、反应迅速等优势,而与常见的焦油脱除方法相比,等离子体气化技术能大幅减少焦油产生^[9-10].等离子体法在裂解焦油方面显示了优异的性能,但在能耗及稳定性上仍存在一定缺点,例如等离子体的成本高、脉冲电源寿命短、整体工艺能耗高.

1.2 焦油的产生及分类

焦油在燃气净化过程中既有气态形式,又有液态形式,油洗法和炭吸附法对于焦油的去除效果较好.气化焦油主要是在生物质热解和碳化阶段通过一系列复杂的氢键结合、酸碱络合等化学反应而生成的.燃气中焦油的含量随着原料特性、气化条件、气化炉类型等因素的变化而改变,因此在对焦油进行处理时需针对具体组成加以分析^[11].焦油中各类化合物的特性和分类见表2^[8].Anis等提出5类焦油对焦油的露点影响不同,其中,第2类、第3类和第5类焦油的凝结是堵塞发动机和涡轮机的主要原因^[1].因此,在焦油脱除过程中,应当优先寻找可有效脱除第2类、第3类和第5类焦油的方法.常用的焦油脱除方法主要是物理脱除法和热化学转化法.物理脱除法主要是基于炉外脱除考虑,通常包含过滤器、洗涤器或静电器等.而热化学转化法通常是指在气化炉内进行焦油脱除的方法,主要包括热裂解和催化裂解法.热裂解法比较简单,其反应温度通常需要达到 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以上,使焦油发生热裂解转化为小分子气体或其他成分,而催化裂解与石油催化裂解类似,是在生物质气化过程中通过加入催化剂,降低大分子焦油成分裂解所需的活化能,进而实现低温条件下($700\sim 900\ ^\circ\text{C}$)较高的焦油催化转化效率^[10].

2 生物质气化焦油裂解技术

2.1 焦油的热裂解脱除技术

热裂解和催化裂解是生物质气化过程中最主要的热化学脱焦法.Brandt等^[4]利用上吸式气化炉对焦油热裂解开展了一系列试验研究,结果表明当停留时间为 $0.5\ \text{s}$ 时,使燃气中焦油质量浓度降至 $12\ \text{mg}/\text{m}^3$ 所需的温度约为 $1\ 290\ ^\circ\text{C}$,而要达到这样高的反应温度,必将耗用大量的空气,造成燃气中氮气含量的升高.因此,对于焦油热裂解而言,虽然较高的氧浓度有效降低了粗燃气

中的焦油含量,但是由于减少了燃气中可燃气体含量,也降低了燃气热值. Asadullah 等^[12]表明在焦油热裂解较稳定的运行工况下,焦油质量浓度

小于 50 mg/m³时,燃气中 CO, H₂, CH₄ 和 CO₂ 等组分的体积分数分别为 20%~26%, 10%~14%, 0.5%~2.5% 和 10%~14%, 其热值为 4.47~5.72 MJ/m³.

表2 焦油的分类及特性

Table 2 Tar type classification and characterization

类别	名称	特性	特征化合物
1	气相色谱不能检出	重质焦油混合物	无
2	杂环芳烃	高水溶性	甲酚、吡啶、喹啉、苯酚、二苯并苯酚、异喹啉
3	轻芳香族(1环)	不容易凝结	甲苯、二甲苯、苯乙烯、乙苯
4	轻环芳烃(2~3环)	2和3环化合物;低浓度时在低温下可凝结	茚、萘、甲基萘、联苯、萘、芴、菲、蒽
5	重环芳烃(4~7环)	>3环的化合物;可在高温下凝结	氟蒽、芘、蒽、二萘嵌苯、蒹

Nunnally 等^[13]通过模拟研究发现高温和足够的停留时间可以使苯、甲苯和萘发生充分的热裂解,但是要在有限的停留时间内获得显著的焦油裂解效果,需要保证气化温度达到 1 250 °C,但是在该温度下进行热分解,具有成本高、颗粒易团聚等缺点. 因此,这表明传统的热裂解方法并不是焦油脱除和转变的理想方法. Bridgwater 等^[14]研究结果表明生物质产生的焦油仅通过热处理很难分解,建议以下的替代方案,以确保焦油的有效分解:①增加停留时间;②增加与独立热源(加热表面)的直接热接触,但是这样会降低整体气化效率;③在氧化反应器中添加空气或氧气促进部分氧化,但是当使用纯氧作为添加剂时,会使燃气中二氧化碳的含量增加,降低气化效率,增加了成本. 江俊飞等^[15]和林娜等^[16]研究了生物质气化焦油和飞灰杂质在陶瓷过滤器上的氧化反应,在考虑燃气爆炸极限的情况下(生物质燃气中的氧体积分数低于 8.5% 时不会爆炸)进行试验,结果表明在高温燃气过滤过程中适当添加 2% 的氧气可以有效促进焦油和飞灰颗粒的临氧燃烧,进而降低飞灰和焦油含量,有助于解决粗燃气过滤的过滤介质堵塞问题.

2.2 焦油的催化裂解脱除技术

目前,催化裂解法是焦油热转化较为经济有效的方法之一,焦油催化裂解的路线主要有两条:一是焦油催化裂解和气化反应在气化炉内同时完成;二是在气化炉后设置单独的焦油催化裂解器,气化和焦油裂解分开进行. 第一种方法中催化剂和生物质直接混合送入气化炉内,工艺较为简单,但是存在两大问题:①催化剂与生物质混合在一起共同气化,导致气化后的炭灰与催化剂混在一起,且飞灰粒度小、密度轻,不利于催化剂的分离与循环使用,实际气化炉内进行焦油催化裂解时多使用廉价的催化剂;②炉内温度分布

不均,持续维持焦油催化裂解所需的高于 800 °C 的反应温度较为困难^[17].

催化重整可以将焦油转化为额外的气体产物,因此被认为是一种很有前途的焦油脱除方法. 目前常用的催化剂主要包括纯碱、橄榄石、黏土矿、白云石、铁矿石、炭粒及碱金属基、镍基和碳基催化剂、活性氧化铝等^[18]. 刘世宇等^[19]提出了一种生物质燃气强化重整提质工艺,并应用 HSC Chemistry 软件对该工艺进行了热力学分析,研究结果表明经过强化重整提质后生物质燃气中的焦油组分可全部裂解,而且随着吸附剂 CaO 的加入,生物质燃气中 H₂ 的浓度可显著提高. Corella 等^[20]对比了在生物质气化炉中煅烧白云石、天然橄榄石和烧结橄榄石的催化活性,结果表明采用白云石产生焦油的含量约为天然橄榄石产生焦油含量的 60%,而烧结橄榄石由于失去了多孔结构,导致其失活. Sutton 等^[21]研究表明碳沉积引起的失活是白云石催化剂面临的一个主要问题,但在气化过程中使用较多的蒸汽是保持这些催化剂活性的有效方法. Miyazawa 等^[22]研究了镍基催化剂对木材热解所产生焦油的部分氧化和蒸汽重整的催化性能,并提出了流化床反应器中生物质焦油部分氧化模型,如图 4 所示,杉木生物质热解产生的焦油由底部通过分配器供给,氧气通过位于催化床底部的细管引入,需要说明的是,所引入的氧含量远远低于杉木和焦油完全燃烧所需的氧含量,因此,氧气主要存在于催化床底部,而顶部含量较少,几乎没有. 而在部分氧气存在的情况下,镍金属很容易氧化成 NiO,这就催化了焦油的临氧燃烧反应. 另一方面,在顶部缺氧区域,镍基催化剂可以进一步催化焦油重整.

Peng 等^[23]对比分析了生物质与煤共同气化过程中不同碱金属催化剂(NaHCO₃, KHCO₃ 和

K₂CO₃等)对催化裂解脱除焦油的作用机制,结果表明 K₂CO₃的催化效果优于 NaHCO₃和 KHCO₃. Noichi 等^[24]指出了碱金属催化剂的缺点主要是由于其熔点较低,在催化反应期间易挥发,容易与 SiO₂反应形成硅酸盐,留下黏性沉积物并在高温下引起团聚. Lasa 等^[25]指出碳基催化剂的主要缺点是颗粒团聚易造成催化剂失活. 近年来,催化过滤技术因其具有较好的脱焦效果而受到诸多学者的广泛关注. 例如, Diego 等^[26]、Hackel 等^[27]和 Nacken 等^[28]分别提出了3种不同的催化过滤方法:①在陶瓷过滤器生产过程中将催化剂成分加入到陶瓷颗粒与黏合剂的混合物中;②在陶瓷过滤器上加装具有催化剂成分的多孔滤管,使固定床气化与催化过滤融为一体;③在陶瓷过滤器的多孔载体上涂装催化层. 以上催化过滤技术主要是在实验室研究,尚缺乏工业实例. 综上所述可知,对于催化气化而言,提高催化剂的催化活性、稳定性、抗积炭性及可再生性等性能是非常必要的. 不同催化剂的优缺点见表3. 在生物质气化过程中,较理想的催化剂应当具备以下特征:

- ①在 600~900 °C 之间对焦油裂解的催化作用具有良好的活性和效率;
- ②以制氢为目标时,甲烷转化的反应活性高;
- ③抗积炭性和抗 H₂S 中毒性好;
- ④易再生;
- ⑤耐磨性好;
- ⑥成本低;
- ⑦无环境毒性.

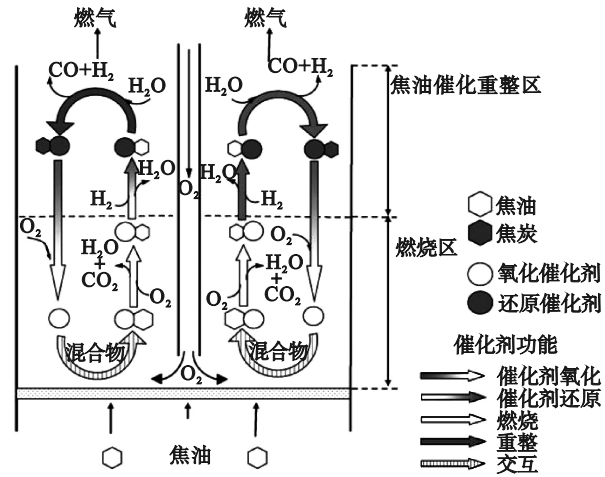


图4 流化床反应器中生物质焦油部分氧化模型
Fig. 4 A model scheme of partial oxidation of tar from the biomass in a fluidized bed reactor

表3 不同催化剂脱除焦油的优缺点

Table 3 Summary of advantages and disadvantages of various catalyst for tar removal

催化剂名称	优点	缺点
纯碱	1. 廉价且原料丰富 2. 焦油转化率较高,白云石可达95% 3. 可用作价格昂贵的焦油脱除的保护床	易碎物料,流化床腐蚀快
橄榄石	1. 廉价 2. 耐磨性良好	催化活性低于白云石
黏土矿物	1. 价格便宜,原料丰富 2. 较少的废物处理问题	1. 催化活性低于白云石 2. 大多数天然黏土不支持焦油脱除所需的高温(800~850 °C),高温下黏土失去孔隙结构
铁矿石	廉价且原料丰富	1. 在没有氢的情况下迅速失活 2. 催化活性低于白云石
炭颗粒	1. 廉价且原料丰富 2. 可持续(气化炉内产生) 3. 与白云石相比,焦油转化率高 4. 中性或弱碱性质	1. 气化反应消耗部分炭 2. 性质不固定,取决于生物质类型和工艺条件
流动裂解催化剂	1. 相对廉价,但比上述催化剂价格贵 2. 其应用具有更多的经验	1. 易造成焦炭快速失活 2. 催化活性低于白云石
碱金属基	1. 可在气化炉中生产 2. 减少碱金属造成的飞灰问题	1. 颗粒在高温下团聚 2. 催化活性低于白云石
活性氧化铝	与白云石相比具有较高的焦油转化率	易造成焦炭快速失活
过渡金属基	1. 焦油在900 °C内可以完全脱除 2. 提高CO ₂ 和H ₂ 的产率 3. 具有更高的焦油重整活性(镍基催化剂的活性是白云石的8~10倍)	1. 容易失活 2. 价格昂贵 3. 容易再生

2.3 催化剂分类及应用时存在的问题

通过大量试验证明,催化剂的加入可以显著降低生物质燃气中焦油的含量,增加燃气产量。Anis等^[1]将生物质气化催化剂分为6类,包括镍基催化剂、非镍金属催化剂、碱金属催化剂、碱性催化剂、酸性催化剂、活性炭催化剂。其中碱性催化剂主要包括除碱金属外的碱土金属氧化物(MgO, CaO等)、天然矿石(白云石、橄榄石等)和一些黏土矿物等;酸性催化剂主要包括沸石、硅铝等。碱性催化剂和酸性催化剂虽然提高了燃气的品质,但同时也增加了气化后剩余灰分的含量,并因结焦而迅速失活。活性炭作为一种较为便宜的催化剂,在气化炉内可以自然产生,但存在的问题是容易结焦,造成气孔堵塞。非镍金属催化剂尤其是铈基催化剂是一种很有发展前景的催化剂,但其价格较昂贵。在所有催化剂中,镍基催化剂是目前将焦油转化为燃料气体较为有效的催化剂。目前几乎所有的催化剂都存在长时间使用失活的现象。

催化剂失活的原因主要在于催化气化的速度低于积碳沉积的速度,从而导致了催化剂的失活^[29]。针对催化剂的不足之处,研究人员可以从提高催化效率、提高可再生能力、确定催化剂全生命周期等方面着手研究。催化效率的提高,一方面可以通过寻找新的催化剂实现,另一方面可以同时改进现有催化剂制备方式并叠加多种催化剂,提高现有催化剂的催化效率,将镍在橄榄石、白云石、沸石等催化剂上浸渍,也可以提高催化效率,且成本低廉;而目前的新型催化剂有:碳基纳米催化剂、沸石基纳米催化剂等,这些新型催化剂主要通过以某一种催化剂为载体,加入其他类型的催化剂,提高其催化效率。该种类型的催化剂克服了单一催化剂在选择性方面的不足,且新加入的催化剂以纳米颗粒为主,不但具备更大的比表面积,而且增加了更多的活性点位,因此比原催化剂催化效率更高,是目前的主要研究热点领域之一。

3 结 论

1) 本文对目前生物质气化过程中固定床、流化床、气流床和等离子体气化炉等气化技术及其控制焦油原始排放方面的特点进行了对比,并对焦油高温热裂解和催化裂解技术进行了研究。目前催化裂解法以及新兴的等离子体法因其能够充分利用焦油中的能量而受到广泛关注,催化裂

解及等离子体法可以将焦油大分子转化为H₂, CO, CH₄等小分子可燃气,提高碳转化率及气化效率。

2) 不同焦油裂解催化剂具有不同的优缺点,在实际中应综合考虑催化剂成本、催化效率、热稳定性及耐磨性等因素,以选用性价比较高的催化剂来满足生产需要,较为理想的催化剂应具备良好的催化活性、抗积炭性和抗中毒性以及具备易再生、耐磨性好、成本低、无环境毒性等特征。

3) 同时将多种功能集成到气化炉中,如催化焦油裂解/重整、飞灰和其他污染物的消除等,是实现生物质气化工艺强化的一条有效途径。目前这些焦油裂解/重整技术大多还不成熟,为了实现生物质燃气的高效净化,开发新的催化剂和改进现有催化剂是提高生物质催化气化效率的有效途径。

参考文献:

- [1] Anis S, Zainal Z A. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(5): 2355-2377.
- [2] 尤占平, 由世俊, 李宪莉, 等. 生物质炭催化裂解焦油的性能研究 [J]. *可再生能源*, 2011, 29(3): 39-42. (You Zhan-ping, You Shi-jun, Li Xian-li, et al. Study on biomass char on catalytic pyrolysis performance of tar [J]. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(3): 39-42.)
- [3] 李乐豪, 闻光东, 杨启炜, 等. 生物质焦油处理方法研究进展 [J]. *化工进展*, 2017, 36(6): 2407-2416. (Li Le-hao, Wen Guang-dong, Yang Qi-wei, et al. Advance in the treatment methods of biomass tar [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(6): 2407-2416.)
- [4] Brandt P, Henriksen U. Decomposition of tar in pyrolysis gas by partial oxidation and thermal cracking: part 2 [J]. *Biomass for Energy and Industry*, 1998: 1616-1618.
- [5] Sikarwar V S, Zhao M, Fennell P S, et al. Progress in biofuel production from gasification [J]. *Progress Energy in Combustion Science*, 2017, 61: 189-248.
- [6] 李九如, 李想, 陈巨辉, 等. 生物质气化技术进展 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2017, 22(3): 137-140. (Li Jiu-ru, Li Xiang, Chen Ju-hui, et al. Progress on technology of biomass gasification [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2017, 22(3): 137-140.)
- [7] Richardson Y, Blin J, Julbe A. A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: catalytic strategies, process intensification and new concepts [J]. *Progress Energy in Combustion Science*, 2012, 38: 765-781.
- [8] Molino A, Chianese S, Musmarra D. Biomass gasification technology: the state of the art overview [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2016, 25: 10-25.
- [9] Chanthakett A, Arif M T, Khan M M K, et al. Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 291: 112661.

- [10] 姜建国,张卫杰,孙荣峰,等.生物质气化过程中焦油脱除技术研究进展[J].山东科学,2019,32(1):127-134.
(Jiang Jian-guo, Zhang Wei-jie, Sun Rong-feng, et al. Research progress on tar removal technology in biomass gasification process [J]. *Shandong Science*, 2019, 32 (1) : 127-134.)
- [11] Devi L, Ptasiniski K J, Janssen F J. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes[J]. *Biomass Bioenergy*, 2002, 24: 125-140.
- [12] Asadullah M. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: a comparative critical review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 118-132.
- [13] Nunnally T, Tsangaris A, Rabinovich A, et al. Gliding arc plasma oxidative steam reforming of a simulated syngas containing naphthalene and toluene [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(23): 11976-11989.
- [14] Bridgwater A V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation [J]. *Fuel*, 1995, 74 (5): 631-653.
- [15] 江俊飞,郎林,阴秀丽,等.生物质燃气中固体颗粒物的临氧燃烧研究[J].太阳能学报,2018,39(9):2432-2438.
(Jiang Jun-fei, Lang Lin, Yin Xiu-li, et al. Partial oxidation of solid particles from biomass gasification in atmosphere of flammable gas [J]. *Acta Energetica-Solaris Sinica*, 2018, 39 (9): 2432-2438.)
- [16] 林娜,郎林,刘华财,等.生物质气化燃气中固体颗粒物的恒温临氧热解机理研究[J].燃料化学学报,2018,46(3): 290-297.
(Lin Na, Lang Lin, Liu Hua-cai, et al. Isothermal partial oxidative pyrolysis mechanisms of solid particles from biomass gasification [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2018, 46(3): 290-297.)
- [17] Hu M, Laghari M, Cui B H, et al. Catalytic cracking of biomass tar over char supported nickel catalyst [J]. *Energy*, 2018, 145: 228-237.
- [18] Chan F L, Tanksale A. Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 428-438.
- [19] 刘世宇,吕竞一,郭锐,等.生物质合成气强化重整提质制取氢气的热力学分析[J].可再生能源,2021,39(8):995-1000.
(Liu Shi-yu, Lyu Jing-yi, Guo Rui, et al. Thermodynamic analysis on hydrogen production of biomass syngas enhanced reforming and refining [J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(8): 995-1000.)
- [20] Corella J, Toledo J M, Padilla R. Olivine or dolomite as in-bed additive in biomass gasification with air in a fluidized bed; which is better? [J]. *Energy Fuels*, 2004, 18: 713-720.
- [21] Sutton D, Kelleher B, Ross J R H. Review of literature on catalysts for biomass gasification [J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 73(3): 155-173.
- [22] Miyazawa T, Kimura T, Nishikawa J, et al. Catalytic performance of supported Ni catalysts in partial oxidation and steam reforming of tar derived from the pyrolysis of wood biomass [J]. *Catalysis Today*, 2006, 115 (1/2/3/4) : 254-262.
- [23] Peng W X, Ge S B, Ebadi A G, et al. Syngas production by catalytic co-gasification of coal-biomass blends in a circulating fluidized bed gasifier [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 1513-1517.
- [24] Noichi H, Uddin A, Sasaoka E. Steam reforming of naphthalene as model biomass tar over iron-aluminum and iron-zirconium oxide catalyst catalysts [J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(11): 1609-1616.
- [25] Lasa H, Salas E, Mazumder J, et al. Catalytic steam gasification of biomass: catalysts, thermodynamics and kinetics [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(9): 5404-5433.
- [26] Diego L F, Garcia-Labiano F, Gayan P, et al. Tar abatement for clean syngas production during biomass gasification in a dual fluidized bed [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 152: 116-123.
- [27] Hackel M, Schaub G, Nacken M, et al. Kinetics of reduction and oxidation reactions for application in catalytic gas-particle-filters [J]. *Powder Technology*, 2008, 180(1/2) : 239-244.
- [28] Nacken M, Ma L N, Heidenreich S, et al. Performance of a catalytically activated ceramic hot gas filter for catalytic tar removal from biomass gasification gas [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2009, 88(3/4): 292-298.
- [29] 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*, 2020, 298: 122263.