

生物质无轴螺旋连续热解装置送料器设计及中试

王明峰, 徐强, 蒋恩臣, 任永志, 吴宇健, 陈晓堃

(华南农业大学材料与能源学院, 农业部能源植物资源与利用重点实验室, 广州510642)

摘要:为解决有轴螺旋送料器存在质量大、能耗高、易产生机械干涉等问题, 该文设计了送料能力为150kg/h的生物质无轴螺旋送料器, 并以稻壳为原料开展了冷态输送和热解试验。设计的无轴螺旋送料器关键尺寸为: 螺旋外径为400mm、螺旋轴径为80mm、螺距为200mm, 送料器采用柴油燃烧机和热解气回烧的方式加热, 计算出燃烧机需要提供的功率为95.43kW。稻壳冷态输送试验表明, 当送料频率为50Hz即无轴螺旋的转速为2.03r/min时, 无轴螺旋送料器输送稻壳的送料量为224.3kg/h > 150kg/h, 无轴螺旋送料器的实际送料量高于理论计算值。稻壳热解试验表明, 当加热腔最高温度为(700 ± 50) °C时, 随着热解时间增加, 稻壳炭的挥发分质量分数由22.45%减至13.6%, 灰分质量分数由29.38%增至33.44%, 固定碳质量分数由48.17%增至52.96%。稻壳炭的高位热值随热解时间增加而增加, 但在试验范围内增幅不大。热解时间对生物炭品质影响较大, 即传热速率是限制大型连续热解反应器处理效率提高的主要因素, 因此, 在工业化应用的大型热解反应器的设计中, 应着重考虑提高热解传热效率的方法。

0引言

生物质能是可再生能源的重要组成部分, 对其进行高效地开发利用, 对解决能源紧缺, 生态环境恶化等问题发挥着十分积极的作用^[1-2]

。生物质热解是指生物质在完全缺氧或者厌氧的环境下, 利用热能切断生物质大分子中的化学键, 将其转变为气体、液体和固体产物的热化学过程^[3-5]。研制节能高效的生物质热解反应器是高效地利用生物质能的关键之一。

目前, 生物质热解反应器的主要类型有流化床反应器、固定床反应器、携带床反应器、涡旋反应器、烧蚀反应器、旋转堆反应器、真空热裂解反应器和螺旋反应器等^[6-13]

。但是, 至今仍然没有研发出得到广泛认可的反应器。加拿大滑铁卢大学(Waterloo)开发了以氮气为载气的常压流化

床热

解设备,

研究最大生物油产

率的反应条件, 高效、快速地利用生

物质资源, 特别是林业剩余物来生产生物油^[14]

。流化床热解设备具有加热速率快, 气相停留时间短, 控温简便, 固体产物分离简便等优点^[15-17]。

循环流化床反应器和流化床反应器原理相似, 具有高的传热速率和短暂的生物质停留时间, 是生物质快速热解液化反应器的另一种理想选择^[18]

。烧蚀反应器通过外界提供高压, 生物质颗粒以相对于反应器较高的速率(>1.2m/s)移动并热解, 生物质是由叶片压入到金属表面, 此反应器不

受物料颗粒大小和传热速率的影响, 但受加热速率的制约^[19]

。荷兰Twente大学发明研制的旋转锥反应器, 采用离心力来移动生物质, 生物质颗粒与过量的惰性热载体同时进入旋转锥反应器的底部, 当生物质颗粒和热载体构成的混合物沿着炽热的锥壁螺旋向上传送时, 生物质与热载体充分混合并快速热解, 而生成的焦炭和砂子被送入燃烧器中

燃烧, 预热载体^[20]。郑晓彪等^[21]

设计制作了双滚筒内螺旋式固体热载体生物质热解反应器, 结构简单紧凑, 增加了陶瓷球与生物质粉末接触机率, 强化了传热, 对生物质粉末和陶瓷球热载体的混

合效果好。华南农业大学^[22-23]

研发的生物质连续热解反应装置, 采用变螺距结构, 提高了螺旋送料器的送料能力和性能, 具有结构简单、反应条件易于操控、能够实现连续稳定作业的优点。

有轴螺旋送料器存在质量大, 能耗高, 高温条件下轴向伸长导致对轴承作用力增大, 降低轴承寿命, 物料受热膨胀后易黏附在旋转轴等问题。无轴螺旋

送料器的送料能力比有轴螺旋送料器高7.9%^[24]

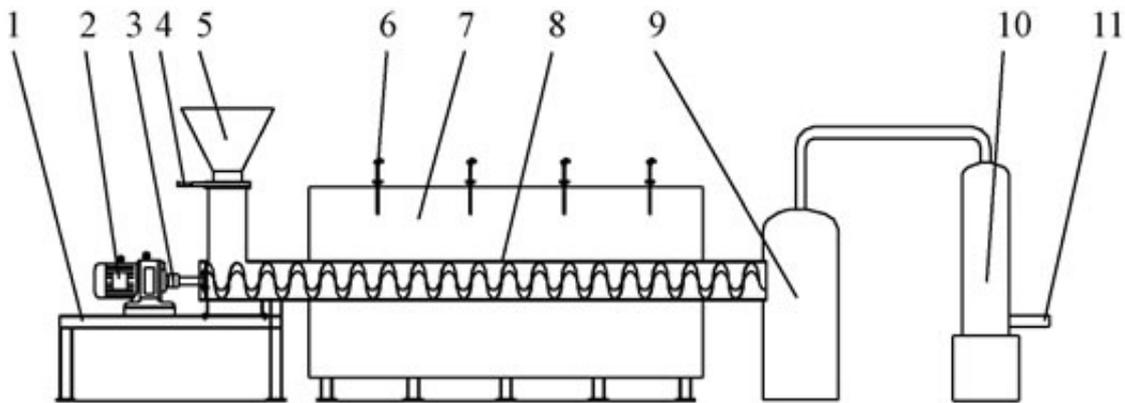
; 无轴螺旋送料器输送部件质量小, 仅为有轴螺旋送料器的1/2, 甚至更小, 运行功耗低; 输送过程中送料器不易堵塞, 能够有效地防止物料缠绕; 无轴螺旋送料器具有一定的伸缩性, 为受热膨胀的物料和热解挥发物排出提供足够的

空间，防止预热解的高黏度物料堵塞反应器。

本文在小型无轴螺旋送料器的基础上，设计了送料能力为150kg/h连续热解反应器核心部件：无轴螺旋送料器和加热组件，并在相应的试验装置上开展了以稻壳为原料的连续热解试验，为连续热解反应装置的工业化应用提供设计基础。

1连续热解反应装置

生物质无轴螺旋连续热解装置如图1所示，该装置采用水平布置的方案，由驱动电机、联轴器、无轴螺旋送料器、加热组件、料斗、炭箱、冷凝器等组成，其工作原理为：生物质原料从料斗进入无轴螺旋送料器，由无轴螺旋从反应器前段输送至末端，并在输送过程中完成干燥和热解过程，生成的挥发物和气体从炭箱上端的排气口进入冷凝器冷凝，木醋液和焦油收集储存，不可冷凝气体从出气口排出，热解产生的炭由螺旋送料器送入炭箱冷却、收集。



- 1.支架 2.驱动电机 3.联轴器 4.闸阀 5.进料斗 6.温度传感器 7.加热腔 8.无轴螺旋送料器 9.炭箱 10.冷凝器 11.出气口
1.Frame 2.Drive motor 3.Coupling joint 4.Sluice valve 5.Feeder 6.Temperature sensor 7.Heating chamber 8.Shaftless screw conveyor 9.Biochar box 10.Condenser 11 Gas outlet

图1 生物质无轴螺旋连续热解装置示意图

Fig.1 Sketch of biomass shaftless screw continuous pyrolysis reactor

2无轴螺旋送料器设计

2.1关键参数设计

一般的螺旋送料器的螺旋外径 D 、螺旋轴径 d 、螺距 S 和使用转速 n 应分别满足式(1)~式(4) [25]。

螺旋外径：

$$D \geq K \left[\frac{Q}{\psi \gamma C} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中 K 为物料的综合系数； ψ 为填充系数； γ 为物料的单位容积质量，生物质的单位容积质量一般在 $110 \sim 270 \text{ kg/m}^3$ ； C 为倾角系数，水平放置时取 1。

螺旋轴径：

$$d = (0.2 \sim 0.35) D \quad (2)$$

螺距：

$$S = (0.5 \sim 2.2) D \quad (3)$$

使用转速：

$$n \leq n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (4)$$

式中 A 为物料的综合特征系数，计算中 $A=50$ 。

根据生物质原料特性，参照《机械工程手册》，具体参数选择 $K=0.05$ ， $\psi=0.3$ ， $C=1$ 。生物质原料容重变化较大，当取 $\gamma=110 \text{ kg/m}^3$ 时， $D=91.62 \text{ mm}$ ，当取 $\gamma=270 \text{ kg/m}^3$

时， $D=6$

3.98mm。螺旋叶片

直径通常制成标准系列， $D=100、120$

、150、200、250、300、400、500和600mm^[26]

，相同工况下，螺旋外径越小，无轴螺旋送料器的输送能力越小，此外，转速一定的情况下，为了能够使生物质完全热解，必须增加加热段的长度以保证足够的热解时间。综合考虑，暂取螺旋外径 $D=400 \text{ mm}$ 。

根据式 (3)， $80 \text{ mm} < d < 140 \text{ mm}$ ，螺旋轴径增大，势必降低有效输送面积，故取螺旋轴径 $d=80 \text{ mm}$ 。根据式 (4)， $200 \text{ mm} < S < 440 \text{ mm}$ ，当螺距较大时，虽然轴向输送速度增大，但是会出现圆周速度不恰当分布情况，当螺距较小时，圆周速度分布情况较好。综合考虑，取螺距 $S=200 \text{ mm}$ 。考虑到高温时，材料的热变形较大，取螺旋外径与管壁的距离 $\delta=20 \text{ mm}$ 。由式 (4) 得，螺旋的许用转速为 $n_{\max}=79.06 \text{ r/min}$ 。文献[27]在螺旋连续热解反应器上开展了松木屑的热解反应，认为松木屑热解温度为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，粒度为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的固体生物质的最佳热解时间为 6 min 。由于本文设计的送料器直径和生物质原料粒度较大，完全热解所需时间较长，因此，对热解时间适当延长，暂定无轴螺旋送料器中原料热解时间为 8 min ，即 $t=8 \text{ min}$ 。连续热解反应器的加热段长度为 $l=4000 \text{ mm}$ ，由式 (5) 得，无轴螺旋的实际使用转速 $n=2.5 \text{ r/min}$ ，取实际转速为 $n=2 \text{ r/min}$ ，在此情况下，由式 (6) 得，无轴螺旋送料器的实际送料量 $Q=156.26 \text{ kg/h}$ ，可以满足设计要求。螺旋叶片由宽度为 160 mm ，厚度为 18 mm 的 310 不锈钢条制成。无轴螺旋送料器管筒用外径为 456 mm 、壁厚为 8 mm ，长度为 6000 mm 的 310 不锈钢管制成。为了保证整个装置的密闭性，在管筒进料端的进料口上端安装气动闸阀。

$$n = \frac{l}{st} \quad (5)$$

$$Q = 3600 \times \frac{\pi}{24} [D^2 - d^2] \psi S n \gamma C \times 10^{-10} \quad (6)$$

2.2 动力驱动

螺旋送料器的轴功率计算公式如下：

$$P_0 = QL_h \omega_0 K_1 / 367 \quad (7)$$

式中 P_0 为轴功率，kW； Q 为给料能力，t/h； L_h 为给料机长度，m； ω_0 为原料运动时的阻力系数，取 1.2~1.5； K_1 为螺旋工作系数， $K_1=1.1\sim 1.2$ ；电动机功率计算公式如下：

$$P = K_2 P_0 / \eta \quad (8)$$

式中 P 为电动机功率，kW； K_2 为功率备用系数， $K_2=1.2\sim 1.4$ ； η 为传动效率。

热解反应器所需要的电机驱动功率主要用来克服物料输送过程中的各种阻力所消耗的能量，主要包括以下几个部分：物料与机壳之间的摩擦作用所消耗的能量、物料与螺旋叶片之间的摩擦作用所消耗的能量、螺旋叶片与机壳之间的摩擦所消耗的能量、传动部分摩擦的作用所消耗的能量、物料颗粒间的相对运动所消耗的能量^[28]

。由式（7）、（8）分别计算出 $P_0=0.0036\text{kW}$ ， $P=0.0055\text{kW}$ ，由此可知，物料输送过程中的各种阻力所消耗的能量较小，然而在热解过程中，物料受热后水分、挥发分析出会增加物料的黏度，导致输送功率增加；同时，物料也容易进入螺旋送料器叶片与筒壁的间隙，导致送料阻力骤增，因此生物质连续热解送料器应该有较大的功率储备。综上，本文选用额定功率为5.5kW四级三相异步减速电机，额定转速为1450r/min，减速比为29，利用变频器控制电机转速。

2.3 加热组件

加热组件提供热解过程所需要的能量，是无轴螺旋送料器重要的附属部件。根据文献[29]，1kg稻壳完全热解所需外界提供的热量为5MJ，稻壳热解三态产物中，可燃气体的质量约占25%，1kg稻壳热解产生的可燃气体燃烧释放的热量为3.871MJ。本文所设计的无轴螺旋送料器采用柴油燃烧机和热解气混合供热的方式提供热解所需热量，以热效率为0.7计算^[29]

，热解1kg稻壳，柴油燃烧机提供的热量为1.129MJ。装置设计的处理量为150kg/h，根据式（9）计算柴油燃烧机所需提供功率 $P=95.43\text{kW}$ 。因此，选用百特斯PX10柴油燃烧机，其输出功率为58~116kW，提供一定的功率储备，以适应不同生物质原料热解。

$$P_w = Qq / 3600 \quad (9)$$

式中 P_w 为加热功率，kW； q 为热值，kJ； Q 为单位时间内的处理量，kg/h。

生物质热解可以分为干燥失水、预热解阶段、热解阶段、炭化阶段4个阶段，其中干燥失水、预热解阶段反应温度较低，热解阶段、炭化阶段反应温度较高，因此，将柴油燃烧机布置在无轴螺旋送料器的出料端，热解过程中能够沿送料器送料方向形成逐渐升高的温度梯度，满足热解不同反应阶段的温度要求。

2.4其他配件主要参数

炭箱内部为微正压，因此，采用简单的圆筒结构，以方便加工，下端布置出料螺旋以便于取料。炭箱的设计相对简单，因此不再进行相关的设计计算，具体尺寸为 800mm × 1800mm。

炭化过程的冷凝主要分为固体产物的冷却和气体产物的冷凝，固体产物的冷却在炭箱中进行。气体产物通过炭箱上端的出气口进入冷凝器冷凝。根据产物特性，送料器处理量，参考《换热器设计手册》，采用立式管层冷凝器，其尺寸为 700mm × 800mm，冷却水流量为800kg/h，换热面积为10.7mm²。

3无轴螺旋送料器输送特性及热解特性试验及结果分析

3.1试验原料

试验以稻壳为原料，稻壳购自于广州某稻谷加工厂。其工业分析结果与堆积密度见表1，工业分析方法参考国标GB/T28731-2012固体生物质燃料工业分析方法，堆积密度测量方法参考《NY/T1881.6-2010》。

表 1 稻壳工业分析与堆积密度

Table 1 Proximate analysis and stacking density of rice husk

原料 Material	工业分析 Proximate analysis				堆积密度 Stacking density/(kg·m ⁻³)
	水分 Moisture/%	挥发分 Volatile/%	灰分 Ash/%	固定碳 Fixed carbon/%	
稻壳 Rice husk	11.24	62.34	12.38	14.05	117.88

3.2试验方法

1) 螺旋叶片转速测定：调节变频器频率控制电机转速，记录螺旋叶片转动3圈所需时间，重复3次，取平均值，计算螺旋叶片转速。

2) 冷态送料量测定：在料斗中加入稻壳，调节变频器频率，打开闸阀，当有稻壳落入炭箱后，开始计时，称量3min内无轴螺旋送料器输送稻壳的质量，重复3次，计算单位时间送料量。

3) 热解试验：调节燃烧机工作负荷，控制加热腔最高温度为(700 ± 50)℃，在料斗中加入稻壳，打开驱动电机电源，控制变频器频率分别为10、20、30Hz进行稻壳连续热解试验，记录测温点温度变化，试验结束，对不同频率下得到的稻壳炭进行工业分析和热值分析。

3.3结果与讨论

3.3.1冷态输送特性

试验结果如表2所示，变频器送料频率与各电机转速之间呈现较好的正线性相关关系，传动性能稳定，能有效地控制螺旋叶片转速。当送料频率为50Hz时，无轴螺旋叶片的转速为2.03r/min，对应的稻壳送料量为224.3kg/h，远大于理论送料量。在输送过程中，发现稻壳密实地填充在送料器内，并受到螺旋叶片的挤压作用，即实际填充率远大于理论计算的选用值，导致实际送料量比理论计算值高。

表 2 冷态试验结果

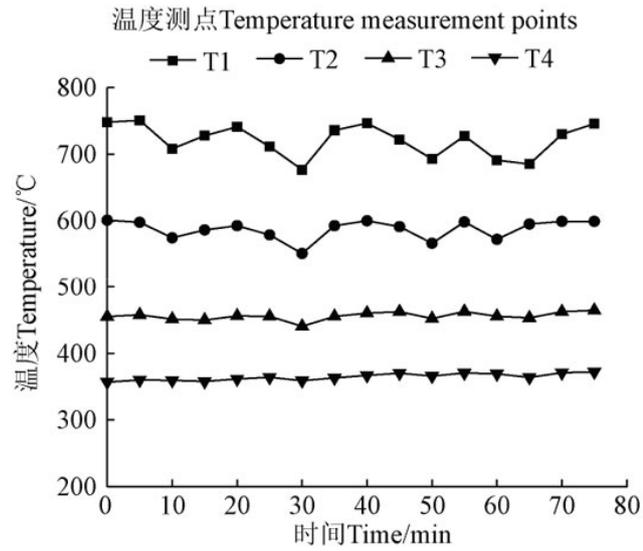
Table 2 Cold state experimental results

频率 Frequency/Hz	转速 Rotation rate/(r·min ⁻¹)	送料量 Feeding amounts/(kg·h ⁻¹)
10	0.4	49
20	0.82	86.5
30	1.23	144.5
40	1.63	166.5
50	2.03	224.3

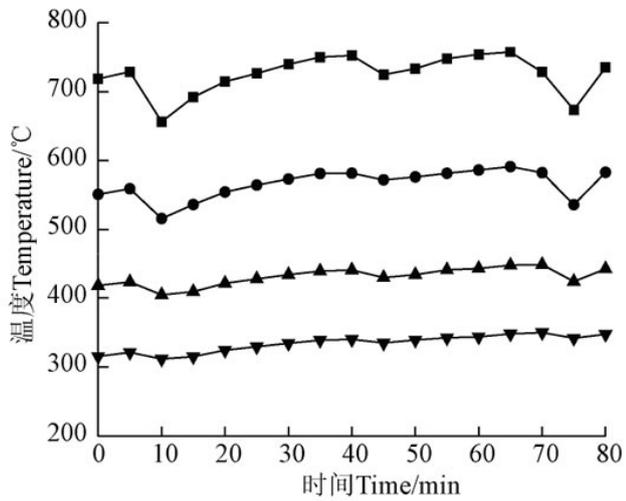
3.3.2热解特性

如图1所示，加热腔上端平均布置了4个测温点，用温度传感器测量各测温点的温度，从右至左，依次为T1、T2、T3、T4。稻壳热解时测温点T1、T2、T3、T4的温度变化曲线如图2所示。

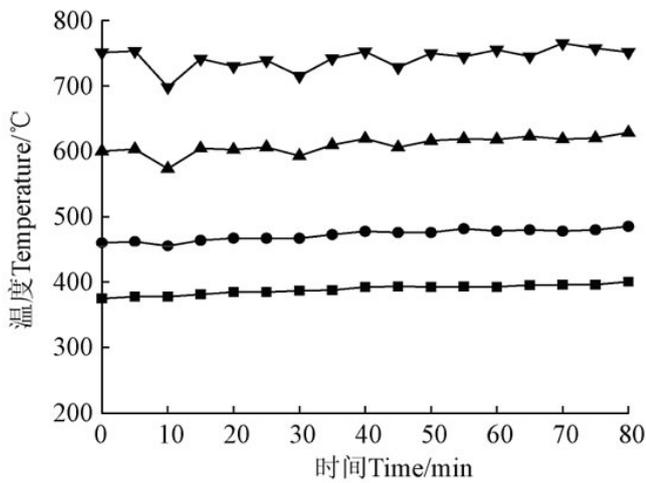
不同送料频率下，各加热腔温度较稳定，4个测温点温度存在梯度， $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ，测温点离柴油燃烧机越远，温度越低。调节柴油燃烧机功率控制热解温度，T1、T2测温点离柴油燃烧机较近，对柴油燃烧机功率变化反应灵敏，引起了较大的温度波动，T3、T4测温点离柴油燃烧机较远，对柴油燃烧机功率变化反应迟钝，温度波动较小。



a. 10 Hz



b. 20 Hz



c. 30 Hz

图 2 加热腔温度变化情况

Table 2 Temperature changes of heating chamber

热解时间对稻壳炭的影响如表3所示,随着热解时间增加,稻壳炭的挥发分质量分数由22.45%减至13.6%,灰分质量分数由29.38%增至33.44%,固定碳质量分数由48.17%增至52.96%,高位热值从19.307MJ/kg增至20.821MJ/kg,这说明增加热解时间有利于稻壳中挥发分的释放和固定碳的产生。随热解时间增加,稻壳炭的高位热值略微增加,热解时间对稻壳炭的高位热值影响不明显。

AlvarezJon等 [30]

以颗粒直径为0.63~1mm的稻壳为原料在锥形喷动床反应器开展了400~600连续热解试验,500热解得到的稻壳炭干基工业分析结果为:挥发分12.8%,灰分50.5%,固定碳36.0%。其挥发分含量与本文无轴连续热解装置上热解温度为(700±50)、变频器频率为10Hz时获得稻壳炭的挥发分含量相近,但是灰分含量和固定碳含量差异较大,说明不同类型的反应器对产物的品质影响较大。

表3 进料频率对稻壳炭的影响

Table 3 Influence of pyrolysis time on rice husk char properties

频率 Frequency/Hz	挥发分 Volatile/%	灰分 Ash/%	固定碳 Fixed carbon/%	高位热值 Higher heating value/(MJ·kg ⁻¹)
10	13.60	33.44	52.96	20.821
20	19.19	31.02	49.79	20.481
30	22.45	29.38	48.17	19.307

文献[31]中热解温度为550,热解时间为8min的工况下得到的稻壳炭的干基工业分析结果为:挥发分12.99%,灰分35.35%,固定碳51.67%,与本文在热解温度为(700±50)、送料频率为10Hz时获得稻壳炭的干基工业分析结果相近。可见,不同处理量的无轴螺旋连续热解反应器得到的热解炭品质较为接近。由于物料在反应器内传热速率较慢,热解反应器直径越大,热解过程中物料内部温度与加热部件之间的温度梯度越大,因此本文在(700±50)的热解温度下的热解炭工业分析结果与文献[24]中小型热解装置上的相近。

试验中发现,当送料频率为30Hz时,稻壳炭挥发分质量分数为22.45%,比送料频率为10Hz时得到的稻壳炭挥发分质量分数高8.85个百分点,但是,稻壳中的挥发分大部分已经得到释放。由试验数据可见,热解时间对生物炭品质影响较大,即传热速率是限制大型连续热解反应器处理效率提高的主要因素,因此,在工业化应用的大型热解反应器的设计中,应着重考虑提高热解传热效率的方法。

综上所述,本文设计的送料量为150kg/h的无轴螺旋送料器在冷态输送和热解试验中,物料输送顺畅,热解工况稳定,能够连续稳定作业,达到了生物质连续热解的要求。

4结论

1)设计的生物质连续热解无轴螺旋送料器螺旋外径为400mm,螺旋轴径为80mm,螺距为200mm。螺旋外径与管壁的距离为20mm,螺旋叶片由宽度为160mm,厚度为18mm的310不锈钢条制成。无轴螺旋送料器管筒使用外径456mm、壁厚8mm、长度为6000mm的310不锈钢管制成。

2)根据冷态输送特性试验可知,当变频器频率为50Hz,即无轴螺旋的转速为2.03r/min时,设计的无轴螺旋送料器输送稻壳的送料量为224.3kg/h > 150kg/h,无轴螺旋送料器的实际送料量高于理论计算值。

3)根据热解特性试验可知,随着热解时间增加,稻壳炭的挥发分质量分数由22.45%减至13.6%,灰分质量分数由29.38%增至33.44%,固定碳质量分数由48.17%增至52.96%。随热解时间增加,稻壳炭的高位热值略微增加,热解时间对稻壳炭的高位热值影响不明显。当变频器频率为10Hz时,热解获得的稻壳炭品质较好,当变频器频率为30Hz时,稻壳挥发分质量分数为22.45%。

热解时间对生物炭品质影响较大即传热速率是限制大型连续处理效率提高的主要因素,因此,在工业化应用的大型热解反应器的设计中,应着重考虑提高热解传热效率的方法。

[参考文献]

- [1]蒋剑春.生物质能源应用研究现状与发展前景[J].林产化学与工业, 2002, 22(2): 75 - 80.
- [2]胡亿明, 蒋剑春, 孙云娟, 等.生物质及生物质组分的慢速热解热效应研究[J].生物质化学工程, 2013(5): 23 - 29.
- [3]Sevgi Ens Z, Mukaddes Can.Pyrolysis of pine (Pinus Brutia Ten.) Chips: 1.effect of pyrolysis temperature and heating rate on the product yields[J].Energy Sources, 2002, 24(4):347 - 355.
- [4]蒋剑春.生物质能源转化技术与应用() [J].生物质化学工程, 2007, 41(3): 59 - 65.
- [5]Demirba Ayhan.Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals[J].Energy Conversion and Management, 2001, 42(11): 1357 - 1378.
- [6]Puy N, Murillo R, Navarro M V, et al.Valorisation of forestry waste by pyrolysis in an auger reactor.[J].Waste Management, 2011, 31(6):1339 - 1349.
- [7]Brown J N, Brown R C.Process optimization of an auger pyrolyzer with heat carrier using response surface methodology[J].Bioresource Technology, 2012, 103(1): 405 - 414.
- [8]Bridgwater A V.Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading[J].Biomass & Bioenergy, 2012, 38(2):68 - 94.
- [9]Sirijanusorn S, Sriprateep K, Pattiya A.Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit[J].Bioresour Technol.2013, 139(13):343-348.
- [10]Liaw S S, Zhou S, Wu H, et al.Effect of pretreatment temperature on the yield and properties of bio-oils obtained from the auger pyrolysis of Douglas fir wood[J].Fuel, 2013,103(1): 672 - 682.
- [11]Veses A, Aznar M, Mart í nez I, et al.Catalytic pyrolysis of wood biomass in an auger reactor using calcium-based catalysts[J].Bioresource Technology, 2014, 162(6):250 - 258.
- [12]Henrich E, Dahmen N, Weirich F, et al.Fast pyrolysis of lignocellulosics in a twin screw mixer reactor[J].Fuel Processing Technology, 2016, 143:151 - 161.
- [13]Conto D D, Silvestre W P, Baldasso C, et al.Performance of rotary kiln reactor for the elephant grass pyrolysis[J].Bioresource Technology, 2016, 218:153 - 160.
- [14]廖艳芬.纤维素热裂解机理试验研究[D].杭州: 浙江大学, 2003.
- [15]林木森, 蒋剑春.生物质快速热解技术现状[J].生物质化学工程, 2006(1): 21 - 26.
- [16]Bahng M K, Mukarakate C, Robichaud D J, et al.Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review.[J].Analytica Chimica Acta, 2009,651(2):117 - 138.
- [17]Xue Y, Zhou S, Brown R C, et al.Fast pyrolysis of biomass and waste plastic in a fluidized bed reactor[J].Fuel, 2015,156:40 - 46.
- [18]路冉冉, 商辉, 李军.生物质热解液化制备生物油技术研究进展[J].生物质化学工程, 2010, 44(3): 54 - 59.
- [19]L é d é Jacques.Comparison of contact and radiant ablative pyrolysis of biomass[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 70(2): 601 - 618.
- [20]朱锡锋, 李明.生物质快速热解液化技术研究进展[J].石油化工, 2013, 42(8): 833 - 837.
- [21]郑晓彪.双滚筒式生物质热解液化反应器设计及实验研究[D].淄博: 山东理工大学, 2011.

- [22]王明峰, 蒋恩臣, 李伯松, 等.稻壳连续热解特性研究[J].太阳能学报, 2012(1): 168 - 172.
- [23]蒋恩臣, 苏旭林, 王明峰, 等.生物质连续热解反应装置的变螺距螺旋输送机设计[J].农业机械学报, 2013, 44(2): 121 - 124.
- [24]赖鹏豪, 马晓建, 常春, 等.稻壳连续炭化装置研究[J].江苏农业科学, 2015(1): 338 - 342.
- [25]向冬枝, 徐余伟.螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].农业工程学报水泥技术, 2010(1): 29 - 33.
- [26]黄石茂.螺旋输送机输送机理及其主要参数的确定[J].造纸科学与技术, 1998(3): 29 - 33.
- [27]Gao Ningbo, Liu Baoling, Li Aimin, et al.Continuous pyrolysis of pine sawdust at different pyrolysis temperatures and solid residence times[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 114: 155 - 162.
- [28]徐余伟.螺旋输送机设计参数选择[J].砖瓦世界, 2008(7): 32 - 37.
- [29]赖鹏豪.生物质连续炭化反应器的强化[D].郑州: 郑州大学, 2014.
- [30]Alvarez Jon, Lopez Gartzen, Amutio Maider, et al.Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor[J].Fuel, 2014, 128: 162 - 169.
- [31]王明峰, 吴宇健, 蒋恩臣, 等.无轴螺旋连续热解装置上的生物质热解特性[J].农业工程学报, 2015, 31(15): 216 - 222.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/112733.html>