

中国生物质气化技术的研究和发展现状

董玉平¹, 邓波¹, 景元琢², 强宁², 申树云¹

(1. 山东大学机械工程学院, 山东济南250061; 2. 济南百川同创实业有限公司, 山东济南250101)

摘要: 生物质能是一种重要的可再生能源, 利用生物质气化技术能实现CO₂

的归零排放, 节约常规能源, 符合可持续发展的要求。介绍了生物质气化的工艺特点和相关气化装置, 阐述了生物质气化领域的重点研究方向, 分析了我国生物质气化技术的商业化现状并提出了参考建议。

0 前言

能源和环境问题已成为全球关注的焦点, 随着我国能源消耗的迅速增长, 化石燃料的大量使用带来了严重的环境污染和生态破坏, 煤、石油、天然气作为现阶段的主要能源, 同时也是宝贵的有机化工的原料, 资源量日益减少, 我国普遍用作燃料的方式造成了很大的浪费。开发洁净的可再生能源成为了可持续发展的迫切需要。与此同时, 生物质能在可再生能源中, 是地球上唯一能够储存和可运输的清洁能源, 资源量大, 分布广, 开发潜力巨大。

从化学的角度上看, 生物质的组成是CH化合物, 它与常规的矿物能源如石油、煤等是同类(煤和石油都是生物质经过长期转换而来的), 生物质是植物通过光合作用生成的有机物, 包括农林废弃物(如秸秆、稻草、树枝等), 薪柴, 食品制糖工业的作物残渣, 城市有机垃圾, 能源作物, 动物排泄物等, 它的特性和利用方式与矿物燃料有很大的相似性, 可以充分利用已经发展起来的常规能源技术开发利用生物质能, 这也是开发利用生物质能的优势之一。我国生物质能极为丰富, 仅秸秆等农林生物质废弃物资源量年约7

@10⁸t, 相当于3.1@10⁸

t吨标煤, 但相当多的生物质被废弃和焚烧。我国于2006年实施5中华人民共和国可再生能源法, 将生物质能等可再生能源的科学研究和产业化发展列为国家科技发展与高技术产业发展的优先领域。

1 生物质气化技术概述

1.1 生物质气化原理

生物质

气化是在不完全燃

烧条件下, 利用空气中的氧气或含氧

物质作气化剂, 将生物质转化为含CO, H₂, CH₄

等可燃气体的过程。目前气化技术是生物质热化学转化技术中最具实用性的一种, 将低品位的固态生物质转化为高品位的可燃气体, 可用于驱动内燃机、热气机发电, 农用灌溉设备, 用于炊事、采暖和作物烘干等。由于生物质原料由纤维素、半纤维素、木质素等组成, 含氧量和挥发分都很高, 活性较强, 更有利于气化, 根据气化介质和气化炉的不同, 燃气热值也会发生变

化。当采用空气作为气化剂进行气化时, 燃气热值

将在4~18MJ/m³的范围内变化。气化反应过程同时包括固体燃料的干燥、热分解反应、氧化反应和还原反应。

1.2 生物质气化的工艺

生物质气化根据所处的气化环境可分为空气气化、富氧气化、水蒸气气化和热解气化。空气气化技术直接以空气为气化剂, 气化效率较高, 是目前应用最广, 也是所有气化技术中最简单、最经济的一种。由于大量氮气的存在, 稀释了燃气中可燃气体的含量

, 氮气占到总体积的50%~55%, 燃气热值较低, 通常为5~6MJ/m³。可直接用于供气、工业锅炉等。

富氧气化使用富氧气体做气化剂, 在与空气气化相同的当量比下, 反应温度提高, 反应速率加快, 可得到焦油含量低的中热值燃气, 发热值一般在10~18MJ/m³

, 与城市煤气相当, 但相应会增加制氧设备, 电耗和成本都很高, 在一定场合下, 具有显著的效益, 使生产的总成本降低。吴创之等使用循环流化床富氧气化木粉得到最佳气化条件: 氧气浓度(90+5)%, 气化当量比约0.15。富氧气化可用于大型整体气化联合循环(IGCC)系统、固体垃圾发电等。

水蒸气气化是指在高温下水蒸气同生物质发生反应，涉及水蒸气和碳的还原反应，CO与水蒸气的变换反应等甲烷化反应以及生物质在气化炉内的热分解反应。燃气质量好，H₂含量高(30%~60%)，热值在10~16MJ/m³

，由于系统需要蒸汽发生器和过热设备，一般需要外供热源，系统独立性差，技术较复杂。现研究主要在流化床反应器内进行。Gil等在常压泡状流化床反应器内研究了空气、水蒸气和水蒸气-氧气三种不同的气化剂对气化产物的影响，发现以水蒸气为气化介质时，氢气的百分含量最高。

热解气化不使用气化介质，又称为干馏气化，产生固定炭、液体(焦油)与可燃气，热值在10~13MJ/m³。

1.3 生物质气化反应设备

生物质气化按照气化器中可燃气体相对物料流动速度和方向不同，分为固定床气化和流化床气化两种。固定床气化炉中，物料发生气化反应是在相对静止的床层中进行，其结构紧凑，易于操作并具有较高的热效率。

1.3.1 固定床气化炉

固定床气化炉具有一个容纳原料的炉膛和承托反应料层的炉栅。应用较广泛的是下吸式气化炉和上吸式气化炉。如图1和图2所示，下吸式气化炉中，原料由上部加入，依靠重力下落，经过干燥区后水分蒸发，进入温度较高的热分解区生成炭、裂解气、焦油等，

继续下落经过氧化还原区将焦炭和焦油等转化为CO，CO₂，CH₄和H₂

等气体，炉内运行温度在400~1200℃左右，燃气从反应层下部吸出，灰渣从底部排出。下吸式气化炉工作稳定，气化产生的焦油在通过下部高温区一部分可被裂解为永久性小分子气体，使气体热值提高并降低了出炉燃气中焦油含量。

上吸式气化炉中，原料移动方向与气流方向相反，气化剂由炉体底部进气口进入炉内参与气化，产生的燃气自下而上流动，由燃气口排出，出炉燃气灰分少，气化效率较高，但存在密封困难，添料不方便等问题。

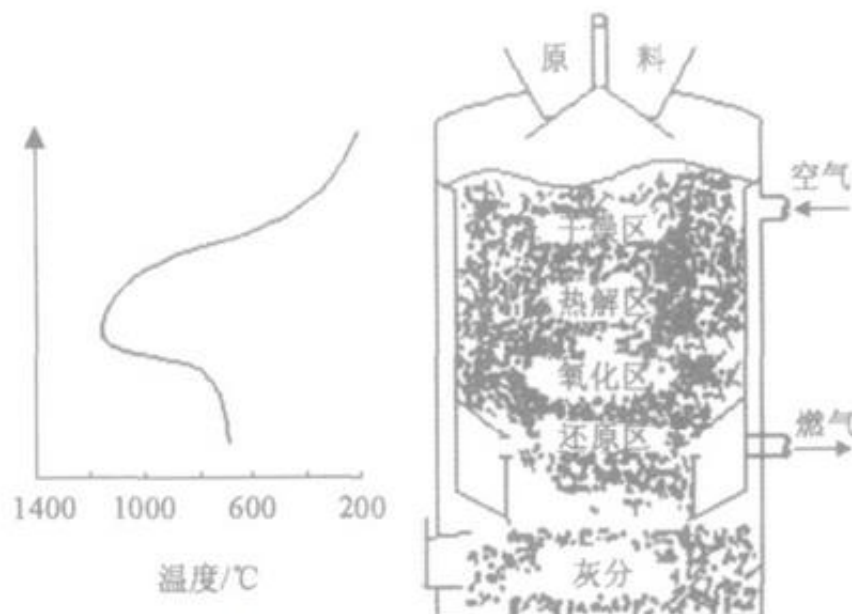


图 1 下吸式气化炉结构和原理

Fig. 1 Structure and principle of down-draft gasifier

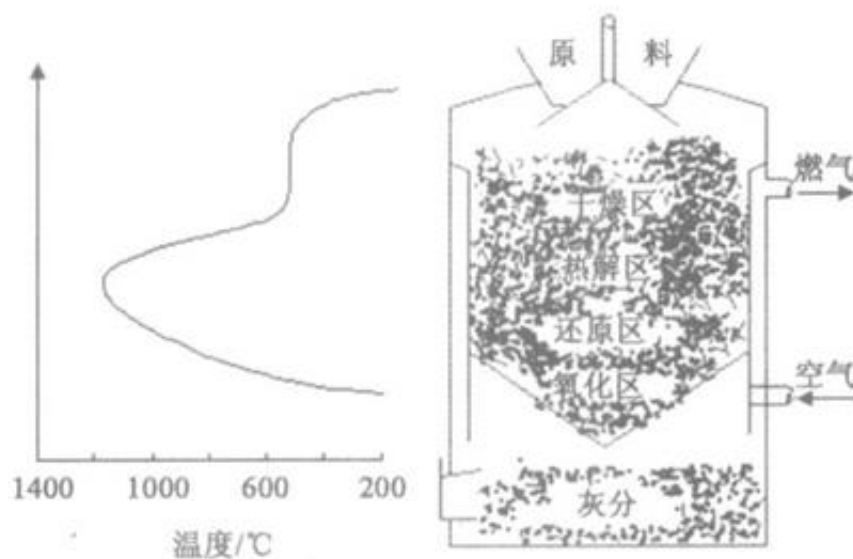


图2 上吸式气化炉结构和原理

Fig. 2 Structure and principle of updraft gasifier

1.3.2流化床气化炉

流化床气化炉在吹入的气化剂作用下，物料颗粒、砂子、气化介质充分接触，受热均匀，在炉内呈/沸腾0状态，气化反应速度快，产气率高。与固定床相比，流化床没有炉栅，一个简单的流化床由燃烧室、布风板组成，气化剂通过布风板进入流化床反应器中。按气化器结构和气化过程，可将流化床分为鼓泡流化床和循环流化床，如图3和图4所示。

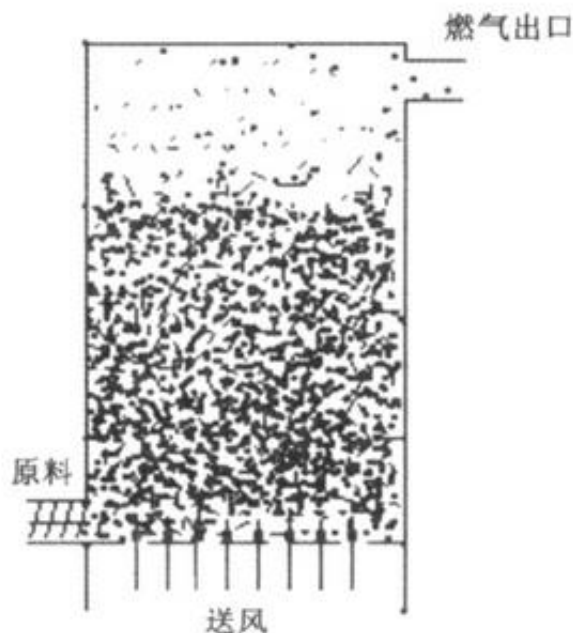


图3 鼓泡床原理

Fig. 3 Principle of bubbling bed gasifier

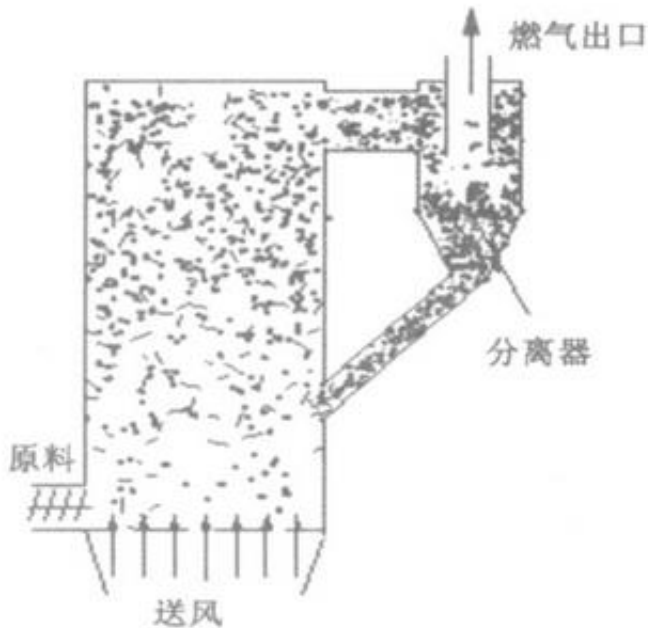


图 4 循环流化床原理

Fig. 4 Principle of CFB gasifier

鼓泡流化床气化炉是最简单的流化床，气流速度较慢，比较适合颗粒较大的生物质原料，一般需增加热载体。而循环流化床气化炉在气体出口设有旋风分离器或袋式分离器，流化速度较高，适用于较小的生物质颗粒，通常情况下不需加流化床热载体，运行简单，有良好的混合特性和较高的气固反应速率。一般流化床气化炉反应温度控制在700~900℃。

1.3.3 固定床气化炉与流化床气化炉适用范围

流化床气化与固定床气化相比较，气化温度更均匀，气化强度更高，原料粒度要求小，对于连续运转，以木材加工厂下脚料和碾米厂的稻壳为原料的中小型气化发电系统比较适合。但同时由于流化床床层温度相对较低，焦油裂解受到抑制，产出气中焦油含量较高，用于发电需要复杂的净化系统，流化床内气流速度大，石英砂等惰性热载体与床壁易于磨损，燃料颗粒细小，产出气体中带出物较多，加重系统负担。

固定床气化对原料适应性强，原料粒度要求不严格，反应区温度较高有利于焦油的裂解，出炉灰分相对较少，系统投资较循环流化床低，但固定床气化强度不高，一般是间歇式工作，在连续工作方面不如流化床，目前在农村集中供气供热系统和中小型气化发电中广泛应用。

固定床气化炉与流化床气化炉都有各自的特点和一定的适用范围，如表1所示。固定床结构简单、操作便利，运行模式灵活，适用于中小规模生产；而流化床适合于工业化、大型化，设备较复杂、投资大。充分考虑目标市场的实际情况，选择技术路线，采用最适宜的技术。

表 1 我国生物气化炉的主要种类和特点^[10]
Table 1 The main types and characteristics of
biomass gasifier in China^[10]

气化炉 类型	上吸式 固定床	下吸式 固定床	流化床
原料种类	秸秆, 废木	秸秆, 废木	稻壳, 木屑, 秸秆
粒度/mm	5~ 100	20~ 100	< 10
气化温度/℃	~ 1100	~ 1000	650~ 850
气化效率/%	70~ 75	75	65~ 75
气化强度/ (kg/m ² ·h)	200~ 300	200~ 600	1000~ 2000
应用领域	锅炉供热	集中供气, 锅炉供热	碾米厂, 木材加 工厂发电

1.4 生物质气体净化

在气化炉反应过程中, 燃气中带有一部分灰分和液态焦油, 必须从中分离出来, 避免堵塞管道。灰分的处理从技术角度分析较容易, 通过提高气化效率, 烧结成灰后较易处理, 而焦油的处理则较复杂, 在一定规模下可使用催化裂解, 一般较可行的方式是物理化学法结合。

目前适用生物质气化焦油的去除方法主要包括普通方法和催化裂解法, 普通法除焦油可分为湿法和干法两种。湿法去除焦油是生物质气化燃气净化技术中最为普通的方法, 包括水洗法和水滤法, 它利用水洗燃气, 使之快速降温从而达到焦油冷凝并从燃气中分离的目的。干法去除焦油是将吸附性强的物质(如炭粒, 玉米芯等)装在容器中, 当燃气穿过吸附材料和过

滤器时, 把其中的焦油过滤出来

。催化裂解法是在一定温度下, 使用白云石($MgCO_3 \cdot CaCO_3$)

和镍基等催化剂把焦油分解成永久性小分子气体, 裂解后的产物与燃气成分相似。中小型气化发电或集中供气系统出于成本方面的考虑, 大多采用水洗法, 优点是同时有除焦、除尘和降温三方面的效果; 其缺点则是产生的洗焦废水会造成一定的二次污染。目前国内秸秆气化工程一般循环利用洗焦废水, 不向外排放。而对洗焦废水尚无成熟的处理工艺, 国内外处于实验室研究阶段。

生物质燃气中焦油成分复杂, 目前还缺乏有效的检测手段, 可以分析出的成分有200多种, 大部分是苯的衍生物。一般而言, 焦油的含量与反应温度、加热速率和气化过程的滞留时间有关。燃气中焦油能量在总能量中占有很大的比重(生物质气化的焦油能量可达5%~15%)。这部分能量在低温时难与可燃气体一起被利用, 大多被浪费掉, 大大降低了气化效率。不同气化反应温度下的焦油生成量如图5所示。

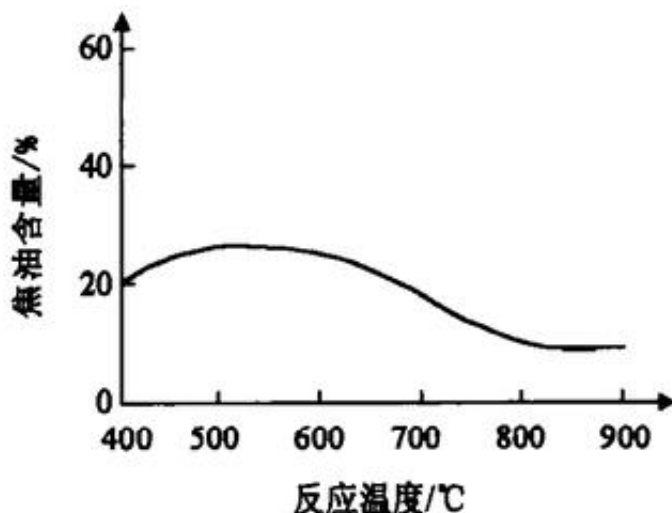


图 5 不同反应温度下焦油生成量

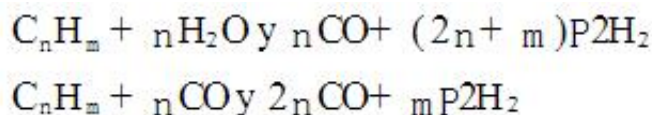
Fig. 5 The amount of tar under different temperature

2 生物质气化的最新进展

2.1 生物质气化焦油的催化裂解

气化过程中焦油是不可避免的副产物，对整个气化系统的正常运行带来了很大的麻烦，液态焦油易于灰分、水黏结堵塞管道；对金属材质的气化设备和PE塑料管道具有较强的腐蚀作用；焦油中含有大量的能量，降低了气化效率和燃气热值。目前催化裂解是生物质气化的主要研究方向之一。

在焦油转化过程中，水蒸气和二氧化碳对其裂解反应过程起着重整作用，反应生成CO和H₂，提高了可燃气体的产量和热值，反应过程为：



目前国内外已研究的用于生物质气化焦油裂解的催化剂有白云石、镍基催化剂和碱金属催化剂等。

白云石在用于生物质气化时，因其脱除焦油的高效性和成本低、实用价值高而得到广泛应用。它可以与生物质在气化前直接混和，也可置于下游反应器中作保护床，国内外学者进行了深入研究，是生物质气化领域目前研究得最多的催化剂。

镍基催化剂在生物质焦油的裂解上，能重整碳氢化合物并调整气体产物的成分，在750°C时即有很高的裂解率，具有很好的催化作用。但由于催化剂表面的积碳和烧结会导致镍基催化剂失去活性，通过添加助催化剂的方法可以改善其性能。很多研究者为此做了大量的工作。Aznar等研究表明，商业镍基催化剂能使生物质焦油转化率达到99%以上，并可调整气体产物的组分。

碱金属催化剂一般与生物质原料混合加入气化炉中，回收比较困难，且会导致气化炉排灰量增加，这些问题影响了碱金属催化剂技术的进一步发展。Encinar等研究碱金属氯化物对焦油的催化裂解作用，分析了各种催化剂及其浓度对气化的影响。Mudge等研究了几种碱金属碳酸盐和天然矿物质催化水蒸气气化木屑的活性。

2.2 生物质气化制氢，制甲醇

生物质在高温下经一系列热化学反应以及蒸汽重整、水气转换和变压吸附(PSA)氢气分离等化工过程可以生成高纯度氢气。中国科学院广州能源所吕鹏梅等以锯末为原料，在流化床气化炉中探讨了催化气化制取富氢气体的一些主要参数。意大利LcAquila的Rapagna等利用催化剂对杏仁壳气化试验，得到含氢量60%的气体。其他学者也进行了广泛的研究。生物质气化制氢技术具有不同的途径，很有可能为大规模氢能制备提供一条潜在在高效、清洁的途径。

生物质经热解气化、气体净化，重整、H₂PCO比例调节，甲醇合成及分离提纯等工艺处理后可合成甲醇。美国、欧盟和日本等有很多公司和研究机构都致力于开发由生物质合成甲醇的技术，并建立了生物质制甲醇的示范装置。

2.3 生物质超临界气化

生物质超临界气化目前研究重点是生物质超临界水催化气化制氢，生物质在超临界水中，气化率可以达到100%，氢气含量可超过50%，对于含水量高的湿生物质可直接气化，减少了高能耗的干燥过程。西安交通大学等高校和科研单位对超临界水气化制氢进行了长期的研究。中科院山西煤炭研究所曲先锋等考察了稻秆在超临界水中的热解行为，毛肖岸等研究发现纤维素在超临界水中的气化率较高。生物质超临界水气化反应过程复杂，还未从理论和技术上系统总结出可工业化利用的规律，仍停留在实验室小规模研究。

3 生物质气化技术的应用和商业化

3.1 生物质气化技术的应用现状

美国，欧洲等发达国家农业生产以农场为主，生物质资源集中，生物质气化一般规模较大，以发电和供热为主，自动化程度高，工艺较复杂，主要有生物质气化燃气2蒸汽联合循环发电(IGCC)、热电联产(CHP)等，发电效率和综合热效率都较高。而中国主要以家庭为单位进行农业生产，生物质的收集相对比较困难，目前生物质气化应用最广泛的领域是集中供气以及中小型气化发电，也有用于工业锅炉供热。农村集中供气工程解决了农作物秸秆的焚烧和炊事用能问题，而生物质气化发电主要针对具有大量生物质废弃物的木材加工厂，碾米厂等工业企业。目前，生物质气化的主要功能定位是节能和环保，针对的客户对象集中在需处理生物质废弃物的企业和团体，优势在于规模灵活，投资较低。中科院广州能源所在循环流化床气化发电方面进行了深入的研究，建立了几十处示范工程；山东大学在下吸式固定床气化集中供气、供热、发电系统上进行的研究，已在全国建立示范工程200余处；浙江大学、华中科技大学、山东省能源所等单位也对生物质气化技术进行了各自的研究工作。

3.2 社会和经济效益

生物质资源作为可再生清洁能源，利用气化技术转化为清洁能源，其SO₂排放量只相当于煤的1/10，NO_x排放量仅为煤的1/5左右，燃烧过程中实现了CO₂的零排放，减少了空气污染，保护了环境，同时也为农林废弃物的规模化利用提供了用途，实现了资源的节约化利用。对农民来说，生物质资源的收集和运输，增加了直接就业的机会，而秸秆等生物质原料收购能增加农民的收入，实现了变废为宝，而且生物质气化产生的气体和电力使用户能有效的降低生活能源支出以及享受到绿色电力的效益，扩大了清洁便利能源利用的可得性。

3.3 生物质气化技术的发展障碍和未来的展望

从生物质气化应用发展的现状看，存在着以下几个问题：

从经济上讲，目前最大的问题是资源的收集。中国绝大部分农村都是以农户为生产单位，资源分散，对于气化技术的规模化应用造成了一定的障碍，从成本上分析，规模化应用将导致生物质收集半径的加大与运输成本提高，可能失去经济性。

在技术上，目前的生物质气化技术还未完全解决二次污染问题。中小型气化发电设备大部分采用水洗方法，这些水含有灰份和焦油等物质，一般循环使用不对外排放。大型化后耗水量将大大增加，洗焦废水的生化处理工艺仍不成熟。目前对焦油的处理技术还未成熟，而如果采用催化裂解手段等方法处理，则需要设备达到一定规模才能适用。生物质气化可以减少环境污染，但如果在减少二氧化碳排放的同时增加了焦油的污染，就失去了该技术的意义，彻底解决焦油的污染问题，将是今后一项重要的研究工作。

生物质气化具有广阔的发展前景，未来生物质能源将在可再生能源中占有重要地位，气化技术也将取得突破，生物质气化将逐步由制取低热值气体向中高热值气体迈进。在气化制氢方面，蒸汽气化和超临界水催化气化值得关注。生

物质本身能量密度偏低，以水为介质制取氢气不会显著降低燃气的热值，具有较高的能量转化效率，同时这类制氢技术具有较强的有机物无害化处理能力、反应条件温和、产品的能量品味高等优点，与生物质的可再生性和水的循环利用相结合可实现能源转化、利用与大自然的良性循环。在生物质气化制取液体燃料方面，随着气体净化技术的创新发展和新技术开发力度的加大，成本将有望大大降低，经济性提高，在相关政策的支持下，会逐步替代部分石油等不可再生资源，达到规模化、工业化的利用途径。目前的气化集中供气和中小型气化发电技术将进一步发展，各种新工艺和新设备会不断的涌现，可靠性和成熟度也大大提高，区域的热电联产技术有望得到商业化应用。

3.4 山东大学在生物质气化方面的科研状况

山东大学自1997年就开展了生物质气化技术的研究，组建了山东省生物质能工程技术研究中心涉及气化集中供气、供热、气化发电、气热电联供等多项领域。先后承担了国家高技术发展项目(863)、国家星火计划、山东省自然科学基金、山东省科技攻关等多项国家和省部级科研课题，具备了较强的理论基础技术条件、资金支持，一批科技成果正在推出。自主研发的湿式秸秆净化机组以及相关的配套产品已在全国十余省市200余处的集中供气系统中推广应用，受到用户的普遍欢迎，运行效果良好。目前在该领域中山东大学实力雄厚，市场综合占有率处于领先地位。在科研投入上，连续几年加大力度，经过对集中气化系统工艺上的改进与创新，在生物质气化中的焦油净化上取得了突破，运用新工艺使秸秆气化产生燃气中焦油含量小于10mgP(m³)，对全国的生物质气化集中供气产生了积极的意义。

4 结论

我国对生物质能源利用极为重视，已连续在四个国家五年计划中将生物质能利用技术的研究与应用列为重点项目，在生物质气化与气化发电方面的研究与开发取得了积极的进展。一大批优秀的科研成果和应用技术进入市场，中小规模的集中供气、供热及气化发电等方面已进入实用阶段，使我国的生物质转换技术得到了快速的发展。本文总结了生物质气化的工艺，气化炉类型和气体净化系统，介绍了国内外生物质气化的最新研究进展，对目前阻碍生物质气化技术商业化运行的主要因素进行了分析。建议尽快解决生物质气化的关键技术及相关的配套技术和设施，积极建立具有规模效益的新技术试验示范工程，解决技术、市场和政策三者之间的衔接问题，明确法律、税收政策和资金支持办法，大力推进我国生物质气化技术的发展。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/81860.html>