

生物质燃油燃烧器的研究与设计

刘欣, 王述洋*, 薛国磊, 孙炳孝 (东北林业大学, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 随着生物质热裂解制油技术的发展, 为适应其工业化大规模生产, 需要一款可以提供稳定的且高效率的生物燃油燃烧器, 而传统的燃烧器很难将生物燃油充分燃烧, 因此笔者设计一种生物燃油燃烧器, 通过对燃烧器的工作原理和主要技术参数研究与确定, 对燃烧器的结构进行了重新设计。该燃烧器结构简单, 装配方便, 可以将生物燃油进行三级雾化, 燃烧效率高。

关键词 生物质热裂解制油技术; 生物燃油; 燃烧器; 设计

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)19-06350-03

Research and Design of Biomass Fuel Burners

LIU Xin, WANG Shu-yang et al (Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract With the development of biomass pyrolysis oil technology, to adapt to its industrial mass production, it is necessary to provide a stable and efficient biofuel burners, and the traditional bio-fuel burner is difficult to fully burn, so a bio-fuel burner was designed. Through research and determine the working principle and main technical parameters of burner, the structure was redesigned. The burner is simple in structure, easy assembly, three biofuels can be atomized, high combustion efficiency.

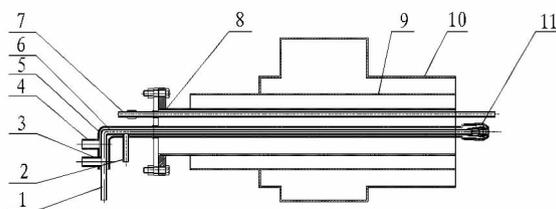
Key words Biomass pyrolysis oil technology; Bio-oil; Burner; Design

自 20 世纪 80 年代以来, 我国开始致力于新能源的开发与利用, 生物质能作为可再生能源, 逐渐成为代替我国化石燃料的第四大能源^[1]。近几年, 具有高热值的生物燃油在工业领域得到广泛应用。生物质热裂解制油技术是一种将农业秸秆和林业剩余枝桠等高温热裂解为可用于燃烧的生物燃油的技术, 可以将我国每年产生的约 7 亿 t 农业和林间剩余生物质转化为生物燃油^[2], 以解决我国越来越严重的能源危机和环境危机。在生物燃油的制取过程中, 热载体加热直接影响生物质热裂解制油的效率, 传统热载体加热热源主要依赖于传统秸秆、煤燃烧产生的热能对热载体进行加热, 不仅热能利用率低、浪费大量资源, 且秸秆、煤等燃烧产生大量的粉尘等污染物。在生物质裂解制油设备中, 燃烧器是其热源的主要提供者, 目前市场上主要存在煤、石油、秸秆的燃烧器, 受到生物燃油自身的一些特性影响, 不能充分燃烧生物燃油, 且传统的燃烧器直接应用与生物质制油技术成本和能耗巨大, 不能适应生物质裂解制油技术的工业化大规模生产, 所以设计一款可以实现生物质制油设备自循环, 即通过燃烧在制油过程中产生的不凝气和生物燃油即可提供足够热量的生物质燃烧器, 对于生物质裂解制油技术的发展和工业化大规模生产具有深远意义。

1 生物质燃油燃烧器构造与基本原理

1.1 整体结构 生物质燃油燃烧器主要由供油管路、供气管路、点火装置、不凝气管道、配风管路、喷头等组成, 其具体结构如图 1 所示。

1.2 基本原理 在燃烧器工作时, 首先鼓风机通过供气连接管将空气吹入燃烧室中, 对燃烧室的杂质进行预吹扫, 以清理燃烧器管内残渣与部分结焦, 同时稀释燃烧室内的可燃气体, 以防发生爆燃。预吹扫完成后, 鼓风机送出的空气被



注: 1. 供油管一; 2. 供油管二; 3. 供气管一; 4. 供气管二; 5. 供气连接管; 6. 供油连接管; 7. 点火装置; 8. 安装管; 9. 不凝气管道; 10. 配风管路; 11. 喷头总成。

图 1 油燃烧器基本结构示意图

吹向燃烧机的前方出口, 生物燃油通过供油连接管进入喷头总成, 由喷嘴喷出雾化状的燃油, 在混合室内与空气混合, 被空气进一步吹散、雾化。同时, 不凝气通过不凝气管道吹入混合室, 空气、生物燃油和不凝气三者进入炉膛内, 由点火装置引燃。

2 燃油燃烧器设计原则及主要技术参数

2.1 设计原则 该研究设计燃烧器主要是燃烧生物燃油、不凝气, 生物燃油的特性参数分别为比重 1.15 ~ 1.25、闪点 87 °C、粘度 58 cSt、热值 18 ~ 21 MJ、密度 1.2 kg/L、含水率 18% ~ 25%^[1], 其热值低、燃烧困难, 为克服这些缺点, 需要对生物燃油进行多级雾化处理, 这不仅有利于点燃, 且可以调整锅炉内压力的大小。

燃烧器设计的过程中必须遵守以下原则^[3]: ①高的燃烧效率。燃料油经雾化后的油滴群中油滴粒度细而均匀, 雾化角适当, 油雾沿圆周的流量密度分布与配风一致, 油雾与空气的混合良好等。②合理地配风, 保证燃料燃烧稳定、完全。供给适量空气, 防止油气因高温缺氧而热解为碳黑; 在燃烧气出口处应形成一个大小适中, 位置恰当的回流区, 使燃料与空气处于较高的温度场中, 以保证着火迅速及稳定。③由于生物油的闪电比较高, 再加上涡轮机的持续给风, 要求在燃烧膛里面有预热的电阻丝, 使之顺利点火。④结构简单、紧凑, 运行可靠, 自动化程度高, 维修方便。

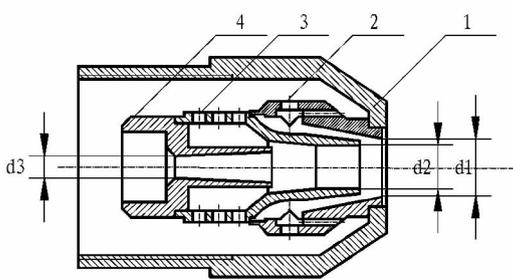
基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金(2572014CB28)。
作者简介 刘欣(1976-), 女, 黑龙江穆稷人, 讲师, 硕士, 从事智能控制、制造信息化等方面研究。*通讯作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事生物质能源方向研究。
收稿日期 2014-06-03

2.2 主要技术指标 在此以设计适用年产 1 万 t 生物燃油的制油设备的燃烧器为例,进行燃油燃烧器的理论计算和结构设计。结果发现,生物质加工量 3 156.566 kg/h(含水率 10%),生物质与热载体质量比 1:10,热载体密度 $\rho = 1\ 700\ \text{kg/m}^3$,不凝气产率为 25%,产碳率为 25%,燃烧生物油的比例为 6%;燃料燃烧效率 95%,燃烧器效率 95%;进热载体口温度 300 °C,进主反应器热载体温度 580 °C;燃烧器可以燃烧生物油量为 216 kg/h,燃烧器燃烧不凝气量 828 kg/h,生物油热值 16 MJ/kg,不凝气热量 6.354 MJ/kg。生物燃油燃烧器的热输出功率为 2 500 kW 或 300 kg/h,生物油最大粘度(40 °C 和 25% 水)为 0.1 Pa·s,产生的 HHV(随湿度而定)为 14~19 MJ/kg,电源三相为 50 Hz,电机运行电流为 1.4 A、2 750 rpm、288 rad/s,电容为 5 MF、点火变压器次级为 8 kW~16 mA,油泵额定压力 7~15 bar、额定流量 216 kg/h,电功率为 0.320 kW。

3 生物质燃油燃烧器理论计算与结构设计

3.1 理论计算与结构设计

3.1.1 喷头结构设计 在燃烧器设计过程中,主要采用高速蒸汽射流冲击油流的方式使油雾化,经过低压油泵加压后,燃油经过小孔后会以很大的速度喷射出在液体表面张力,粘性和空气阻力的相互作用下,液体由滴落、平滑流、波状流逐渐向喷物流转变。高速蒸汽射流冲击油流的雾化喷嘴(图 2)可以将燃油进行三级雾化,雾化后的油滴比较细小。



注:1. 喷头壳体;2. 喷嘴一;3. 喷嘴二;4. 喷嘴三。

图 2 喷头结构示意图

生物质燃油自喷口流出的速度按公式 $w_M = \mu \sqrt{\frac{2P_M}{\rho_M}}$ 计算,式中, ρ_M 为生物质油的密度,其取决于加工方法和原材料,一般地有 $\rho_M = 1\ 000 \sim 1\ 200\ \text{kg/m}^3$,取 $\rho_M = 1\ 130\ \text{kg/m}^3$; P_M 为生物质油在喷嘴前压力,取 $P_M = 200\ \text{kPa}$; μ 为生物质燃油的流速系数,取 $\mu = 0.2$ 。由此可见燃油自喷口流出的速度为 3.76 m/s。生物质燃油喷口直径 $d_1 = \sqrt{\frac{B_M \times 10^8}{0.785 w_M \rho_M}}$,式中, B_M 为喷嘴的燃油供入能力(kg/s)。为防止喷嘴堵塞和结焦,其直径应不小于 3 mm,由此可得生物质燃油喷口直径为 4.24 mm。

3.1.2 雾化方式及结构设计 该设计采用二级雾化方式,雾化剂选择为压缩空气,压力为 $P_p = 600\ \text{kPa}$,温度 $t_p = 250\ ^\circ\text{C}$,即 523 K。一次与二次雾化剂的单位消耗量相等,均为 q

= 0.65 生物燃油。雾化剂流通截面的计算按用于超临界压力的气体力学公式计算。雾化剂在拉瓦尔管临界截面流速

计算公式为 $w_{0mp} = \varphi M P_p \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0p} T_p P_p}}$,式中,对于空气, $M =$

0.685, $\rho_{0p} = 1.29\ \text{kg/m}^3$;干饱和蒸汽, $M = 0.635$, $\rho_{0p} = 0.804\ \text{kg/m}^3$;过热蒸汽, $M = 0.667$, $\rho_{0p} = 0.804\ \text{kg/m}^3$;系数 φ 取 0.2。根据公式计算可得 $w_{0mp} = 467.7\ \text{m/s}$ 。拉瓦尔管的临界

截面计算公式为 $F_p = \frac{B_M q \times 10^6}{w_{0mp} \rho_{0p}}$,如果是两级雾化,计算每一级时, q 值应取相应的雾化剂单耗。根据公式计算可得 $F_p =$

64.64 mm²。拉瓦尔管的出口截面计算公式为 $F_{pM} = F_p \times A$,

式中, A 值根据空气到喷嘴前的压力来选取^[4]。拉瓦尔管出口截面处生物质油喷嘴的外径和中间管内径,选择时应保证必需的截面积即 $F_{pM} = 130.18\ \text{mm}^2$ 。从结构的角度看,这个面积也可稍微增大些,因为这不会引起拉瓦尔管出口截面处空间流速的降低。

3.1.3 二级雾化混合管的设计 全部生物质燃油以及全部雾化剂(对单级雾化的喷嘴)或只是一次雾化剂(对两级雾化喷嘴)均通过拉瓦尔管出口截面进入混合管。进入混合管的

雾化剂密度按公式 $\rho_{p\Pi x} = \rho_{0p} \frac{T_0}{T_p} \Pi$ 确定,空气或蒸汽的 Π 值

按空气在喷嘴前的压力来选取。根据公式计算可得 $\rho_{p\Pi x} =$

1.11 kg/m³。进入混合管的雾化剂流速按确定公式 $w_{p\Pi x} =$

$\frac{B_M q \times 10^6}{F_{pM} \rho_{p\Pi x}}$,计算可得 $w_{p\Pi x} = 374.86\ \text{m/s}$ 。混合管开始界面处的

总动能,按每千克生物质燃油计算,等于生物质油和雾化剂动能的叠加值: $E_{m\psi} = \frac{w_{\Pi}^2}{2} + \frac{w_{p\Pi x}^2}{2} q$,根据此公式,计算可得

$E_{m\psi} = 45.677\ \text{kJ/kg}$ 。消耗于混合过程的能量计算公式: $E_{CM} =$

$\frac{(w_{p\Pi x} - w_{\Pi})^2}{2} \times \frac{q}{1+q}$,计算可得 $E_{CM} = 27.09\ \text{kJ/kg}$ 。生物质油雾化颗粒直径 $r = 0.275 / (w_{p\Pi x}^2 \rho_{p\Pi x})$,根据此公式,计算

可得 $r = 1.763 \times 10^{-6}\ \text{m}$ 。

雾化 1 kg 生物质油所消耗的能量 $E_{PC\pi} = 3\sigma / (\rho_M r)$,式中, σ 为生物质油的表面张力(随生物燃油的种类和温度变化于 0.024~0.022 H/m)。根据公式计算可得 $E_{PC\pi} =$

0.042 2 kJ/kg。

混合管出口界面处的动能 $E_{\pi\omega} = \frac{E_{m\psi} \eta_{CM} - E_{CM} - E_{PC\pi}}{\eta_{CM}}$,式

中, η_{CM} 为混合管有效利用系数,为 0.8~0.9。根据公式计算可得 $E_{\pi\omega} = 11.761\ \text{kJ/kg}$ 。混合物在混合管出口界面处的流

速 $w_{CM} = \sqrt{\frac{2E_{\pi\omega}}{(1+q)}}$,经计算可得 $w_{CM} = 119.4\ \text{m/s}$ 。进入混合

管雾化剂的温度 $T_{\pi\omega x} = T_p / \Pi$,经计算可得 $T_{\pi\omega x} = 317\ \text{K}$ 。进入混合管的生物燃油和雾化剂的焓 $i_{\pi\psi} = c_M T_M + c_p T_{\pi\omega x} q$,式

中, c_M 、 c_p 分别为生物燃油和雾化剂的比热(J/kg·grad)。根据公式计算可得 $i_{\pi\psi} = 917.53\ \text{kJ/kg}$ 。混合和摩擦消耗热 $i_q = E_{m\psi} - E_{\pi\omega} - E_{PC\pi}$,计算可得 $i_q = 33.874\ \text{kJ/kg}$ 。混合管出口截

面处混合物温度 $T_{CM} = \frac{i_{\pi\psi} + i_q}{c + c_p q}$, 经计算可得 $T_{CM} = 364.5 \text{ K}$ 。

混合物在混合管出口截面处的密度 $\rho_{CM} = \rho_{op} \frac{T_0}{T_{CM}}$, 根据公式计算可得 $\rho_{CM} = 0.966 \text{ kg/m}^3$ 。混合管出口截面面积 $F_{CM} = \frac{B_M q \times 10^6}{w_{CM} \rho_{CM}}$, 计算可得 $F_{CM} = 338.1 \text{ mm}^2$ 。混合管出口截面直径 $d_{CM} = \sqrt{F_{CM}/0.785}$, 经计算可得 $d_{CM} = 20.75 \text{ mm}$ 。

二次雾化剂的出口截面积应与拉瓦尔管的临界截面积相等, 因为对于二次雾化剂不存在喷管的扩张部分。计算时推荐采用以下管道流速, 即生物质油 $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 、压缩空气 $15 \sim 20 \text{ m/s}$ 、干饱和蒸汽 $20 \sim 30 \text{ m/s}$ 、过热蒸汽 $30 \sim 60 \text{ m/s}$ 。

3.2 生物燃油燃烧器的配风原则 保证燃油锅炉燃烧好坏的基本条件是良好的雾化质量与合理的配风, 合理的配风直接影响空气与燃料的混合、热裂解和热效率, 配风的合理与否对燃油燃烧器性能起着决定性的作用^[5]。以一般工业炉和锅炉燃烧器为例, 配风的主要原则^[6]如下。

3.2.1 多次供风。对油燃烧器来说, 一次风即所谓根部风, 在喷雾锥的根部, 油雾尚未着火前就与之混合。它的作用是避免油雾着火时由于缺氧而产生严重热分解, 形成大量炭黑。一次风量不能太大, 否则破坏着火条件, 一般约占总风量的 $15\% \sim 30\%$ 。

3.2.2 保证高温气回流区着火燃烧。在离喷嘴一定距离应有一个高温气(燃气)回流区, 使之保证着火燃烧。

3.2.3 前期的燃料与空气混合要强烈。除了根部风之外, 其余部分空气应在燃烧器出口就能和油雾均匀而强烈地混合。一般要求风量和燃料量相适应, 气流扩散角小于油雾化角, 使二次风能切入油雾。为此可以让气流以一定角度与燃料射流交叉, 或以旋转气流“搅拌”燃料, 或以壁面孔的射流穿透油雾(燃气轮机燃烧室上采用)等方式强化混合和燃烧。

3.2.4 后期燃料和空气扩散混合也应强烈,以保证未燃成为充分烧尽。目前工业炉、锅炉上的燃烧器采用直流式(或

平流式)配风, 即二次风不带旋流, 减少了压力损失, 能以较高二次风流速(约 30 m/s)穿入扩展的火焰之中, 有利于后期混合、燃烧。

一次风量通常用一次风量占总风量的比值表示, 称为一次风率。此处选取一次风率为 20% , 燃烧器配风风速选取 20 m/s 。由前文设计燃烧器需要满足的技术可得总配风量为: $Q_{\text{总}} = m_{\text{燃油}} \cdot Q_{\text{空气}} + m_{\text{不凝气}} \cdot Q'_{\text{空气}}$, 式中, $m_{\text{燃油}}$ 为每秒钟燃烧的生物燃油量(kg/s), $Q_{\text{空气}}$ 为每千克生物燃油燃烧需要消耗的空气质量(m^3/kg), $m_{\text{不凝气}}$ 为每秒钟燃烧的不凝气量(kg/s), $Q'_{\text{空气}}$ 为每千克不凝气燃烧需要消耗的空气质量(m^3/kg)。在此选取 $Q_{\text{空气}}$ 为 $10.836 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $Q'_{\text{空气}}$ 为 $2.826 \text{ m}^3/\text{kg}$, 可得总的需求配风量为 $3.73 \text{ m}^3/\text{s}$, 由此可得一次配风量为 $0.746 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4 小结

该设计的生物燃油燃烧机功率可到达 2500 kW , 燃烧器燃烧效率达 95% , 是一款大功率高效率的燃烧器, 可以适应生物质裂解制油工业化生产。该设计针对生物燃油燃烧困难的缺点, 采用了3次雾化处理, 使得生物燃油雾化后颗粒更小, 燃烧更充分, 污染更少, 同时该燃烧器燃烧用生物燃油为年产 10000 t 生物燃油工程中产生的生物燃油, 能够达到自循环, 有效地解约了成本。

参考文献

- [1] 曹有为, 王述洋, 薛国磊, 等. 串联复合式热载体加热装置的设计与研究[J]. 安徽农业科学, 2013(32): 12686 - 12689.
- [2] 李七军, 王述洋, 张琳. 688型秸秆燃气燃烧机的设计[J]. 机电产品开发与创新, 2010(4): 42 - 44.
- [3] TZANETAKIS T, ASHGRIZ N, JAMES D F, et al. Liquid Fuel Properties of a Hardwood-Derived Bio-oil Fraction[J]. Energy and Fuels, 2008, 22: 2725 - 2733.
- [4] 秦裕琨, 朱群益, 李瑞扬, 等. 燃油燃气锅炉实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [5] 赵钦新. 中小型燃油燃气锅炉运行与维护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 74 - 81.
- [6] 易磊, 龚金科. 全自动轻油燃烧机的设计与分析[J]. 工业加热, 2004, 33(6): 21 - 22.

(上接第 6303 页)

普遍比较缺乏懂开发、善经营、会管理的开发型人才。但是, 农业科研单位聚集了大量农业方面高精尖的科技和管理人才, 通过有选择性、有针对性地对部分科技人员进行科普和休闲服务以及经营管理方面的培训, 将科研人才培养与科普服务人员培训结合起来, 既可以极大地缩短科普服务人员培训的周期, 又能够使他们在开展科普旅游和休闲农业服务的同时, 充分发挥深厚的科技知识优势, 做到“研”以致用。这

些人作为兼职人员, 既可为单位科普旅游和休闲农业开发节约人力资源方面的投入, 又能打造一支科技知识扎实、管理过硬、服务到位的科普旅游和休闲农业开发专业队伍, 更好地满足不断变化的旅游市场需求。

参考文献

- [1] 李绍刚. 浅析科普旅游开发[J]. 科技资讯, 2006(15): 195.
- [2] 休闲观光农业[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/6015824.htm>.