

生物质连续热解反应装置的变螺距螺旋输送机设计*

蒋恩臣¹ 苏旭林¹ 王明峰² 熊磊明² 赵创² 许细微²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 研制了带有变螺距螺旋输送器的生物质连续热解反应实验装置, 对变螺距螺旋输送机参数进行了设计。冷态实验结果表明, 变螺距与正、反向螺旋相结合的物料输送方式, 更易于热解挥发物顺畅地由尾端排出, 保证了连续热解反应的正常进行。该装置对一般生物质处理量约为 30 kg/h, 停留时间 5 ~ 10 min, 能满足连续稳定热解反应的要求, 可开展多种农林生物质连续热解反应的实验研究。

关键词: 生物质 连续热解 热解装置 螺旋输送 变螺距

中图分类号: TQ051 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0121-04

Design of Variable Pitch Spiral Conveyor for Biomass Continual Pyrolysis Reactor

Jiang Enchen¹ Su Xulin¹ Wang Mingfeng² Xiong Leiming² Zhao Chuang² Xu Xiwei²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The biomass continuous pyrolysis reaction device with a variable pitch spiral conveyor was developed. To be more specific, the special screw conveyor was designed and optimized. Cold experiments showed that pyrolysis volatiles could be smoother to the end by way of combining the variable pitch with pros and cons screw. For general biomass, the productivity of the device was about 30 kg/h, and stay time was 5 ~ 10 min, which can meet the needs of pyrolysis reaction stably and continuously. Experimental research for various agriculture and forestry biomass could be carried out.

Key words: Biomass Continual pyrolysis Pyrolysis reactor Screw conveying Variable pitch

引言

生物质不仅能贮存太阳能, 而且是一种可再生的碳源。利用各种生物质能源转化技术, 可以将其转化为高品位、高效能、商品化、易于运输、使用方便的新能源产品^[1]。根据热解反应的条件, 如加热速率、反应温度和停留时间等, 生物质热解工艺可分为: 慢速热解和快速热解。其中, 慢速热解又可分为炭化和常规热解, 是指生物质以较低的升温速率(0.1 ~ 1.0 °C/s)升温到 300 ~ 700 °C 进行热解, 且热解产物停留时间较长, 物料尺寸较大(5 ~ 20 mm)。低温和长停留时间的慢速热解主要用于最大限度的增加炭的产量^[2]。

热解反应器是生物质慢速热解的关键技术环节。国内外研究开发的炭化热解设备主要有固定床和移动床 2 种类型^[3-6]。固定床有传统砖窑和外热式干馏釜。固定床的特点是物料在炉内空间的位置基本保持不变, 原料进入炉内后要经历升温、炭化保温、降温、出料等阶段, 属间歇(分批)式生产。该技术成熟, 设备简单、投资少, 但操作时要反复进行炉的加温和冷却, 且由于炉内各部位温度参差不齐, 产品品质也会有差异^[7]。移动床是借助外力驱动生物质达到连续炭化热解的目的, 属于移动床的有链条炉排式炭化热解、滚筒式炭化热解和管式炭化热解等。云南腾众新能源科技有限公司^[8]开发了用生物质燃料连续制炭和热风利用的一体化装置, 该

装置由链条炉排及窑炉构成,链条炉排置于窑炉内,窑内分为炭化室、燃尽室和除尘室。装置将制炭炉和热风炉有机结合,解决了生物质制炭过程中不能连续生产及热量得不到有效利用的问题,但结构较复杂,占地面积大。南京师范大学^[9]开发了一种农林废弃物低温热解炭化方法及其炭化炉装置。炭化炉的炉体采用螺旋推进式送料,通过螺旋式推进实现低温热解炭化反应的连续运行,实现了生物质在炭化炉内停留时间的控制。王明峰等^[10]研发了生物质连续热解反应实验装置及工艺流程,处理量约400~500 g/h,并以稻壳粉末为原料进行了参数实验,结果表明,该反应装置在300~600℃反应温度能够实现连续、稳定热解,具有良好的密封性能,适用性较好。

综合现有研究成果,不难发现,虽然对各种反应装置的研究起步较早,但针对反应装置及其特殊部件进行深入研究并不多。本文研制处理量约为30kg/h的连续热解装置,对核心部件——变螺距螺旋输送机进行设计和优化。

1 连续热解反应装置

1.1 总体结构

处理量为30 kg/h的生物质连续热解反应装置简图如图1所示。该装置水平放置,由变频调速器、驱动电动机、万向节、热解电炉、热解反应器、炭箱及冷凝装置等组成。

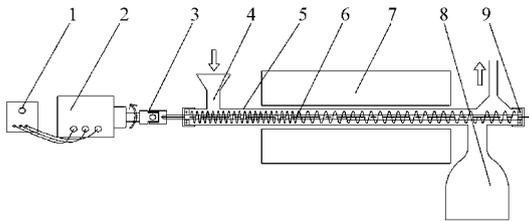


图1 生物质连续热解反应装置简图

Fig. 1 Sketch of biomass continuous pyrolysis reactor system

1. 变频调速器 2. 驱动电动机 3. 万向节 4. 进料漏斗 5. 热解反应管 6. 热解电炉 7. 变螺距螺旋输送机 8. 炭箱 9. 轴承

该连续热解反应装置利用变频调速器和驱动电动机,准确控制转速1~100 r/min,生物质颗粒经进料漏斗,由热解反应器的特殊螺旋送料器输送,在输送过程中完成连续热解反应,反应产物中大部分炭颗粒直接落入炭箱,少量颗粒随挥发分气体在反应器末端沉降,由反向螺旋输送至炭箱。挥发分经过冷凝装置后,其中的木醋液和焦油被收集下来,不可冷凝气体由出气口排出收集。

1.2 工作原理

热解反应器由变螺距螺旋输送机与筒式反应器

和驱动电动机配合组成。根据高温连续热解特殊条件而设计的变螺距螺旋输送机,主要由密螺旋、宽螺旋和反向螺旋构成(图2)。在1~100 r/min的慢转速条件下,生物质颗粒经由密螺旋传送至高温热解区,密螺旋既能保证持续均匀送料,同时也能够保证系统良好的密封性,为物料热解反应提供了无氧或缺氧的外部环境。由于热解反应温度在300~600℃,物料在此温度下预受热膨胀,甚至熔融,极易发生堵塞,故密螺旋延伸至高温热解区的长度不宜过长。宽螺旋属于热解反应区域,为防止发生预热解的高粘度物料堵塞反应器,并使挥发物顺利排出反应器,螺距和总长都应保证足够长,同时也为受热膨胀的物料和热解挥发物提供足够的空间,使物料热解尽可能完全。物料通过宽螺旋完成热解后,大部分半焦直接落入炭箱,热解产气中携带少量半焦颗粒由反向螺旋从反应器末端输送到炭箱,避免了半焦沉降在末端,利于整个热解反应实验对固态产品的量化。同时也防止颗粒堵塞轴承,保证螺旋输送长时间的稳定持续运转。

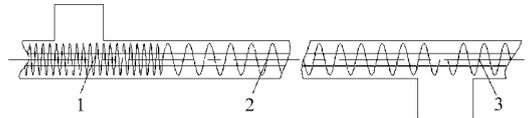


图2 变螺距螺旋输送机简图

Fig. 2 Sketch of special screw conveyor

1. 密螺旋 2. 宽螺旋 3. 反向螺旋

2 变螺距螺旋输送机

螺旋输送机是连续热解反应装置的核心部件,决定着热解反应的处理量和反应停留时间。采用变螺距螺旋输送机实现连续热解,具有设备结构简单耐久、体积小而紧凑、操作方便、使用安全可靠和密封性好的优点^[11]。

2.1 主要参数设计

参照一般螺旋输送机的设计与理论^[12~14],并根据高温热解的特殊使用条件对关键参数设计为

$$\text{螺旋外径} \quad D \geq K \left(\frac{Q}{\psi \gamma C} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$\text{螺旋轴径} \quad d = (0.2 \sim 0.35) D \quad (2)$$

$$\text{螺距} \quad S = (0.5 \sim 2.2) D \quad (3)$$

$$\text{螺旋轴使用转速} \quad n \leq n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (4)$$

式中 Q ——生产率,取30 kg/h

K ——物料综合系数,取0.05

ψ ——填充系数,取0.25~0.35

γ ——物料容积密度,取110~270 kg/m³

C ——倾角系数,水平轴时取1.0

A ——物料综合特征系数,取 50

由式(1)计算出 $D \geq 31.8$ mm,取 $D = 76$ mm。螺旋轴径的计算结果在 15.2 ~ 26.6 mm 之间,考虑到螺旋送料器工作在高温条件下,且必须满足一定的强度和刚度,故取 $d = 24$ mm。由式(3)螺距的计算结果在 38.0 ~ 167.2 mm 之间。要保证物料沿轴向移动,需要满足 $\alpha_{im} \leq 90^\circ - \phi$ (ϕ 为摩擦角, α_{im} 为螺旋内径处摩擦角),且当 $\alpha_{im} = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ 时,螺旋输送能力最强^[15]。所以,同时保证良好密封性和较好输送能力的条件下,设计密螺旋螺距 $S_1 = 40$ mm,长度 $L_1 = 400$ mm;宽螺旋螺距 $S_2 = 70$ mm,长度 $L_2 = 1\ 280$ mm;反向螺旋螺距 $S_3 = 70$ mm,长度 $L_3 = 250$ mm; S_2 与 S_3 之间(炭箱上部)留出适量长度,约一螺距长, $\Delta L = 70$ mm,总长 $L = 2\ 000$ mm。由式(4)得出螺旋轴最大使用转速 181.2 r/min,实验控制螺旋轴转速在 1 ~ 150 r/min。

连续热解要求反应装置在 300 ~ 600℃ 条件下连续稳定工作,同时螺旋外径与反应管间隙选择宜为 4 ~ 8 mm,故设计筒式反应器为外径 90 mm、壁厚 3 mm、长度 2 000 mm 的不锈钢(310S)管,螺旋叶片采用实体螺旋面,利用厚度 2 mm、宽度 20 mm 的不锈钢(310S)条,缠绕并焊接在螺旋轴上。

2.2 功率计算

连续热解螺旋输送机因其工作时轴的转速较低且低于临界转速,故称其为慢速螺旋输送机^[16]。该输送器的功率用于克服在物料输送过程中的各种阻力所消耗的能量,主要包括^[14]:物料与机壳、叶片间的摩擦作用所消耗的功率,轴承处的摩擦所消耗的功率,物料颗粒间的相对运动所消耗的功率等,按照等螺距、不变径螺旋输送机在填充系数为 1、满载启动时的电动机功率计算,具体计算如表 1 所示。所有功率均在转速 $n = 80$ r/min 条件下计算得出。

表 1 各阻力消耗功率情况

Tab.1 Power consumption caused by different friction forces

消耗功率来源	功率计算公式	计算值/W	说明
物料与机壳间摩擦	$N_1 = q_1 L f_1 \varepsilon$	0.064	$\varepsilon = 1.07$
物料与叶片间摩擦	$N_2 = q_1 L f_2 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}$	0.060	装置水平放置,倾角 $\beta = 0$
空载时轴承处摩擦	$N_3 = G f_3 v \frac{\pi d'}{S}$	10.36	$G = 300$ N
负载后载荷在轴承处摩擦	$N_4 = f_3 (N_1 + N_2)$	0.019	f, f_1, f_2, f_3 均以稻壳物料为例
密封件处 ^[17]	$N_5 = 2.02 \times 10^{-5} + P_c f_n (D_1 + D_2)^2 \times 10^{-3}$	63.85	
倾斜输送时提升物料	$N_6 = q_1 H v$	0	装置水平放置,倾斜高度 $H = 0$
输送机	$N_7 = K K_0 (N_1 + N_2) + N_3 + N_4 + N_5 + N_6$	74.63	$K_0 = 1 + 2\psi, K = 2.0$
电动机	$N = \frac{K_1 N_7}{\eta}$	122.92	$K_1 = 1.4, \eta = 0.85$

注: q_1 为物料线载荷, N/m; v 为物料轴向速度, m/s; ε 为机壳形状与装满系数对摩擦力的影响因素; α 为物料横截面重心所处的螺旋升角; f_1 为物料与机壳间的摩擦因数; f_2 为物料与叶片间的摩擦因数; f_3 为轴承处摩擦因数; G 为输送机转动部分质量; P_c 为压力因数; D_1, D_2 为反应管内、外径; d' 为径向轴承的平均直径; K 为修正系数; K_0 为倒塌功率因数; K_1 为功率备用因数; η 为驱动装置总传动效率。

这些功率是装置在冷态调试状态下的理论计算值一般较小,然而在实际操作中,物料高温热解后水分、挥发分析出会增加物料的粘度,使物料与机壳及叶片间的摩擦阻力成倍增加,因而消耗功率也会有所增加。同时,不同物料的摩擦因数不尽相同,进料口处物料堆积压力对螺旋输送机的启动、运行影响很大,而且该螺旋输送机为变螺距,包含正、反向螺旋等特殊因素。综合考虑,选用扭矩较大的直流电动机,功率 400 W,与变频调速器联用,实现 1 ~ 150 r/min 连续可调。螺旋轴与驱动电动机之间采用万向节连接,可以弥补并减少反应管与螺旋轴不同心或螺旋叶片受热膨胀引起的刮擦阻力,可以更有效地延长反应装置的寿命。

3 反应装置的冷态调试

参考文献[16],螺旋输送机生产率 Q 为

$$Q = \frac{\pi}{24} \times 10^{-10} \times [(D + 2\lambda)^2 - d^2] \psi S n \gamma C \quad (5)$$

式中 λ ——螺旋叶片与外壳间隙, mm

由以上一般设计理论和经验确定合理的 D, d, λ 和 S ,在转速 30 r/min 条件下,对于不同物料冷态调试下的生产率如表 2 所示。实验所用稻壳、锯木屑等均来自广州某加工厂,冷态实验效果良好。

对于一般生物质,在转速 10 ~ 50 r/min 条件下进行冷态调试,生产率约为 30 kg/h,与设计指标相符。但是,实际实验温度 300 ~ 600℃,物料粒度及

表2 不同物料的理论生产率

Tab.2 Productivity of various materials

实验物料	容积密度/kg·m ⁻³	填充系数	生产率/kg·h ⁻¹
稻壳	96~160	0.25~0.35	0~12.5
稻壳粉末	384~400	0.50~0.60	0~78.4
锯木屑	185~220	0.50~0.55	0~35.2
一般生物质	110~270	0.20~0.50	0~30.6

物料性质对螺旋输送生产率及螺旋叶片材料的寿命影响很大,生产率也会偏低。考虑高温引起的阻力加大的情况,在极低转速实验条件下(2~20 r/min),生物质材料热解反应停留时间约为5~10 min,也满足一般物料充分热解的需要。

4 结论

(1) 设计了生物质连续热解反应装置,尤其对变螺距螺旋输送机进行了设计和优化。螺旋总长

$L=2\ 000\text{ mm}$,螺旋外径 $D=76\text{ mm}$,轴径 $d=24\text{ mm}$,螺距 $S_1=40\text{ mm}$, $S_2=S_3=70\text{ mm}$ 。在极低转速2~20 r/min冷态实验条件下,实验效果良好,对于一般生物质生产率约为30 kg/h,热解反应物料停留时间约为5~10 min,与设计指标相符,满足连续热解反应的需要。

(2) 该连续热解反应装置采用变螺距的特殊螺旋输送机,密螺旋保证顺畅送料的同时系统具有良好的密闭性;宽螺旋为生物质热解提供了足够的空间,保证反应充分完全;反向螺旋避免了半焦在反应器末端的沉降,利于对热解固态产物的量化控制。冷态实验结果表明,通过变螺距与正反向螺旋相结合的物料输送方式,更宜于热解挥发物顺畅的从尾端排出,避免了因倒流由喂入端排放,更好地保证了连续热解反应的顺利正常进行。同时也表明该装置对生物质原料具有较好的适应性。

参 考 文 献

- 刘荣厚,牛卫生,张大雷. 生物质热化学转换技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:22~24.
- 袁振宏,吴创之,马隆龙,等. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:1~2.
- 蒋剑春. 生物质热化学转化行为特性和工程化研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2003.
Jiang Jianchun. Study on the behaviors and properties and industry application of thermol-chemical conversion of biomass [D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry,2003. (in Chinese)
- Colomba D B. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2008,34(1):47~90.
- Babu B V, Chaurasia A S. Modeling, simulation, and estimation of optimum parameters in pyrolysis of biomass [J]. Energy Conversion and Management,2003,44(13):2135~2158.
- Bridgwater A V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,1999,51(3):3~22.
- 蔡晓峰,张涛. 生物质热解技术的现状、发展趋势及研究[J]. 工业锅炉,2011(2):10~14.
- 云南腾众新能源科技有限公司. 用生物质燃料连续制炭和热风利用的一体化装置:中国,CN201110155130.9 [P]. 2011-11-16.
- 南京师范大学. 连续式生物质低温热解炭化方法及其炭化炉:中国,CN201110140961.9 [P]. 2011-10-26.
- 王明峰,蒋恩臣,张强,等. 稻壳热解模型建立与应用[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊2):114~118.
- 高春光,陈武东,韩雪松,等. 螺旋输送机及其应用[J]. 现代化农业,2001(11):38~39.
- 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,2012,33(1):168~172.
Wang Mingfeng, Jiang Enchen, Li Bosong, et al. Rice continuous pyrolysis characteristics research [J]. Journal of Solar Energy, 2012,33(1):168~172. (in Chinese)
- 胡勇克,戴莉莉,皮亚南. 螺旋输送器的原理与设计[J]. 南昌大学学报:工科版,2000,22(4):29~33.
Hu Yongke, Dai Lili, Pi Ya'nian. Theories and calculation of the auger-type conveyer [J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology Edition, 2000,22(4):29~33. (in Chinese)
- 王晓艳,董良杰,李玉柱,等. 生物质热裂解制取生物油装置的螺旋给料机设计[J]. 吉林农业大学学报,2005,27(5):582~585.
Wang Xiaoyan, Dong Liangjie, Li Yuzhu, et al. Design of a worm distributor for the equipment of producing bio-oil by biomass pyrolysis [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2005, 27(5): 582~585. (in Chinese)
- 谭生禄. 原盐计量包装秤中螺旋输送器的设计计算[J]. 盐业与化工, 2007(5): 46~49.
- 中国农业机械化科学研究院. 实用机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业机械出版社,1985:524~532.
- 夏廷栋,胥德孝. 实用密封技术手册[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1987:68~178,271~327.