

# 高温空气发生器热态实验研究

曹小玲<sup>1</sup>, 蒋绍坚<sup>2</sup>, 吴创之<sup>3</sup>, 艾元方<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 徐汇区 200030; 2. 中南大学能源与动力工程学院, 湖南省 长沙市 410083; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广东省 广州市 510070)

## HOT-STATE EXPERIMENT RESEARCH OF HIGH TEMPERATURE AIR GENERATOR

CAO Xiao-ling<sup>1</sup>, JIANG Shao-jian<sup>2</sup>, WU Chuang-zhi<sup>3</sup>, AI Yuan-fang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Xuhui District, Shanghai 200030, China; 2. Department of Applied Physics and Heat Engineering CSU, Changsha 410083, Hunan Province, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510070, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** In order to validate the feasibility and rationality of experiment equipment of high temperature air generator, means and apparatus for hot-state experiment of high temperature air generator are introduced in this paper, and hot-state experiment of high temperature air generator is carried out here; The result of hot-state experiment indicates that development of high temperature air generator is successful, it's basic performances can satisfy the demand of system's design, and lots of experiment data are got; Using these data, the Relation among temperature of heated air, exhaust gas, combustion area and switching period are obtained, the influences of the temperature of heated air and switching time are researched on nitrogen oxide emission, and some important performances are got, good experiment preparing has been done for deeply studying HTAG system for biomass.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering; High temperature air gasification; Biomass energy; High temperature air generator; High temperature air combustion; Hot-state experiment

**摘要:** 介绍了高温空气发生器热态实验研究的实验方法和仪器, 进行了高温空气发生器热态实验研究, 实验结果表明: 高温空气发生器的基本性能满足系统设计的要求, 并获得了大量的实验数据; 根据实验数据分析了空气预热温度、排烟温度、炉温、切换时间之间的变化关系, 研究了空气预热温度、切换时间对烟气中 NO<sub>x</sub> 排放的影响, 并且获得了高温空气发生器重要的性能参数, 为深入研究生物质高温空气气化系统作好了充分的准备。

**关键词:** 热能动力工程; 高温空气气化; 生物质; 高温空气发生器; 高温空气燃烧; 热态实验研究

## 1 引言

随着全球能源危机的日益加剧, 可再生生物质的利用逐渐受到人们的广泛关注。目前, 世界上生物质 IGCC 领域里出现了不少生物质气化利用方法, 如流化床气化法、热解气化法、联合气化法等<sup>[1]</sup>, 但它们均在常温下气化, 通常存在气化效率及燃气热值较低, 燃料利用范围小, 预处理复杂等问题; 而在富氧或纯氧条件下气化, 尽管可提高气化效率及燃气热值, 但需要空气分离装置, 动力消耗大, 系统复杂, 总经济效益不高。近年来世界上生物质气化领域内提出了一种高温空气气化技术 (High Temperature Air Gasification, 简称 HTAG), 它主要采用 1000℃ 以上的高温空气/蒸汽对生物质进行高温气化, 获得的燃气具有热值较高、焦油和酚类的含量极低、对外界的污染很小等特点<sup>[2-3]</sup>, 日、美、欧等发达国家相继开展了这方面的工作, 并取得了初步的研究结果<sup>[4-7]</sup>。目前, 在我国生物质高温气化研究已列进了“十五”863 计划项目“生物质气化发电优化系统及其示范工程”中<sup>[8-10]</sup>, 正在进行相关的基础性研究, 其中高温空气发生器的研制与实验研究是最关键的部分之一。

在生物质 HTAG 系统中, 生物质 HTAG 是通过高温空气来实现的, 因此高温空气发生器是该系

统的最关键技术之一,研制出具有优良性能的高温空气发生器对生物质 HTAG 系统整体性能有着至关重要的影响。笔者进行了高温空气燃烧的实验研究<sup>[8]</sup>,研制了高温空气发生器实验台架,进行了冷态实验并已经取得了成功<sup>[8]</sup>;为验证研制的高温空气发生器的可行性和合理性,本文介绍了高温空气发生器热态实验研究的实验方法和仪器,并进行了高温空气发生器热态实验研究,实验结果表明:高温空气发生器的研制是成功的,基本性能满足系统设计的要求,并获得了大量的实验数据;根据实验数据分析了空气预热温度、排烟温度、炉温、切换时间之间的变化关系,研究了空气预热温度、切换时间对烟气中  $\text{NO}_x$  排放的影响,并且获得了高温空气发生器的重要性能参数,为深入研发生物质高温空气气化系统作好了充分的准备。

## 2 实验方法与实验仪器

### 2.1 实验方法

高温空气发生器工作原理及笔者研制的高温空气发生器实验装置已在相关的文献[8]中进行论述过,现在介绍高温空气发生器热态实验研究所采用实验方法和实验仪器。

实验系统示意图见图 1<sup>[9-10]</sup>,燃料选用丙烷气体,经减压阀、流量计及调节阀后分成两路,经由 ZCT-10 型电磁阀分为两路供给发生器,燃气流量通过 LZJ-15 型玻璃转子流量计调节;助燃空气由风机供给,经过流量计和电磁切换阀后进入蜂窝陶瓷蓄热体;燃烧产生的高温烟气经过蓄热室换热后由引风机抽走。调节燃气流量为  $0.7\sim 1.0\text{Nm}^3/\text{h}$ ,空气流量为  $21\sim 27\text{Nm}^3/\text{h}$ ,通过电动点火装置点火升温,高于  $700^\circ\text{C}$  后,将燃气和助燃空气调节为要求的流量,此时由于温度已超过燃料着火温度点,实际上无需点火

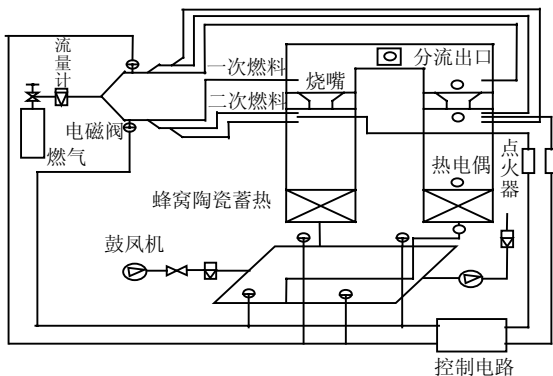


图 1 高温空气发生器实验装置系统示意图  
Fig.1 Schematic of experiment rig of high temperature air generator

器燃料已能自动与高温空气发生燃烧。

在低(约  $800^\circ\text{C}$  左右)、中(约  $1000^\circ\text{C}$  左右)、高(约  $1150^\circ\text{C}$  左右) 3 个温度段,选取不同的换向周期 15s、30s、60s、90s、120s、300s,进行燃烧试验,在空气和燃气管路上设置流量计,准确计量燃烧试验时空气和燃气的流量;在蓄热体进出口以及燃烧室内布置热电偶,观察研究蓄热体的换热及炉内温度分布情况,分析蜂窝型陶瓷蓄热体的换热效果和换热基本规律;利用烟气成分分析仪在烟气排出部位检测烟气中污染物的排放,分析高温空气燃烧烟气中污染物的排放特性;在此基础上寻找该系统的最佳切换时间。

### 2.2 实验所用的主要检测仪器

(1) 温度检测 采用分度号为 S 的铂铑 10-铂热电偶测量蓄热体出口预热高温空气温度(测温范围  $0\sim 1600^\circ\text{C}$ ,允许偏差  $\pm 0.5\%$ );采用分度号为 B 的铂铑 30-铂铑 6 热电偶测量燃烧室温度(测温范围  $0\sim 1800^\circ\text{C}$ ,允许偏差  $\pm 0.5\%$ );采用分度号为 K 的镍铬-镍硅热电偶(测温范围  $40\sim 1100^\circ\text{C}$ ,允许偏差  $\pm 1.5\%$ ) 测量排烟温度。补偿导线和显示仪表均相应的保持一致。采用 WFHX-63 型红外温度计检测发生器表面温度分布。

(2) 流量调节 燃料流量采用 LZJ-15 型玻璃转子流量计(量程  $0.6\sim 6\text{m}^3/\text{h}$ ) 调节;鼓风机出口空气流量、排烟流量采用 CL-Y 型毕托管(规格  $8\times 250\text{mm}$ ) 测量。

(3) 点火装置 在预热空气温度未达到燃料着火温度前,采用电动打火装置点火。

(4)  $\text{NO}_x$  排放检测 采用美国产 PGM-7800 型烟气分析仪检测烟气中  $\text{NO}_x$  的排放量。

## 3 热态实验研究

### 3.1 换热装置的换热规律

换热装置中用来换热的蓄热体(蜂窝型陶瓷蓄热体)在工作过程中周期性地通过被预热的介质(空气)和被冷却的介质(烟气),总是处于周期性的放热和吸热状态,其工作周期由加热期和冷却期组成。在加热期,流过换热装置的高温烟气将热量传递给蜂窝陶瓷蓄热体;在冷却期,常温空气以相反的方向流过蓄热体并获得热量。在整个过程中,烟气温度、空气温度和蓄热体温度周期性地随时间而变化,其换热过程是包含了对流、辐射和传导在内的十分复杂的非稳态传热过程<sup>[11-14]</sup>。

为了研究不同情况下高温空气发生器中蜂窝型陶瓷蓄热体的换热特性，分别在炉温 800℃、1000℃、1150℃左右 3 个温度段进行了切换周期分别为 15s、30s、60s、180s、300s 各工况下的测试。

由实验结果可以得出高温空气发生器中蜂窝型陶瓷蓄热体换热性能的一些基本规律<sup>[9-10]</sup>：

(1) 各工况下，两边的蓄热体温度变化的规律基本一致，呈对称分布。

(2) 图 2 表示的是在给定的一个切换周期内空气预热温度  $t_a$  随时间变化的关系。蓄热体冷却期（放热阶段），空气预热温度随时间的延长而逐渐降低，蓄热体的温度效率下降，热回收率降低。

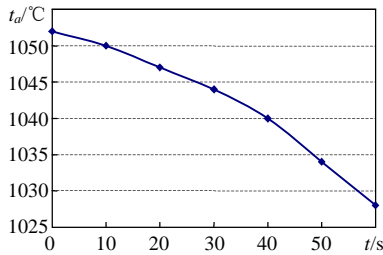


图 2 一个周期内空气预热温度随时间的变化  
Fig.2 Temperature of heated air changing versus time in one period

(3) 图 3 表示的是在给定的一个切换周期内排烟温度  $t_g$  随时间变化的关系。在同一切换周期内，蓄热体加热期（蓄热阶段）排烟温度随时间的延长而升高。这是由于在加热初期，蓄热体温度较低，随着加热时间的延长，蓄热体温度不断升高，蓄热能力下降，烟气出口温度升高。当加热时间足够长后，蓄热体的温度将等于烟气温度，不再具有蓄热能力，也即烟气出口温度将等于入口温度。在冷却期，空气出口预热温度可作同样分析。

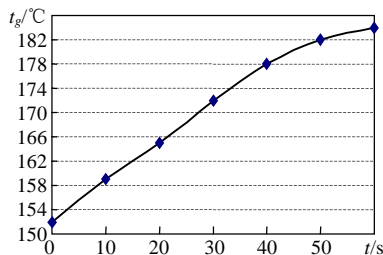


图 3 一个周期内排烟温度随时间的变化  
Fig.3 Exhaust gas temperature changing versus time in one period

(4) 图 4、5 表示的是不同切换周期  $T$  下切换时间对排烟温度和空气预热温度的影响。可以看出，切换时间对蓄热体的传热特性有较大影响，切换时间延长，空气出口预热温度降低，烟气出口温度升高，蓄热体温度效率  $\eta$  和热回收率降低，如图 6。

(5) 空气预热温度可达到只比炉温低 50~100℃ 的“极限”预热温度，排烟温度在 180℃ 以下，烟气温度效率可达 80%~90%。

(6) 随着切换时间的延长，预热空气温度波动、炉温波动和排烟温度波动增大，温度换热效率降低。如图 7 所示，炉温随燃烧换向做周期性波动，但波动幅度比空气预热温度在同一周期内的波动幅度小。

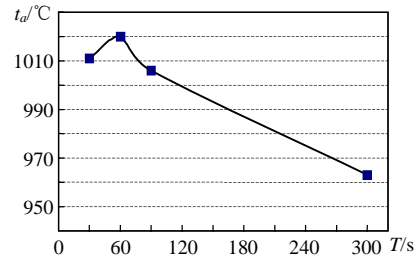


图 4 空气预热温度与切换周期的关系  
Fig.4 Relation between temperature of heated air and switching period

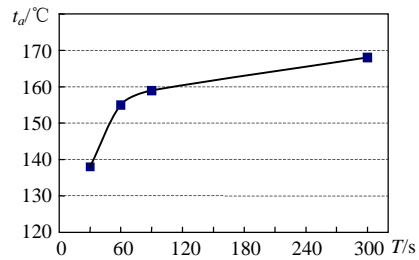


图 5 排烟温度与切换周期的关系  
Fig.5 Relation between exhaust gas temperature and switching period

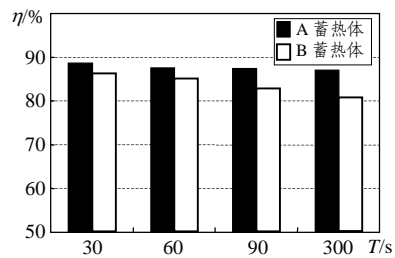


图 6 1000℃ 炉温下蓄热体温度效率与切换周期的关系  
Fig.6 Relation between temperature's efficiency of regenerator and switching period as furnace temperature is 1000°C

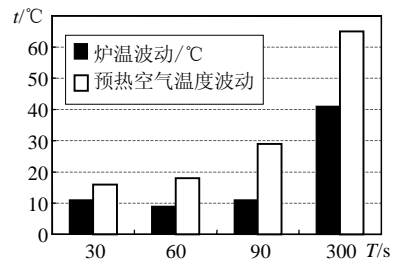


图 7 预热空气温度和炉温的波动与切换周期的关系  
Fig.7 Relation among temperature of heated air, fluctuation of furnace temperature and switching period

(7) 图 8 表示的是空气出口预热温度、排烟温度与炉温之间的关系。炉温升至在 800℃ 以上后, 空气出口温度和排烟温度随着炉温的升高逐渐升高, 其规律近似成线性变化。

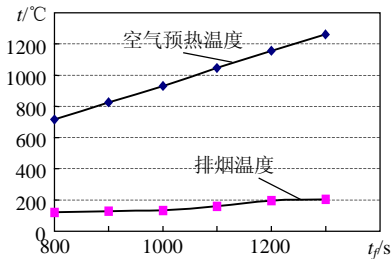


图 8 空气预热温度、排烟温度与炉温之间的关系  
Fig.8 Relation among temperature of heated air, exhaust gas temperature and furnace temperature

### 3.2 低污染特性

实验过程中利用美国产 PGM-7800 型烟气分析仪检测烟气中  $NO_x$  的排放量, 由实验结果可以得出高温空气发生器低污染特性的一些基本规律<sup>[9]</sup>:

(1) 空气预热温度与  $NO_x$  排放的关系。图 9 显示了空气预热温度对  $NO_x$  排放量的影响。由图可知, 随着空气预热温度的升高,  $NO_x$  的排放不断上升; 空气预热温度在 800~1000℃ 之间时,  $NO_x$  的排放量是比较低的, 而且增长趋势也比较缓慢。而当空气预热温度超过 1000℃ 时,  $NO_x$  的排放量增长的趋势明显上升。

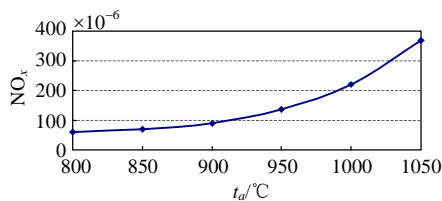


图 9 空气预热温度与  $NO_x$  排放的关系  
Fig.9 Relation between temperature of heated air and  $NO_x$  let

(2) 不同切换周期下  $NO_x$  排放体积分数: 图 10 显示了空气预热温度为 1000℃ 左右时不同切换周期下的  $NO_x$  排放量的变化。从图可以看出, 随着切换时间的延长,  $NO_x$  排放量逐渐下降, 下降趋势

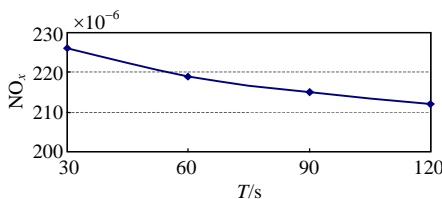


图 10 不同切换周期下  $NO_x$  排放体积分数  
Fig.10 Volume fraction of  $NO_x$  let under different switching period

相当平缓。因为随着切换时间的延长, 空气预热温度是不断降低的, 因此  $NO_x$  排放量也随之下降。

### 3.3 切换时间的合理确定

根据实验结果所述, 切换时间对高温空气发生器中蓄热体的传热特性有较大影响。换向时间过长, 烟气余热得不到充分回收, 使得排烟温度升高, 烟气余热利用率降低, 同时预热空气温度波动大, 造成炉内温差增大; 切换周期越短, 空气出口平均预热温度越高, 而烟气出口平均温度越低, 但是, 切换周期并不是越短越好, 实际换向时间过短, 蓄热体得不到充分加热, 难以获得较好的预热效果, 且换向周期过短, 切换阀过于频繁开闭会降低其使用寿命, 同时, 切换占用的时间增多, 会影响炉内的正常燃烧; 此外, 切换时间还会影响到氮氧化物的生成。因此, 当高温空气发生器中蓄热体结构一定时, 其切换周期的选取有一个合理范围, 一般在 40~60s 之间比较合理。

## 4 热态实验结论

本文概述了国内外发展生物质高温空气气化系统的现状, 阐述了研制高温空气发生器的重要性, 为验证研制的高温空气发生器的合理性和可行性, 在高温空气发生器实验台上以丙烷气体为燃料, 在低 (约 800℃ 左右)、中 (约 1000℃ 左右)、高 (约 1150℃ 左右) 3 个温度段, 选取不同的切换时间, 开展了一系列高温空气发生器热态实验研究, 实验结果表明: 高温空气发生器的研制是成功的, 基本性能满足设计要求, 并获得了大量的实验数据; 基于实验数据对高温空气发生器性能参数进行了如下研究: ①分析了空气预热温度、排烟温度、炉温、切换时间之间的变化关系; ②总结了蜂窝型陶瓷蓄热体的基本换热规律, 计算了蜂窝陶瓷蓄热体的综合传热系数和温度效率, 证明其换热系数比一般同类工质换热器显著提高, 其温度效率高达 80%~88%, 而换热装置的体积大大缩小; ③研究了空气预热温度、切换时间对烟气中  $NO_x$  排放的影响; ④综合考虑了各种因素的影响, 确定系统的切换时间在 40~60s 之间较为合理。成功的热态实验研究为深入研发生物质高温空气气化系统作好了充分的准备, 为今后的研究工作奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 陆胜勇, 李晓东, 严建华, 等. 异重介质循环流化床焚烧炉多环芳烃排放特性的测定[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10):

- 130-135.
- Lu Shengyong, Li Xiaodong, Yan Jianhua *et al.* PAHs emission from a fluidized-bed msw incinerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 130-135.
- [2] Yoshikawa K. Gasification and power generation from solid fuels using high temperature air[C]. Beijing: Proceeding of High Temperature Air Combustion Symposium, 1999.
- [3] Oshikawa Y. Present status and future plan of CREST MEET project [C]. Taiwan: Proceeding of the 2nd International High Temperature Air Combustion Symposium, 1999.
- [4] Yoshikawa K. R&D on small-scale gasification of solid fuels using high temperature air and steam[C]. ENEA of Italy: Proceedings of the 4th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 2001.
- [5] Sugiyama S, Yoshikawa K, Ishii T *et al.* Gasification performance of solid fuels using temperature air at the demonstration plant MEET-II [C]. ENEA of Italy: Proceedings of the 4th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 2001.
- [6] Ishii T, Yoshitaka E, Yoshikawa K *et al.* Gasification of coal and wood at the demonstration plant of MEET system, MEET II [C]. ENEA of Italy: Proceedings of the 4th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 2001.
- [7] Carlson C P, Pian, Lincoln Young. High-temperature, air-blown gasification of dairy-farm wastes for energy production[C]. ENEA of Italy: Proceedings of the 4th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 2001.
- [8] 曹小玲. 生物质高温空气气化工艺过程分析与高温空气发生器的研制[D]. 长沙: 中南大学能源与动力工程学院, 2002.
- Cao Xiaoling. Analysis of gasification from biomass using high temperature air and development of high temperature air preheater[D]. Changsha: Energy and Power Engineering School Central South University, 2002.
- [9] 柳楷玲. 基于 HTAC 技术的蓄热式高温空气发生器实验研究[D]. 长沙: 中南大学能源与动力工程学院, 2003.
- Liu Kailing. Experiment research of regenerative high temperature air generator based on HTAC technology[D]. Changsha: Energy and Power Engineering School Central South University, 2003.
- [10] 郑彦民. 高温空气发生器试验研制与高温空气气化器设计[D]. 长沙: 中南大学能源与动力工程学院, 2004.
- Zheng Yanmin. Research and development of high temperature air generator and design of high temperature air gasifier[D]. Changsha: Energy and Power Engineering School Central South University, 2004.
- [11] 蒋绍坚, 艾元方, 彭好义, 等. 高温低氧燃烧技术及其高效低污染特性分析[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31 (4): 311-314.
- Jiang Shaojian, Ai Yuanfang, Peng Haoyi *et al.* High temperature air combustion and its performance analysis[J]. Journal of Central South University of Technology, 2000, 31 (4): 311-314.
- [12] 刘贵芬, 陈世英, 何耀华, 等. 宽调节比燃烧技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(1): 54-58.
- Liu Guisun, Chen Shiyong, He Yaohua *et al.* On combustion technology of WR burner[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(1): 54-58.
- [13] Tanaka R, Hasegawa T. Innovative technology to change flame characteristics which highly preheated air combustion[C]. Osaka, Japan: Japanese Flame Days-JFRC 20th Anniversary, 1997.
- [14] Simon Lille. Experimental study of single fuel jet in conditions of highly preheated air combustion[C]. Sweden: Licentiate thesis, 1999.
- 
- 收稿日期: 2004-08-23.
- 作者简介:
- 曹小玲(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为动力系统仿真与控制及能源与环保。