

垃圾热解气燃烧炉的数值模拟研究

王少江¹, 漆小虎¹, 毛凯¹, 魏永峭¹, 王东亮^{2,3}, 杨勇^{2,3}, 李红伟^{2,3*}

¹二重(德阳)重型装备有限公司, 四川 德阳

²甘肃省低碳能源化工重点实验室, 甘肃 兰州

³兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年7月20日; 录用日期: 2022年8月23日; 发布日期: 2022年8月29日

摘要

描述了用于固体垃圾热解气处理的工业燃烧炉结构特点, 采用非预混燃烧模型对热解气燃烧过程进行数值模拟。通过比较两种不同内部结构的燃烧炉中流场、温度场和组分浓度场分析了不同燃烧炉的热解气燃烧效果。结果表明, 燃烧炉内热解气和空气以螺旋流动形式进行混合、燃烧, 其中A结构燃烧炉由于收缩口的节流混合效应, 强化了混合燃烧过程, 使得炉内温度更高、CO等可燃组分浓度更低。同时, 需要保持适当过量的空气用量以保证充分燃烧且避免空气的冷却效应; 特别地, 当热解气中可燃组分含量较低时, 需要考虑升温措施以保证二噁英等物质的热解环境。

关键词

垃圾热解气, 燃烧炉, 数值模拟, 节流混合

Numerical Simulation Study of Waste Pyrolysis Gas Burner

Shaojiang Wang¹, Xiaohu Qi¹, Kai Mao¹, Yongqiao Wei¹, Dongliang Wang^{2,3},
Yong Yang^{2,3}, Hongwei Li^{2,3*}

¹Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co. Ltd, Deyang Sichuan

²Key Laboratory of Low Carbon Energy and Chemical Engineering of Gansu Province, Lanzhou Gansu

³School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Received: Jul. 20th, 2022; accepted: Aug. 23rd, 2022; published: Aug. 29th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 王少江, 漆小虎, 毛凯, 魏永峭, 王东亮, 杨勇, 李红伟. 垃圾热解气燃烧炉的数值模拟研究[J]. 化学工程与技术, 2022, 12(5): 323-330. DOI: 10.12677/hjct.2022.125042

Abstract

The industrial combustion furnace for pyrolysis gas of solid waste is described. The combustion process of pyrolysis gas is simulated with a non-premixed combustion model. The velocity, temperature and component concentration field are compared for the two kinds of internal furnace structures to analyze the combustion performance in different combustion furnaces. The results show that the pyrolysis gas and air are mixed and burned in the form of spiral flow in the combustion furnace. The A structure furnace strengthens the mixture and combustion process due to the throttling effect of the contraction port, which leads to the higher temperature and the lower concentration of combustible components such as CO. Meanwhile, it is necessary to maintain an appropriate excess air amount to ensure full combustion and to avoid the cooling effect of air. On the other hand, when the content of combustible components in pyrolysis gas is low, certain heating strategy should be considered to ensure the pyrolysis environment of dioxins and other substances.

Keywords

Waste Pyrolysis Gas, Combustion Furnace, Numerical Simulation, Throttle Hybrid

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市生活垃圾量不断增长, 其无害化、减量化、资源化处置成为重要环保问题, 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[1] [2] [3] [4]。城市生活垃圾中存在大量的可燃固体废弃物, 将其热解处理获取中低热值可燃气体(简称热解气) [5] [6], 特别是为解决垃圾焚烧过程中产生二噁英类毒性物质的问题[7] [8], 一些发达国家提出了热解气化焚烧炉技术, 被认为是 21 世纪新型的垃圾焚烧技术[9] [10]。热解气化焚烧炉技术原理是在无氧或缺氧条件下现将垃圾中 C、H 等元素热解为小分子可燃气体, 再在燃烧炉中提供充足的氧气进行焚烧, 实现垃圾有效无害处理, 同时产生的高温烟气还可以进行加热蒸汽发电等能量回收利用[11] [12] [13]。

在燃烧炉热解炉的出口气体与圆形喷射燃烧器中空气汇合(湍流)进而燃烧。成珊[14]和 Zhang 等[15]等发现低氧稀释混合的燃烧过程具有超低污染排放及低振荡燃烧特性, 能适应低热值燃料且高效清洁的优点。廖艳芬等[16]基于 Fluent 软件对 1 m 长度的燃烧器进行了低氧稀释混合的燃烧过程模拟分析, 探讨了燃烧器的运行参数、结构优化对燃烧状况及 NO 排放的影响。顾菁等人[17]则综合现有固定床气化炉的结构特点, 增加了螺旋体, 促使热解后进行旋流燃烧; 对螺旋体的模拟分析发现, 气相平均停留时间延长, 燃烧室内气体混合均匀, 燃烧完全, 出口可燃组分浓度基本为零。基于上述研究成果, 针对工业应用的垃圾热解气燃烧炉装置, 探讨了燃烧炉结构、热解气处理量(进口速度)等因素对燃烧结果的影响, 以便优化燃烧过程、提高燃烧效率并降低烟气中的 CO 浓度。

2. 燃烧炉结构与模型

2.1. 工业燃烧炉结构

燃烧炉的目的是热解气和空气充分混合, 促进可燃组分的燃烧和有害物质的分解转化。如图 1 所示

的燃烧炉内部结构。该燃烧炉由底部的圆锥形灰斗、中间圆筒型燃烧炉体和上部的圆筒形烟囱组成。热解气由燃烧炉体底部水平进入，空气(O₂)则由灰斗上部通过三个空气管道进入燃烧室，随后与热解气混合，进而发生热解气的燃烧反应；出口位于烟囱中段，水平排出高温烟气可进行后续利用。A 结构比 B 结构多出了燃烧炉腔中部的收缩口，以进一步促进流体混合。

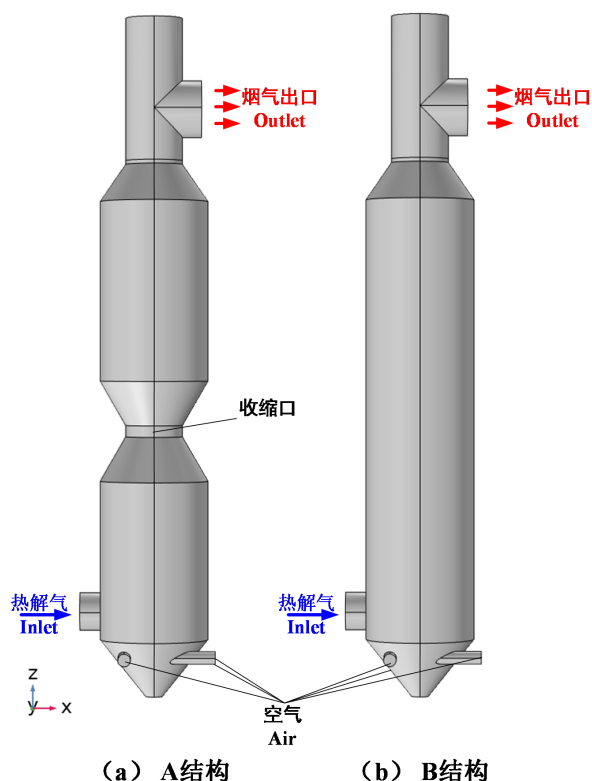


Figure 1. Structure and physical model of the pyrolysis gas combustion furnace
图 1. 热解气燃烧炉的结构和物理模型

2.2. 热解气燃烧模型

参考垃圾热解气的代表样本组成如表 1 所示，进口温度为 600℃，主要可燃组分为 CO、H₂ 和 CH₄，除了 CO₂ 其余惰性组分均用 N₂ 含量代替。空气提供 O₂ (占比 21%)，进入燃烧炉与热解气进料管中的气流混合后反生燃烧反应区，因此产生的燃烧为非预混型燃烧。连续反应需要反应物和助燃剂混合到化学计量条件，当前模型主要考虑反应 R1、R2 和 R3。



考虑湍流，应用了 k-ε 湍流模型，且借助热量守恒方程(包含反应热源)和浓物质组分传递方程(包含反应物质生成或消耗速率方程)以达到对湍流状态的燃烧反应过程有效模拟的目的[18]。其中燃烧过程本次模拟参考燃烧器装置中非预混燃烧产生的温度和成分的研究数据[19] [20]，利用 COMSOL Multiphysics 软件基于对不同工况数值模拟结果的分析，对燃烧炉的空气过量系数、燃烧炉结构和工艺操作条件进行了分析、优化。

Table 1. Main composition data of pyrolysis gas**表 1.** 热解气主要组成数据

温度/°C	体积分数/%				
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂
600	17.4	8.4	2.2	15.2	56.8

2.3. 模型参数和边界条件

基于可燃气组成(表 1), 当前燃烧炉物理模型对应的边界条件和参数如表 2 所示。利用 COMSOL Multiphysics 软件, 将“反应流”与“流体传热”接口相结合, 建立并求解热解气燃烧模型。

Table 2. Key parameters and boundary conditions of the pyrolysis gas combustion furnace**表 2.** 热解气燃烧炉的关键参数和边界条件

结构参数	数值	结构参数	数值
热解气进口直径	1.0 m	燃烧炉高度	17.8 m
空气进口直径	0.33 m	燃烧炉筒体高度	11.5 m
燃烧炉体内径	2.85 m	A 结构收缩口直径	1.5 m
烟气出口直径	1.5 m	瓶颈中心高度	5.45 m
边界条件			
热解气进口	U_{inlet}	T_{inlet}	折合流量 150°C
	12 m/s	600°C	16,440 m ³ /h
空气进口	U_{Air}	T_{Air}	O ₂ 浓度
	14.664 m/s	150°C	21%
其他条件	热解气入口浓度参照表 1; 烟气出口为出口边界条件; 其他为壁面和绝热边界条件		

3. 两种结构燃烧炉的结果比较

对 A、B 两种结构的燃烧炉模拟结果如图 2 和图 3 所示。在相同的入口条件下, 对比 A、B 两种结构的燃烧结果发现, 热解气和空气都采用内切圆柱炉腔壁的方式进入燃烧炉, 并以螺旋流动形式进行混合、燃烧而逐渐离开出口; 在炉壁附近呈现较高流速, 而炉腔中心则会形成低速区; 除了烟囱入口和燃烧器出口的高流速区域, A 结构因为中间收缩口结构的节流作用, 导致形成高流速的第二区域, 截断了炉腔中心的低速区域, 避免了颗粒物的沉降, 促使气流在燃烧炉上部的二次混合和反应。

同时, 平均处理计算燃烧炉烟气出口和收缩口等高截面上, A 和 B 结构各自变量的平均值结果列于表 3 中。由表 3 数据可知, 尽管在理论需氧量条件下, A、B 两种燃烧炉出口的 CO 和 O₂ 含量都几乎消耗殆尽, A 结构烟气流速和温度都略高于 B 结构的参数值; 同时, CO、H₂ 等可燃组分含量, A 结构也低于 B 结构。对比收缩口等高截面上参数值发现, A 结构由于收缩口的节流效应, 使得局部气流速度急剧增大, 强化了湍流混合效应, 促使在收缩口下段尚未充分混合燃烧的组分, 再次混合燃烧, 由此, 自此截面高度之后的上段炉腔中的温度都较高, 而可燃组分的含量都相对较低。

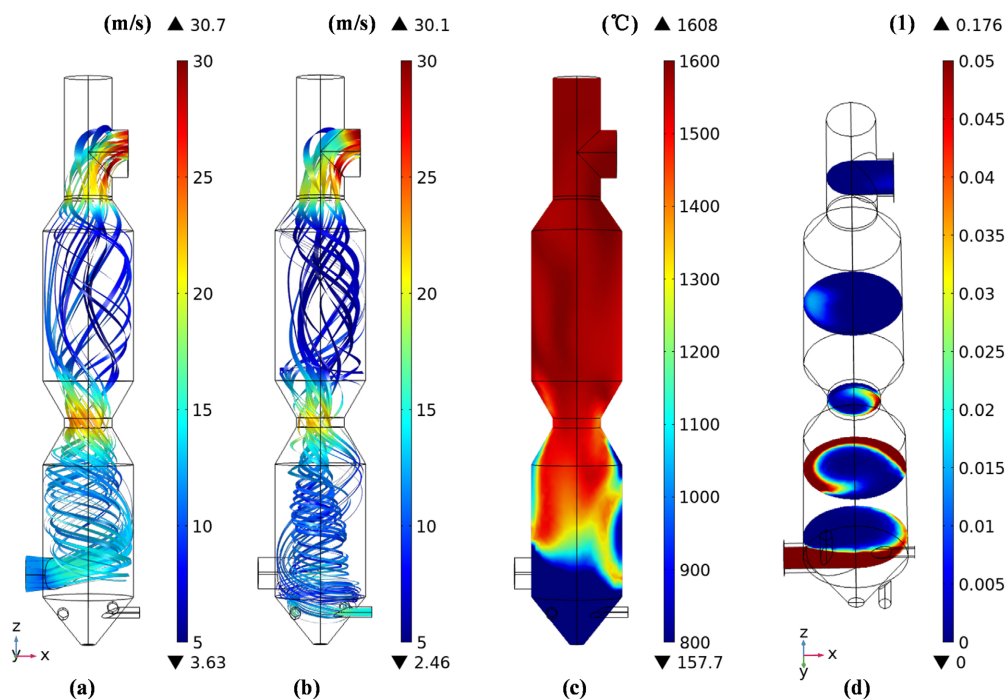


Figure 2. A structure combustion furnace results: (a) pyrolysis gas inlet streamline; (b) air inlet streamline; (c) temperature distribution of central section ($y = 0$); (d) molar fraction of CO on cross section

图 2. A 结构燃烧炉结果: (a) 热解气入口流线; (b) 空气入口流线; (c) 中心截面($y = 0$)的温度分布; (d) 横截面上 CO 的摩尔分数

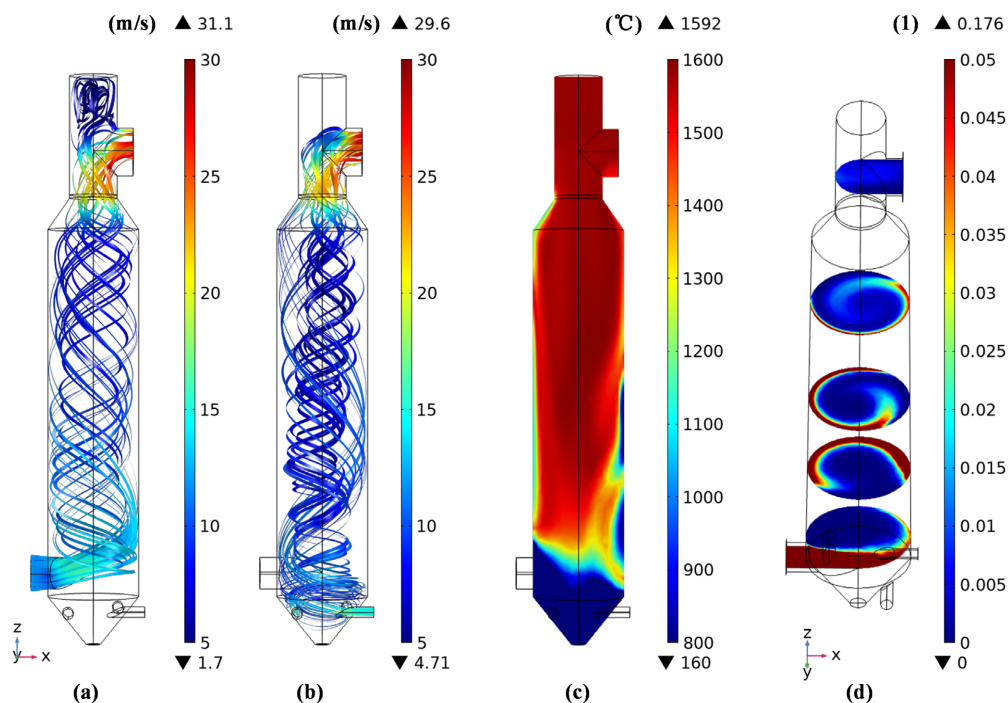


Figure 3. Structure combustion furnace results: (a) hydrolysis gas inlet streamline; (b) air inlet streamline; (c) temperature distribution of central section ($y = 0$), and (d) molar fraction of CO on cross section

图 3. B 结构燃烧炉结果: (a) 热解气入口流线; (b) 空气入口流线; (c) 中心截面($y = 0$)的温度分布; (d) 横截面上 CO 的摩尔分数

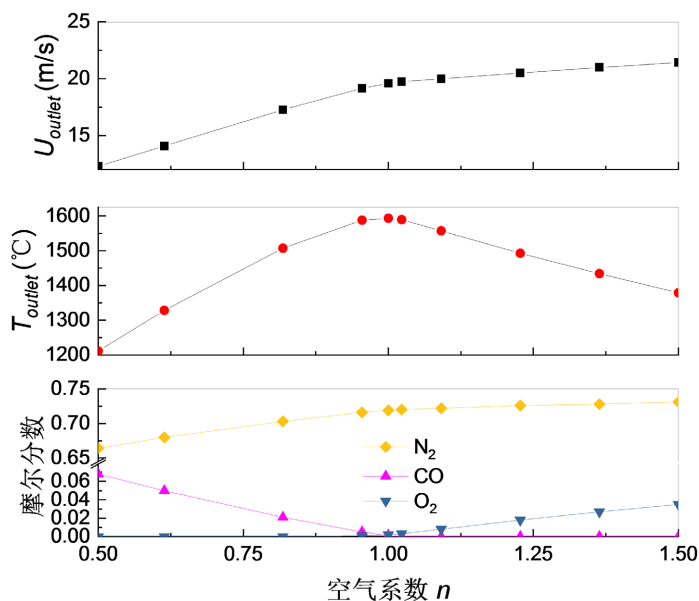
Table 3. Meverage of the combustion furnace outlet and constriction section**表 3.** 燃烧炉出口和收缩口截面相关量的平均值

平均值		U_{Outlet} (m/s)	T ($^{\circ}\text{C}$)	摩尔分数						
				CO	O_2	CO_2	H_2	H_2O	CH_4	N_2
收缩口 等高截面	A 结构	21.641	1486.5	0.012	0.011	0.190	0.003	0.069	$7.5\text{E-}4$	0.714
	B 结构	8.3367	1445.8	0.016	0.012	0.187	0.006	0.066	$1.3\text{E-}3$	0.711
燃烧炉 出口	A 结构	19.586	1693.8	0.001	0.002	0.203	0.000	0.075	0.000	0.719
	B 结构	19.384	1648.4	0.002	0.007	0.198	0.000	0.073	0.000	0.720

4. 工艺参数对燃烧炉结果的影响

4.1. 空气用量的影响

维持热解气进口流速为 12 m/s，即热解气处理量不变，调整空气入口流速，其与理论值(14.664 m/s)的比值定义为空气系数 n ，结果如图 4 所示。随着空气量增加，炉腔内流速增加，烟气出口温度先增加，而后逐渐降低；可燃组分含量都急剧降低，减少至零。由此，随着空气量增加， O_2 的量增加，使得燃烧过程更高充分，但由于空气进料温度相对较低，过量增加空气使得受限于可燃组分燃烧热量的燃烧炉温度也随之降低。特别地，当可燃组分含量较低时，这一现象可能会加剧。

**Figure 4.** Effect of air excess factor on A structure combustion furnace**图 4.** 空气过量系数对 A 结构燃烧炉的影响

4.2. 热解气中可燃组分含量的影响

维持热解气进口流速不变，调整热解气中 CO 、 H_2 等可燃组分的体积分数，该体积分数与表 1 中相应组分体积分数加和的比值为 m ，并保证空气入口流速为其与理论需氧量，则结果如图 5 所示。由图 5 可知，随着可燃组分含量降低，热解气的热值降低，需要的空气用量也减少，故此，燃烧炉内气流速度

和温度都显著降低,可能由于气流平均停留时间增加,可燃组分和 O_2 混合相对充分,出口 CO 浓度也较低。从燃烧过程来看,可燃组分含量低,需氧量降低,更倾向于充分燃烧,但由于燃烧放热量就少,炉腔的温度也较低,可能不利于参与颗粒、二噁英等有害物质分解。

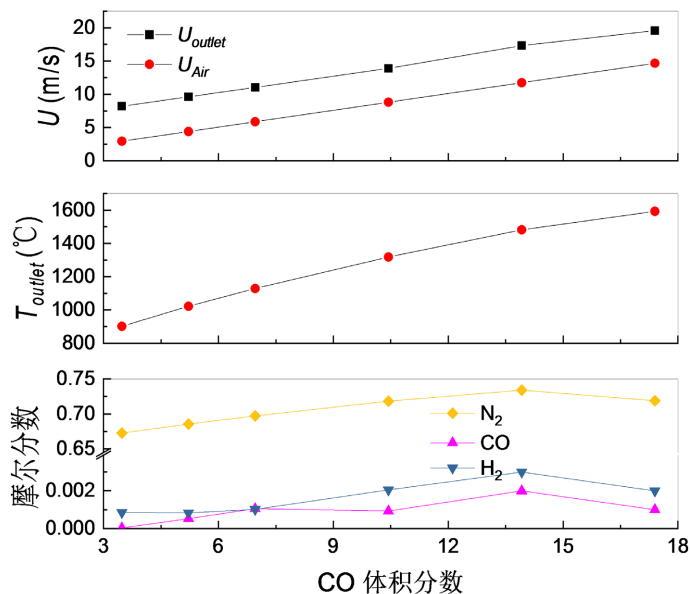


Figure 5. Effect of combustible component content on A structure combustion furnace

图 5. 可燃组分含量对 A 结构燃烧炉的影响

5. 结论

针对固体垃圾热解气在燃烧炉内燃烧过程,采用非预混燃烧模型进行数值模拟研究。通过比较两种内部结构的燃烧炉中流场、温度场和组分浓度场分析了不同燃烧炉的热解气燃烧效果。结果表明:

- 1) A 结构燃烧炉的收缩口结构展现出节流混合效应,促使可燃组分在此结构前后与 O_2 充分混合、燃烧,导致 A 结构的温度稍高于 B 结构,且 CO 等可燃组分浓度降低至 0.002。
- 2) 需要保持适当过量的空气用量以保证充分燃烧,但要避免过量空气导致的炉腔冷却效应。
- 3) 当热解气中可燃组分含量较低时,释放燃烧热有限,需要考虑升温措施以保证二噁英等物质的热解环境。

参考文献

- [1] 任超峰,方朝军,夏小栋,等. 城市生活垃圾固体回收燃料在中国的发展前景[J]. 现代化工, 2019, 39(9): 1-4.
- [2] 何皓,王旻烜,张佳,等. 城市生活垃圾的能源化综合利用及产业化模式展望[J]. 现代化工, 2019, 39(6): 6-14.
- [3] 袁浩然,鲁涛,熊祖鸿,等. 城市生活垃圾热解气化技术研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(2): 421-427.
- [4] 徐鹏,王启民. 生活垃圾低温热解实验研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2020, 16(2): 39-44.
- [5] 梅振飞,陈明,陈德珍,等. 垃圾热解-挥发分重整过程中基于产物导向的催化剂选择[J]. 化工学报, 2019, 70(8): 3104-3112.
- [6] 莫永强,李洪亮,方书起,等. 城市生活垃圾气化制合成气研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(5): 73-77.
- [7] 贾顺杰. 不同类型分子筛催化热解陈腐垃圾性能研究[J]. 工业催化, 2020, 28(10): 75-80.
- [8] 龙宝玉,王少波,张黎明,等. 抑制垃圾焚烧中二噁英合成的中试研究[J]. 现代化工, 2019, 39(3): 191-193.

- [9] Leckner, B. (2015) Process Aspects in Combustion and Gasification Waste-To Energy Units. *Waste Management*, **37**, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.019>
- [10] 张思成. 垃圾热解耦合燃煤混烧的实验研究与数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [11] 张蒙蒙, 宋强, 宋丽华, 等. 城市生活垃圾与松木屑共热解实验研究[J]. 环境工程, 2018, 36(4): 137-141.
- [12] 李小明, 肖燕, 孙钟华, 等. 城市生活垃圾热解重整合成气计算分析[J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 1261-1267.
- [13] 贾晋炜, 刘璐, 鲁明元, 等. 生活垃圾热解产物中含氧物质的分布规律[J]. 环境工程, 2016, 34(10): 108-112.
- [14] 成珊. 多段式自预热燃烧器设计、模拟及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [15] Zhang, Z.W., Li, X.S., Zhang, L.Q., *et al.* (2019) Numerical Investigation of the Effects of Different Injection Parameters on Damkuhler Number in the Natural Gas MILD Combustion. *Fuel*, **237**, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.133>
- [16] 顾菁, 袁浩然, 呼和涛力, 等. 城市生活垃圾两段热解旋流燃烧装置数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(12): 2715-2719.
- [17] 廖艳芬, 张曼玉, 陈顺凯, 等. 基于 FLUENT 的垃圾热解气 MILD 燃烧研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 9-16.
- [18] Huai, X.L., Xu, W.L., Qu, Z.Y., *et al.* (2008) Analysis and Optimization of Municipal Solid Waste Combustion in Reciprocating Incinerator. *Chemical Engineering Science*, **63**, 3100-3113. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.03.020>
- [19] Barlow, R.S., Fiechtner, G.J., Carter, C.D., *et al.* (2000) Experiments on the Scalar Structure of Turbulent CO/H₂/N₂ Jet Flames. *Combustion and Flame*, **120**, 549-569. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00126-1)
- [20] Frassoldati, A., Faravelli, T. and Ranzi, E. (2007) The Ignition, Combustion and Flame Structure of Carbon Monoxide/Hydrogen Mixtures. Note 1: Detailed Kinetic Modeling of Syngas Combustion Also in Presence of Nitrogen Compounds. *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 3471-3485. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.01.011>