

文章编号:0254-0096(2017)04-0874-05

生物质气化低热值燃气窑炉燃烧温度特性

周肇秋, 潘贤齐, 周意, 阴秀丽, 吴创之

(中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

摘要: 通过生物质气化低热值燃气在工业窑炉上燃烧的中试试验研究, 得到不同燃烧条件下生物质燃气的窑炉燃烧温度特性。试验结果表明: 常温空气助燃情况下, 经低温净化的冷燃气的窑炉燃烧温度约 1100 °C, 经高温净化的热燃气的窑炉燃烧温度约 1200 °C; 如果回收燃烧烟气的余热, 将助燃空气预热至 400 °C 时, 燃气窑炉燃烧温度可提高 100~150 °C。生物质气化低热值燃气基本能达到工业窑炉生产对温度的要求。

关键词: 生物质气化; 燃气; 窑炉; 燃烧温度

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A

0 引言

生物质能作为唯一含碳的可再生能源, 是传统含碳矿物能源的直接替代燃料^[1]。虽然生物质气化燃气热值较低, 但对于燃料品质要求不是很高的工业窑炉(如炼铝炉、炼铜炉、轧钢炉等)可达到其生产工艺要求; 燃气经净化处理后还可能应用于对燃料品质要求更高的玻璃窑炉、陶瓷窑炉等。根据中国环境统计年报, 2010 年全国重点调查的工业企业中在用工业窑炉为 8.3 万台, 2012 年达到 9.9 万台, 应用生物质燃气可低成本解决其燃料供应问题, 推动生物质燃气新兴战略性新兴产业的形成与发展。鉴于我国清洁能源需求及大气污染治理的紧迫任务, 近年来各地(如北京、广州、珠海等)对生物质燃料直接燃用有一定限制, 但对于生物质燃气化利用给予了支持。

温度是工业窑炉生产过程中主要的控制参数^[2], 如陶瓷工业窑炉中温度控制是制品烧成的关键。生物质空气气化得到的燃气热值通常约为 5 MJ/m³, 比天然气的热值低, 因此, 生物质燃气替代燃烧能否达到工业窑炉生产工艺对温度的要求是生物质燃气产业应用的关键。本文在一个工业窑炉中中试试验装置上着重研究生物质气化燃气在不同燃烧条件下的燃烧温度特性。

1 试验系统

生物质气化燃气工业窑炉燃烧温度特性中试试验系统主要由生物质气化炉、燃气净化系统、窑炉燃烧系统、烟气-空气换热装置、制氧装置组成, 如图 1 所示。

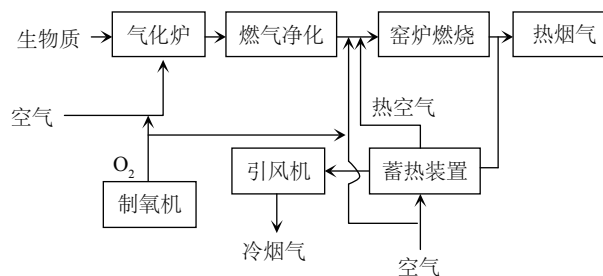


图1 试验系统流程图

Fig. 1 Flow chart of the experimental system

生物质燃气发生装置(气化炉)采用自行研制的混流式固定床气化炉^[3], 生物质消耗量 500 kg/h, 空气气化时燃气产量基本稳定在 950 m³/h。气化炉出口燃气温度约 500 °C, 经高温陶瓷过滤除尘净化后温度可保持在约 440 °C, 即高温热燃气; 若燃气经低温水洗深度净化降温即得到低温冷燃气。制氧装置采用 300 m³/h (O₂ 体积分数 80%) VPSA 制氧机, 为气化炉富氧气化及窑炉富氧燃烧提供稳定的助燃气。

收稿日期: 2015-04-09

基金项目: 广东省战略新兴产业项目(2012A032300019); 国家自然科学基金(51176194)

通信作者: 吴创之(1965—), 男, 硕士、研究员、博士生导师, 主要从事生物质能应用方面的研究。wucz@ms.giec.ac.cn

窑炉为有效容积 20 m³ 的梭式窑, 试验中为考察生物质燃气炉内燃烧温度特性不放置烧制品。燃烧器位于与炉门正对的炉墙上中间位置(结构如图 2 所示), 包括两路进风装置, 生物质燃气和助燃空气分别切向吹入燃烧器, 燃气与空气混和后喷入炉内燃烧, 火焰刚性强, 可沿炉拱直达炉门。因为梭式窑有倒焰窑的特点, 所以炉内温度较均匀, 热电偶置于火焰靠近炉门侧。

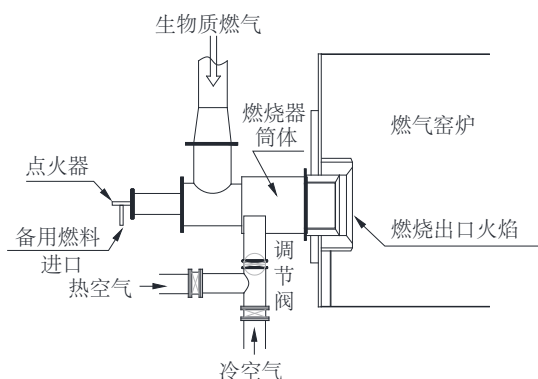


图2 生物质燃气燃烧器结构示意图

Fig. 2 Biomass gas burner diagram

烟囱置于侧墙靠近炉门下部。当需要部分高温烟气通过蓄热装置加热助燃空气时, 烟气从炉底烟道经引风机引出至蓄热装置(如图 3 所示), 设定程序自动控制高温换向阀^[4], 使烟气与空气交替通过换热室实现放热和吸热。

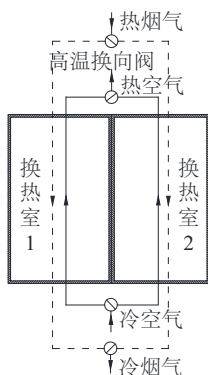


图3 烟气-空气换热装置

Fig. 3 Exhaust flue gas-air heat exchanger

由陶瓷蓄热体构成的烟气-空气换热装置可回收高温热烟气的热能, 加热助燃空气, 从而提高窑炉燃烧温度。通过换向阀自动切换使热烟气和冷空气先后经换热室内装填的蓄热陶瓷放热和吸热, 向燃烧器连续提供助燃热空气。

2 试验方法

以废纸致密成型的颗粒燃料作为固定床气化炉的生物质原料, 其工业和元素分析结果见表 1。气化产生的低热值燃气净化后进入窑炉燃烧器, 与切向进入燃烧器的旋流助燃空气混合燃烧。部分高温烟气(试验中约 30%)由引风机抽吸流经蓄热装置放热后, 烟气温度降至约 120 °C。

表1 原料工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of the experimental biomass material

工业分析/%, ad				低位热值/ kJ·kg ⁻¹
V	FC	A	M	
80.28	9.70	5.14	4.88	14542
元素分析/%, ad				
[C]	[H]	[N]	[S]	[O]
43.08	6.58	0.39	0.02	39.91

制氧机输出的 O₂ 体积分数为 80% 的富氧气体与空气(O₂ 体积分数 21%)混合至 35%, 再进入气化炉发生富氧化反应, 因此产生的燃气中 N₂ 含量降低, 燃气热值提高, 从而提高窑炉燃烧温度; 同样, 富氧气体如果进入窑炉与燃气发生富氧燃烧反应, 也将提高窑炉燃烧温度。

试验工况如表 2 所示。各工况下, 当燃烧温度无明显变化、排烟黑度小于 1 级、燃烧基本稳定后, 测试记录燃烧温度随时间的变化及对应的燃气热值、燃气温度和空气预热温度等。比较燃烧温度升高的结果, 虽然高温热燃气和高温热空气对燃烧温度的提升比相差很小, 但高温热燃气所需的温度直接来自气化炉, 无额外成本, 而高温热空气则需通过增加余热回收装置来获得。因此, 从投资成本角度考虑, 应首先充分利用高温热燃气燃烧方式来提高窑炉燃烧温度, 其次采用高温烟气余热回收来预热助燃空气。当同时采用温度水平相当的高温热燃气燃烧和高温热空气助燃时(如工况 5 所示), 分别与工况 3 和工况 4 比较可见, 相同热值燃气的燃烧温度变化不明显。

表2 生物质气化燃气窑炉燃烧试验工况

Table 2 Experimental conditions for biomass gasification gas combustion

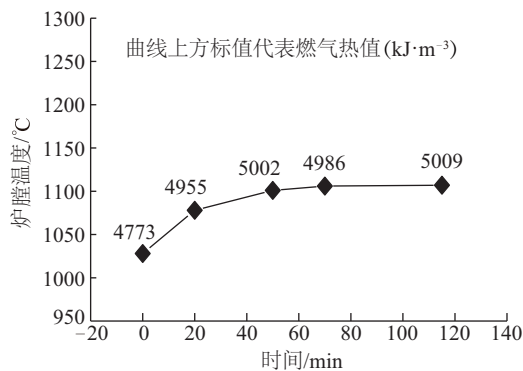
工况	气化方式		燃气		助燃气		
	空气气化	富氧气化	冷燃气	热燃气	空气	富氧气	热空气
工况1	√		√		√		
工况2	√		√			√	
工况3	√			√	√		
工况4	√		√				√
工况5	√			√			√
工况6		√		√	√		

3 试验结果比较分析

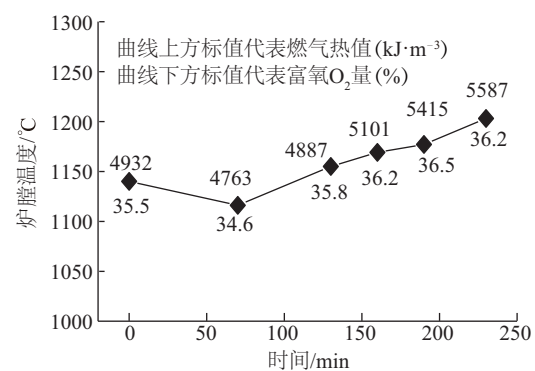
生物质气化低热值燃气在工业窑炉中的燃烧温度测试结果如图4所示,图中给出了各工况下燃气燃烧基本稳定后燃烧温度随时间的变化情况。由于每个工况的调节和稳定测试时间较长,平均约需3h,因此固定床气化炉产生的燃气热值会随时间发生波动变化,从而影响燃气燃烧的温度,即由工况1~工况4的曲线可见,燃烧温度因燃气热值的变化而发生变化。因此,燃气热值是影响窑炉燃烧温度的重要因素之一,需通过气化炉工况调节和燃

气经储气柜充分混合尽量减小燃气热值变化的幅度。

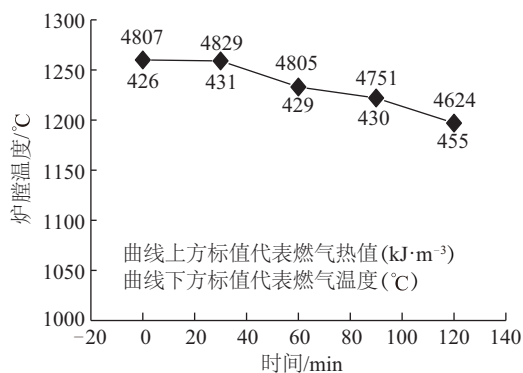
比较工况1和工况3可知,气化炉出口的高温热燃气如果保持高温状态进入窑炉内燃烧,其燃烧温度比燃气温度降至常温再入炉燃烧的温度高,即430℃的高温热燃气的燃烧温度比冷燃气的提高约150℃,提升比约1.0℃/2.9℃。比较工况1和工况4可知,利用高温烟气预热助燃空气,即采用高温热空气助燃方式也可达到提高窑炉燃烧温度的效果,即480℃的高温热空气助燃的燃烧温度比常温空气的提高约180℃,提升比约1.0℃/2.7℃。



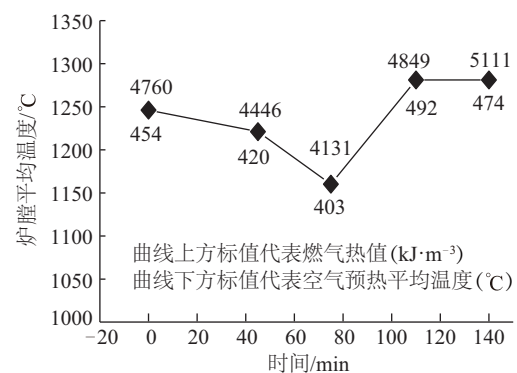
a. 工况1



b. 工况2



c. 工况3



d. 工况4

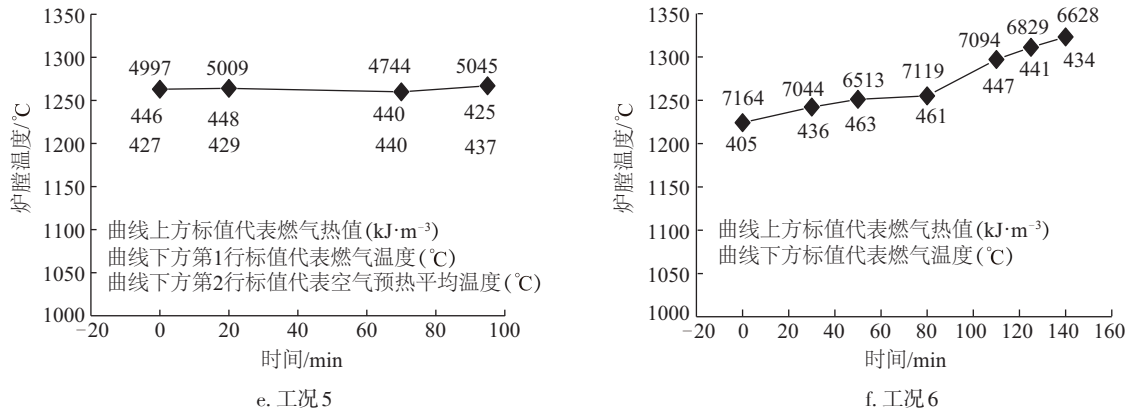


图4 生物质燃气工业窑炉燃烧温度特性

Fig. 4 Combustion temperature characteristics of biomass gas in industrial furnace

对于空气气化和空气助燃,由于空气中的 N_2 组分几乎不参与反应,降低了燃气的热值和燃烧温度,因此采用低氮的富氧气化或富氧气体助燃均可提高燃气燃烧温度^[5]。试验对生物质燃气(热值约 5480 kJ/m^3)在不同富氧浓度下的富氧燃烧温度特性进行了研究。根据试验得到图 5 所示的富氧燃烧温度随 O_2 含量变化的趋势可知,较适合的 O_2 体积分数为 30%~40%。综合考虑制氧成本和气化炉的气化特性,富氧气化的 O_2 体积分数为 35%时,燃气热值可提高约 40%,接近中热值燃气,由工况 3 和工况 6 可见,燃烧温度提高了 50~100 $^{\circ}\text{C}$ 。比较工况 2 和工况 1 可知, O_2 体积分数为 35%的富氧气体助燃温度在燃气热值相同的情况下比空气助燃温度提高约 50 $^{\circ}\text{C}$ 。因为生物质具有低硫、低氮的特点,所以生物质燃气燃烧排放污染物含量很低。试验采用 testo350 烟气分析仪进行检测,烟气中 SO_2 未检出, NO_x 达到 128~145 mg/m^3 ,主要是热型 NO_x ,低于国家排放标准限值^[6]。

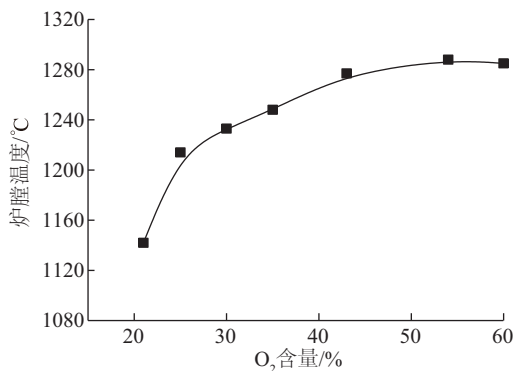


图5 生物质燃气富氧燃烧温度特性

Fig. 5 Oxygen-rich combustion temperature characteristics of biomass gas

由于采用的烟气-空气换热装置为小型试验装置,试验中只有约 30%的高温烟气体量被用于烟气-空气换热,空气可预热至约 400 $^{\circ}\text{C}$,对应的高温烟气体温度为 1250~1300 $^{\circ}\text{C}$;若增大换热高温烟气体量,并改进换热装置蓄热性能,空气预热温度可进一步提高,从而使高温烟气体温度也进一步提高。一般而言,空气预热温度每升高 100 $^{\circ}\text{C}$,可使理论燃烧温度提高约 50 $^{\circ}\text{C}$,蓄热式高温空气燃烧技术(high temperature air combustion, HTAC)中空气预热温度可达到 900~1100 $^{\circ}\text{C}$ ^[7],通过组合式循环回收烟气余热装置空气预热温度有望达到 1200~1250 $^{\circ}\text{C}$ ^[8]。本试验系统若通过增大换热高温烟气体量和提升换热装置蓄热能力(如采用耐受温度 1300 $^{\circ}\text{C}$ 以上的强化换热的陶瓷-金属蜂窝蓄热体^[9]),使空气预热温度达到 1200 $^{\circ}\text{C}$,可提高燃烧温度约 400 $^{\circ}\text{C}$,达到 1500~1600 $^{\circ}\text{C}$,则冷燃气有可能应用于玻璃窑炉和陶瓷窑炉。

4 结论

同天然气等传统燃料相比,生物质气化得到的燃气属于低热值气体燃料。在工业窑炉试验装置上的燃烧结果表明,生物质低热值冷燃气的窑炉燃烧温度约 1100 $^{\circ}\text{C}$,热燃气燃烧温度约 1200 $^{\circ}\text{C}$,蓄热燃烧(空气预热至 400 $^{\circ}\text{C}$)的燃烧温度可提高 100~150 $^{\circ}\text{C}$ 。由此可知,高温热燃气可直接用于炼铝炉、炼铜炉、轧钢炉等;若通过提高系统蓄热能力等措施使空气预热温度达到 1200 $^{\circ}\text{C}$,则有可能应用于玻璃窑炉和陶瓷窑炉。

[参考文献]

- [1] 贾敬敦, 孙康泰, 蒋大华, 等. 我国生物质能源产业科技创新发展对策研究[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 1—6.
- [1] Jia Jingdun, Sun Kangtai, Jiang Dahua, et al. Challenges and countermeasures for the development of biomass energy industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(1): 1—6.
- [2] 牛景原. 浅析工业炉温度的控制技术[J]. 科技致富向导, 2012, 33: 130.
- [2] Niu Jingyuan. Study on control technology of industrial furnace temperature [J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2012, 33: 130.
- [3] 吴创之, 潘贤齐, 周肇秋, 等. 一种生物质混流式气化装置[P]. 中国: 201120164215.9, 2011-05-20.
- [3] Wu Chuangzhi, Pan Xianqi, Zhou Zhaoqiu, et al. A biomass mixed-current gasifier[P]. China: 201120164215.9, 2011-05-20.
- [4] 冯自平, 张建军, 黄冲, 等. 蓄热燃烧四通阀[P]. 中国: ZL200910037593.8, 2009-03-04.
- [4] Feng Ziping, Zhang Jianjun, Huang Chong, et al. A four way valve for regenerative[P]. China: ZL200910037593.8, 2009-03-04.
- [5] 苏德仁, 黄艳琴, 周肇秋, 等. 两段式固定床富氧-水蒸气气化实验研究[J]. 燃料化学学报, 2011, 39(8): 595—599.
- [5] Su Deren, Huang Yanqin, Zhou Zhaoqiu, et al. Experimental study on biomass steam-oxygen enriched air gasification in a two-stage fixed bed gasifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2011, 39(8): 595—599.
- [6] GB 13271—2014, 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [6] GB 13271—2014, Standard for air pollution emission of boiler[S].
- [7] 刘洪, 温治. 蓄热式高温空气燃烧技术[J]. 金属世界, 2003, 6: 10—12.
- [7] Liu Hong, Wen Zhi. High-temperature air combustion technology with regenerator [J]. Metal World, 2003, 6: 10—12.
- [8] 郭卫, 司敏杰. 蓄热式高温空气燃烧技术应用探讨[J]. 玻璃, 2014, 41(8): 44—48.
- [8] Guo Wei, Si Minjie. Regenerative high temperature air combustion technology in the application [J]. Glass, 2014, 41(8): 44—48.
- [9] 张建军, 邹得球, 肖睿, 等. 蓄热燃烧蓄热体的应用现状与发展趋势[J]. 冶金能源, 2009, 28(4): 36—39.
- [9] Zhang Jianjun, Zou Deqiu, Xiao Rui, et al. Application and development of regenerator material of HTAC [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2009, 28(4): 36—39.

COMBUSTION TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF LOW HEATING VALUE GAS FROM BIOMASS GASIFICATION IN INDUSTRIAL FURNACE

Zhou Zhaoqiu, Pan Xianqi, Zhou Yi, Yin Xiuli, Wu Chuangzhi

(Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The combustion temperature characteristics of biomass fuel gas under different combustion conditions in pilot industrial furnace were obtained through the combustion investigation of low heating value fuel gas from biomass gasification in a pilot industrial furnace. The experimental results show that using normal temperature air as combustion-supporting agent, the combustion temperature of cold fuel gas purifying in low temperature in industrial furnace is about 1100 °C, and about 1200 °C for hot fuel gas purifying in high temperature; The raise of 100-150 °C of combustion temperature can be achieved when the air is preheated to about 400 °C through recycling the exhaust heat of combustion flue gas. Therefore, it is feasible to burn low heating value fuel gas from biomass gasification in industrial furnaces to meet the temperature requirements for industrial production.

Keywords: biomass gasification; fuel gas; industrial furnace; combustion temperature