DOI：10.16056/j.2096-7705.2026.04.014

生物质气化炉技术研究进展与发展趋势

寇海群[1]，周丹[1]，周晨[1]，邹佳乐[2]，胡瑾[1]，徐梓凝[1]，江汝清[1,*]

（1. 豫章师范学院生态与环境学院，南昌 330103；

2. 南昌大学资源与环境学院，南昌 330031）

摘 要：为破解风能、太阳能间歇性供能短板，发挥生物质能可储存、可运输的优势，推动农林类生物质废弃物清洁资源化利用，助力我国“双碳”战略落地，本文采用文献调研对比分析手段，系统梳理生物质气化技术发展历程，对比固定床、流化床、气流床3类气化炉结构原理与运行特征，剖析工艺参数、原料属性对气化效果的影响，汇总气化多场景工程应用现状并研判现存技术瓶颈与演进方向。结果表明：固定床气化炉结构简单，气化效率60%～75%，燃气焦油产出较高，适合户用供热、分散式秸秆小规模处理；流化床气化传热传质充分，气化效率75%～85%，适配中大规模集中供热与气化发电；气流床运行温度可达1 200 ℃以上，气化效率85%～95%，焦油极低，更适用于大型多联产、煤-生物质共气化项目。空气气化燃气热值5～6 MJ/m^3，富氧气化可达10～18 MJ/m^3，水蒸气气化合成气中H_2体积分数可达30%～60%；当量比控制在0.25～0.35区间，气化效率可达70%～75%。国内已建成1 MW谷壳气化发电、4 MW气化-蒸汽联合循环发电、15万t/a绿色甲醇等示范工程，4 MW机组投资回收期5～7年；天津村镇案例显示，气化供热环境成本占总成本22.25%，优于直燃供热的35.41%。现阶段该技术普遍存在燃气焦油偏高问题，气流床还存在原料粉碎预处理能耗高、设备材质要求严苛等短板；行业正向大型规模化、多产物联产、智能精准调控方向迭代。综上，炉型、操作参数与原料条件共同决定气化综合性能，突破焦油脱除、系统放大难题，可进一步释放生物质气化在能源转型中的应用潜力。

关键词：生物质；气化炉；可再生能源；合成气；焦油处理

中图分类号：TK6 **文献标志码：**A **文章编号：**2096－7705（2026）04－0112－10

Research Progress and Development Trends of Biomass Gasification Furnace Technology

Kou Haiqun[1], Zhou Dan[1], Zhou Chen[1], Zou Jiale[2], Hu Jin[1], Xu Zining[1], Jiang Ruqing[1,*]

（1. School of Ecology and Environment, Yuzhang Normal University, Nanchang 330103, China;

2. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China）

Abstract: To overcome the shortcoming of intermittent energy supply of wind and solar energy, give full play to the advantages of biomass energy in storage and transportation, promote the clean and resource-oriented utilization of agricultural and forestry biomass wastes, and support China's carbon peaking and carbon neutrality goals, this paper reviews the development history of biomass gasification technology, compares structural principles and operating characteristics of

收稿日期：2026-06-01 **网络首发日期：**2026-10-09

基金项目：2022年江西省教育厅科学技术研究项目“秸秆资源化利用整体解决方案”（GJJ2202504）

第一作者：寇海群（1969—），男，副教授，本科，主要研究方向为生物质及生物质气化。E-mail：210507692@qq.com

*** 通信作者：**江汝清（1996—），女，讲师，博士，主要研究方向为固废低碳资源化及污染物控制。E-mail：2293812851@qq.com

引用格式：寇海群,周丹,周晨,等.生物质气化炉技术研究进展与发展趋势[J].能源研究与管理,2026,18(4):112–121.

fixed-bed, fluidized-bed and entrained-flow gasifiers, analyzes the influences of process parameters and feedstock properties on gasification performance, summarizes multi-scenario engineering applications, and identifies existing technical bottlenecks and evolution trends based on literature investigation and comparative analysis. The results show that, the fixed-bed gasifier features simple structure with gasification efficiency of 60%−75% and relatively high tar yield, which is suitable for small-scale domestic heating and scattered straw treatment. The fluidized-bed gasifier has sufficient heat-mass transfer with gasification efficiency of 75%−85%, matching medium-to-large-scale centralized heating and power generation. The entrained-flow gasifier operates above 1 200 ℃, achieves gasification efficiency of 85%−95% with extremely low tar output, and is more applicable for large-scale polygeneration and coal-biomass co-gasification. The calorific value of producer gas from air gasification is 5−6 MJ/m^3, while that from oxygen-enriched gasification reaches 10−18 MJ/m^3; the volume fraction of H_2 in syngas from steam gasification can reach 30%−60%. When the equivalence ratio is controlled within 0.25−0.35, gasification efficiency can reach 70%−75%. Demonstration projects including 1 MW rice-husk gasification power generation unit, 4 MW combined cycle power generation system and 150 kt/a green methanol plant have been constructed in China; the payback period of the 4 MW unit is 5−7 a. According to a village-scale case in Tianjin, the environmental cost ratio of biomass gasification heating accounts for 22.25% of total cost, lower than 35.41% of direct combustion heating. At present, excessive tar in product gas is a common bottleneck; entrained-flow gasification also suffers high pretreatment energy consumption and strict requirements for equipment materials. The technology is developing toward large-scale production, multi-product co-production and intelligent precise regulation. In conclusion, gasification performance is jointly determined by reactor type, operating parameters and feedstock conditions. Breaking through tar removal and system scale-up constraints will further promote the application of biomass gasification in national energy transition.

Keywords: biomass; gasifier; renewable energy; syngas; tar treatment

引言

在全球能源紧张与环境污染日益严峻的背景下，可再生能源的开发利用作为重要战略方向备受世界各国关注。生物质能作为储量最丰富的资源，是仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源，因其利用过程近零碳排放而重新受到重视[1-2]。生物质气化技术持续进步，可显著提升合成气品质并降低焦油含量，是支撑碳中和目标的关键技术路线。我国是农业大国，农林类生物质废弃物资源存量丰富，亟待实现资源化利用。在我国积极推动能源结构转型、大力发展可再生能源的大趋势下，生物质气化炉技术能将农林废弃物等生物质资源转化为可燃气体（如合成气），成为实现高效能源转化与低碳排放的重要途径[3]。目前，燃烧、热解和气化是生物质资源化利用的主要热化学转化方法[4]，是实现生物质资源高效利用的重要方式，所得合成气可用于发电、供热及化学品合成等。自20世纪70年代起，生物质气化技术逐步由简易固定床发展为高效流化床。围绕生物质热解、气化及耦合燃煤利用等方向，相关研究多聚焦适配工况、气化比影响因素、工艺参数优化及工程实际应用等方向，旨在提升技术可行性与工程落地价值[5-7]。

生物质气化因其碳减排与资源循环优势受到广泛关注，契合我国能源结构转型与双碳战略发展需求，成为可再生能源领域的研究重点。目前，工程中应用最典型的生物质气化反应器主要分为固定床、流化床和气流床3类，其中，气流床和流化床气化炉可在固体生物质和气体之间提供高效的相互作用，强化气固两相之间的接触混合、传热传质与动态交互作用，进而大幅加快炉内气化反应进程，提高转化率和反应速率[8]。Kumar等[9]梳理了全球主流生物质气化技术体系，明确固定床、流化床、气流床是现阶段工业化应用最广泛的三大炉型，并对比证实3类炉型在运行参数、转化效率、原料适配性上存在显著差异，该分类体系已成为国际上普遍认可的分类方式。相比之下，固定床气化炉更易于操作设计，适用于小规模、低处理量的气化系统[10]，然而通常具有较低的传热和传质速率，并容易发生焦炭和焦油沉积。总体而言，3类气化炉因结构形式、反应温度场、物料运动方式存在明显差异，对生物质原料的粒径大小、含水率、成型状态、灰分含量等进料条件均有着各不相同的适配要求，在原料预处理方式、进料输送形式上也需针对性匹配设计。

综上，本文系统梳理了生物质气化技术发展历程，对比固定床、流化床、气流床3类气化炉的结构原理与运行特征，剖析工艺参数、原料属性对气

化效果的影响，构建气化性能综合评价体系；汇总生物质气化在发电、供热、制氢及合成燃料领域多场景工程应用现状，研判当前燃气焦油偏高、气流床原料预处理能耗高及设备材质要求严苛等现存技术瓶颈，结合我国“双碳”战略需求，展望技术向大型规模化、多产物联产、智能精准调控方向的迭代路径，以期为生物质气化炉技术的基础研究、工艺优化与产业化落地提供参考依据。

1 生物质气化技术的基本原理

生物质气化技术是将生物质转化为高附加值的富H_2、CO和CH_4气体，为提高能源利用效率、降低化石能源依赖并减少碳排放提供了可行路径，共包括干燥、热解和气化3个阶段[11]。此外，气化装置是生物质气化过程中的关键组成部分，包括气化炉和辅助设备，气化炉作为气化技术的核心设备，为生物质气化反应提供场所，使炉内生物质原料与气化剂（一种或多种）发生反应得到合成气体、固态/液相产物，不同类型的气化炉适用范围各异[12]。

初始干燥阶段，生物质在室温至200 ℃的过程中逐渐失去水分；随后，200～600 ℃的热解阶段，分解产出质量分数约80%的挥发分和20%的焦炭；700～900 ℃的气化过程，是一种在温和条件下将焦炭和挥发分转化为高品质燃气的有效途径[13-15]。根据气化剂不同，主要分为空气气化、富氧气化和水蒸气气化，三者特性对比如表1所示。气化炉按床层特性分为固定床、流化床与气流床等，以适应不同原料与规模需求。

表1 不同气化剂特性对比

Table 1 Comparison of characteristics of different gasifying agents

气化剂类型	燃气热值/(MJ·m^{-3})	主要特点	经济性与系统复杂度
空气气化	5～6	技术成熟、应用广泛	经济性好、系统简单，燃气热值偏低
富氧气化	10～18	燃气热值高、焦油含量低	成本有所增加，综合品质更优
水蒸气气化	10～16	H_2体积分数高（30%～60%）	系统结构复杂，工艺调控难度大

2 不同类型气化炉的结构与性能

2.1 固定床气化炉

固定床气化炉作为最早发展的生物质气化装置，结构相对简单，具有适用于中小规模场合的优点。根据气流与物料运动方向可分为上吸式、下吸式与横吸式3类（图1），各自结构、运行特性与适用原料差异显著。

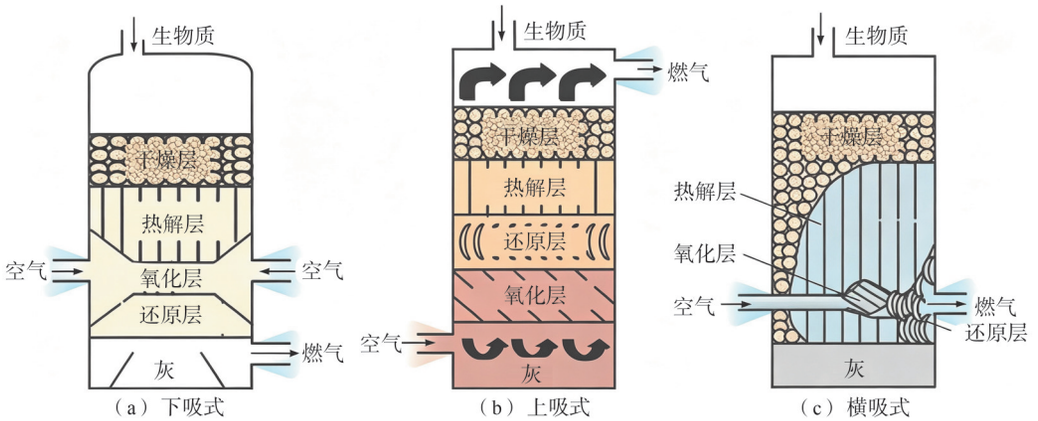


图1 固定床气化炉工作原理结构简图[20-22]

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of a fixed-bed gasifier [20-22]

上吸式固定床气化炉的特点是气体的流动方向与物料运动方向相反，热效率比其他固定床气化炉高[16]。杜海江等[17]设计的改进型上吸式气化炉通过设置锥形下料裙分隔气化室与储料室，并将出气口设于下料裙死角，结合自动供料系统，有效缓解了传统上吸式炉焦油含量高与热值偏低的问题。研究显示，优化后的上吸式气化炉气化效率可超过70%，适用于秸秆、木片等原料。

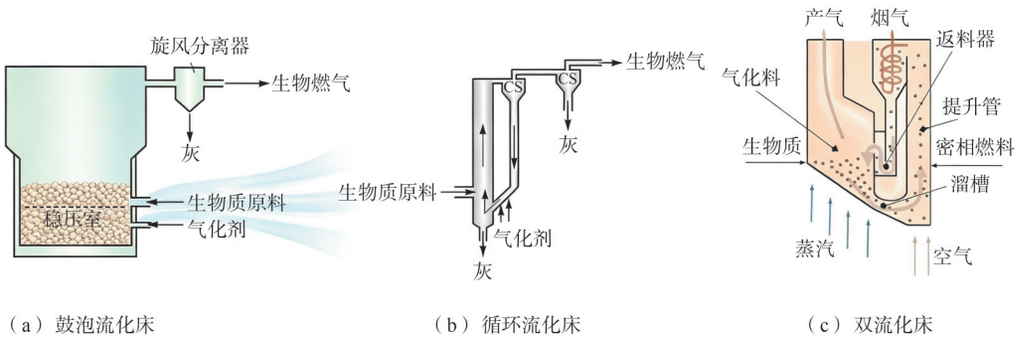
下吸式固定床气化炉的特征是气体和生物质物料混合向下流动，炉结构简单，运行比较可靠，适用于较干的大块物料或低灰分大块与少量粗糙颗粒的混合物料。下吸式生物质气化炉是一种应

用广泛的生物质气化装置，以其构造简洁、运行便利而受到众多研究者的重视。杨辉等[18]总结得出加料结构使用螺旋、气动、带式输送机可提高加料速度，供气系统采用多级送风、预热和进气喷嘴型式结构能提高气化炉温度并降低焦油含量，使用振动炉排、旋转炉排或往复炉排可有效防止架桥现象的出现，出灰结构采用螺旋和带式输送机可提高出灰速度。最后指出原料适用性广、可连续生产和具备高度的自动化是未来下吸式气化炉研究和发展的方向。

横吸式固定床气化炉的特点是空气由侧向供给，产出气体由侧向流出，横向通过燃烧气化区，主要用于木炭气化。该气化器的反应过程与其他固定床气化器相同，但其反应温度很高，容易使灰熔化造成结渣。因此，这种气化器一般选用灰分含量较低的生物质作为原料，如木炭和焦炭等。横吸式气化器的主要特点是有一个高温燃烧区，它通过一个单管进风喷嘴的高速集中鼓风实现，进风管需用水或空气来冷却。高温燃烧区温度可达2 000 ℃以上，其区域范围由进风喷嘴结构与送风风速共同决定，区间尺寸需控制在合理范围[19]。

2.2　流化床气化炉

流化床与固定床的气化反应机理大体一致，区别在于流化床无规整固定床层。目前，流化床主要包括鼓泡流化床、循环流化床、双流化床3种[23]，其工作原理结构简图如图2所示。



（a）鼓泡流化床　　（b）循环流化床　　（c）双流化床

图2　流化床气化炉工作原理结构简图[24-25]

Fig. 2　Schematic diagram of the working principle and structure of a fluidized bed gasifier [24-25]

3类流化床气化炉性能与适用场景各有差异：鼓泡流化床结构简易、成本低廉，适用于中小规模、燃气品质要求较低的工况；循环流化床碳转化率高、处理能力强，是大型气化发电、集中供热的主流设备；双流化床可制备中高热值合成气，多用于高端化工领域，但存在结构复杂、运行调控难度大的问题。相关研究指出，焦油生成是制约循环流化床气化技术商业化落地的核心瓶颈，催化后置气化技术可有效实现焦油转化，配套专用催化剂还能同步优化合成气组分，是当前流化床除焦的主流技术路线[26]。目前相关研究以气固两相流计算流体动力学（CFD）、仿真与冷态试验优化为重点，行业技术正朝着大型化、智能化、产物定向转化的方向演进。

鼓泡流化床作为重要的气固反应设备应用广泛，但床内稠密相与气泡相共存，气泡行为与颗粒运动使气固接触、传热传质过程复杂，采用颗粒轨道模型模拟气泡特征存在计算复杂、量大的问题，当前运算能力难以实现。因此，杨太阳等[27]基于拟流体模型结合自编程序，采用双流体模型与CFD软件模拟了鼓泡流化床气泡频率、大小及速度，成功复现其流动状态；结果表明气泡集中于离壁面区域、颗粒在壁面附近下降并形成涡旋，与试验吻合，可用于模拟气固流动、优化反应器设计，实现降本增效。

循环流化床（CFB）通过颗粒循环延长物料停留时间，可有效提升碳转化率与气化效率；当前在我国的生物质气化耦合燃煤发电的细分领域，主要采用10 MW级的循环流化床气化反应器，其出力可与规模化的燃煤机组容量相匹配。Gao等[28]以废弃木材为原料进行鼓泡流化床气化实验发现，合成气产率随温度升高而增加。李智梁[29]通过总结循环流化床的基本原理和应用方面得出循环流态化是一种高效、无气泡的气固接触技术，是流态化研究中备受关注的领域之一。

双流化床气化炉具备加热速率快、反应速度高、燃气热值大等优势，适配气化发电与气化液化，且气化强度大便于大型化与工业化；其系统循环量与炉内流动状态直接决定气化温度、燃气品质及气化效率。张萌[30]指出，采用与热态系统尺寸结构一致的透明冷态试验台开展实验十分必要，可全面检验

气化炉系统及关键部件性能，为热态运行提供基础数据，并据此完成了初步冷态实验研究。通过冷态流场可视化观测与流动参数标定，能够精准掌握双流化床内部颗粒循环、物料停留及气固耦合流动规律，为后续热态气化工况参数匹配、结构优化与稳定运行调控提供了可靠试验依据与理论支撑。

2.3 气流床气化炉

相比于固定床和流化床，气流床气化温度可达到1 200 ℃以上，该类气化炉适用于大规模处理，并具有碳转化率高和无焦油生成以及合成气品质好等优点[31]。实验研究已证实生物质气流床气化的可行性，关键技术包括生物质粉碎、输送及气化反应器设计。陆海峰等[32]通过研究表明，生物质气流床气化所得合成气热值可达约10 MJ/m^3，高于传统固定床与流化床技术，可用于替代天然气供热，兼具经济性与碳减排效益。将煤与生物质协同共气化，是提升资源利用率的有效手段。相关研究表明，气流床煤生物质共气化方案技术可靠、工况稳定、风险较低，既能减少碳排放与原料消耗，也可带来可观的经济效益[33]。但是，生物质气流床气化仍面临原料粉碎能耗高、预处理要求严格、需高温高压操作及设备材质要求高等挑战，限制了其在单一生物质气化中的应用，目前更适用于煤与生物质共气化或大型综合利用项目。3类生物质气化炉技术性能对比如表2所示。

表2 3类生物质气化炉技术性能对比

Table 2 Comparison of technical performance of three types of biomass gasifiers

气化炉类型	结构特点	适用规模	气化效率	焦油产量	典型适用场景
固定床	结构简单 床层稳定	中小规模	中等 （60%～75%）	较高	户用供热、小型气化； 分散式秸秆利用
流化床	气固混合充分 传热传质强	中大规模	较高 （75%～85%）	中等	集中供热、气化发电； 规模化生物质处理
气流床	高温超细粉进料 并流反应	大规模	高 （85%～95%）	极低/无焦油	大型多联产、制氢； 与煤共气化、工业热源

2.4 国内外生物质气化技术应用现状

国内外已建设多套生物质气化中试与商业化示范装置。芬兰VTT流化床气化平台属于海外基础性中试试验台架，侧重于原料适配、气化反应机理、燃气净化等基础工艺全链条探索，用于工艺机理验证；国内在气化工程化、规模化应用上技术成熟，现阶段项目以商业化示范工程为主，聚焦绿色甲醇制备、气化发电等工业化产出，已陆续落地流化床加压气化、生物质制绿色甲醇等示范项目。代表性中试、商业化装置信息归纳如表3。

表3 国内外代表性生物质气化中试及商业化装置

Table 3 Representative pilot and commercial biomass gasification plants in China and abroad

装置名称	研发/建设单位	气化炉类型	原料	核心工艺与流程特点	处理规模	应用方向
芬兰VTT流化床气化中试平台	芬兰VTT技术研究中心	循环流化床	林业生物质、农林废弃物	常压流化床，可完成原料适配、气化工艺、燃气净化全链条试验	150 kg/h进料量	工艺中试，发电、合成燃料技术验证
中国科学院广州能源所4 MW气化-蒸汽联合循环示范装置	中国科学院广州能源研究所	循环流化床	稻壳、秸秆等农林废弃物	空气气化，气化-余热锅炉-汽轮发电梯级利用	20 MW热输入	气化发电、生物质合成燃料技术研发验证
广东湛江5万t/a生物质制绿色甲醇示范工程	中国科学院工程热物理研究所	循环流化床	农林废弃物	生物质气化-合成气净化-甲醇合成，耦合直燃发电	5万t/a甲醇	绿色甲醇制备、发电联产
上海电气洮南加压流化床气化示范项目	上海电气	加压流化床	农林生物质成型料	纯氧加压气化，粗合成气有效气（$CO+H_2$）体积分数约70%	300 t/d生物质进料，年产5万t绿色甲醇	绿色甲醇制备，应用于航运燃料、化工领域

3 生物质气化的影响因素与性能评价

3.1 操作参数的影响

生物质气化过程中，当量比、气化温度、气化剂种类、气化压力是决定气化反应走向与产物分布的四大核心运行参数（见图3）。当量比调控体系氧化环境与反应温度，需要维持在合理区间保障气化效率；气化温度主要驱动焦油裂解，改变合成气有

效组分占比；气化剂种类从根本上决定燃气组分与热值水平；气化压力通过改变化学反应平衡，同时影响焦油产率、产气组分以及整套装置的设备配置规模。不同参数之间存在耦合效应，相同原料条件下，通过匹配差异化的参数组合，能够获得热值、组分特征完全不同的合成气。因此对多参数进行协同调控与优化，是实现生物质高效气化、定向制备目标合成气的关键。

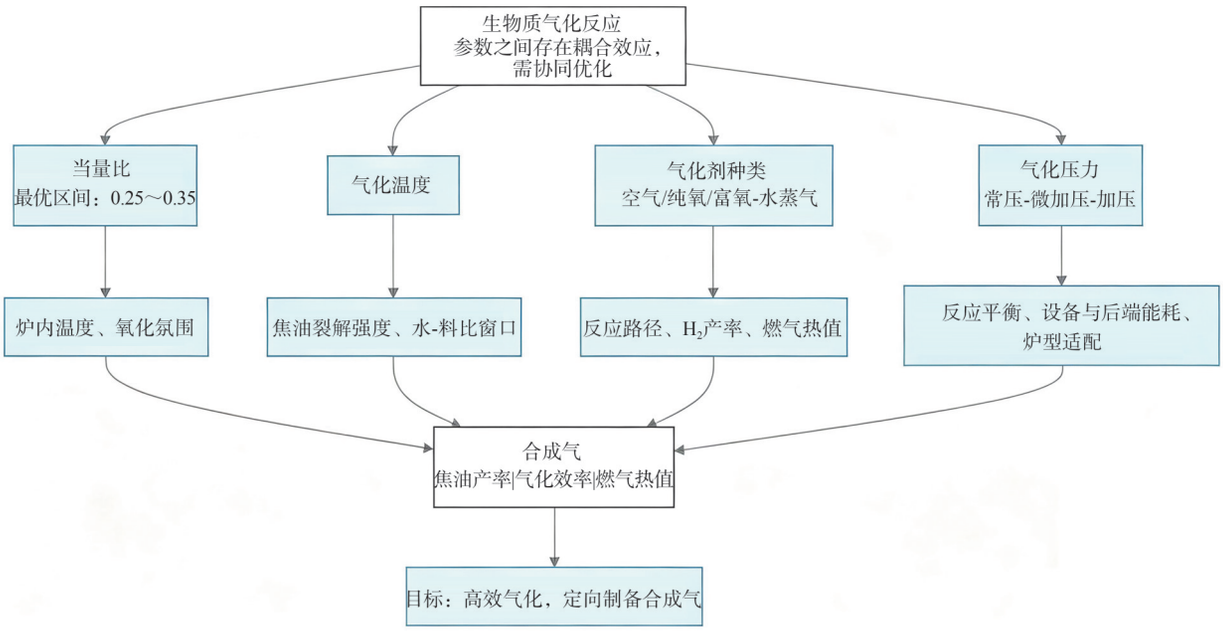


图3　生物质气化关键运行参数及其作用关系

Fig. 3　Key operating parameters of biomass gasification and their interactions

空气当量比定义为单位质量生物质气化实际通入空气量，与该质量生物质完全燃烧所需理论空气量的比值，是气化过程最核心的调控参数，直接耦合气化温度、燃气组分以及系统气化效率[34]。已有研究结果表明：当量比升高会加剧体系氧化放热，气化温度随之上升，促进焦油氧化裂解，焦油产率显著降低；但当量比过高时，体系内燃烧反应占比过度提升，大量可燃组分被消耗，会造成燃气热值与整体气化效率下降。综合现有试验结果，生物质气化普遍存在最优当量比区间0.25～0.35，该区间下系统气化效率可达70%～75%；当量比低于该范围易造成反应温度不足，焦油大量累积；高于该范围则燃气热值快速衰减。上述变化趋势可汇总至操作参数-气化性能关系图中，直观呈现当量比对气化效率、焦油产率、燃气热值的影响规律。

气化温度对热解程度、焦油裂解以及合成气组分具有决定性影响[35]。高温条件能够强化生物质大分子热解与焦油的二次裂解反应，提升产气中H_2、CO等有效合成气组分的占比；以水蒸气气化体系为例，800 ℃工况下，产气中H_2体积分数可以达到50%以上。同时气化温度会进一步耦合水蒸气-生物质质量比的最优操作窗口：温度偏低时，过高水蒸气投料会造成体系热量被大量消耗，抑制气化反应；温度充足条件下，适度提高水蒸气投料才能够发挥水蒸气重整制氢效果。因此水蒸气与生物质的质量比并非越高越好，需要结合气化温度选取适宜操作区间，以此兼顾气化效率与产气品质[36]，该耦合关系也可在绘图中予以体现。

气化剂种类是决定燃气品质的关键变量，不同气化剂对应完全差异化的产气特征。Salem等[37]基于下吸式固定床气化炉对比试验证实，空气、纯氧、水蒸气等气化剂会显著改变合成气热值、产物组分以及CO_2生成水平，气化剂选型需要与炉型结构互相匹配，以此实现气化效率与燃气品质同步提升。空气气化受大量N_2稀释影响，只能得到低热值燃气；纯氧气化规避N_2稀释效应，可产出中热值合成气；水蒸气气化侧重于水-碳重整反应，能够显著提升H_2产率；而富氧-水蒸气耦合气化可以整合氧气供热与水蒸气制氢两方面优势，可定向制备富氢合成气，更加适配后续化学品合成、液态燃料合成等应用场景。绘图中可分类标注不同气化剂对应的H_2占比、燃气热值区间。

气化压力同样对气化产物分布与工程设备选型起到重要调控作用。常压/低压气化工艺流程简单，反应器耐压要求低，但如果面向合成燃料制备，后续合成工段需要配置大功率加压压缩单元，能耗成本较高；提高气化压力能够推动甲烷化平衡正向移动，提升产气中CH_4体积分数，降低后端合成工序的压缩能耗，但压力升高会对部分焦油裂解反应产生抑制，带来焦油产率回升的问题，同时对反应器耐压密封、固体原料进料系统提出严苛的工程要求。不同气化炉型适配压力区间存在明显区别：流化床气化大多选择常压或者微加压工况；气流床气化则多采用加压操作模式。绘图可对比常压-加压条件下焦油产率、CH_4、H_2组分的变化趋势，同时备注不同炉型适配压力范围。

3.2 原料特性的影响

生物质原料自身属性是决定气化反应进程与产气品质的关键内因，原料品类、颗粒粒径、含水率与化学组分四大指标均会对整套气化过程形成显著调控作用。各类生物质物料物理性质差距较大，流化性能存在明显分化，直接改变物料在气化反应器内部的流化状态、传质传热效率与多相反应动力学行为。

不同农林生物质的有机组分与无机灰分构成差异明显：木质生物质木质素占比高，热解阶段极易生成大量焦油副产物，加重后续净化负荷；草本生物质钾、钠等碱金属元素富集，高温气化工况下易发生熔融团聚，诱发炉膛结渣、黏壁等运行故障。原料粒径同样存在适配区间：粒径偏大时颗粒内部传热传质受阻，气化反应深度不足、碳转化率偏低；粒径过细的粉末物料则抗气流携带能力弱，极易随燃气逸出炉膛造成物料损耗。3种主流气化炉对原料粒径的适配阈值区别清晰，要求宽松程度排序为：固定床＞流化床＞气流床，气流床对原料粉碎细度的管控标准最为严格。原料含水率是影响热平衡与燃气品质的重要参数，入炉物料水分过高时，水分蒸发汽化会大量吸收炉膛显热，降低反应体系温度，进而拉低合成气有效热值；针对高湿原生生物质，工业工况下通常配套预烘干预处理工序。而原料内高灰分、高碱金属、碱土金属组分，除加剧结渣风险外，还会增大排灰系统运行压力，甚至腐蚀炉衬、堵塞管路设备[38]。

除此之外，经挤压压块制成的成型生物质能够改善松散原料堆积状态，规整料层孔隙结构，稳定炉膛内部气流分布，有效提升气化稳定性与碳转化效率。工程实际运行中，需依据选用气化炉的结构特性与工艺参数，针对性配套粉碎、筛分、干燥等全套原料预处理工艺，匹配最优进料工况。

3.3 气化性能评价指标

综合操作参数、原料特性两大核心影响因素，生物质气化性能可通过燃气热值、焦油含量、碳转化率、气化效率、产气组分等指标进行综合评价。当量比、气化温度、气化剂类型直接决定炉内反应氛围、焦油裂解程度及产气品质；原料自身种类、粒径、含水率与化学组分则影响物料流化特性、反应稳定性及能量转化。工程应用中可通过优选原料预处理方式、调控当量比与气化温度、适配气化剂类型，实现各参数协同，在降低焦油产出、提升碳转化效率与气化效率的同时调控H_2、CO等有效产气组分，满足供热发电、制备液体燃料等不同工程应用需求。

4 生物质气化技术的应用领域

4.1 气化应用历史及其案例

欧洲是全球生物质气化商业项目最集中的区域，技术主要以木料、秸秆等农林生物质为原料，维美德循环流化床气化及高温净化工艺已实现多项目规模化应用，技术优势突出。我国生物质气化技术研发开始较早，中国科学院广州能源研究所于“九五”期间建成了1 MW的谷壳气化发电系统，“十一五”期间建成了百吨级生物质气化合成二甲醚的评价系统，“十四五”期间又建成了广西田东15万t/a生物质绿色甲醇示范项目。国电荆门电厂是国内第一个实现生物质气化耦合燃烧发电厂，其中生物质燃气发电能力约10.8 MW [39-40]。中国林业科学院林产化学工业研究所建立了5 MW农林生物质剩余物热解气化实验装置，并进行生物质燃气发电试验和研究示范及系统装置的推广应用，取得了良好经济效益和社会效益[24, 41]。我国近年来也落地多项标杆示范工程：湛江5万t/a生物质气化制绿色甲醇项目耦合直燃发电，成本较绿电制甲醇路线下降约30%；山西浮山生物质能源岛形成园区绿电与工业蒸汽联供模式。依托我国丰富廉价的农林废弃物资源、流化床装备国产化提速，加之中国核证自愿减排量（CCER）将农林生物质发电纳入碳核算带来碳收益加持，国内生物质气化正从技术示范向商业化盈利转型，经济与产业发展前景广阔。

燃气焦油脱除是生物质气化工程化必须配套的关键环节，主流分为物理净化与催化转化两大类技

术[42]。物理净化包含金属网/陶瓷滤芯过滤、水洗洗涤、静电捕集等，其中金属网过滤依靠多孔金属滤芯拦截燃气内焦油液滴与粉尘，设备结构简单，但滤芯易发生堵塞，需要配置反吹再生单元；水洗洗涤可高效脱除焦油，但会产生含焦油难降解废水，需要配套废水处理系统[43]。催化脱除属于化学转化方式，分为原位炉内催化与炉后异位催化，以镍基、白云石等为催化剂，在700～900 ℃条件下将重质焦油组分重整转化为H_2、CO等小分子合成气，既降低焦油含量，又可提升合成气有效组分占比，是目前高值化利用场景的主流技术路线[44]。

4.2 气化发电

生物质气化发电是生物质能利用的重要形式，通过气化-发电系统将固态生物质转化为电能。我国已开发出800 kW稻壳气化发电系统与4 MW生物质气化-蒸汽联合循环发电系统等多种规模技术。其中，以4 MW气化-蒸汽联合循环为代表的技术路线，凭借大规模的低成本废弃物原料、能量梯级利用带来的效率提升及高值副产品（如稻壳炭）的收益补充，在现行电价补贴下能实现稳定盈利，投资回收期通常在5～7年；而目前其利用率占总量不足1%，意味着未来原料成本将在很长一段时间内保持低位，经济性优势会随着规模扩大和碳交易市场完善而进一步增强。我国生物质资源丰富，每年生物质废弃物约50亿t，是石化能源消耗量的4倍左右，而目前将其作为能源利用的约占其总产量的0.76%，资源开发利用潜力巨大[45-46]。

4.3 气化供热

生物质气化供热包括工业热源供应与民用供暖2种形式。蔡杰[47]通过研究发现，相比传统固定床与流化床，生物质气流床气化所得合成气热值较高，可以替代天然气供热，兼具经济性与碳减排效益。生物质气化供热在环保性能与原料适应性上优势明显，已在区域集中供热中得到示范应用，以天津一村为例，直燃供热方案的环境成本占总成本的35.41%，而气化供热方案的环境成本只占总成本的22.25% [48]。

4.4 气化制H_2与合成燃料

生物质气化制氢是通过气化生成富H_2合成气，再经变换反应与气体分离提纯H_2。固体热载体催化气化生物质制氢工艺是一种有效方法，该工艺利用固体热载体（催化剂）实现生物质快速加热，在水蒸气与催化剂作用下进行气化，产生富H_2气体。研究表明，不论使用何种固体热载体，生物质气化均能显著提高H_2产率。生物质气化合成气还可用于制备二甲醚、液化石油气（LPG）、绿色甲醇等清洁燃料。生物质气化制备绿色甲醇是当前国内发展最快的合成燃料方向，工艺路线为：农林生物质经气化得到粗合成气，再通过净化、水煤气变换、甲醇合成工序产出绿色甲醇，部分项目进一步耦合风光电解制绿氢，调节合成气氢碳比，提升甲醇产率。国内已建成广东湛江5万t/a、吉林洮南5万t/a等生物质气化制绿色甲醇示范工程，该类路线生产成本相较生物质耦合风光绿电制甲醇路线下降约30%，产品可用于航运燃料、化工原料，为生物质高值化利用开辟新路径。中国科学院广州能源研究所开发了“合成气一步法合成LPG催化剂制备方法”与“合成气一步法合成二甲醚催化剂还原装置”等技术，并成功获授权专利，为生物质合成燃料产业化提供了支撑。

5 结论与展望

生物质气化技术是实现低品位固体生物质向高品位合成气燃料转化的重要热化学途径，可充分挖掘农林废弃物资源潜力，对拓展可再生能源利用渠道、助力我国碳减排与“双碳”战略实施具有重要现实意义。目前工业化应用的气化炉主要包含固定床、流化床、气流床3类。固定床气化炉结构简单、操作便捷，气化效率处于60%～75%区间，适合中小规模分散式供能场景，但普遍存在燃气焦油产出高、合成气热值偏低的问题；流化床气化炉传热传质条件优良，气化效率可达75%～85%，放大性能好，更适配大规模连续化运行，是集中供热、气化发电项目的主流装备，但其规模化落地仍受原料供应季节性波动、缺少完备成熟的系统放大准则制约；气流床气化炉反应温度高于1 200 ℃，气化效率可达85%～95%，焦油生成量极低，合成气品质优异，在大型多联产、煤-生物质共气化场景优势突出，不过该工艺存在原料粉碎预处理能耗高、设备材质要求严苛等现实短板，单独以生物质为原料大规模推广仍存在阻碍。

操作当量比、气化温度、气化剂类型等工艺参数，以及生物质原料粒径、含水率、化学组分共同决定气化系统综合性能，当量比在0.25～0.35范围内可获得较优气化效果；不同气化剂产出燃气品质差异显著，空气气化燃气热值仅5～6 MJ/m^3，富氧、水蒸气气化可分别实现中高热值产气与高体积分数H_2合成气制备。国内已建成1 MW谷壳气化发电、

4 MW气化-蒸汽联合循环发电、15万 t/a绿色甲醇等一批示范工程，验证了生物质气化在发电、供热、制氢及合成燃料领域的工程可行性，但焦油脱除、系统能效提升依旧是制约行业进一步商业化推广的共性难题。

面向未来，生物质气化技术将朝着高效清洁化与系统集成化方向迭代，重点发展方向主要包括：开发高效焦油催化裂解与净化技术，降低燃气焦油水平，提升合成气品质；拓宽原料适配范围，实现秸秆、林业残料等多元农林生物质废弃物协同处置；推进装置大型规模化建设，将气化单元与发电、制氢、合成燃料等高价值工艺耦合集成，提高系统整体能效与项目经济效益；完善多产物联产工艺体系，推动生物质全组分高值化利用；结合数值模拟、人工智能算法，构建气化过程智能精准调控体系，增强系统运行稳定性。综上，只有持续开展核心技术创新，逐一攻克焦油脱除、装备放大、原料预处理等关键瓶颈，同时配套完善产业政策支撑，生物质气化技术才能够在我国能源结构转型与碳中和推进过程中释放更大应用价值。

参考文献

[1] Anekwe I M S,Akpasi S O,Tetteh E K,et al.Progress in heterogeneous catalysis for renewable energy and petrochemical production from biomass[J].Fuel Processing Technology,2025,276:108267.

[2] Jonathan A E,Agbajor G K,David O O,et al. Determination and prediction of biogas production potential from selected biomasses as alternative renewable energy source in Sapele,Nigeria[J].Renewable Energy,2025,255:123802.

[3] Dang Han,Xu Runsheng,Zhang Jianliang,et al. Waste to energy: Gasification characteristics and conversion mechanism of biomass char in the novel steam explosion process for blast furnace injection[J].International Journal of Hydrogen Energy,2026,208:153251.

[4] Lu Xueqin,Sun Li,Li Yuhan,et al.Technical, economic, and environmental analysis of coal co-firing with biomass: A comparative study of gasification co-firing, torrefaction co-firing, and direct co-firing[J].Energy,2026,356:141194.

[5] 王保君,梅艳阳,侯艇.基于热重的烘焙生物质与废轮胎协同热解特性分析[J].能源研究与管理,2025,17(3):39−45.

[6] 高忠明,杨涛,刘俊,等.生物质气化合成气层流燃烧特性的模拟[J].能源研究与管理,2023,15(1):114−119.

[7] Liu Xuesong,Ding Lu,Yu Guangsuo,et al.Biomass and biochar pellet Gasification: A review of bridging feedstock heterogeneity, process parameters, and syngas quality[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2026,237:117032.

[8] Sanni S E,Oni B A,Okoro E E.Heterogeneous catalytic gasification of biomass to biofuels and bioproducts: A review[J].Korean Journal of Chemical Engineering,2024,41(4):965−999.

[9] Kumar S,Palange R,De Blasio C.Advancements in gasification technologies: Insights into modeling studies,power-to-X applications and sustainability assessments[J].Sustainable Energy & Fuels,2025,9(18):4793−4831.

[10] 刘海峰,王世丞,郭晓镭,等.基于生物质气化技术的预处理研究进展[J].辽宁大学学报(自然科学版),2025,52(4):289−301.

[11] 罗扬,彭杨皓,周钰博.生物质气化技术研究进展[J].化工矿物与加工,2025,54(11):59−69.

[12] 魏启启,谈本刚,王欢,等.“双碳”背景下生物质气化技术研究进展[J].山东化工,2024,53(16):130−133.

[13] Akhator P,Obanor A,Sadjere G.Experimental studies on synthesis gas production from wood wastes in a pilot downdraft gasifier[J].International Journal of Engineering Research in Africa,2022,61:115−128.

[14] Fu Leijie,Cao Yan,Du Jiang.H_2-rich syngas produced from steam gasification of municipal solid waste: A modeling approach[J].Clean Technologies and Environmental Policy,2022,24(3):1001−1007.

[15] 严帅,赖宇杰,黄颖颖,等.生物质气化制燃气过程的研究进展[J].农业工程学报,2025,41(20):17−29.

[16] 李仁贵.生物质气化技术工业化应用与气化炉选择[J].石油和化工设备,2022,25(1):42−44.

[17] 杜海江,徐冰嫘,李宗楠,等.中部出气的上吸式固定床气化炉及其自动控制的料斗供料系统设计[J].应用能源技术,2015(1):23−28.

[18] 杨辉,孙姣,陈文义,等.下吸式生物质气化炉结构研究进展[J].天然气化工—C1化学与化工,2020(1):120−128.

[19] 孙学峰.生物质流化床气化实验与建模研究[D].保定:华北电力大学(河北),2010.

[20] Oveisi E,Sokhansanj S,Lau A,et al.Characterization of recycled wood chips, syngas yield, and tar formation in an industrial updraft gasifier[J].Environments,2018,5(7):84.

[21] Zhang Weiwei, Wu Youqing, Huang Sheng,et al. Study on physicochemical characteristics, solidification and utilisation of tannery sludge gasification ash[J].Journal of Environmental Management,2022,310:114584.

[22] Lotfi S,Littlejohns J,Austin K,et al.Modeling as a tool for the optimal design of a downdraft gasifier operating on waste feedstock[J].Waste and Biomass Valorization,2021,12(12):6569−6589.

[23] 高嘉楠,方小里.生物质气化原理及设备浅析[J].锅炉制造,2020(2):36−37.

[24] 马中青,薛俊杰,袁世震,等.生物质气化联产燃气和炭的研

究进展[J].林产化学与工业,2023,43(3):145−159.
[25] 苏鑫,刘静,陈冠益,等.煤耦合生物质气化发电技术研究进展[J].煤炭学报,2023,48(6):2261−2278.
[26] De Lasa H, Torres Brauer N, Rojas Chaves F, et al. Biomass-derived tar conversion *via* catalytic post-gasification in circulating fluidized beds: A review[J].Catalysts,2025,15(7):611.
[27] 杨太阳,王安仁,张锁江,等.气固鼓泡流化床的流动特性数值模拟[J].计算机与应用化学,2005,22(3):206−210.
[28] Gao Na, Zhu Kang, Fang Shiwen, et al. A numerical simulation and experimental study of fluidization characteristics of a bubbling fluidized bed in biomass gasification[J].Energies, 2024,17(10):2302.
[29] 李智梁.循环流化床的基本原理与应用[J].科技资讯,2012,10(12):108.
[30] 张萌.双流化床生物质气化试验研究[D].北京:华北电力大学,2012.
[31] 廖雷,熊家辉,余万,等.温度梯度对生物质气流床气化产物的影响[J].煤炭转化,2024,47(3):38−44.
[32] 陆海峰,卞耀,郭晓镭,等.生物质气流床气化可行性分析与减碳效应[J].华东理工大学学报(自然科学版),2024,50(3):328−334.
[33] 宋星星,王贵顺,温繁生,等.生物质与煤气流床共气化工业试验[J].石油石化绿色低碳,2024,9(5):68−72.
[34] 朱红.生物质气化过程运行工况研究[D].北京:华北电力大学,2011.
[35] 曹凌燕.生物质水蒸气催化重整制富氢合成气的催化剂制备及性能研究[D].北京:北京化工大学,2011.
[36] 张红岗.固体热载体催化气化生物质制氢工艺研究[D].大连:大连理工大学,2005.
[37] Salem A M, Paul M C. Effects of throat sizing and gasification agents in a biomass downdraft gasifier: Towards CO_2-free syngas production[J].RSC Advances,2023,13(15):10221−10238.
[38] Carmo-Calado L, Brito P, Hermoso-Orzáez M J, et al. Comparative evaluation of biomass and waste gasification in fixed and fluidized beds: Influence of operating conditions on syngas quality and energy viability[J]. Biomass and Bioenergy,2026,205:108502.
[39] 姜述杰,赵伟英.浅谈秸秆生物质直燃发电技术[J].锅炉制造,2009(4):40−42.
[40] 刘华财,吴创之,谢建军,等.生物质气化技术及产业发展分析[J].新能源进展,2019,7(1):1−12.
[41] 李学琴,刘鹏,吴幼青,等.生物质气化技术的发展现状及展望[J].林产化学与工业,2022,42(5):113−121.
[42] 姚锡文,刘清华,周浩东,等.生物质气化过程焦油裂解脱除技术[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(6):890−896.
[43] 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.
[44] Chan Fanliang, Tanksale A. Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,38:428−438.
[45] 张卫东,张兰,张彩虹,等.我国林木生物质能源资源分类及总量估算[J].北京林业大学学报(社会科学版),2015,14(2):52−55.
[46] 许惠,夏志鹏,冯勇,等.生物质连续热裂解设备开发现状及发展前景[J].现代制造技术与装备,2017,53(3):152−155.
[47] 蔡杰.基于ASPEN Plus的村镇垃圾热解气化燃烧模拟与试验[D].杭州:浙江大学,2021.
[48] 丁亿极.生物质气化/直燃供热系统的经济性及环境效益评价[D].天津:河北工业大学,2020.