

# 生物质热解炭化反应设备研究进展

石海波<sup>1,2</sup>, 孙姣<sup>1,2</sup>, 陈文义<sup>1,2</sup>, 潘萌娇<sup>1,2</sup>

(1、河北工业大学过程装备与控制工程系, 天津300130; 2、河北工业大学工程流动与过程强化研究中心, 天津300130)

**摘要：**生物质热解炭化技术作为生物质能源开发利用的一种重要途径, 已经得到国内外广泛关注。文章介绍了生物质热解炭化反应设备的两大类型, 即窑式炭化炉和固定床式热解炉。详细论述了各种典型设备的结构特点和适用范围, 认为与窑式炭化炉相比, 固定床式热解炭化炉炭化周期短、对生物质原料适应性和可操作性更强、产炭品质更有保障。最后指出了高效、稳定、机械化是生物质热解炭化设备未来的研究和方向。

生物质能是可再生的环境友好型能源, 我国具有非常丰富的生物质能资源, 包括各种速生林、薪炭林、农林废弃物、居民生活垃圾、工业垃圾等, 年产量约合4亿多吨石油当量。在全球传统能源匮乏且价格越来越昂贵、环境污染问题愈演愈烈的今天, 研究生物质能源的开发利用, 可以改善不合理的国家能源消费结构, 减少能源进口量, 具有特别突出的战略意义。我国已将“大力推进生物质能源产业发展”列入国家“十二五”规划, 作为战略性新兴产业予以重点培育和扶持。

生物质热解是一种新兴的生物质能开发利用技术, 是指生物质在隔绝氧或缺氧条件下吸收热能, 破坏生物质内部大分子结构, 使其转化为固体焦炭、可燃气体和液态生物质油的过程。按照热解产物的不同分为热解炭化、热解气化、热解液化3种。生物质热解炭化即热解产物以焦炭为主, 主要利用炭化设备将生物质在一定温度和升温速率下热解, 并进一步加工处理成为蜂窝煤状、棒状、颗粒状等形状的固体成型燃料, 能够将生物质由低品位能源转化为无污染、易储运的高品质“生物煤”能源<sup>[1]</sup>。

欧美等发达国家以及日本这样的资源短缺国家, 采取对本国的资源保护主义和技术保密政策, 尽管生物质热解炭化技术研究起步较早, 但对于炭化设备的相关报道并不多见, 直接利用本国生物质资源进行炭化研究在这些国家开展的也较少。生物质热解炭化及其设备研究主要集中在亚洲的印度、菲律宾、泰国、南美的巴西等发展中国家。我国从20世纪70年代开始对生物质能源开发支持力度加大, 热解炭化工艺及设备研究得到快速发展, 改善了一些传统的热解炭化反应工艺和炭化设备。

## 1 生物质热解炭化反应及其设备特点

### 1.1 生物质热解炭化反应特点

根据固体燃料燃烧理论和生物质热解动力学研究<sup>[2-10]</sup>, 生物质热解炭化过程可分为如下阶段。首先是干燥阶段。生物质物料在炭化反应器内吸收热量, 水分首先蒸发逸出, 生物质内部化学组成几乎没变。其次是挥发热解阶段。生物质继续吸收热量到200℃左右, 内部大分子化学键发生断裂与重排, 有机质逐渐挥发, 材料内部热分解反应开始, 挥发分的气态可燃物在缺氧条件下, 有少量发生燃烧, 且这种燃烧为静态渗透式扩散燃烧, 可逐层为物料提供热量支持分解。最后是全面炭化阶段。这个阶段温度在300~550℃, 物料在急剧热分解的同时产生木焦油、乙酸等液体产物和甲烷、乙烯等可燃气体, 随着大部分挥发分的分离析出, 最终剩下的固体产物就是由碳和灰分所组成的焦炭。生物质热解炭化是复杂的多反应过程, 其工艺特点可概括为以下3点。较小的升温速度, 一般在30℃/min以内。

实验研究表明: 相对于快速加热方式, 慢速加热方式可使炭的产率提高5.6%。较低的热解终温。500℃以内的热解终温有利于生物质炭的产生和良好的品质保证。较长的气体滞留时间。根据原料种类不同, 一般要求在15min至几天不等。

### 1.2 生物质热解炭化设备特点

针对前述生物质热解炭化反应的特点, 要产出质量和活性都符合要求的优质炭<sup>[11]</sup>, 生物质热解炭化反应设备应有如下特点: 温度易控制, 炉体本身要起到阻滞升温 and 延缓降温的作用; 反应是在无氧或缺氧条件下进行, 反应器顶部及炉体整体密封条件必须要好; 对原料种类、粒径要求低, 无需预处理, 原料适应性更强; 反应设备容积相对较小, 加工制造方便, 故障处理容易、维修费用低。

生物质热解炭化设备主要包括两种类型，即窑式热解炭化炉和固定床式热解炭化反应炉。其中窑式热解炭化炉在传统土窑炭化工艺的基础上已出现大量新的炉型。而固定床式炭化设备按照传热方式的不同又可分为外燃料加热式和内燃式，另外固定床热解炭化设备还有一种新型再流通气体加热式热解炭化炉型，也很有代表性。

## 2窑式热解炭化炉

### 2.1传统窑式炭化炉

烧炭工艺历史悠久，传统的生物质炭化主要采用土窑或砖窑式烧炭工艺。其装置大多类似图1所示。首先将要炭化的生物质原料填入窑中，由窑内燃料燃烧提供炭化过程所需热量，然后将炭化窑封闭，窑顶开有通气孔，炭化原料在缺氧的环境下被闷烧，并在窑内进行缓慢冷却，最终制成炭。窑式炭化炉对燃烧过程中的火力控制要求十分严格，且由于窑体多是由红砖砌成，一般容积较大，多用硬质原木进行烧炭，不仅资源浪费严重，而且生产过程劳动条件差、强度大，生产周期长，污染严重，对于农村大量废弃秸秆、稻草等储量丰富的生物质原料无法热解制炭。我国在20世

<sup>[12]</sup>，其余的气体和液体产物都被排放到环境中，成为世界制炭行业的最大污染源。



图 1 传统窑式炭化炉

### 2.2新型生物质热解炭化窑

新型窑式热解炭化系统主要在火力控制和排气管道方面做了较大改变，其主要构造包括密封炉盖、窑式炉膛、底部炉栅、气液冷凝分离及回收装置。

在炉体材料方面多用低合金碳钢和耐火材料，机械化程度更高、得炭质量好、适应性更强。在产炭同时可回收热解过程中的气液产物，生产木醋液和木煤气，通过化学方法可将其进一步加工制得乙酸、甲醇、乙酸乙酯、酚类、抗聚剂等化工用品<sup>[13-14]</sup>

。目前，国内外对窑式炭化炉体研究主要集中在利用现代化工艺和制造手段改进传统炉体上，已出现很多窑式炭化炉专利。

日本农林水产省森林综合

研究所设计了一种具有优良隔热性能的移动式BA- 型炭化窑<sup>[15]</sup>

，如图2所示。以当地毛竹、桑树作为原料进行制炭。该窑体的四壁面和开闭盖采用具有隔热性能材料的双层密封结构，炭化窑本体和顶盖联接部分的缝隙中用砂土密封（砂封部分结构如图3所示），热量不易泄露，保温性能良好。因此，炉内温差小，通风量也小，从而防止了由于燃烧而导致木炭损失的缺点，木炭得率高。



图2 日本 BA- I 型炭化窑

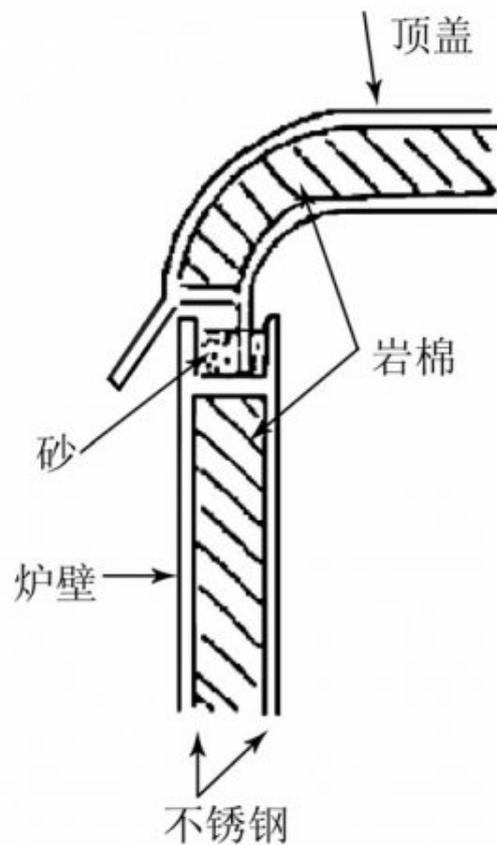


图3 砂封的炉本体和顶盖断面图

国内方面，王有权等<sup>[16]</sup>

经过5年的潜心钻研制造出一种自燃闷烧式炉型，又叫敞开式快速热解炭化窑，如图4所示。这种炉体采用上点火式内燃控氧炭化工艺，当炉内温度达到190℃时，在自然环境下进行原料断氧，控制火力，火焰能逐渐进入炭化室，使窑内多种生物质原料炭化，同时产生清洁、高热值的可燃气体，该炉型已获国家专利，并在当地得到很好普及。

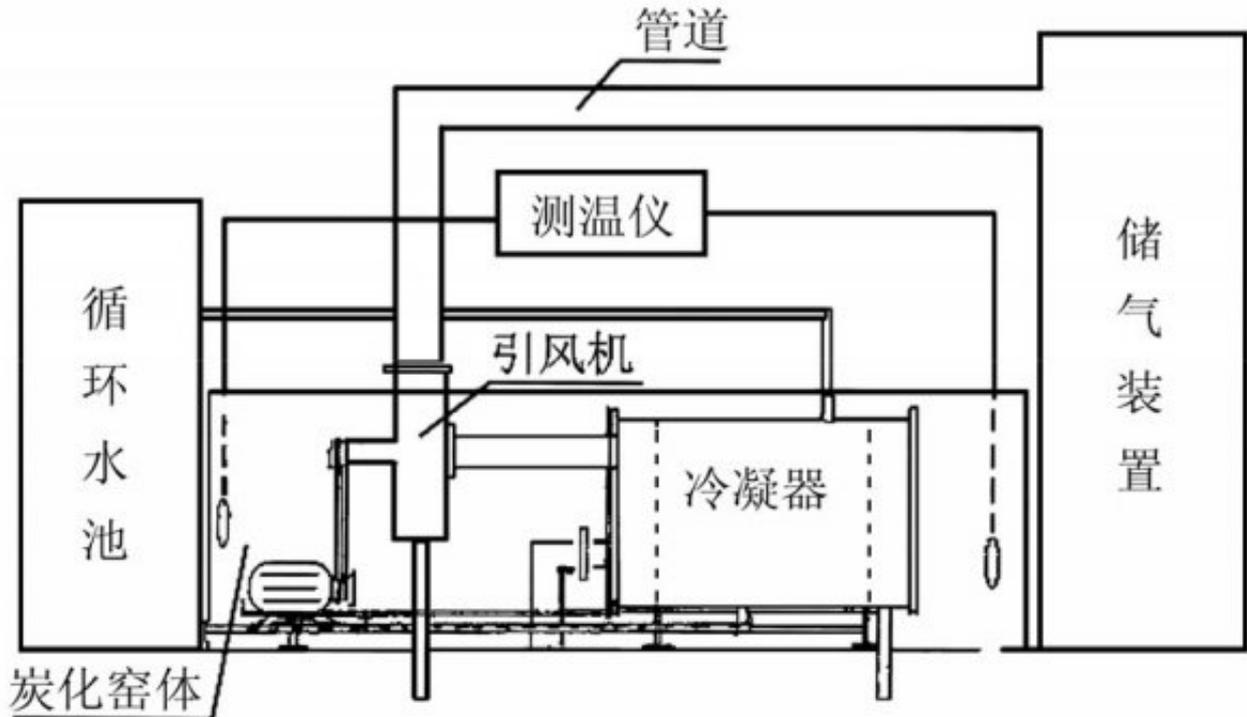


图4 敞开式快速热解炭化窑

浙江大学将生物质废弃物置于一种创新型外加热回转窑内热解炭化，如图5所示。回转窑筒体长0.45m，内径0.205m，筒体转速可在0.5~10r/min范围内调节，在整个加热过程中窑壁和窑膛温度可以稳定升高直至热解终温。这种回转窑炭化炉的固体炭产率可达40%以上，已达到较高的水平<sup>[17]</sup>。

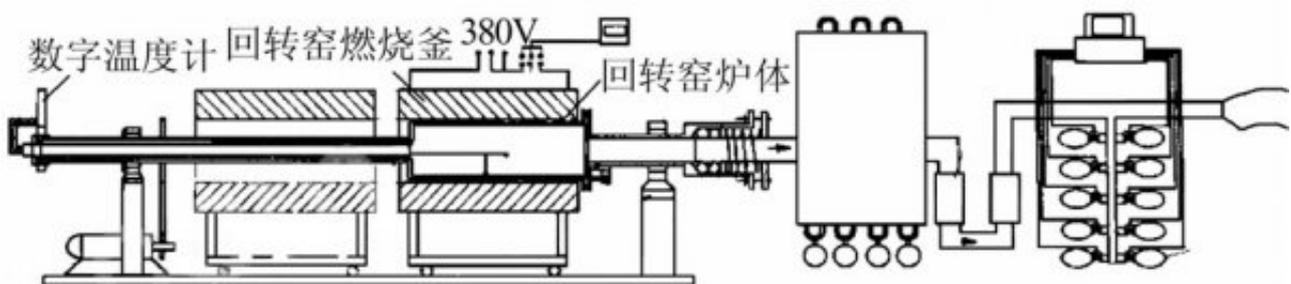


图5 浙江大学回转窑热解炭化系统

河南省能源研究所雷廷宙等<sup>[18]</sup>

在中科院广州能源研究所主办的2004年中国生物质能技术与可持续发展研讨会上展示了他们研制的三段式生物质热解窑，如图6所示。该窑体由热解釜与加热炉两部分组成，根据不同升温速率对热解产物的影响，将热解釜部分设计3个温度段炉膛，分别为低温段（100~280℃）、中温段（280~500℃）和高温段（500~600℃），所设计的热解釜尺寸为450mm×900mm，热解釜通过管道相互连通，气相也通过料管排出，料管上部焊在装有两个轮子的钢板上，可在热解釜下方的卧式加热炉导轨上行走。经试验研究，这种由热解釜和三段式卧式加热炉组合而成的炭化系统效率高，产物性能好，得到了与会专家的一致推介。

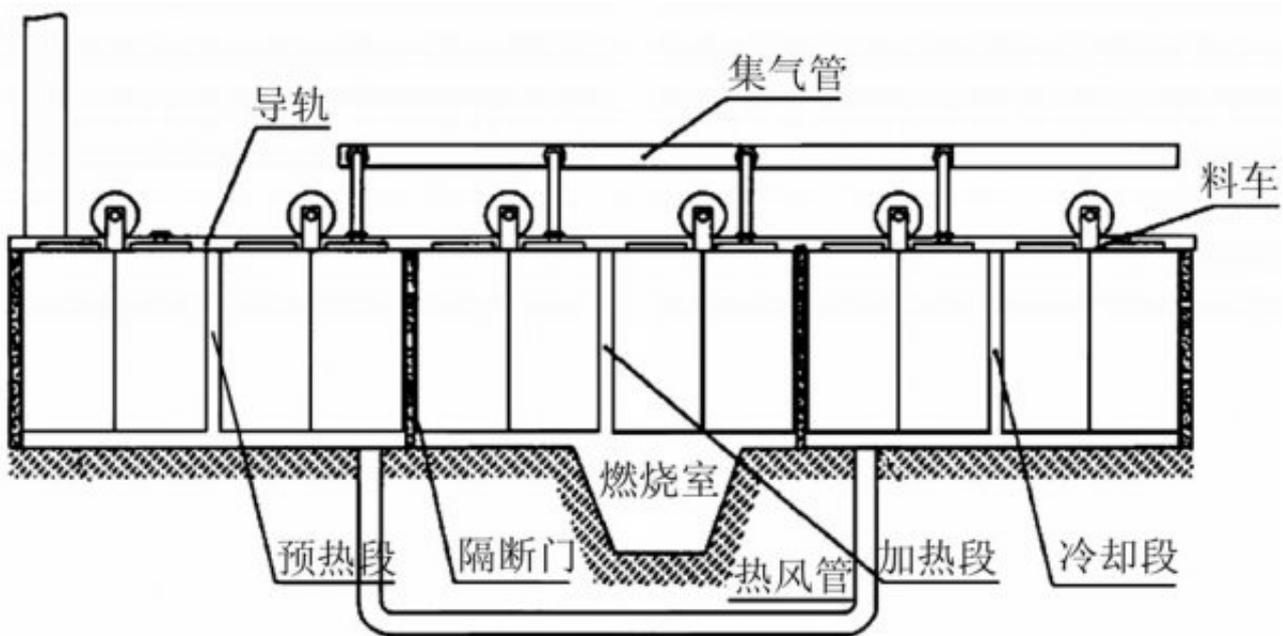


图 6 三段式生物质热解窑

### 3固定床式热解炭化炉

从20世纪70年代开始，生物质固定床热解炭化技术得到迅猛发展，各种炭化炉炉型结构大量出现，国内外除了采用管式炉加热炉体进行实验室规模研究生物质热解及动力学分析外，对实际应用的大型化的固定床炭化炉研究也较多。生物质固定床式热解炭化反应设备的优点是运动部件少、制造简单、成本低、操作方便，可通过改变烟道和排烟口位置及处理顶部密封结构来影响气流流动从而达到热解反应稳定、得炭率高的目的，更适用于小规模制炭。随着机械化

[19-21]。

#### 3.1外热式固定床热解炭化炉

外加热式固定床热解炭化系统包含加热炉和热解炉两部分，由外加热炉体向热解炉体提供热解所需能量。加热炉多采用管式炉，其最大优点是温度控制方便、精确，可提高生物质能源利用率，改进热解产品质量，但需消耗其它形式的能源。由于外热式固定床热解炭化炉的热量是由外及里传递，使炉膛温度始终低于炉壁温度，对炉壁耐热材料要求较高，且通过炉壁表面上的热传导不能保证不同形状和粒径的原料受热均匀<sup>[22]</sup>。国内外对加热炉型及加热方式方面的研究进行的比较深入。

巴西是世界上能源农业成本最低的国家，该国研究生物质热解技术较早，目前巴西利亚大学<sup>[23]</sup>

正在研究固定床外加热式热解炭化系统，如图7所示，该系统利用背压增压器来实现反应器增压，使生物质热解炭化更加充分。Rousset等的研究结果显示，在10bar压力下可使小桉树炭化得炭率增加到50%。目前，增压热解炭化反应设备的研究在美国乔治亚大学和国际农业研究发展中心<sup>[24]</sup>也在进行，但受限于增压设备的成本，尚未形成工业生产规模。

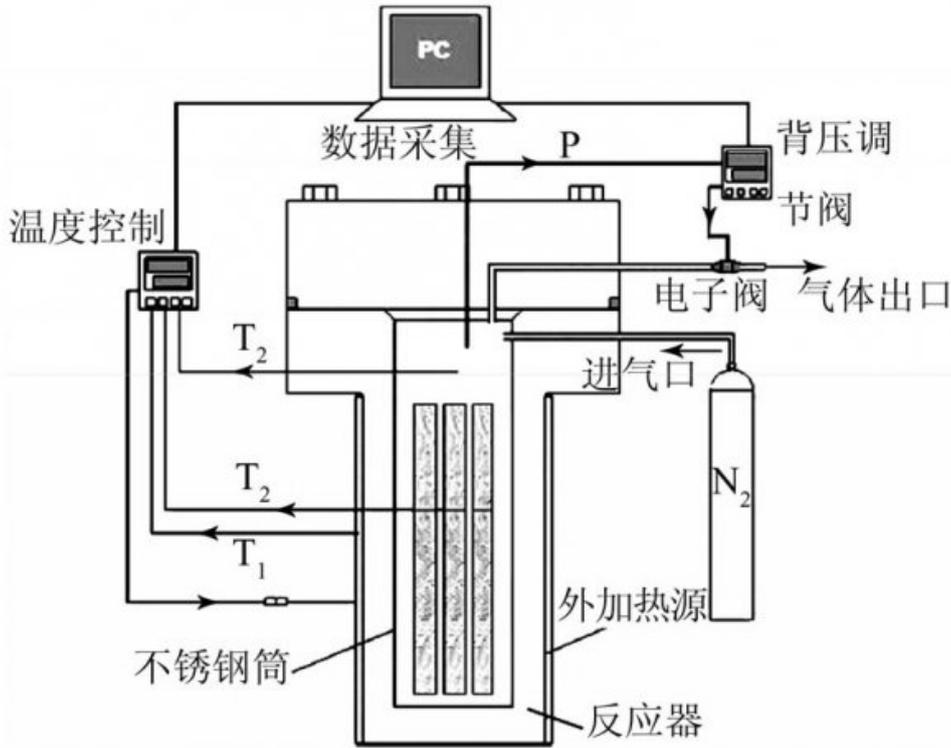


图 7 巴西利亚大学加压热解反应系统

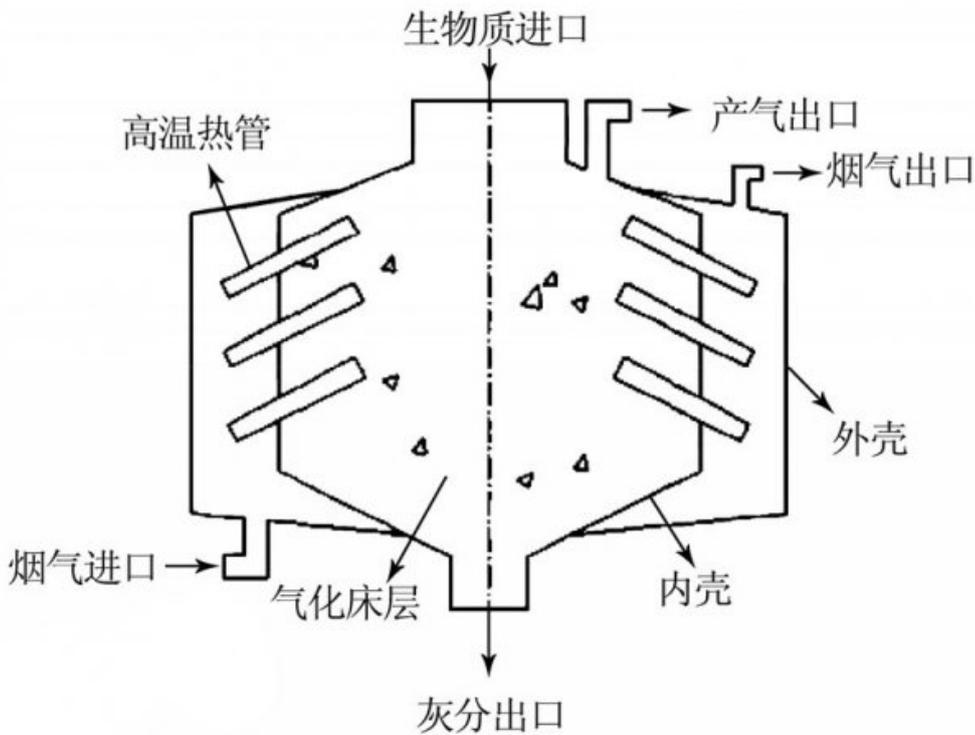


图 8 热管式生物质固定床气化炉

南京工业大学于红梅等<sup>[25]</sup>

设计的热管式生物质固定床气化炉如图8所示。利用高温烟气加热热管蒸发段，通过在不同位置布置不同数量的高温热管，利用热管的等温性、热流密度可变性以调控气化炉床层温度，更好的达到控制制气与制炭的目的。这种新型加热方式在固定床热解气化炉中得到了成功应用，但在炭化中由于温度在热解最佳反应条件下较难实现均匀分布，且由于温度传递的滞后效应，不适用于硬质木料的炭化，可针对粒径较小的生物质进行热解炭化实验研究。

中国石油大学最近提出一种利用单模

谐振腔微波设备外加热固定床热解炉型<sup>[26]</sup>

，如图9所示。研究表明，微波加热速率较慢，蒸汽驻留时间长，其热解得到的炭具有比常规加热更大的比表面积和孔径，经处理可作为活性炭使用。这种创新型热解工艺是以后的一个开拓点，但其原料适应性相对较差、生产成本较高，不适用于用户推广，目前只限于实验室水平研究。

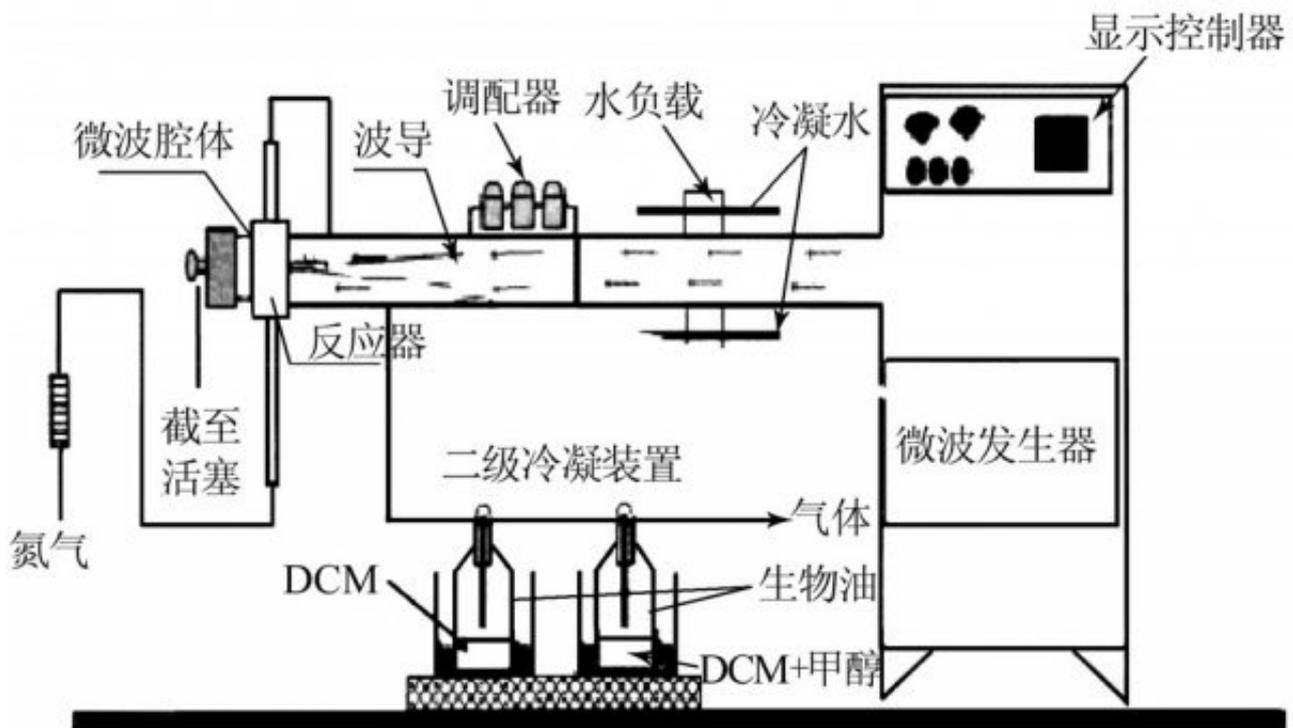


图9 中国石油大学微波热解实验装置

另外，我国于20世纪50年代从前苏联

引进的专门用来制造活性炭的斯列普炉<sup>[27]</sup>

；中科院兰州化学物理研究所王金梅、陈革新等<sup>[28]</sup>

研发的螺旋炭化机；山东理工大

学研制的陶瓷球热载体加热下降管式生物质热解装置<sup>[29]</sup>

；焦作市秸秆燃气设备工程有限公司研

发的STQ-型生物质炭气油联产系统<sup>[30]</sup>

也都采用外加热式固定床热解，运行良好，取得了很好的经济效益和社会效益。

### 3.2内燃式固定床热解炭化炉

内燃式固定床热解炭化炉的燃烧方式类似于传统的窑式炭化炉，需在炉内点燃生物质燃料，依靠燃料自身燃烧所提供的热量维持热解。内燃式炭化炉与外热式的最大区别是热量传递方式的不同，外热式为热传导，而内燃式炭化炉是热传导、热对流、热辐射3种传递方式的组合<sup>[31-32]</sup>

，因此，内燃式固定床热解炭化炉热解过程不消耗任何外加热量，反应本身和原料干燥均利用生物质自身产热，热效率较高，但生物质物料消耗较大，且为了维持热解的缺氧环境，燃烧不充分，升温速率较缓慢，热解终温不易控制。

印度博拉理工学院（BITS）研制的内燃下吸式生物质热解装置如图10所示<sup>[33]</sup>。该装置利用炉体顶部的水封装置达

到密封且便于拆卸的目的，设置窄口还原区，便于热解区域挥发分向下流动，这既利于热解区部分温度较高时带走热量增加产炭又利于氧化区域增加热量，同时对挥发分后续的冷凝制取生物质油也起到降温作用，从而达到炭、气、油的高效联产。

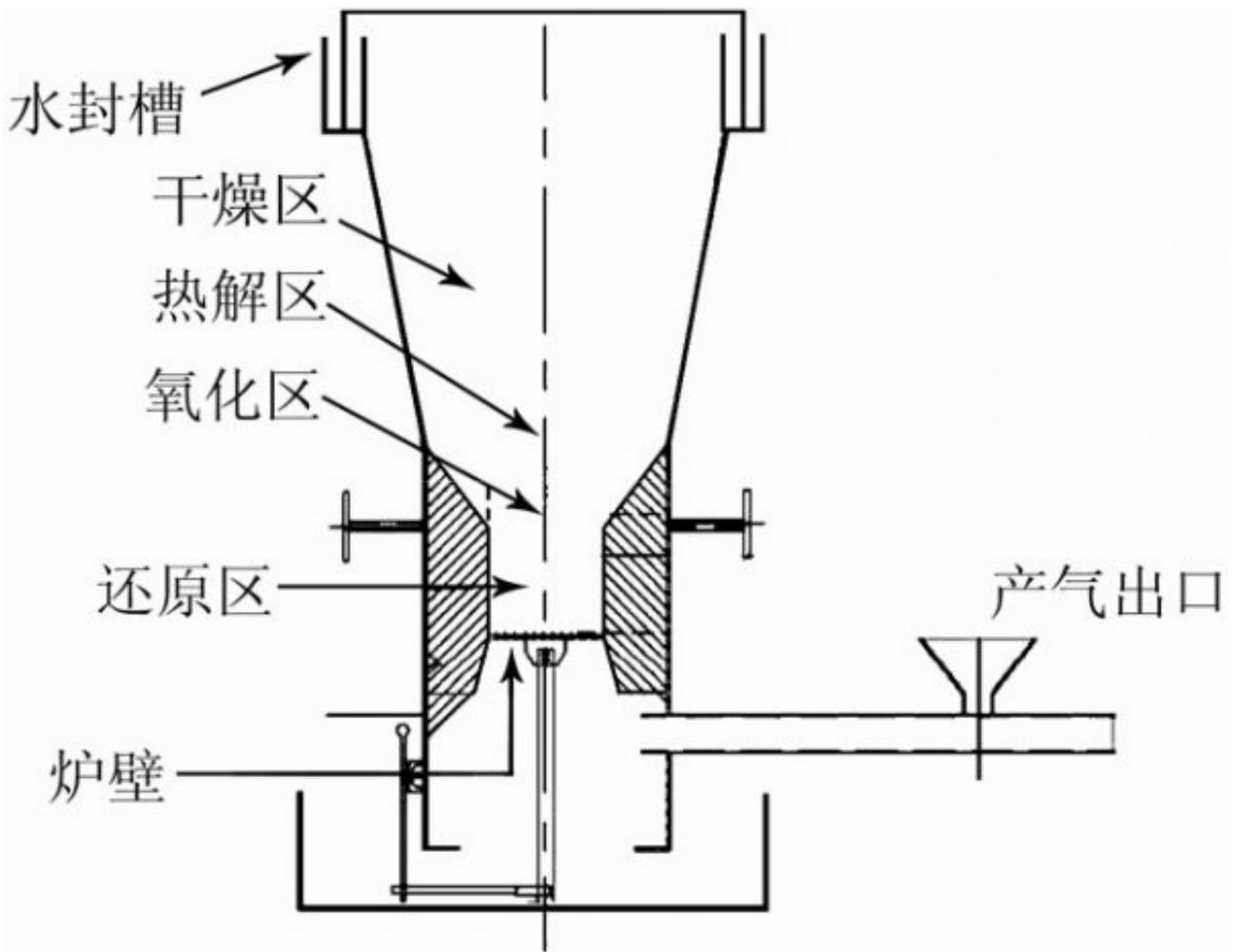


图 10 印度内燃下吸式生物质炉

合肥工业大学朱华炳等[34]设计的以热解气体为燃料的内燃加热式生物质气化炉，将生物质气化与焦油催化裂解集于一体，不需为催化裂解提供热源，如图11所示。在废气引风机作用下，产生的燃气经回流燃气风量调节阀、止火器，可持续与空气混合，混合气经点燃后经蛇形管向气化炉内提供热量。烟气回流燃烧既节省能源又减少污染。物料从45°锥形滑板上下落，可延长物料与挥发分的接触时间，利于热量的传递和炭的质量提高。这种内燃式气化炉体内部蛇形管道和锥形滑板落料器的设计也为炭化炉传热和落料设计提供了依据。但受滑道的限制，这种炉体只适合于粒径较小的物料。

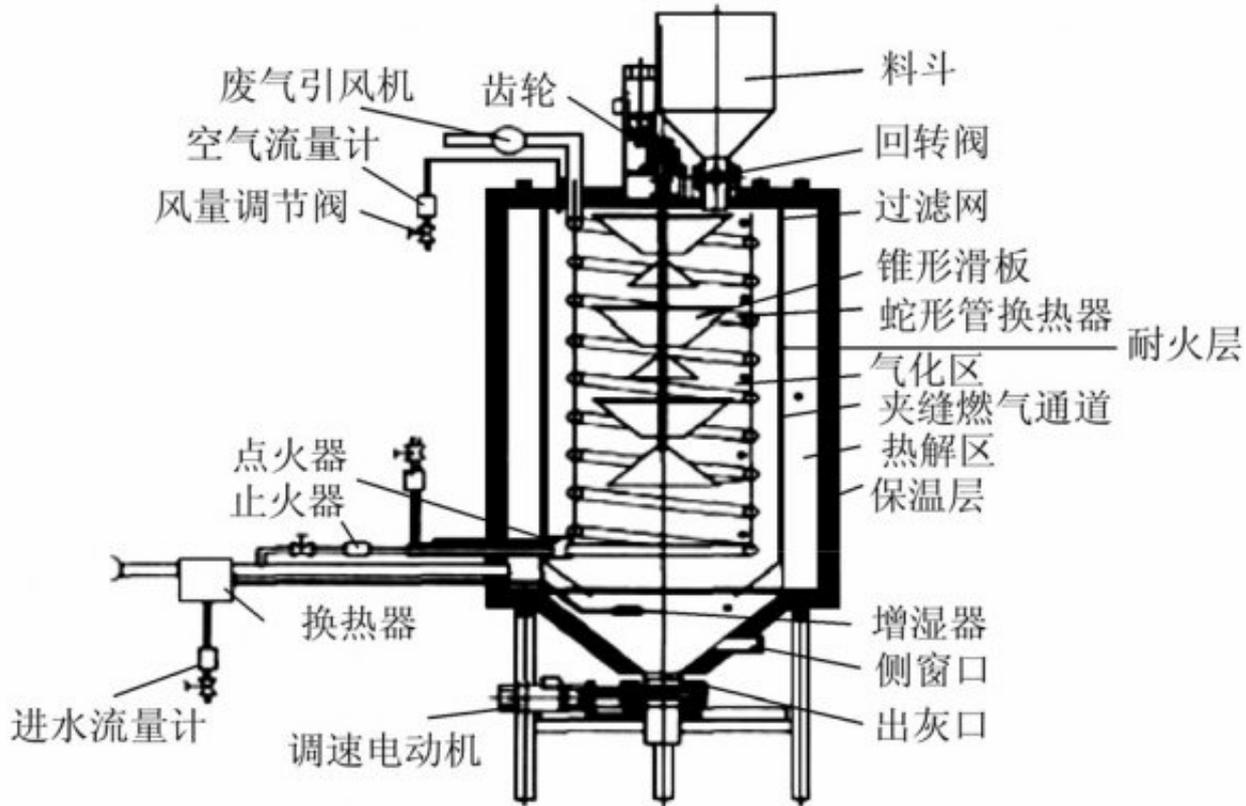


图 11 合肥工业大学内燃加热式生物质气化炉

中国林科院林产化学工业研究所刘石彩、蒋剑春等[35]开发的BX型炭化炉也是针对内燃式生物质固定床热解炭化设备进行，所得成型炭质量与日本同类产品相当。

### 3.3再流通气体加热式固定床热解炭化炉

再流通气体加热式固定床炭化炉是一种新型热解炭化设备，其突出特点是可以高效利用部分生物质物料本身燃烧而产生的燃料气来干燥、热解、炭化其余生物质。

泰国清迈大学研发的大型烟道气体金属炭化炉如图12所示[36]，将实验用木薯根茎在燃烧炉内点燃，用产生的燃料气进一步热解金属炭化炉中的物料，且热解产生的可燃气体还可二次回流利用。实验发现：当将炭化炉以70°的倾斜角放置时热解温度分布最理想，热解所需时间最短，对于干燥物料热解仅需95min；在炭化得率方面，鲜木薯根茎经过热解可得到35.65%的合格木炭。

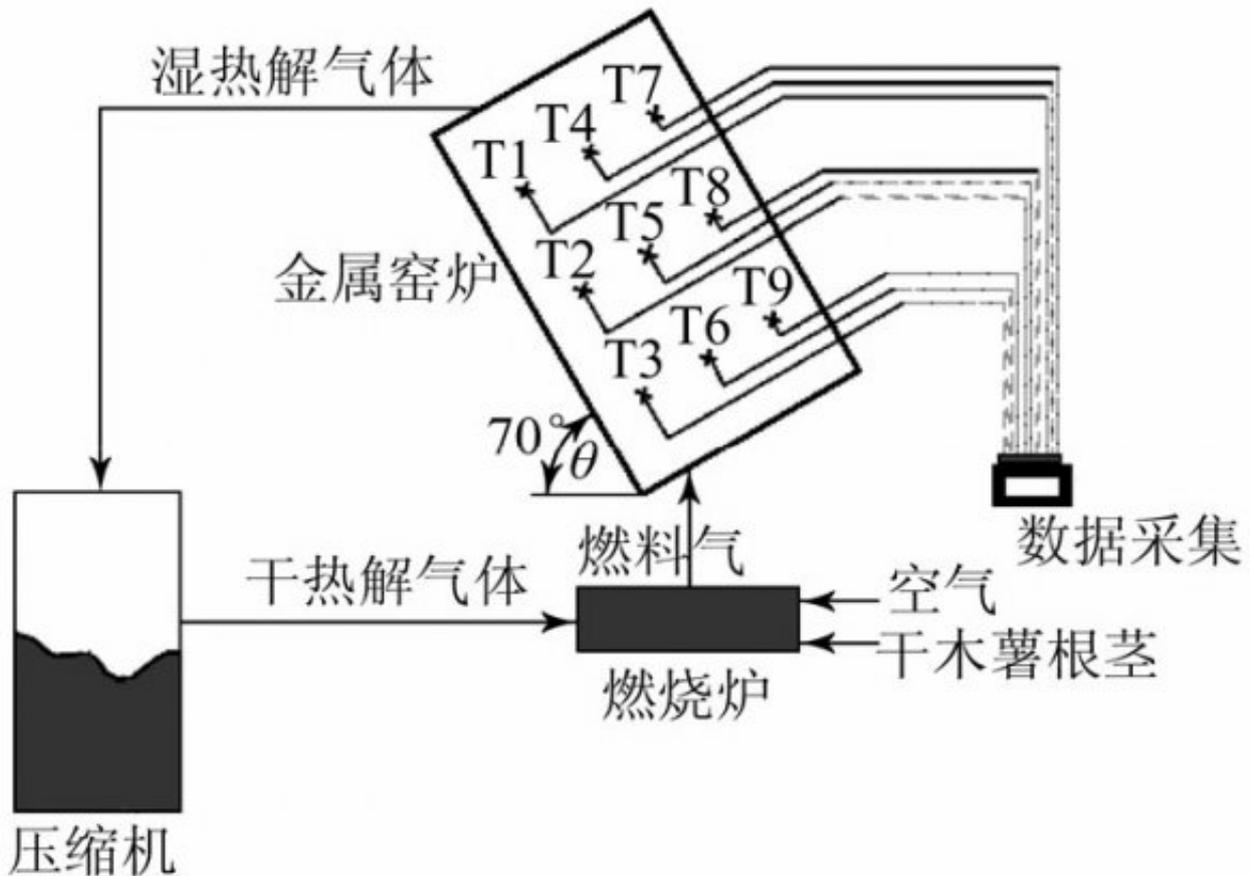


图 12 泰国清迈大学烟道气体炭化炉

国内出现的再流通气体加热式固定床炭化炉，其热解多利用固体燃料层燃技术，采用气化、炭化双炉筒纵向布置，炉筒下部为炉膛，炉膛内布置水冷壁，炉膛两侧为对流烟道。为保障烟气的流通，防止窑内熄火，避免炭化过程中断，这种炉型要在烟道上安装引风机和鼓风机<sup>[37-39]</sup>

。由于气化炉本身产生的高温燃气温度可达600~1000℃，能充分满足炭化反应需要，因此利用这种炉型进行生物质热解炭化燃料利用率更高，更适于挥发分高的生物质炭化。该炭化炉型按照气化室部分产出的加热气体流向分为上吸式和下吸式两种。

### 3.3.1 上吸式固定床炭化炉

即气化炉部分采用上吸式，特点是空气流动方向与物料运动方向相反，向下移动的生物质物料被向上流动的热空气烘干和裂解，可快速、高效利用气化炉内燃料。上吸式气化炉对物料的湿度和粒度要求不高，且由于热量气流向上流动具有自发性，能源消耗相对下吸式固定床更少，经多层物料过滤后产出的供炭化炉使用的高温可燃气体灰分含量也较少<sup>[40]</sup>，但对炉体顶部密封要求则较高。

典型炉型如韩璋鑫<sup>[41]</sup>

设计的上吸式固定床快速热解炭化炉，如图13所示。在干馏炭化室中心部位设置气化反应室，空气管进口设置在气化室底部，采用下点火方式，气化产生的高温缺氧气体通过两个抽吸内燃气管口，向上扩散到干馏炭化室将物料炭化。该上吸式固定床气化炉产生热解气体的炭化炉型除产气灰分含量低外，优点就是炭化室中物料在上部热解时所释放的高发热量挥发分都被吸入到下面料层，有助于热解炭化，也使收集得到的可燃气体热值提高。

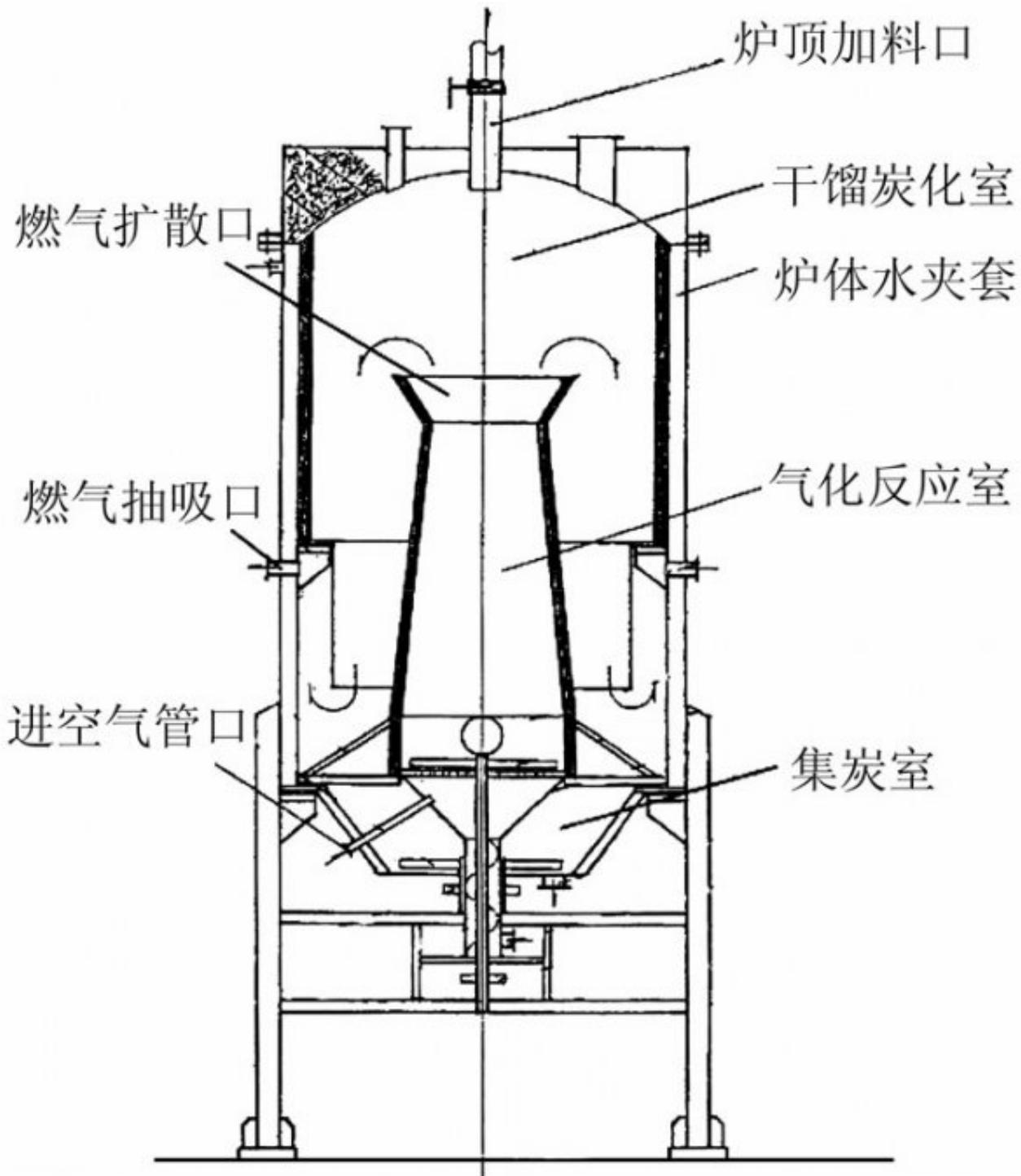


图 13 上吸式固定床气化室炭化炉

### 3.3.2 下吸式固定床炭化炉

气化炉体部分采用下吸式，与上吸式气化炉相比有3个优点：物料气化产生的焦油可以在物料氧化区床层上被高温裂解，生成气即炭化所需高温燃气中焦油含量较低；裂解后的有机蒸汽经过高温氧化区，携带较多热量，所以下吸式气化炉气化室部分排出的气体温度更高；由于气流流动特点，下吸式气化炉在微负压条件下运行，对密封要求不高<sup>[42]</sup>。

图14为张连发等<sup>[43]</sup>

设计的下吸式固定床反火生物质炭化燃气发生炉，上层为下吸式反火气化室，下层为热解炭化室，在上层反火气化炉腔和下层炭化炉腔中间设炉内防爆管口接头。由于气化产生气体温度较高、焦油含量低、热气流流动均匀等优点，生产的生物质炭和燃气都较为理想。与上吸式固定床相比，下吸式床对原料含水率要求更高，不能超过30%。因气化室和炭化室间的通气炉栅长期处于高温状态，该炉体对材料性能和成本要求较高。

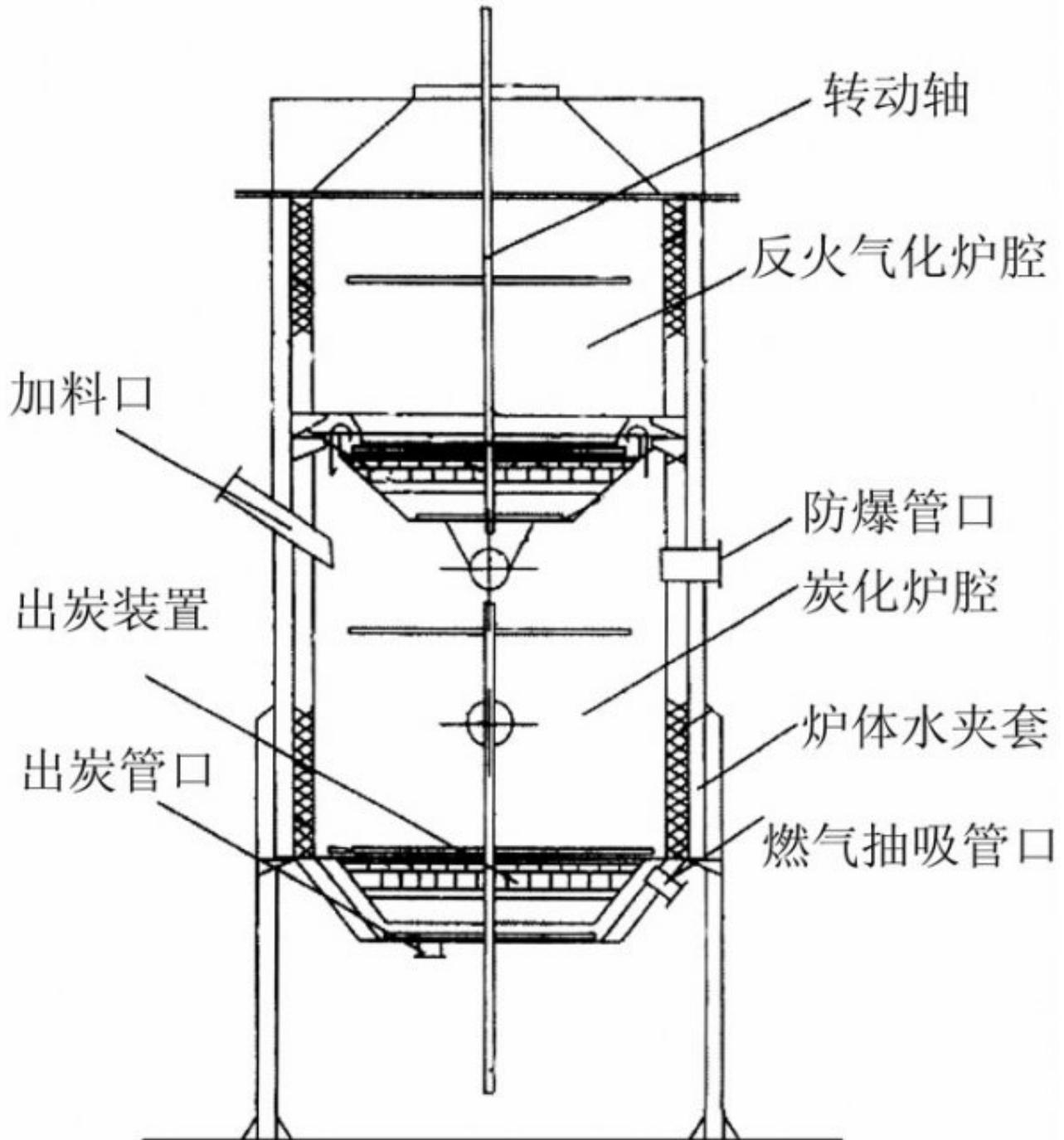


图 14 下吸式固定床气化室炭化炉

#### 4 几种类型热解炭化设备对比

表1列举了几例生物质热解炭化反应设备各自的特点。经过对3种生物质热解炭化反应设备的对比，不难发现，传统的窑式生物质热解炭化炉制造容易，成本较低，使用不受地区限制，技术较为成熟，但只能烧制粒径较大的硬质木材

，且生产周期长，材料浪费严重，污染大，产炭质量难以保证。

表 1 几例生物质热解炭化反应设备特点

项目	设备种类		
	传统土窑	三段式生物质热解窑	上吸式固定床炭化炉
研究者及研究单位	中国	河南省能源研究所雷廷宙等	韩璋鑫等
类型	传统窑式炭化	新型窑式炭化	再流通气体加热上吸式固定床炭化
生物质原料	硬质木材	硬木、秸秆、壳类、固化成型材料	秸秆、木屑、壳类、固化成型材料
炉体材料	红砖或黏土	钢制	钢制
炉体组成	燃烧窑、热解窑、排气管	热解釜、加热炉、料管、导轨	炭化室、气化室、加料口、抽吸口、集炭室等
升温速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	不可控	5~30, 可控	10~30, 可控
热解终温/ $^{\circ}\text{C}$	500	低温段 (100~280) 中温段 (280~500) 高温段 (500~600)	气化室段 (600~800) 炭化室段 (200~500)
得炭率/%	20	30	40
生产周期/h	120~480	30	24
气体排放情况	排空	净化回收	二次利用
焦油处理	不处理	分离提纯	含量极低, 可净化回收

新型窑炉和固定床式热解制炭设备生产周期短，可操作性更强，制炭质量较优，对尾气和焦油的处理合理，而相对成本较高，多应用于工业化规模生产。

## 5 结语

生物质炭化一个古老而又新兴的产业。从最原始的搭窑烧炭到现代的各种热解炭化反应设备，热解制炭的原理始终如一，但不同类型的炭化反应设备都具有各自的优缺点，其中渗透的科技含量也越来越高。

通过实地考察与大量资料查阅，总结国内外多家科研机构对生物质热解炭化反应设备的开发试验情况，作者认为，传统土窑式炭化炉体已不适用于现代制炭业，窑式烧炭正向着可移动式、多空间箱式、可回转式窑体等方向发展。而结构更加简单、操作更加便捷的固定床式热解炭化设备，可对烟道气流走势、炉体传热方式及密封部件结构等进行改进，更适合小型户用生物质炭气联产，工业应用价值更大。

随着国家对生物质能源关注度的不断升温，生物质热解制炭产业必将得到快速广阔的发展。热解炭化机理以及高效、节能、稳定且具有较高自动化、机械化水平的生物质热解炭化反应设备将是未来的主要研究方向。

## 参考文献

- [1]张全国，杨群发.生物质气化副产物的能源特性实验研究[J].太阳能学报，2002，23（3）：392-397.
- [2]刘圣勇，赵迎芳，张百良.生物质成型燃料燃烧理论分析[J].能源研究与利用，2002（6）：26-29.
- [3]Maiti S, Dey S, Purakayastha S. Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source[J]. Bioresource Technology, 2006, 97（16）：2065-2070.
- [4] Burkhard Klopries, Werner Hodek, Friedhelm Bander mann. Catalytic hydroliquifaction of biomass[J]. Fuel, 1990, 69（4）：448-455.
- [5]赖艳华，吕明新，马春元，等.生物质多孔燃料层辐射加热热解过程的影响因素分析[J].太阳能学报，2011，32（05）：735-740.
- [6]吴创之，周肇秋，阴秀丽，等.我国生物质能源发展现状与思考[J].农业机械学报，2009，40（1）：91-99.
- [7]杨海平，陈汉平，晏蓉，等.温度对生物质固定床热解影响的研究[J].太阳能学报，2007，28（10）：1152-1158.

- [8]Di Blasi C , Signorelli G , Di Russo C , et al.Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residuals[J].Ind.Eng.Chem.Res. , 1999 , 38 : 2216-2224.
- [9]Elauria J C , Castro M L Y , Racelis D A.Sustainable biomass production for energy in the Philippines[J].Biomass and Bioenergy , 2003 , 25 ( 5 ) : 531-540.
- [10]朱锡锋.生物质热解原理与技术[M].合肥：中国科学技术大学出版社，2006：144-166.
- [11]GB/T 17664—1999，木炭和木炭试验方法[S].
- [12]邹吉华，邹吉红，王志伟，等.热解法处理生物质废渣的最新技术[J].北方环境，2000（4）：58-60.
- [13]李瑜.废植物热解制气制油制炭的研究[J].再生资源与循环经济，2008（6）：34-38.
- [14]刘康，贾青竹，王昶.生物质热解技术研究进展[J].化学工业与工程，2008，25（5）：459-464.
- [15]马元庚.介绍一种移动式炭化炉[J].林产化工通讯，1993（4）：24-26.
- [16]王有权，王虹，王喜才.用敞开放式快速炭化窑生产炭的工艺：中国，200610048274.3[P].2009-6-17.
- [17]李爱民，李晓东，李水清，等.生物质废弃物在回转窑内热解研究[J].太阳能学报，2000，21（4）：333-340.
- [18]李在峰，雷廷宙，丁鸣，等.生物质热解制炭制气系统研究[C]//2004年中国生物质能技术与可持续发展研讨会论文集，2004.
- [19]马林转，宁平，何屏，等.生物质在固定床中的热解试验研究[J].资源开发与市场，2006，22（1）：01-02.
- [20]Tsai W T , Lee M K , Chang Y M.Fast pyrolysis of rice husk : Product yields and compositions[J].Bioresource Technology , 2007 , 98 ( 1 ) : 22-28.
- [21]Axel Funke , Felix Ziegler.Heat of reaction measurements for hydrothermal carbonization of biomass[J]. Bioresource Technology , 2011 , 102 ( 16 ) : 7595-7598.
- [22]Colomba Di Blasi. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars[J].Progress in Energy and Combustion Science , 2009 , 35 ( 2 ) : 121-140.
- [23]Rousset P , Figueiredo C.Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry : A statistical analysis approach[J].Fuel Processing Technology , 2011 , 92 ( 10 ) : 1890-1897.
- [24]Pelaez-Samaniego M R , Garcia-Perez M , Cortez L B.Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2008 , 12 ( 4 ) : 1063-1086.
- [25]于红梅，张红，王中贤，等.热管式生物质气化炉反应过程的理论分析[J].南京工业大学学报，2006，28（6）：82-86.
- [26]商辉，路冉冉，孙晓锋，等.微波热解生物质废弃物的研究[J].可再生能源，2011，29（03）：25-30.
- [27]Brendan Hall , Chuangwei Zhuo , Yiannis A.Levendis.Influence of the fuel structure on the flame synthesis of carbon nanomaterials[J].Carbon , 2011 , 49 ( 11 ) : 3412-3423.
- [28]王金梅，陈革新，赵培庆，等.生物质连续炭化工艺研究[J].现代化工，2009，29（1）：300-302.
- [29]崔喜彬，李志合，李永军，等.下降管式生物质快速热解实验装置设计与实验[J].农业机械学报，2011，42（1）：113-116.

- [30]古启隆, 杜秋香.STQ- 型生物质炭气油联产系统评价分析[J].可再生能源, 2006 ( 3 ) : 47-48.
- [31]Paist A , Poobus A , Tiikma T.Probes for measuring heat transfer parameters and fouling intensity in boilers[J].Fuel , 2002 , 81 ( 14 ) : 1811-1818.
- [32]Jone E White , Catallo W Jame , Benjamin L Legendre.Biomass pyrolysis kinetics : A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis , 2011 , 91 ( 1 ) : 1-33.
- [33]Pratie N Sheth , Babu B V.Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier[J].Bioresource Technology , 2009 , 100 ( 12 ) : 3127-3133.
- [34]朱华炳, 胡孔元, 陈天虎, 等.内燃加热式生物质气化炉设计[J].农业机械学报, 2009, 40 ( 02 ) : 96-02.
- [35]刘石彩, 蒋剑春, 陶渊博, 等.生物质固化制造成型炭技术研究[J].林产化工通讯, 2002, 36 ( 2 ) : 3-5.
- [36]Karan Homchata , Thawan Sucharitakul , Preecha Khantikomol.The experimental study on pyrolysis of the cassava rhizome in the large scale metal kiln using flue gas[J].Energy Procedia , 2012 , 14 : 1684-1688.
- [37]Thomas Grotkjaer , Kim Dam-Johansen , Anker D Jensen , et al.An experiential study of biomass ignition[J].Fuel , 2003 , 82 : 1633-1641.
- [38]Lundgren J , Hermansson R , Dahl J.Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems[J].Biomass and Bioenergy , 2004 , 26 : 443-453.
- [39]李燕东, 王述洋, 刘会粉, 等.生物质成型颗粒燃料气化锅炉的设计研究[J].机电产品开发与创新, 2009, 22 ( 4 ) : 37-40.
- [40]李鹏.户用型上吸式生物质气化炉的结构设计与试验研究[D].石河子: 石河子大学, 2008.
- [41]韩璋鑫.生产生物质干馏炭和生物质燃气的方法及快速热解炭化炉: 中国, 200810019302.8[P].2011-04-13.
- [42]魏敦崧, 李芳芹, 李连民, 等.生物质固定床气化试验研究[J].同济大学学报, 2006, 34 ( 2 ) : 254-260.
- [43]韩连恩, 张连发.生产生物质炭化燃气的方法及反火生物质炭化燃气发生炉: 中国, 200510040840.1[P].2007-10-3.
- 原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/118156.html>