

# 城市生活垃圾两段热解旋流燃烧装置数值模拟

顾菁<sup>1</sup> 袁浩然<sup>1</sup> 呼和涛力<sup>1</sup> 马晓茜<sup>2</sup> 陈勇<sup>3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;  
2. 华南理工大学, 广州 510640;  
3. 中国科学院广州分院, 广州 510070)

**摘要** 为了实现城市生活垃圾的无害化处置, 提出了两段热解旋流燃烧装置。该装置的关键技术在于燃烧室内增加了一螺旋体。通过对燃烧室的数值模拟, 确定了螺旋体的结构参数, 并考察了螺旋体对气相燃烧温度场、烟气平均停留时间和组分浓度分布的影响。结果表明: 增加螺旋体后, 燃烧室内气体混合均匀, 燃烧完全, 燃烧情况优于无螺旋体时, 满足抑制二噁英的要求。

**关键词** 燃烧室; 数值模拟; 平均停留时间; 气相燃烧

**中图分类号:** X505 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)12-2715-05

## Numerical Simulation of the Two-stage Pyrolysis Swirling Combustion Devices of Municipal Solid Waste

GU Jing<sup>1</sup> YUAN Hao-Ran<sup>1</sup> HUHE Tao-Li<sup>1</sup> MA Xiao-Qian<sup>2</sup> CHEN Yong<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;  
2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
3. Guangzhou Division Academy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

**Abstract** In order to realize harmless disposal of Municipal Solid Waste (MSW), the two-stage pyrolysis swirling combustion devices is put forward. The key technology of the device is that the combustion chamber adds a helix. Through the numerical simulation of the combustion chamber, the structural parameters of the helix structure were determined, and the effort of helix on the temperature of the gas phase combustion, average residence time of flue gas and mole fraction of the component was studied. The results showed that with the helix, the gas mixture in the combustion chamber was uniform, the combustion was completely and the combustion condition was better than no helix, which could meet the requirements of dioxin control.

**Key words** combustion chamber; numerical simulation; average residence time; gas phase combustion

## 0 前 言

随着我国城市经济发展和居民生活水平提高, 我国城市生活垃圾产量增长较快。2013 年, 我国城市生活垃圾产量超过 1.7 亿吨<sup>[1]</sup>。城市生活垃圾不仅污染环境, 还危害人类健康, 已发展成为一个全球性问题。城市生活垃圾无害化、减量化以及资源化循环利用, 对于我国实现循环经济发展模式和社会可持续发展具有举足轻重的作用。

目前, 为了解决城市生活垃圾焚烧过程中产生二噁英类毒性物质的问题, 世界发达国家提出了热解气化焚烧炉技术, 被认为是 21 世纪的新型垃圾焚烧技术<sup>[2,3]</sup>。热解气化焚烧炉技术原理是在无氧或缺

氧条件下先将城市生活垃圾中主要能量元素 C/H 转化为小分子可燃气, 再将可燃气高温完全燃烧生成清洁气体, 并产生热能。美国、日本、德国等国家<sup>[4-6]</sup>开发的热解气化焚烧炉技术, 共同之处在于具有两个燃烧室: 在热解气化室为缺氧气氛, 温度控制在 600~900°C, 实现垃圾的热解气化, 生成可燃气, 然后进入燃烧室; 燃烧室氧气供给充足, 产生高温烟气用于加热蒸汽实现发电。

为了提高气相燃烧效率、延长烟气停留时间, 减少不完全燃烧的前驱物和未燃尽碳, 综合现有固定床气化炉的结构特点, 本文提出了一种适合城市生

收稿日期: 2016-02-25; 修订日期: 2016-11-19

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51406207); “十二五”农村领域国家科技计划课题 (No.2012BAD14B16-04)

作者简介: 顾菁 (1982-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事固体废物资源化、资源化高效利用技术研究。通信作者: 袁浩然, 研究员, yuanhr@ms.giec.ac.cn

活垃圾的两段热解旋流燃烧装置。此装置的关键技术在于燃烧室结构的设计，增加了一螺旋体。本文利用 CFD 技术对燃烧室进行流场冷态模拟，通过比较平均停留时间确定了螺旋体的结构参数；同时对气相燃烧进行了热态模拟，为两段热解旋流燃烧中试装置的设计提供依据。

### 1 两段热解旋流燃烧装置

两段式热解旋流燃烧装置，采用圆筒直立形，包括有相互连通的热解气化室、燃烧室和空气预热室，如图 1 所示。热解气化室采用常规的固定床上吸式；在燃烧室喉口位置设置多个二次风喷嘴，使得二次风切向高速进入燃烧室形成旋流燃烧，同时在喉口上方增加了一螺旋体强制烟气形成旋流，此处旋流方向与燃烧旋流的相反；空气预热室利用高温烟气加热一次风和二次风。本文主要对燃烧室结构设计进行数值模拟与讨论。

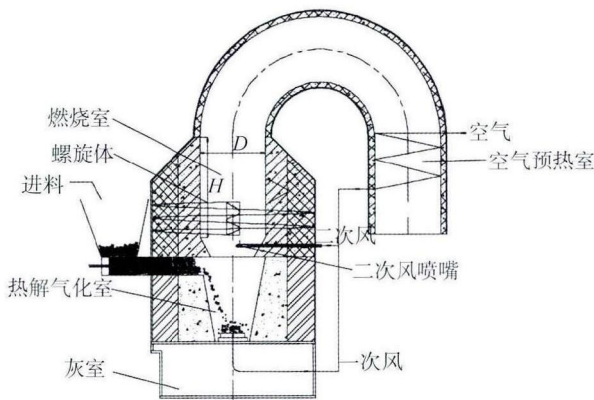


图 1 两段式热解旋流燃烧装置

Fig. 1 Two-stage Pyrolysis Swirling Combustion Devices

### 2 燃烧室冷态模拟

#### 2.1 平均停留时间的计算方法

CFD 通过添加附加变量 (RT) 的方法，在入口处加入一定量的附加变量，在出口处监测附加变量，然后通过停留时间公式求得平均停留时间。

首先，计算无附加变量的稳态模拟，再将此稳态模拟结果作为添加了附加变量瞬态模拟的初始文件。

在瞬态模拟计算开始的 1 s 内向容器注入附加变量 RT (STEP 函数,  $RT_{flow} = step(1 - t/1[s]) [kg^3/s]$ )，该变量本身无实际物理意义，设定为时间的函数，且不与 CFD 已存在变量发生冲突。

附加变量随着气体流出容器，在出口处监控并记录所有时刻的附加变量。计算完成后，通过后处

理查看并导入出口处附加变量随时间分布曲线，并利用停留时间公式求得平均停留时间  $t_c$ 。

$$t_c = \frac{\sum_1^n t_i c_i \Delta t_i}{\sum_1^n c_i \Delta t_i} \tag{1}$$

式中,  $t_i$  为 time, s;  $C_i$  为 areaAve(RT)@Outlet, 每个记录时间出口处附加变量的加权平均值,  $kg^3/s$ ;  $\Delta t_i$  为 Timestep\* Timestep Interval, s.

#### 2.2 螺旋体的结构参数

为了确定燃烧室螺旋体的结构参数并快速便捷地计算，设定燃烧室模型：直径  $D100\text{ mm}$ 、高  $H360\text{ mm}$ ；进气量  $50\text{ m}^3/\text{h}$  (常压,  $25^\circ\text{C}$  空气)，不考虑二次风的影响。利用 CFD 软件分析了高度 ( $1/9H$ 、 $2/9H$ 、 $1/3H$ 、 $4/9H$ )、螺旋体的旋转圈数 (圈数分别为 0、1、2、3、4) 及内径 ( $0.1D$ 、 $0.2D$ 、 $0.3D$ ) 对平均停留时间的影响，结果见图 2~5。

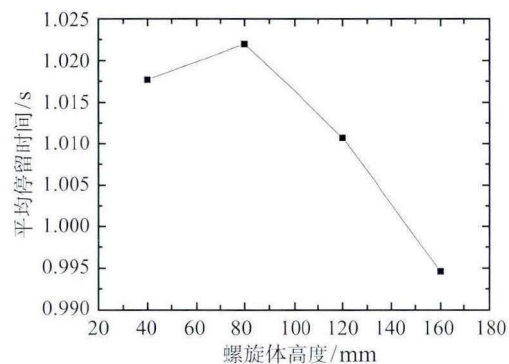


图 2 旋转圈数 1 圈、内径 0.3D 时，高度对平均停留时间的影响

Fig. 2 The effort of height on the average residence time of flue gas

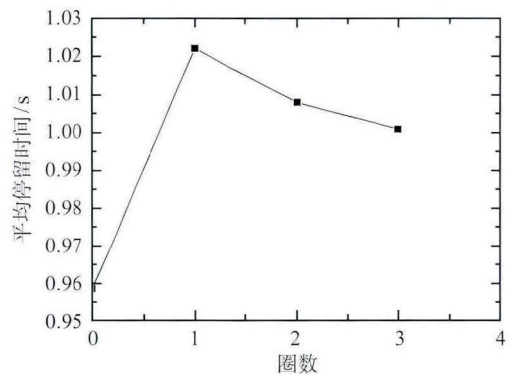


图 3 螺旋体高度 2/9H、内径 0.3D 时，旋转圈数对平均停留时间的影响

Fig. 3 The effort of number of rotations on the average residence time of flue gas

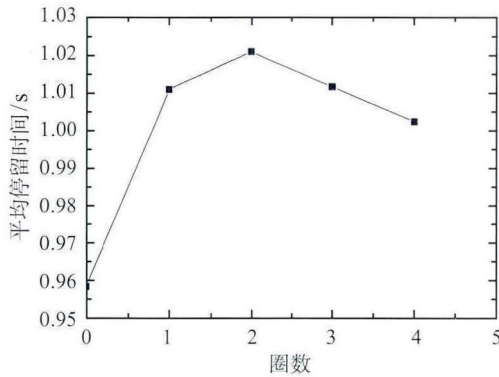


图4 螺旋体高度  $1/3H$ 、内径  $0.3D$  时, 旋转圈数对平均停留时间的影响

Fig. 4 The effort of number of rotations on the average residence time of flue gas

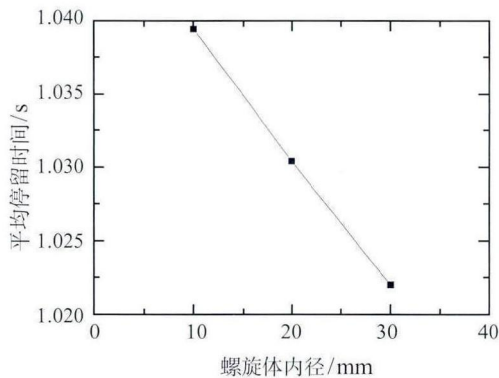


图5 旋转圈数 1 圈、螺旋体高度  $2/9H$  时, 内径对平均停留时间的影响

Fig. 5 The effort of inside diameter on the average residence time of flue gas

螺旋体高度和旋转圈数决定了烟气的旋转角度, 主要体现在截面平均流速和流动轨迹, 对停留时间分布有较大的影响。通过模拟计算, 得到平均停留时间在在高度  $2/9H$ 、旋转圈数 1 与高度  $1/3H$ 、旋转圈数 2 分别存在最大值, 旋转角度范围  $10^\circ \sim 20^\circ$ 。从图 3 和图 4 可知, 螺旋体有利于平均停留时间的提高。

从图 5 可看出, 随着螺旋体内径减小, 螺旋体入口流速随之降低, 使得平均停留时间增加。考虑到螺旋体的制造与安装问题, 选取螺旋体内径为  $0.2D$ 。

因此, 螺旋体规格参数: 高度  $2/9H \sim 1/3H$ , 旋转圈数 1~2 圈, 内径  $0.2D$ 。

### 3 燃烧室燃烧模拟

#### 3.1 燃烧室模型

根据典型广州城市生活垃圾性质<sup>[7]</sup>、常规固定床气化炉设计<sup>[8]</sup>和气相燃烧室设计<sup>[9,10]</sup>计算城市生活垃圾处理量为  $30 \text{ kg/h}$  的中试装置尺寸, 得到

燃烧室主体直径  $D0.5 \text{ m}$ 、高  $H1.2 \text{ m}$ , 设定螺旋体高度  $0.4 \text{ m}$ 、旋转圈数 2 圈、内径  $0.1 \text{ m}$ 。采用 Design-Modeler 建模, 并采用 Ansys Meshing 划分四面体网格, 总的单元数为 861 368。

#### 3.1.1 数学模型设定

湍流模型: 标准  $\kappa - \varepsilon$  模型<sup>[11]</sup>; 辐射模型: P-1 辐射模型<sup>[12]</sup>; 燃烧模型: 焓耗散模型<sup>[12]</sup>, 化学反应选择氢氧反应 (Hydrogen Oxygen) 和 CO 氧化反应 (WD2 CO Oxidation)。

#### 3.1.2 边界条件

进口边界: 进口气体为广州城市生活垃圾经热解气化得到的可燃气, 主要组分为 CO、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$ , 体积百分比分别为 17.4%、8.4%、2.2%、56.8%和 15.2%, 进口温度为  $600^\circ\text{C}$ , 质量流量为  $0.019 \text{ kg/s}$ ; 二次风为常温空气, 质量流量为  $0.033 \text{ kg/s}$ , 分 10 个喷嘴切向进入燃烧室。出口边界: 设定出口相对压力为零。壁面边界: 设定为无滑移边界。

#### 3.2 燃烧模拟结果

为了彻底分解垃圾本身所持有的二噁英和来自热解气化室的前驱物, 充分燃烧, 要求燃烧室温度在  $1000^\circ\text{C}$  以上<sup>[13,14]</sup>, 烟气停留时间  $3 \text{ s}$  以上<sup>[15]</sup>, 同时保证烟气中的  $\text{O}_2$  体积百分比在  $3\% \sim 6\%$ <sup>[14,16]</sup>。在 3.1 所述基础上, 利用 CFD 对无螺旋体与有螺旋体分别进行了模拟计算, 得到了相应的温度场、烟气平均停留时间和组分浓度分布。

#### 3.2.1 螺旋体对温度场的影响

图 6 为无螺旋体与有螺旋体时燃烧室温度分布图。无螺旋体时, 可燃气进入燃烧室后与二次风混合进行燃烧反应, 最高温度  $1349^\circ\text{C}$  在二次风喷嘴出口, 大部分区域温度范围  $946 \sim 961^\circ\text{C}$ , 平均温度  $947^\circ\text{C}$ , 未达到抑制二噁英的要求。有螺旋体时, 可燃



图6 燃烧室温度分布图

Fig. 6 The temperature distribution of the gas phase combustion

气与二次风的燃烧反应主要集中在二次风喷嘴前炉膛中心位置, 燃烧完全, 最高温度  $1410^{\circ}\text{C}$ , 螺旋体上方温度  $>1026^{\circ}\text{C}$ , 燃烧室内平均温度  $1003^{\circ}\text{C}$ , 比无螺旋体时提高了  $56^{\circ}\text{C}$ , 有利于二噁英完全分解。

### 3.2.2 螺旋体对平均停留时间的影响

图 7 为无螺旋体与有螺旋体时燃烧室气体流线图, 图 8 为无螺旋体与有螺旋体时附加变量出口处浓度曲线。无螺旋体时, 可燃气体与二次风混合不均匀, 二次风切向进入燃烧室旋流向上, 速度较快, 出口处烟气速度  $2.92\text{ m/s}$ , 按式 (1) 计算得到平均停留时间  $2.99\text{ s}$ 。增加螺旋体后, 在燃烧室入口处可燃气体与二次风形成了旋流, 混合充分, 有利于燃烧; 向上的烟气经螺旋体逆向旋流, 烟气轨迹明显变得复杂, 湍流度高, 出口速度  $1.82\text{ m/s}$ , 低于无螺旋体, 平均停留时间增加至  $3.17\text{ s}$ , 满足了设计要求。

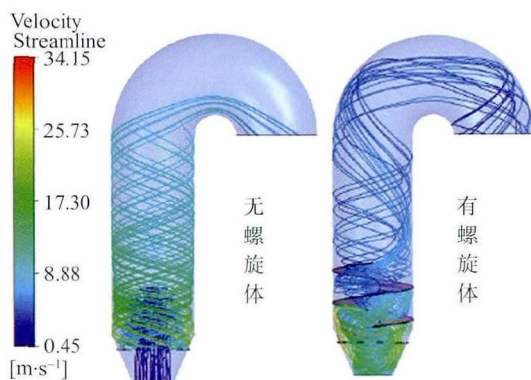


图 7 燃烧室气体流线图

Fig. 7 The Streamline of the gas phase combustion

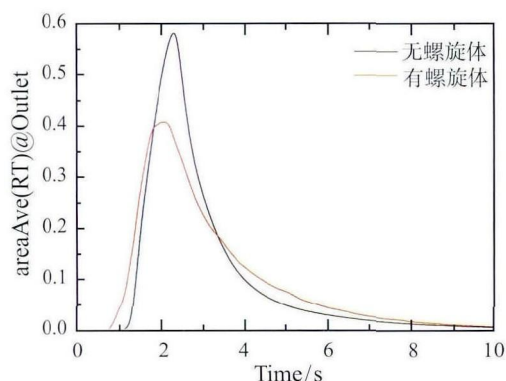


图 8 附加变量出口处浓度曲线

Fig. 8 The concentration of the additional variable at the outlet

### 3.2.3 有螺旋体时 CO 和 O<sub>2</sub> 浓度分布

图 9 为有螺旋体时燃烧室内 CO 和 O<sub>2</sub> 的浓度分布图。从图 9 可看出, CO 进入燃烧室后, 迅速与 O<sub>2</sub> 发生燃烧反应, 燃烧完全, 出口处 CO 基本为

零, O<sub>2</sub> 平均体积百分比 6%, 保证了 CO 等可燃组分的充分燃烧。

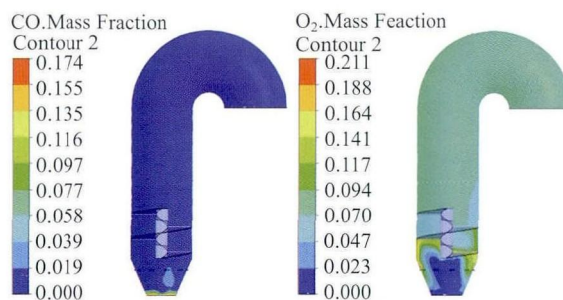


图 9 有螺旋体时燃烧室内 CO 和 O<sub>2</sub> 的浓度分布

Fig. 9 The mole fraction of CO and O<sub>2</sub> in the combustion chamber with the helix

## 4 结 论

利用 CFD 对城市生活垃圾两段式热解旋流燃烧装置燃烧室进行数值模拟, 得到以下结论:

1) 通过比较平均停留时间, 确定燃烧室的螺旋体结构参数: 高度  $2/9H \sim 1/3H$ , 旋转圈数  $1 \sim 2$  圈, 内径  $0.2D$ 。

2) 燃烧室内无螺旋体时, 可燃气体与二次风混合不均匀, 燃烧不完全, 未达到抑制二噁英的要求。

3) 在燃烧室增加螺旋体后, 平均温度  $>1000^{\circ}\text{C}$ , 烟气平均停留时间  $>3\text{ s}$ , 出口烟气的 O<sub>2</sub> 浓度 6%, 满足了燃烧室设计要求, 为两段热解旋流燃烧中试装置的设计提供依据。

## 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 (2014) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014  
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook (2014) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014
- [2] Leckner B. Process Aspects in Combustion and Gasification Waste-to-Energy (WtE) Units [J]. Waste Management, 2015, 37: 13-25
- [3] Consonni S, Viganò F. Waste Gasification vs. Conventional Waste To Energy: A Comparative Evaluation of Two Commercial Technologies [J]. Waste Management, 2012, 32: 653-666
- [4] Tanigaki N, Manako K, Osada M. Co-Gasification of Municipal Solid Waste and Material Recovery in a Large-Scale Gasification and Melting System-Nippon Steel [J]. Waste Management, 2012, 32: 667-675
- [5] Shibaiki H, Takamiya K, Hoshizawa Y, et al. Development of High-Performance Direct Melting Process for Municipal Solid Waste-Nippon Steel [R]. Japan: Nippon Steel Technical Report No.92, 2005: 22-29
- [6] Malkow T. Novel and Innovative Pyrolysis and Gasification Technologies for Energy Efficient and Environmen-

- tally Sound MSW Disposal [J]. Waste Management, 2004, 24: 53-79
- [7] 熊祖鸿, 李海滨, 吴创之, 等. 下吸式气化炉处理城市生活垃圾 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(8): 75-78  
XIONG Zuhong, LI Haibin, WU Chuangzhi, et al. Treatment of Municipal Solid Waste in a Down-Draft Gasifier [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(8): 75-78
- [8] 胡建军. 生物质气化机组的设计与试验研究 [M]. 天津: 天津大学, 2003  
HU Jianjun. Design and Experimental Research of Biomass Gasifier. Tianjin: Tianjin University, 2003
- [9] 徐旭常, 周力行. 燃烧技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 409  
Xu Xuchang, ZHOU Lixing. Combustion Technology Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 409
- [10] 胡珀. 废气焚烧炉的设计探讨 [J]. 科技创新导报, 2008, 26: 15  
HU Po. Design of Gas Incinerator [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, 26: 15
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-124  
WANG fujun. Analysis of Computational Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 120-124
- [12] Huai X L, Xu W L, Qu Z Y, et al. Analysis and Optimization of Municipal Solid Waste Combustion in a Reciprocating Incinerator [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63: 3100-3113
- [13] Gulyurtlu I, Crujeira A T, Abelha P, et al. Measurements of Dioxin Emissions During Co-Firing in a Fluidised Bed [J]. Fuel, 2007, 86: 2090-2100
- [14] McKay G. Dioxin Characterisation, Formation and Minimisation During Municipal Solid Waste (MSW) Incineration: Review [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86: 343-368
- [15] 赵吉睿, 张骥, 刘佳泓. 垃圾焚烧过程中二噁英的生成与控制 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 101-104  
ZHAO Jirui, ZHANG Ji, LIU Jiahong. Synthesis and Reduction of Dioxin Emissions in Waste Incineration Process [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 101-104
- [16] Yan Mi, Li Xiaodong, Chen Tong, et al. Effect of Temperature and Oxygen on the Formation of Chlorobenzene as the Indicator of PCDD/Fs [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(10): 1637-1642