



移动扫码阅读

刘泽庆, 林瑜. 垃圾焚烧炉高温低氧燃烧技术可行性仿真研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(2): 1-7.

LIU Zeqing, LIN Yu. Simulation study on the feasibility of high temperature and low oxygen combustion technology in waste incinerator[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 1-7.

垃圾焚烧炉高温低氧燃烧技术可行性仿真研究

刘泽庆¹, 林瑜²

(1. 上海环境卫生工程设计院有限公司, 上海 200232; 2. 霍尼韦尔中国研发中心, 上海 201203)

摘要: 针对生活垃圾焚烧炉结焦及 NO_x 初始生成浓度较高的问题, 在垃圾焚烧炉炉膛内采用高温低氧燃烧技术, 探讨了该技术的适用性。在常规垃圾焚烧炉的前拱设置 11 个高温低氧喷口, 对喷射流速分别为 60、50、40、30 m/s 的四种工况进行计算流体力学数值仿真。结果表明: 在喷口速度为 60 m/s 和 50 m/s 工况下, 喷射气流的卷吸和掺混能力更强, 喷射气流的前端基本可达炉排表面, 形成的气流旋涡覆盖了主燃区(炉排燃烧段)的高温段; 燃烧段及其上方的气体组分混合较为均匀, 主燃区氧气浓度(体积分数)为 6.5%~7.0%; 主燃区温度(约为 1 200 K)分布趋于一致, 局部高温区的范围较小; 该技术可有效缓解焚烧炉内的结焦情况, 有助于降低 NO_x 的初始生成浓度。

关键词: 生活垃圾焚烧炉; 垃圾分类; 高温低氧燃烧技术; 温度场; 组分场; 计算流体力学数值仿真
中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8759(2022)02-0001-07

Simulation study on the feasibility of high temperature and low oxygen combustion technology in waste incinerator

LIU Zeqing¹, LIN Yu²

(1. Shanghai Environmental Sanitary Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China; 2. Honeywell Technology Solution (China), Shanghai 201203, China)

Abstract: In order to solve the problems of coking and high initial NO_x concentration in the municipal solid waste (MSW) incinerator, high temperature and low oxygen combustion technology in the furnace of MSW incinerator was adopted, and its feasibility was discussed. Eleven high temperature and low oxygen nozzles were set on the front arch of the conventional waste incinerator. Four cases with different flow rates at 60, 50, 40 and 30 m/s respectively were investigated by computational fluid dynamic (CFD) numerical simulation. The results show that with the jet velocities of 60 m/s and 50 m/s, the entrainment and mixing capability of the jet fluid is stronger. The leading edge of jet can almost reach the surface of the grate, and the resulting flow vortex covers the high temperature section of the main combustion area (the combustion section on the grate). The gaseous components are mixed much more evenly in the main combustion area with the oxygen concentration in the range of 6.5%~7.0% (volume fraction). The temperature profile in the main combustion area (about 1 200 K) is more uniform and characterized by smaller high-temperature-zone, which can help reduce the coking risk and the initial NO_x concentration in the incinerator.

Key Words: Domestic waste incinerator; Waste classification; High temperature and low oxygen combustion technology; Temperature field; Species field; CFD numerical simulation

0 前 言

《上海市生活垃圾管理条例》(以下简称“条

例”)自 2019 年 7 月 1 日起施行。条例实施以后, 干垃圾含水率明显降低, 2019 年 1~6 月混合垃圾含水率为 56.99%, 7 月干垃圾的含水率为

收稿日期: 2022-01-15; 责任编辑: 金丽丽

基金项目: 上海市科委项目《焚烧线高效扩能与清洁焚烧智能控制关键技术》(18DZ1202601)

第一作者简介: 刘泽庆(1988-), 男, 内蒙古人, 硕士, 主要研究方向为垃圾清洁焚烧技术。E-mail: liuzeq@huanke.com.cn

17.38%, 相比于混合垃圾下降了 69.50%^[1], 从而使干垃圾热值提升约 30% 以上。

生活垃圾管理和处置方式的变化和由此导致的垃圾热值的提升, 对于垃圾焚烧炉的设计和运行提出了新的要求。计算流体力学(CFD)数值模拟为科学合理的炉膛改造和运行优化提供了有效的手段, 可大幅度提高焚烧炉设计和改造的成功率。此前的数值模拟研究成果包括: 陈涛等^[2]基于床层燃烧的一维非稳态模型, 结合炉膛空间的稀相燃烧模拟, 分析了焚烧炉防结焦的结构优化措施; 林海等^[3]通过数值模拟研究了垃圾厚度和着火时间的关系, 并对各种一次风配风方案进行了比较; 李秋华等^[4]模拟并评估了降低炉膛后拱和加装挡板等措施的效果; 张钦华、曾祥浩等^[5-6]对炉膛上部的切圆二次风的布置方案进行了详细仿真; 王进等^[7-8]通过 CFD 仿真, 研究了采用低温循环烟气的二次风, 以及二次风扩张角、二次风率、二次风层数和二次风倾角等因素对焚烧炉高度方向上的温度和 CO 分布、前后墙结焦和耐材交变应力, 以及 NO_x 的排放等的影响规律; 冯淋淋等^[9]对协同焚烧污泥的工况进行了模拟, 还考虑了回流烟气的喷射效果; 杨栩聪等^[10]则对垃圾掺烧污泥的过程及一烟道内选择性非催化还原脱硝(SNCR)的过程进行了仿真研究。

在垃圾分类和垃圾热值显著提升的大背景下, 现有焚烧炉如不作调整, 则燃烧段中心温度将超过 1 673 K, 热力型 NO_x 会大量生成, 由此会造成炉膛热负荷偏离设计、结焦和污染物超排等一系列严重问题。高温低氧燃烧技术是在低氧稀释条件下进行燃烧(甚至可调节至无焰燃烧), 以最大程度实现均质化燃烧和温度场的均匀分布, 从而有效避免局部高温^[11], NO_x 及 CO 等污染物排放水平也很低。现有文献中, 有采用低温循环烟气作为二次风的^[7], 但该项措施对于主燃区的燃烧效果影响很小。至于在主燃区(炉排燃烧段区域)喷入高温低氧助燃空气的做法, 则很少有文献涉及。为此, 本文将利用 CFD 数值仿真技术, 探索在垃圾焚烧炉的主燃区采用高温低氧燃烧技术的可行性, 通过对炉内气流组织、组分场和温度场均匀性等方面的考察, 分析该技术对主燃区燃烧组织和温度场调节, 以及抑制热力型 NO_x 生成的效果, 从而为纾解垃圾分类(干湿分离)后高热值垃圾燃烧处置的困难提供一种解决方案。

1 研究目标及模型简介

分类后干垃圾热值相比于混合垃圾增幅超过 35%, 燃烧中心火焰温度大幅提升将进一步加剧焚烧炉结焦及 NO_x 原始生成浓度, 而传统烟气再循环技术仅能控制 NO_x 低于 200 mg/Nm³。针对上述问题, 本项目在普通垃圾炉排炉的基础上, 在其前拱设置若干高速喷口, 温度为 1 073 K, 喷出流速分别为 60、50、40、30 m/s。通过高温低氧燃烧仿真研究, 模拟不同喷口流速下的炉内参数分布, 并将温度场和组分场分布的均匀性作为评价喷口设计效果的主要指标。通过考察高温低氧燃烧技术对炉内燃烧组织的影响, 形成垃圾焚烧炉内高温低氧燃烧技术的设计思路和初步方案, 为后续的工程应用与推广给予理论支撑。

仿真模型简介: 床层燃烧的仿真模型采用 Yang Y. B. 等开发的 FLIC 程序^[12-15]; 气相湍流燃烧模拟采用 Fluent 软件中的模型, 湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 气相燃烧反应采用有限速率/涡耗散模型, 辐射模型采用 DO 模型。本文根据垃圾焚烧炉燃烧的特点和不同软件的功能, 采用如下思路和流程进行数值模拟(如图 1 所示): FLIC 计算得到垃圾床层固相燃烧结果, 由此获得烟气温度、流速和各组分浓度沿炉排长度方向的分布曲线, 将其作为入口边界条件导入 Fluent, 以此为基础再进行床层上方的

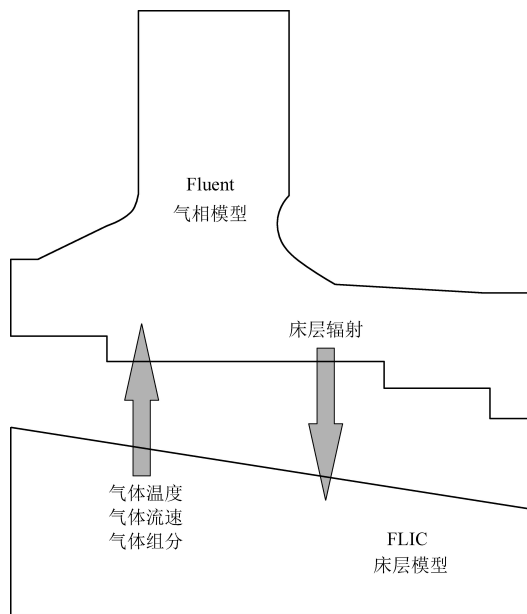


图1 FLIC 与 Fluent 的耦合计算方法

Fig.1 Couple calculation methodology between FLIC and Fluent

气相燃烧模拟。然后将 Fluent 计算得到的气相对下方床层的辐射强度反馈给 FLIC, 重新进行床层上方固相燃烧计算。此即 FLIC 和 Fluent 的双向耦合计算, 如此反复迭代多次直到辐射强度不再变化, 视为计算收敛。

2 研究对象及边界条件

研究对象: 炉排炉, 垃圾热值 10 000 kJ/kg, 日处理量为 500 t/d。

炉膛三维模型, 如图 2 所示, 炉排依次分为干燥段、燃烧段、燃尽段。焚烧炉为保障垃圾充分燃烧, 采用绝热壁面。垃圾从料斗下料后依次经过干燥段、燃烧段、燃尽段, 再通过落料口进入除渣器, 该燃烧过程一般持续 1.5~2 h。一次风温度 473 K, 在干燥段、燃烧段、燃尽段风量配比为 0.15 : 0.70 : 0.15, 过量空气系数为 1.4。为探索高温低氧技术在垃圾焚烧炉上使用的可行性, 特别在炉前拱布置 11 个高温低氧喷口, 喷口方向对准炉排中的燃烧段, 喷口直径为 0.12 m。本文主要考察喷口流速的影响, 流速分别设置为 60、50、40、30 m/s, 喷射气流温度为 1 073 K, 气体中氧气浓度 5% (体积分数)。射流气体的流量和氧浓度根据炉内配风量和配风比例计算得到, 通过高温烟气回流与空气混合来获得所需的氧浓度, 低氧射流的目的是抑制燃烧段 NO_x 的生成。

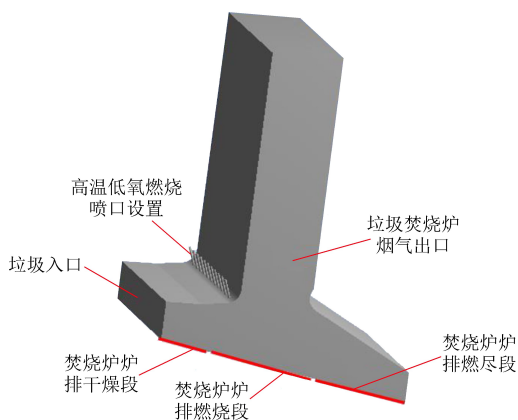


图 2 生活垃圾焚烧炉及高温低氧喷口设置示意图

Fig.2 Schematic diagram of domestic waste incinerator and the set of high temperature and low oxygen nozzles

3 仿真结果分析

本文对流速 60、50、40、30 m/s 这四种工况下高温低氧喷口在炉排炉上的使用效果进行考察, 通过对比不同工况下燃烧段上方燃烧区域的组分场及温度场分布的均匀性, 进而找出较优的喷口

气流设计方案, 从而为高温低氧燃烧技术在焚烧炉上的应用提供理论层面的借鉴。

3.1 原炉型的炉内流场、温度场及组分场分析

先对不采用高温低氧燃烧技术的原有焚烧炉 (原型炉) 进行仿真。图 3 为原炉型的炉内流场、温度场及组分场分析。

由图 3(a) 可见, 固体床层附近, 在炉膛长度约 1/2 处为火焰中心, 最高温度约 1 300 ~ 1 400 K, 蒸发干燥段和燃尽段温度相对较低。垃圾经过干燥段降低水分后, 在燃烧段炉排表面进行均相和非均相燃烧, 燃烧热量一方面提高了烟气温度, 同时使得垃圾快速热解。垃圾在炉排上热解、燃烧后, 挥发分及烟气从床层顶端逸出进入燃烧室, 未完全燃烧的可燃性挥发分气体继续与 O_2 发生反应, 在炉膛空间及其上方的一通道内释放出大量的热量。

由图 3(c) 可见, 垃圾床层上的 O_2 高浓度区域主要分布在蒸发干燥段和燃尽段。燃烧段氧气浓度急剧降低, 因为燃烧段内垃圾剧烈燃烧, 绝大部分氧气在该区域被消耗掉, 同时燃烧段两侧的氧气由于扩散动力学限制不能有效进行补充。

由图 3(d) 可见, 在干燥段, 大量水分蒸发, 因此在干燥段炉排上方的水蒸气浓度较高。在燃烧段中部, 整个干燥过程已进行完毕, 水蒸气浓度明显减小。另外, 对比图 3(a) 可见, 由于干燥段水分大量蒸发, 蒸发吸热作用导致干燥段上方烟气温度也相对较低。

从图 3 看, 不采用高温低氧燃烧技术的传统焚烧炉, 燃烧段及其上方的空间内, 温度场和组分场的不均匀性比较明显。

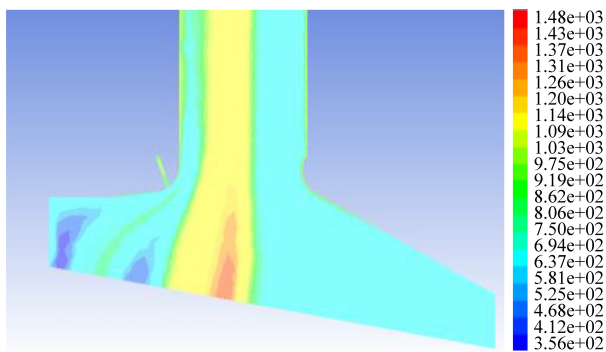
3.2 高温低氧燃烧技术对应的流场分析

图 4 为采用高温低氧燃烧技术的炉内流场分布。由图 4 可见, 喷口流速分别为 60、50、40、30 m/s 时, 射流前端与炉排面的垂直距离分别为 0.5、0.5、1.0、1.5 m, 显然较高速的喷射气流对固体床料的影响更大。高温气体 (1 073 K) 的高速射流引起周围气流的旋流和卷吸, 由此导致燃烧段炉排上方局部高温的挥发性气体和烟气被卷吸、裹挟。高温射流气体和炉排上方气氛的这种高速掺混和互相作用, 将极大地促进不同温度及组分气体的有效混合, 从而有利于炉排上方床料的着火和燃烧。

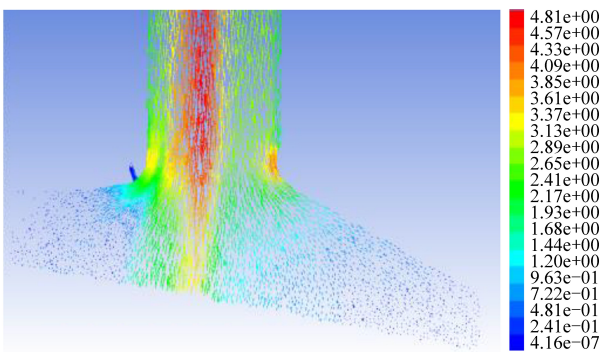
如图 4(c) 和 (d) 所示, 随着喷口流速降低, 高速射流对炉排面上方空间的影响及气体掺混能力

下降,射流对主燃区的气流和燃烧组织的影响也

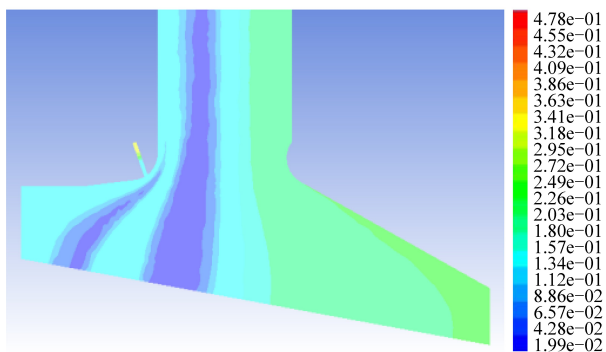
就较小。



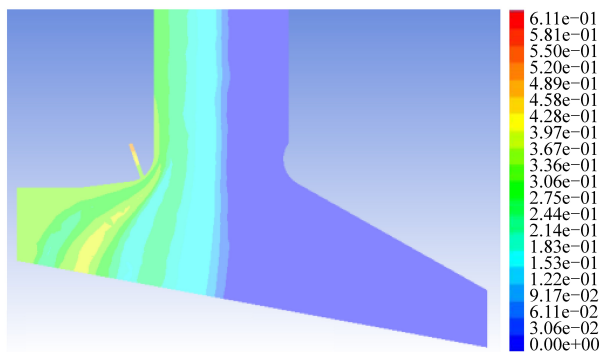
(a) 温度场分布(K)



(b) 流场分布(m/s)



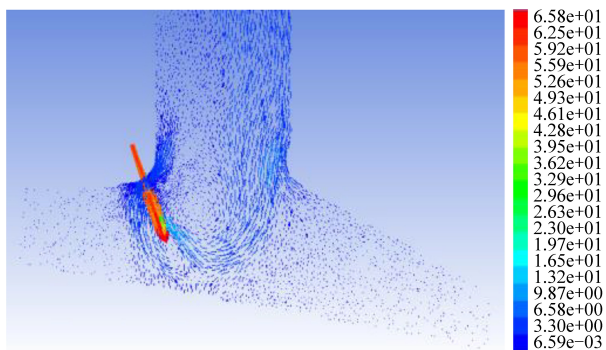
(c) 氧气浓度分布(体积分数)



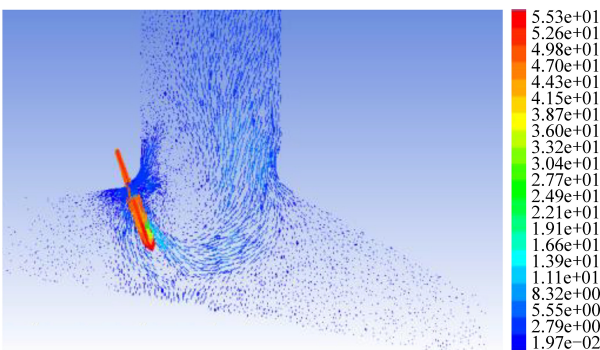
(d) 水蒸气浓度分布(体积分数)

图 3 原炉型的流场、温度场及组分场分析

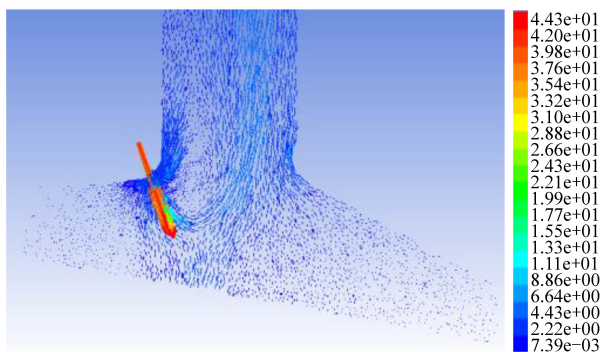
Fig.3 Analysis of flow, temperature and species fields for the original furnace



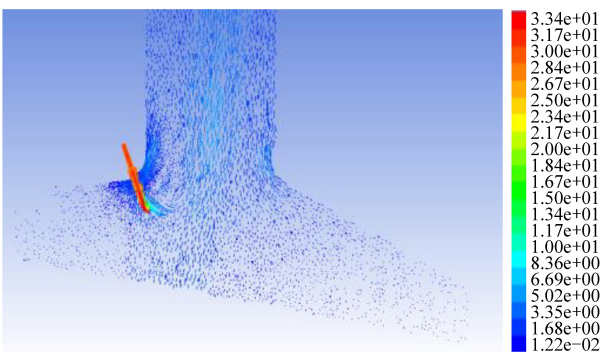
(a) 喷嘴流速 60 m/s



(b) 喷嘴流速 50 m/s



(c) 喷嘴流速 40 m/s



(d) 喷嘴流速 30 m/s

图 4 采用高温低氧燃烧技术的炉内流场分布 (m/s)

Fig.4 Flow field profile for the furnace using high temperature and low oxygen combustion technology (m/s)

3.3 高温低氧燃烧技术对应的氧气浓度分布分析

图 5 为采用高温低氧燃烧技术的炉内氧气浓度分布。从图 5 可见,由于燃烧段炉排上方燃烧反应剧烈,氧气浓度明显较低;而燃烧段两侧的氧气浓度较高,尤其是燃尽段氧气浓度最高,因为该段对应的焦炭燃烧速度缓慢。由图 5(a)和(b)可以看出,高温低氧燃烧喷口的设置,有效加强了燃烧段炉排上方气体的混合,气体卷吸和掺混的范围也明显加大。与喷口速度较低的图 5(c)和(d)两工况相比,喷口流速较高时(60 m/s 和 50 m/s),燃烧段上方气相组分混合均匀,氧气浓度在 6.5%~7%(体积分数)。燃烧段区域的氧气浓度分布越均匀,越有助于垃圾床料的充分燃烧和污染物的彻底分解,也有助于燃烧温度的均匀及

NO_x 的控制。

3.4 高温低氧燃烧技术对应的温度场分析

高温低氧喷口的高温高速气流对主燃区气相空间的混合能力,决定了炉内温度的分布情况。图 6 为采用高温低氧燃烧技术的炉内温度场分布。由图 6 可见,喷口流速较低时(40 m/s 和 30 m/s 的工况),燃烧段上方的高温区域(温度高于 1 350 K)范围较大;而喷口流速较高时(60 m/s 和 50 m/s 的工况),燃烧段上方的高温区域范围较小,且高温区域仅存在于炉排表面。由图 6(a)和(b)可以看出,燃烧段炉排上方的主要燃烧区域的温度均匀,约为 1 200 K。该温度低于一般垃圾焚烧飞灰的灰熔点温度,故高温低氧燃烧技术将有助于减轻焚烧炉内的结焦情况。

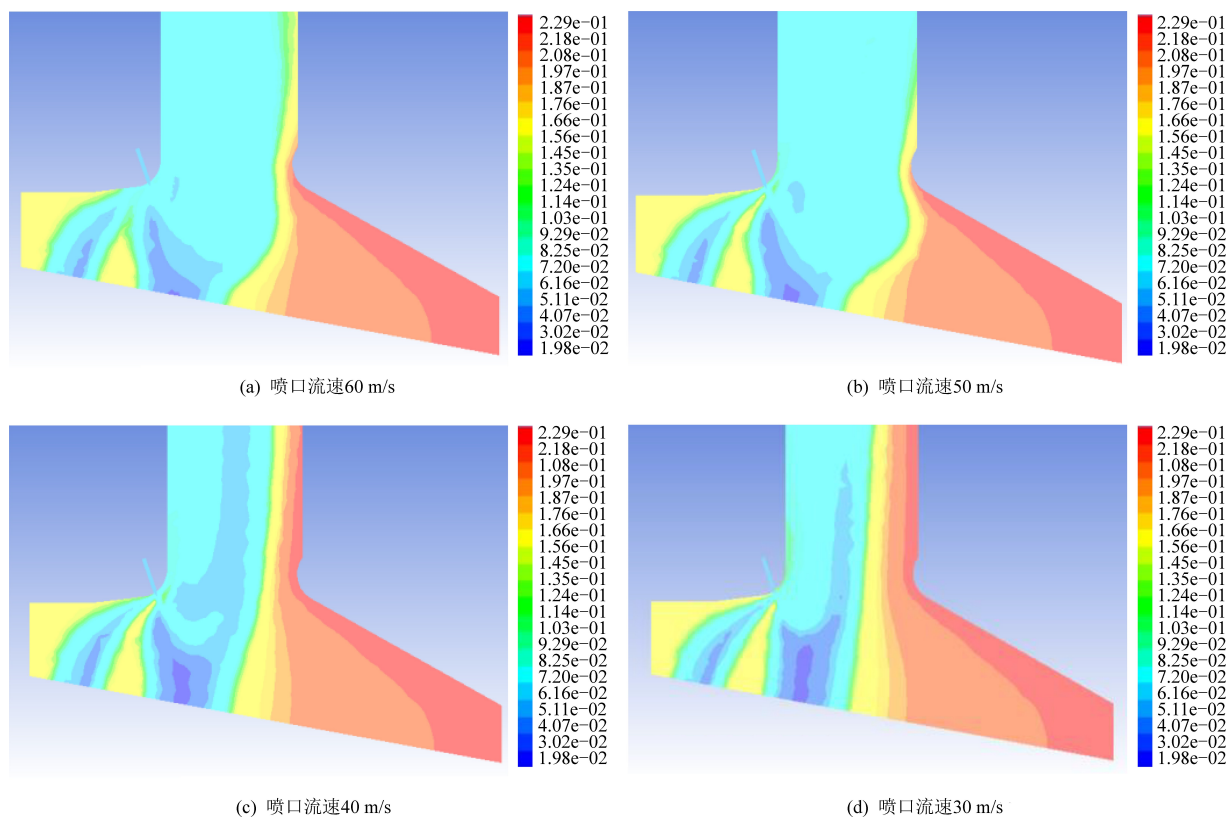


图 5 采用高温低氧燃烧技术的炉内氧气浓度分布(体积分数)

Fig.5 Oxygen concentration profile for the furnace using high temperature and low oxygen combustion technology (volume fraction)

通过上述高温低氧喷口在 60、50、40、30 m/s 射流工况下的 CFD 仿真及其流场、组分场和温度场的分析,可以发现:较高速射流(60 m/s 和 50 m/s)工况下的气流设计和燃烧组织更为优越,射流前端基本可达炉排表面,这显然有利于炉排上方垃圾燃料的快速着火燃烧。高速射流气体的卷吸和掺混能力明显更强,形成的气流旋涡覆盖

了主燃区(炉排燃烧段)的高温段;气体组分混合均匀,炉排上方主燃区及一通道的氧气浓度在 6.5%~7%(体积分数)。较高速射流(60 m/s 和 50 m/s)工况,其对应的主燃区温度也更均匀,约为 1 200 K;局部高温仅存在于炉排表面,由此可有效缓解焚烧炉内的结焦情况,同时有助于抑制 NO_x 的初始生成浓度。

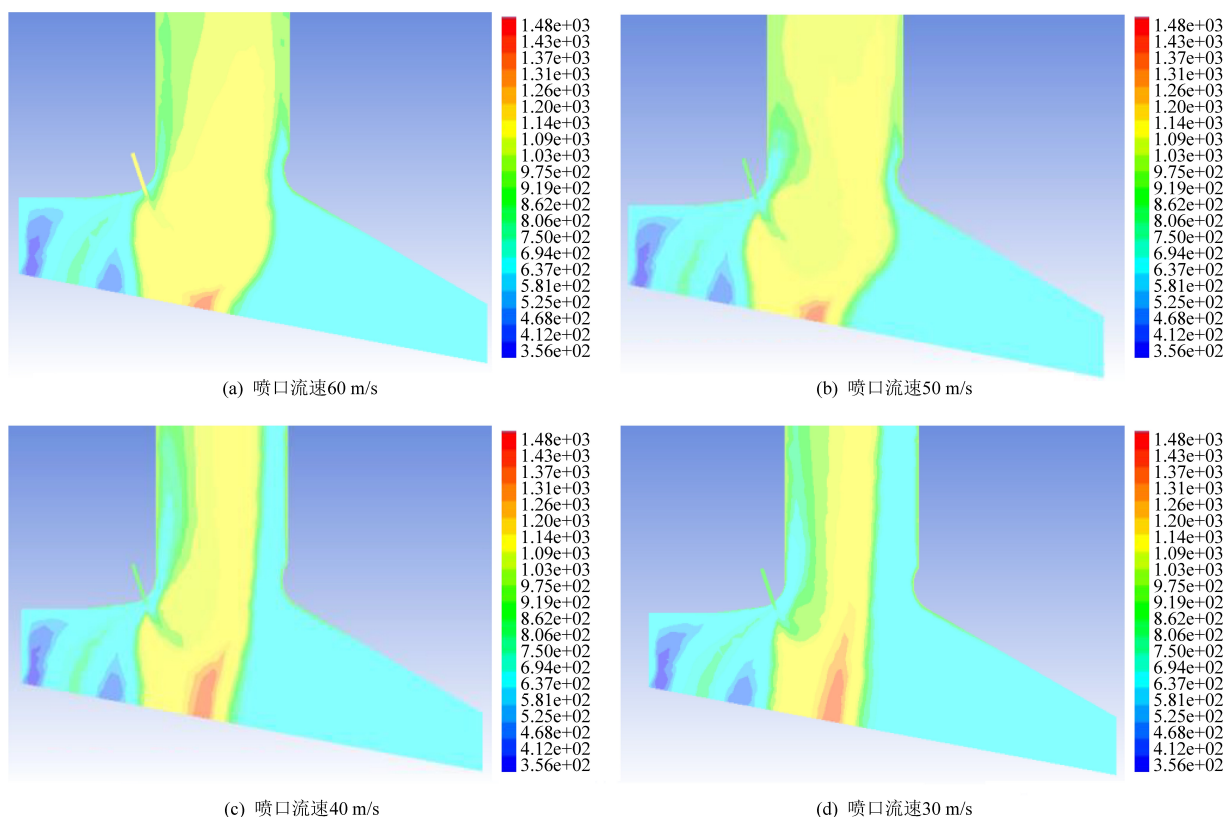


图6 采用高温低氧燃烧技术的炉内温度场分布 (K)

Fig.6 Temperature field profile for the furnace using high temperature and low oxygen combustion technology (K)

4 结 论

本文在普通垃圾焚烧炉排炉结构的基础上,在其前拱设置了11个高速喷口,喷射800℃、氧气浓度5%的高温低氧气流,喷口方向对准炉排的燃烧段。本文对不同喷口流速(分别为60、50、40、30 m/s)工况下焚烧炉内的高温低氧燃烧技术进行CFD仿真,模拟得到了各工况下的炉内流场、组分场和温度场分布,并将氧气浓度场和温度场分布的均匀程度作为喷口气流设计的主要评价指标,以探索喷口气流设计对高温低氧燃烧技术使用效果的影响。数值仿真的结果表明:与40 m/s和30 m/s的较低喷口速度相比,60 m/s和50 m/s较高喷口速度的气流设计和燃烧组织更为优越,喷射气流的卷吸和掺混能力强,喷流的前端基本可达炉排表面,形成的气流旋涡覆盖了主要燃烧区域(炉排燃烧段)的高温段。燃烧段上方的气体组分混合均匀,主要燃烧区域氧气浓度在6.5%~7%(体积分数)。主要燃烧区域温度均匀,约为1 200 K,局部高温仅存在于炉排表面,由此可有效缓解焚烧炉内的结焦情况,同时也有助于抑制 NO_x 的初始生成浓度。

参考文献

- [1] 奚慧. 上海市生活垃圾全程分类体系建设现状分析及对策建议 [J]. 环境卫生工程, 2020, 28 (3): 80-85.
- [2] 陈涛, 韩乃卿, 邵哲如, 等. 国产化垃圾焚烧炉排炉膛选型CFD优化研究 [J]. 资源节约与环保, 2014, 10 (1): 48-50+54.
- [3] 林海, 马晓茜, 余昭胜, 等. 大型城市生活垃圾焚烧炉的数值模拟 [J]. 动力工程学报, 2010, 30 (2): 128-132.
- [4] 李秋华, 夏梓洪, 陈彩霞, 等. 垃圾焚烧炉炉拱改造与燃烧优化的数值模拟 [J]. 环境工程学报, 2012, 6 (11): 4191-4196.
- [5] 张钦华, 余笑枫. 750 t/d 垃圾焚烧炉的优化设计与CFD模拟验证 [J]. 工业锅炉, 2020 (4): 9-14.
- [6] 曾祥浩, 马晓茜, 王海川, 等. 900 t/d 生活垃圾焚烧炉二次风优化数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2020, 35 (9): 96-103.
- [7] 王进, 许岩韦, 王沛丽, 等. 垃圾焚烧炉烟气再循环改造的数值模拟与试验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25 (5): 468-473.
- [8] 王进, 许岩韦, 孙丽娟, 等. 西格斯炉二次风设计的数值研究和应用分析 [J]. 环境工程, 2018, 36 (增刊): 623-629.
- [9] 冯淋淋, 施子福, 周永刚, 等. 大型垃圾焚烧炉排炉协同焚烧污泥的数值模拟研究 [J]. 环境卫生工程, 2020, 28 (3): 32-37.

[10] 杨栩聪, 廖艳芬, 林涛, 等. 350 t/d 垃圾焚烧炉污泥掺混燃烧与 SNCR 脱硝特性的数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (21): 6964-6972.

[11] 周生权, 李远博, 陈冠益, 等. 生物质气化燃气无焰燃烧的实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26 (3): 226-230.

[12] Yang Y B, Yamauchi H, Nasserzadeh V, et al. Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed [J]. Fuel, 2003, 82 (18): 2205-2221.

[13] RYU C K, Yang Y B, Nasserzadeh V, et al. Thermal reaction modeling of a large municipal solid waste incinerator [J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176 (11): 1891-1907.

[14] Yang Y B, GOH Y R, Zakaria R, et al. Mathematical modelling of MSW incineration on a travelling bed [J]. Waste Management, 2002, 22 (4): 369-380.

[15] Yang Y B, Lim C N, Goodfellow J, et al. A diffusion model for Particle mixing in a packed bed of burning solids [J]. Fuel, 2005, 84 (2-3): 213-225.