

A Review of Low Temperature Pyrolysis Reactors

Xin Wang, Xiaoyi Yang*

Department of Thermal Energy Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing, China

yangxiaoyi@buaa.edu.cn

Abstract: In this paper, a review is provided on reactor types and heating methods for biomass low temperature pyrolysis to oil. Fluidized bed reactors have been widely used in biomass pyrolysis with no mobile parts and less wear-and-tear, in spite of the decrease of the heat value of pyrolysis gas and a complex separation equipment after the pyrolysis reactor. Mechanical-contact reactors produced a pyrolysis gas with higher heat value but more wear-and-tear in rotating parts. Mechanical-contact reactors including rotating cone reactor, ablative coil reactor, vertical mixing reactor and rotary kiln reactor have been discussed in detail. Moreover, the vacuum pyrolysis reactor and Enersludge process were also analyzed. The heating modes by infrared-wave or microwave are still in lab-scale research stage and have not been reported in practical use.

Keywords: Biomass; pyrolysis; Reactors; Heating mode

低温热解制油反应装置

王 鑫, 杨晓奕*

北京航空航天大学, 北京, 中国, 100191

yangxiaoyi@buaa.edu.cn

摘要: 本文对生物质低温热解制油的反应装置类型及其加热方式进行了综述。其中流化床反应装置由于不存在运动部件, 反应器的磨损小, 因而在生物质热解中得到广泛使用, 但是流化气的使用降低了可燃气体的热值, 同时后续分离工艺需要复杂的装置。机械接触式反应器包括旋转锥反应器、烧蚀涡流反应器、卧式搅拌反应器和旋转窑等虽然产生的气体热值相对集中, 但是运动部件磨损较多。本文还对真空热解反应器和 Enersludge 处理工艺进行了分析。此外, 对红外和微波等新型加热方式虽处于实验研究阶段还没有工业应用的装置, 文中也进行了探讨。

关键词: 生物质; 热解; 反应器; 加热方式

1 低温热解制油技术

低温热解制油技术是指在无氧或氧含量较低的情况下加热原料至一定温度(一般小于或等于500℃), 在干馏和热分解作用下原料转化为生物油(或称热解油)、反应水、不凝性气体和焦炭四种产物的过程^[1]。其中的不凝性气体和焦炭可通过燃烧来为低温热解制油过程提供热量, 其余能量以生物油(液体)的形式回收, 因此低温热解制油技术具有很好的应用前景。生物油经过脱水、净化和催化重整可以用作高品质的液体燃料。由于生物油和液体化石燃料在燃烧装置上具有一定兼容性, 而且它们的物理化学性质相似, 因此生物油在技术上可以代替化石燃料。热解过程残留的焦炭具有较大的空隙率和比表面积, 可以用来作廉价的吸附剂和建材等。从能量平衡角度分析, 只要原

料的含水率小于一定值, 低温热解制油过程就是一个可以实现能量自给自足的过程^[2]。

影响低温热解制油过程产油率和生物油品质的因素很多, 主要有样品的种类、含水率、热解温度、升温速率和气相停留时间等。其中热解温度是最重要的影响因素。热解温度的高低直接影响原料中有机质的转化程度, 温度越高有机质转化率越高, 但是当热解温度过高时生成的生物油会发生二次裂解, 生成小分子的气态产物, 从而降低生物油的产率。大量研究结果表明: 当追求生物油产率时, 热解温度应控制在400~500℃之间。另外, 原料的种类在很大程度上影响了产油率的高低, 这种差别主要体现在原料中挥发份的多少。一般的木质基生物质挥发份含量在70%以上, 而城市固体废弃物(如污泥)的挥发份含量只有60%或更低。生物油是由原料中的有机质转化而成的,

高的有机质含量必然会有较高的产油率。气相停留时间影响主要是因为长的停留时间必然造成生物油的二次裂解，从而降低产油率。不同类型的反应器的气相停留时间各不相同，但是选取的原则应该是在保证热解温度不受影响的前提下，尽可取较短的停留时间。

热解技术的应用历史悠久，如古埃及人将热解得到的液体用作防腐剂，古希腊人和古罗马人则将这种液体用于填充和连接木船上的细缝和缺口^[3]。但是真正地开发出适用于低温热解制油的现代工业装置不过才几十年的历史，如果原料是污泥的话，这个时间将会更短。低温热解制油装置的种类繁多，国内外学者也进行了较多的研究工作，设计出了许多适合这一反应过程的装置。

反应器类型及加热方式的选择在很大程度上决定

了产物的最终分布，是热解各种技术路线的关键环节。反应器应具有加热速率快、反应温度中等和气相停留时间短等特征。按照热解过程中受热方式的不同，可以将低温热解制油反应器大概分为三种类型：机械接触式反应器、间接式反应器和混合式反应器。

上述三种类型的热解反应器主要是在常压下运行，另外，在较低加热速率下进行的真空热解反应器也能取得较高的生物油产量^[4]。表 1 列出了部分国外热解反应器的类型、加热方式及其主要研究机构信息。评价一个设备好坏的标准包括以下三个方面：设备的最大产油率、设备的能量利用率以及设备是否易操作，易维护。本文针对几种比较典型的热解反应装置进行了详细叙述，总结了低温热解制油的反应器及其各自的加热方式，分析了它们各自的优缺点。

Table 1. Pyrolysis reactors and heating methods
表 1 热解反应器类型及其加热方式汇总^[5]

反应器类型	加热介质	主要研究机构
烧蚀涡流反应器	壁面加热	美国 Castle Capital 公司
烧蚀磨反应器	壁面（圆盘）加热	美国科罗拉多矿业学院
烧蚀盘反应器	壁面加热	英国阿斯顿大学、法国南希国家科研中心
烧蚀旋风反应器	壁面加热	Interchem 公司、美国国家可再生能源实验室
奥格窑	壁面加热	德国蒂宾根大学、加拿大西城学院
循环流化床	焦炭气化热、热沙子	希腊可再生能源和节能中心、雅典农业大学
旋风床	壁面加热	法国南希国家科研中心
夹带床	燃烧尾气	Egemin 公司
夹带床	热沙子	乔治亚理工学院研究所
固定床	燃烧尾气	法国 Alten 公司
固定床	部分气体产物	Italenergie 公司
固定床	过热气体	英国卡蒂夫大学
流化床	热的循环气	达茂能源股份有限公司、葡萄牙国家工程技术创新研究所等
流化床	热的惰性气体	希腊化工过程工程研究所、美国可再生能源实验室、阿斯顿大学
流化床	部分气体产物	英国利兹大学、德国萨萨里大学、德国斯图加特大学
水平床反应器	水管	加拿大 Wastech 公司
多段加热炉	炉壁加热	加拿大拉瓦尔大学
旋转窑反应器	壁面加热	PKA 公司、Stenau 公司、西门子公司、美国堪萨斯卫斯理大学等
旋转锥	壁面和沙子加热	荷兰特文特大学
搅拌床	部分气化产物	法国 Alten 公司
传输床	循环热沙子	美国 Ensyn 科技有限公司
真空移动床	直接和热表面接触	加拿大拉瓦尔大学、Pyrovac 公司

2 机械接触式反应器

机械接触式反应器是通过一灼烧的反应器表面直接或间接与生物质接触，从而将热量传递到生物质表

面而使其高速升温达到快速热解，其采用的热量传递方式主要为热传导，辐射是其次的，对流传热则不起主要作用，常见的反应器有旋转锥反应器、烧蚀涡流反应器、卧式搅拌反应器和旋转窑等。

2.1 旋转锥热解反应器

“旋转锥”是由英文单词“Rotating Cone”翻译过来的，名字本身就很形象地描述了旋转锥反应器的特点。它是在1989~1997年间由荷兰特文特大学发明，最终由BTG公司发展起来的。图1就是旋转锥热解反应器的一个示意图。

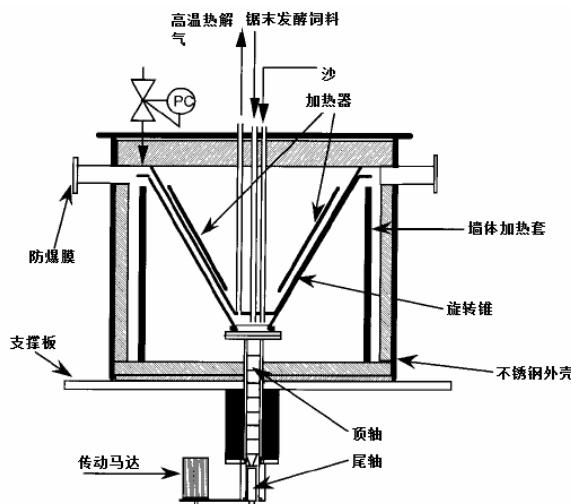


Figure 1. Rotating cone reactor
图 1. 旋转锥热解反应器

旋转锥生物质热解反应器主要由固定的内锥、旋转的外锥、反应器加热元件以及外壳组成。生物质和热砂子在离心力作用下沿着旋转的高温锥壁螺旋上升，发生热解反应，与流化床相比，不需要载气量，但系统较复杂，旋转设备在高温下运行容易出故障。

国内沈阳农业大学于1995年引进了一套规模为10kg/h的转锥式热解装置，东北林业大学研制了中国第一套三锥齿缘式锥式反应器^[6]。上海理工大学在荷兰特文特大学开发的旋转锥式热解反应器的基础上，设计了一套旋转锥生物质热解液化装置，但产油率不高^[7]。

2.2 烧蚀涡流反应器

美国可再生能源实验室(NREL)研制出最新的烧蚀涡流反应器。同其它热解方法相比，烧蚀热解在

原理上有实质的不同。在所有其它热解方法中，生物质颗粒的传热速率限制了反应速率，因而要求较小的生物质颗粒。在烧蚀热解过程中，热量通过热反应器壁面来“融化”与其接触的处于压力下的生物质。生物质被机械装置移走后，残留的油膜可以给后继的生物质提供润滑，蒸发后即成为可凝结的生物质热解蒸汽。反应速率的影响有压力、反应器表面温度和生物质在换热表面的相对速度。图2是烧蚀涡流反应器的示意图。装置中的生物质被加速到超音速来获得加热桶内的切向高压。未反应的生物质颗粒继续循环，反应生成的细小颗粒和碳粒沿轴向离开反应器进入下一工序。后续工艺中安装了热蒸汽过滤设备，成功地防止了微小的焦炭颗粒在裂解气被冷却过程中混入生物油，同时这也使得油中的灰分含量低于0.01%，并且碱金属含量很低。典型的生物油产率为60%~65%(干燥基)^[8]。

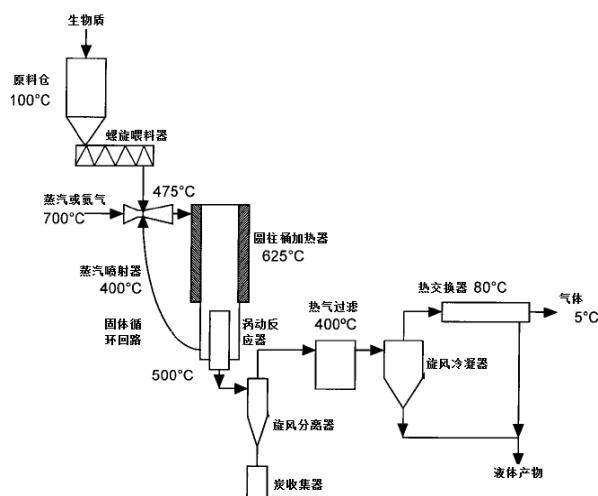


Figure 2. Ablative coil reactor
图 2. 烧蚀涡流反应器

2.3 回转窑反应器

在建材、冶金、化工、环保等许多生产行业中，广泛地使用回转设备对固体物料进行机械、物理或化学处理，这类设备被称为回转窑。回转窑的应用起源于水泥生产，1824年英国水泥工阿斯普发明了间歇操作的土立窑；1883年德国狄茨世发明了连续操作的多层立窑；1885年英国人兰萨姆发明了回转窑，在英、美取得专利后将它投入生产，很快获得可观的经济效益。

李水清、李爱民和陈超等人在回转窑实验装置上

进行了污泥热解实验^[9, 10]。回转窑以其广泛的物料(各种尺寸及形状的固体和液体、气体废弃物)适应性及操作简单、控制方便等一系列优点, 已成为各种废弃物热解的主要炉型之一。09年3月中国最大的利用水泥窑(回转窑)处理污泥项目在广州建成投产。

2.4 立式搅拌反应器

立式搅拌反应器外壳采用钢管制成, 内部由电机带动旋转轴转动, 旋转轴上插有叶片, 对污泥颗粒进行搅拌。装置采用沙粒作为热载体, 通过夹套进行加热, 热解产生的蒸汽向上运动进入冷却装置。装置示意图如图3所示。

2009年E. Pokorna利用立式搅拌反应器进行了三种不同来源的污泥热解实验。加热介质采用白沙子, 载气为氮气。进料和反应器均采用螺旋搅拌器, 反应器采用夹套加热^[11]。

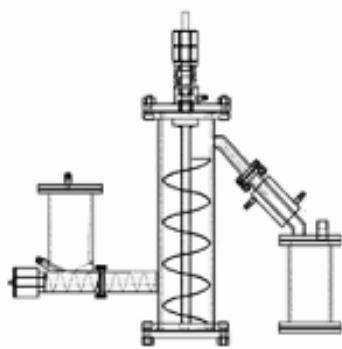


Figure 3. Vertical mixing pyrolysis reactor
图 3. 立式搅拌热解装置

3 间接式反应器

间接式反应器的是由一高温的表面或热源提供生物质热解的所需能量, 其主要是通过热辐射进行热量传递, 对流和导热则居于次要地位, 常见的热天平和落下床反应器可归属此类。间接式反应器主要是通过辐射的方式加热生物质, 例如红外辐射^[12]、微波、高温光源和高温壁面等。

3.1 热辐射反应器

Chan设计了一种用于研究单颗粒生物质热裂解行为的反应器及相关的分析系统。该反应器的热源是一个1000W的氘灯, 其均匀提供0~25W/cm²的一维高强度热通量给内置在玻璃反应器内套管的试样, 反

应器、氘灯以及热通量测定装置固定在光学台架上进行精确校正。单颗粒生物质的热解试验在常压下进行, 得到了约40%的生物油。该类反应器中生物质颗粒以及各热解产物的辐射吸收特性存在差异, 使得温度控制较为困难, 同时, 因需要提供高温热源而限制了其实际应用, 通常只在机理研究时才采用^[4]。

3.2 落下床反应装置

早在上个世纪90年代初期国内大连理工大学就采用落下床工艺验证了污泥低温热解制油的可行性。热分解设备的主体是辐射加热炉, 其原理是一种采用落下床间接加热方式的立管炉, 管长1.2m, 内径30mm。污泥颗粒由管顶部的给料机连续送入, 在管内分散自由落下, 接受炉管高温辐射传给的热量而迅速分解, 约1s左右即可达到规定的加热温度。污泥颗粒落入下部的反应器后恒温10min, 固体残渣经夹套水冷器冷却后导出, 挥发产品经除尘后导出。实验结果表明: 热解温度为600°C时, 生物油(不含水)产率为16.2%(干基), 热解气产率为约30%^[13]。

3.3 微波加热器

微波是指波长在1mm~1m的电磁波, 微波加热是通过改变介质离子的迁移和偶极子的转动情况, 使介质分子运动加剧, 相邻分子间产生摩擦作用, 从而使分子获得能量, 达到使受热物体升温的目的。2000年以后微波作为一种新型的加热方式, 具有加热快、温度分布均匀的特性, 广大国内外科研工作者将此技术应用于污泥高温热解, 进行了较多的基础研究。

工业规模的微波加热污泥热解装置还未见报道, 实验室规模的装置一般是将传统加热炉换成微波加热器, 如图4所示。

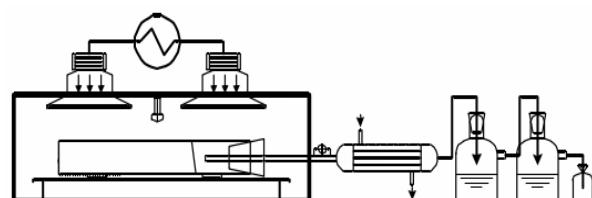


Figure 4. Lab-scale microwave heating pyrolysis reactor
图 4. 实验室规模微波热解装置

4 混合式反应器

混合式反应器主要是借助热气流或气固多相流对

生物质进行快速加热，其主要热传导方式是对流换热，但导热和热辐射有时也不可忽略，常见的反应器有流化床反应器、快速引射反应器、循环流化床反应器等。

4.1 流化床反应器

流化床的概念是指通过一个向上流动的空气或烟气维持一个颗粒床处于流动悬浮状态，第一台成功运行的流化床是德国人 Friz Winkler 于 1921 年 12 月发明的。图 5 为采用外部电加热提供热源的一种流化床生物质热解的工艺流程。生物质经干燥、磨碎和筛分等预处理工艺后成为粒径小于一定值（如 1mm）的颗粒物料，然后通过可调速的螺旋进料器送入液化反应器^[3]。热解产生的蒸汽经过旋风分离器和两级冷凝装置后进入收集装置。

加拿大滑铁卢大学开发的流化床反应器具有结构简单、运行方便、传热效率高和易工业放大的优点，同时需要小粒径的给料、高效的焦炭分离设备和大型化后面临着床内传热不佳等问题。采用该流化床技术，西班牙 Union Fenosa 公司在西班牙加利西亚省建立了一个 250kg/h 的半工业实验装置（现已关闭），英国 Wellman 公司在英国伯明翰附近建造了相同容量的实验装置，这也是当时欧洲最大的流化床热解反应器。

加拿大 Dynamotive 公司在加拿大安大略省完成建造了日处理木材加工厂废弃物 100 吨的流化床热解装置，每天生产生物油 70 吨，其中 50 吨作为燃气轮机燃料发电，可满足 2500 个家庭的需要，同时多余的热量每小时还可以产生 5 吨蒸汽。这是目前世界上已建成的第一个以生物油为燃料的热电联产项目，该公司目前正在建造 200 吨/天规模的生物质热解生物油热电联产系统^[14]。

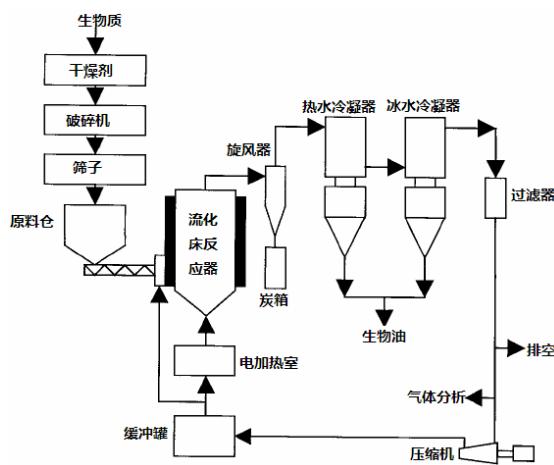


Figure 5. Fluid bed reaction system

图 5. 流化床反应系统

2001 年 H. Schmidt 和 W. Kaminsky 分别在实验室规模试验台和工业规模试验台上进行了污泥低温热解实验。两种试验装置均采用流化床结构，配套的冷凝、分离装置均相同。实验室规模试验台加热方式采用 10KW 的电加热器，而工业规模试验台采用四个火焰加热器，燃料为丙烷（或热解气），燃烧的尾气用来加热流化气体。流化气为经过冷凝和除尘的热解气。实验结果表明：流化床热解反应器可以高效地回收含油污泥中的有机成分^[15]。

2003 年 Lilly Shen 和 Dong-Ke Zhang 在流化床反应器上进行了污泥热解实验，该装置采用电加热器（230W, 15A）预热流化气体（氮气），而且流化床上附加三个小功率的电加热器（150W, 10A）来弥补流化床的热损失。实验没有采用热解气或燃气加热的方式的原因是实验仪器规模较小，若采用上述方法加热实验过程不易控制，流化气的预热温度可在 300~600℃ 内调节。最大产油率为 30%，最大产油率所对应的温度和气相停留时间分别为 525℃ 和 1.5s^[16]。

国内主要研究单位有上海交通大学、浙江大学、山东理工大学和中国科学技术大学等等。其中中国科学技术大学于 2004 年成功研制出每小时 15kg 物料的电热式热解液化工业小试装置，2006 年研制出每小时处理 150kg 物料的自热式热解液化工业中试装置^[17]。

4.2 循环流化床反应器

循环流传床反应器与常规流化床反应器的基本结构相同，主要区别是循环流传床反应器将热解液化获得的炭粒送入流化床反应器底部的沸腾床，其燃烧后获得的高温烟气一部分作为流化介质均匀分布地吹入床内。该反应器可以使用较大粒径的原料，热解气停留时间可以很短，适合于大量的生产，与流化床一样面临着高效分离焦炭和大型化后床内传热的问题，另外还有设备磨损和物料循环带来的控制复杂问题。

加拿大 Ensyn 公司在欧盟的资助下在意大利 Bastardo 镇附近建有 650kg/h 的循环流传床热解装置供研究用，该技术被称为 RTP™ (Rapid Thermal Pyrolysis)。该公司还在美国威斯康星州建有处理量分别为 50 吨/天和 70 吨/天的生物质热解工厂，专门生产食品添加剂等产品。另外芬兰的 Fortum 公司建有容量 500kg/h 的循环流传床热解装置^[14]。国内中科院广州能源所自主研制了生物质循环流传床液化装置。

5 其它

5.1 真空热解反应器

图 6 是生物质低温热解真空反应器的示意图。加拿大 Laval 大学设计了生物质真空热解装置，以完善反应过程和提高产量，在 1996 年成立了 Pro-system 能源公司，负责把这个反应器大型化，上述这套系统已经商业化运行。

物料干燥和破碎后进入反应器，物料送到两个水平的金属板，金属板被混合的熔融盐加热且温度维持在 530℃ 左右，熔融盐是通过一个靠在热解反应中产生的不可凝结气体燃烧提供热源的炉子来加热。另外，

合理地使用电子感应加热器以保持反应器中的温度连续稳定，物料中的有机质加热分解所产生的蒸汽依靠反应器的真空状态很快被带出反应器，挥发份气体直接输入到两个冷凝系统：一个是收集重油，一个收集轻油和水分通过这套系统得到的比较典型和物料有关的热解产物是 47 % 的生物油、17 % 的裂解水、12 % 的焦炭和 12 % 的不可凝结热解气。

该系统的最大的优点是真空下一次裂解产物很快的移出反应器从而降低了裂解气二次反应的概率。不过该反应器所需要的真空需要真空泵的正常运转以及极好的密封性来保证，这就加大了成本和运行难度^[4]。

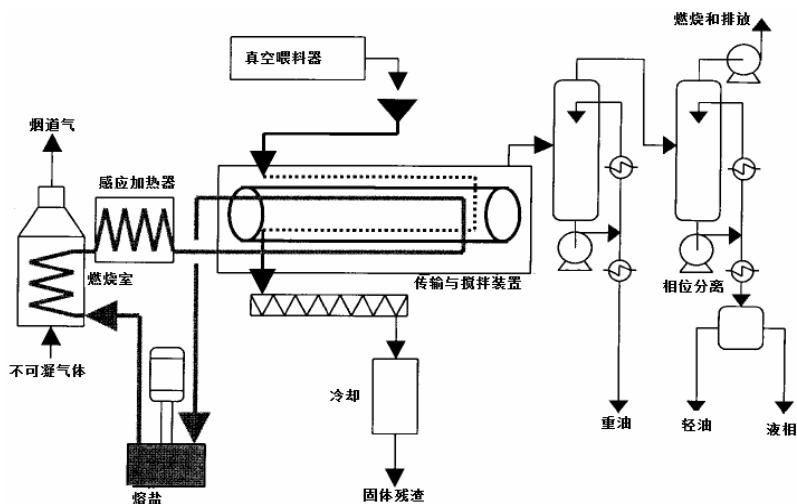


Figure 6. Vacuum pyrolysis reactor

图 6. 真空热解反应器

5.2 Enersludge 工艺

澳大利亚 ESI 公司发展了 Enersludge 工艺来处理污泥。污泥经过离心脱水和干燥之后送入一个双级反应器。其中第一个反应器为挥发区（450℃），第二个反应器为反应区。反应器通过壁面加热污泥，热量来自热解过程中产生的不凝气体和焦炭。经过干燥的污泥送入第一个反应器后，污泥中的有机质便受热挥发出，随后热解蒸汽和热解固体残渣通过管路进入第二个反应器发生催化反应。热解蒸汽在固体残渣中催化剂的作用下成分发生变化，其组成更接近于柴油。不可冷凝的气体和热解焦渣经燃烧放出热量，为热解和干燥过程提供能量^[18]。

利用该工艺每吨干污泥可以产生 200~300L 的生

物油，生物油的热值大约为 35GJ/L。灰分可以用来做建材，燃烧产生的热量完全可以满足整个过程中干燥和热解所需的。由于所燃烧的原料中没有有机氯等结构复杂的有机物，因此可以设置较低的燃烧温度，燃烧室结构可以设计的更小。随着设计燃烧温度的减低，整个过程的 NO_x 排放也会更低。

6 结论

综上所述，低温热解制油反应器不仅在外形上差别较大，最主要的是生物油产量和生物油成分也随反应器结构的变化而变化。这主要是因为不同的热解反应器采用不同的加热模型，不同的加热模型中导热、对流换热和辐射换热三种传热方式所占比例不同，造成不同的加热模型下生物质中有机质大分子断裂机理

不同。由于各种反应器都有其各自的优缺点，不能直接断言哪一种反应器最好。热解反应器的设计工作仍然需要进一步的研究。本文总结了低温热解过程中反应器的主要类型及其特点，主要得出的结论如下：

(1) 只要原料的含水率小于一定值，低温热解制油过程就是一个可以实现能量自给自足的过程，而且污泥低温热解制油工艺不仅可以回收能量，同时还能减少环境污染；

(2) 以木质基生物质为原料的低温热解反应器的发展较为成熟，而污泥热解反应器的设计和研制工作相对落后；

(3) 机械式反应器由于存在运动部件，容易损坏，但是操作方便，不需要载气，热解气体热值较为集中；

(4) 与机械式反应器不同，流化床反应器不存在运动部件，设备磨损小，但是需要循环气，热解气体中由于混入了惰性气体而使热值降低。同时它存在焦炭和热解蒸汽分离问题，要达到一个好的分离效果，必须组合使用旋风分离器和热蒸汽过滤器，成本较高；

(5) 一些新型的反应器，如微波加热器、红外加热器，都处于试验研究阶段，没有成形的工业装置；

(6) 热解反应器的设计必须考虑后续工艺，必须有利于生物油的收集、净化和升级等。

致 谢

本课题由“航空推进创新引智项目（111 项目）”提供资金支持。

References (参考文献)

- [1] Bayer B., M Kutubuddin. Low temperature conversion of sludge and waste to oil[A]. Proceedings of the international Recycling Congress. Berlin: EF Verlag, 1987, 314-318.
- [2] He Pinjing, Gu Guowei, Shao Liming, et al. The Study on the Low-temperature Pyrolysis Process for Sewage Sludge[J]. *China Environmental Science*, 1996, 16(4), 254-257.
何品晶, 顾国维, 邵立明, 等. 污水污泥低温热解处理技术研究[J], 中国环境科学, 1996, 16(4), 254-257.
- [3] Zhu Xifeng. Mechanism and Technology of Biomass Pyrolysis[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 2006, 181.
朱锡锋. 生物质热解原理与技术[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2006, 181.
- [4] Zhang Jianan, Liu Dehua. Technologies using biomass energy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008, 63-64.
张建安, 刘德华. 生物质能源利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008, 63-64.
- [5] A. V. Bridgwater. Principles and practise of biomass fast pyrolysis processes for liquids[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1999, 51, 3-22.
- [6] Zhao Jun, Wang Shuyang, Qiao Guochao, et al. Development of rotating cone biomass pyrolysis mechanical system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5), 198-200.
赵军, 王述洋, 乔朝国, 等. 转锥式生物质热解机械系统的研制[J], 农业工程学报, , 2007, 23(5), 198-200.
- [7] Zeng Zhong. The Technology of Rotating Cone Pyrolysis of Biomass[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2002, 20(2), 215-217.
曾忠. 生物质热解液化实验研究[J]. 应用科学学报, 2002, 20(2), 215-217.
- [8] Li Peisheng, Sun Lushi, Xiang Jun. Combustion and Pyrolysis of Solid Waste[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2006, 182-183.
李培生, 孙路石, 向军. 固体废物的焚烧和热解[M]. 北京: 中国环境出版社, 2006, 182-183.
- [9] Li Shuiqing, Li Aimin, Ren Yuan, et al. Experimental Investigation of paper Mill Sludge Pyrolysis in the Laboratory-Scale Rotary Kiln[J], *Journal of Engineering Thermophysics*, 1999, 20(3), 373-377.
李水清, 李爱民, 任远等. 造纸污泥在回转窑中热解的试验研究[J], 工程热物理学报, 1999, 20(3), 373-377.
- [10] Chen Chao, Li Shuiqing, Yue Changtao, et al. Lab-scale pyrolysis of oil sludge in continuous rotating reactor: mass/energy balance and product analysis[J], *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2006, 57(3), 650-657.
陈超, 李水清, 岳长涛等. 含油污泥回转式连续热解—质能平衡及产物分析[J], 化工学报, 2006, 57(3), 650-657.
- [11] E. Pokorna, N. Postelmans, P. Jenicek, et al. Study of bio-oil and solids from flash pyrolysis of sewage sludge[J], *Fuel*, 2009, 88, 1344-1350.
- [12] Shi Zhongping, Hua Zhaozhe. Biomass and biomass energy handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006, 116.
史仲平, 华兆哲. 生物质和生物质能源手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 116.
- [13] Liu Lifen, Zhao Shuchang, Deng Yizhao, et al. Experimental Study of Energizing Activated Sludge: Tests of Thermal Flash Pyrolysis[J], *China Journal of Environment Science*, 1991, 12(2), 2-8.
柳丽芬, 赵树昌, 邓贻钊等. 废水污泥快速热分解试验研究[J], 环境科学, 1991, 12(2), 2-8.
- [14] Wang Xianhua. The experimental study and application of biomass fast pyrolysis with fluidized bed[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
王贤华. 生物质流化床热解液化实验研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [15] H. Schmidt, W. Kaminsky. Pyrolysis of oil sludge in a fluidised bed reactor[J], *Chemosphere*, 2001, 45, 285-290.
- [16] Lilly Shen, Dongke Zhang. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidised-bed[J], *Fuel*, 2003, 82, 46-472.
- [17] Xu Qingli, Xu Hanshen, Li Hongyu, et al. Research process of bio-oil technology and reactor[J], *Jiangsu Chemical Industry*, 2008, 36(6), 15-18.
许庆利, 薛瀚深, 李洪宇, 等. 生物质制备生物油裂解反应器研究进展[J], 江苏化工, 2008, 36(6), 15-18.
- [18] S. Skrypski-Mantele, T. R. Bridle. Environmental sound disposal of tannery sludge[J], *Water Resource*, 1995, 29(4), 1033-1039.