

# 炉排焚烧炉生活垃圾掺烧渗滤液污泥的数值模拟

彭丹<sup>1</sup>, 高天宇<sup>2</sup>, 姜华伟<sup>2</sup>, 景玉博<sup>3</sup>, 曹海<sup>4</sup>, 吴玉新<sup>4</sup>

(1. 郑州电力高等专科学校 河南省电厂节能环保工程技术研究中心, 河南 郑州 450004; 2. 青岛大学 机电工程学院, 山东 青岛 266071; 3. 郑州荻泽环保能源有限公司, 河南 郑州 450131; 4. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 海淀 100084)

**摘要:** 随着城市生活垃圾产量不断提升, 在垃圾分类和技术进步的驱动下, 垃圾焚烧发电作为一种兼具环境效益和社会效益的发电方式已成为清洁能源发电的重要发展方向。目前, 机械炉排焚烧炉因其高效性和稳定性, 在垃圾焚烧发电厂中的占比已超过 90%。然而, 在生活垃圾掺烧渗滤液污泥对焚烧炉运行的影响方面, 国内外尚缺乏深入的研究。通过数值模拟, 研究掺烧城市生活垃圾和渗滤液污泥条件下炉排焚烧炉内的燃烧状态对实现焚烧炉的高效稳定运行具有重要意义。以郑州某 700 t/d 逆推式垃圾焚烧炉为对象, 利用 FLIC 软件和 FLUENT 软件分别对炉排床层燃料燃烧和燃烧室气相燃烧过程进行模拟, 得到炉内温度场、速度场和气体组分浓度场。通过与现场运行数据对比, 模拟结果与实测结果最大误差不超过 10%, 验证了模拟的准确性, 并在此基础上对炉排移动速度和污泥质量分数进行了优化, 以获得更好的空气动力场和温度场。研究发现, 降低炉排移动速度可以改善燃烧状态, 提高燃烧效率, 而适量的污泥掺烧可以降低炉内局部高温, 减轻后墙二次风喷口处由于烟温过高而造成的结焦。然而过量的污泥掺烧会导致干燥段延长, 使燃烧室高温区域向后墙靠近, 反而不利于焚烧炉的稳定运行。因此, 建议炉排移动速度控制在 3.56 m/h, 污泥质量分数在 2%~4%。

**关键词:** 垃圾焚烧发电; 炉排炉; 城市生活垃圾; 渗滤液污泥; 数值模拟

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2025)01-0051-10

## Numerical simulations of co-firing municipal solid waste with leachate sludge in a moving grate incinerator

PENG Dan<sup>1</sup>, GAO Tianyu<sup>2</sup>, JIANG Huawei<sup>2</sup>, JING Yubo<sup>3</sup>, CAO Hai<sup>4</sup>, WU Yuxin<sup>4</sup>

(1. Engineering Technology Research Center of Energy Conservation and Environmental Protection for Power Plant of Henan Province, Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450004, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071; 3. Zhengzhou Yingze Environmental Protection & Energy Company Limited, Zhengzhou 450131, China; 4. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the continuous increase in urban domestic waste, waste incineration power generation, driven by waste classification and technological progress, has become an important development direction for clean energy power generation due to its environmental and social benefits. Currently, mechanical grate incinerators account for more than 90% of waste-to-energy plants due to their high efficiency and stability. However, there is a lack of research on the impact of co-firing municipal solid waste (MSW) with leachate sludge on incinerator operations both domestically and internationally. Numerical simulations can play a significant role in studying the combustion state in a moving grate incinerator. In this study, taking a 700 t/d reverse-moving grate incinerator as the object, FLIC software and FLUENT software were employed respectively to simulate grate-firing on the moving grate and gas-phase combustion in the combustion chamber. By the numerical simulations, the temperature field and velocity field were obtained, as well as the concentration distributions of different gas components within the incinerator. The simulation results were compared with the actual operating data, and the maximum

收稿日期: 2024-08-14; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.24081406

基金项目: 河南省高等学校重点科研资助项目(23B480005); 河南省科技攻关资助项目(242102240093); 河南省教育厅重点科研资助项目(24B480015)

作者简介: 彭丹(1987—), 女, 河南南阳人, 副教授。E-mail: pengdanhust@163.com

通讯作者: 姜华伟(1984—), 男, 山东荣成人, 硕士生导师, 博士。E-mail: jianghuawei@tsinghua.org.cn

引用格式: 彭丹, 高天宇, 姜华伟, 等. 炉排焚烧炉生活垃圾掺烧渗滤液污泥的数值模拟 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(1): 51-60.

PENG Dan, GAO Tianyu, JIANG Huawei, et al. Numerical simulations of co-firing municipal solid waste with leachate sludge in a moving grate incinerator [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 51-60.



error did not exceed 10%, verifying the accuracy of the simulation. Based on this, the moving speed of the grate and the mass fraction of leachate sludge were optimized to improve the aerodynamic field and temperature field in the incinerator. Simulation results showed that reducing the moving speed of mechanical grate could improve the combustion state and combustion efficiency. The appropriate mass fraction of leachate sludge could reduce the local high temperature in the combustion chamber and reduce the slagging level caused by the high flue gas temperature near the secondary air nozzle of the rear wall. However, excessive mass fraction of leachate sludge would lead to the extension of the drying section, which made the high temperature zone closer to the rear wall, which is not conducive to the stable operation of the incinerator. Therefore, it is recommended to control the moving speed of mechanical grate at 3.56 m/h and maintain mass fraction of leachate sludge between 2% and 4%.

**Key words:** waste incineration power generation; moving grate incinerator; municipal solid waste; leachate sludge; numerical simulation

## 0 引言

近年来,伴随着城市规模的扩大和居民生活水平的提高,城市生活垃圾产量逐年增多并呈现出高速增长趋势。据统计,2022年全国城市生活垃圾清运量达24419.3万t,而且正在以每年约8%~10%的速度增长,垃圾的无害化处理日益紧迫<sup>[1]</sup>。垃圾焚烧发电在解决垃圾处理难题的同时,还可以实现其资源化利用,具有良好的环境效益和社会效益<sup>[2]</sup>。截至2022年底,全国城市生活垃圾无害化处理率99.90%,其中,焚烧处理占比为72.53%,焚烧处置量逐年增加,在垃圾分类和技术进步的驱动下,垃圾焚烧发电已成为清洁能源发电的重要发展方向<sup>[3]</sup>。生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据公开平台数据显示,截至2023年4月,我国垃圾焚烧发电厂中机械炉排焚烧炉占比93.5%,炉排炉产能占比93.6%<sup>[4]</sup>。

生活垃圾进入垃圾焚烧发电厂后,一般须在垃圾池内发酵3~7d,尽可能析出其中的水分,提高入炉垃圾的发热量。在垃圾池堆积的过程中,生活垃圾会渗漏出大量渗滤液,其属于有害污染物,如果不经过处理而直接排放,会导致土壤和水的污染,危害人类身体健康和生态系统平衡。因此,渗滤液一般由厂内渗滤液处理站处理,产水达标后,作为循环水补充水,回收利用。渗滤液污泥作为渗滤液处理的副产物,通常含有大量的有毒、有害或对环境产生负面影响物质<sup>[5]</sup>。由于渗滤液污泥无法直接进行填埋,为降低其对环境的影响,可以送入焚烧炉进行焚烧处置,并进行能量回收。然而,在生活垃圾掺烧渗滤液污泥对焚烧炉运行的影响方面,国内外尚缺乏深入的研究。

喻武等<sup>[6]</sup>采用现场实验和数值模拟的方法,研究了5%和12%污泥掺烧比例下日立L型垃圾焚烧炉协同焚烧污泥的燃烧过程。结果显示,掺烧污泥会导致炉膛温度下降,5%掺烧比例时温度降低4.4%,12%掺烧比例时降低11.2%。喻武等还发现,掺烧污泥后,锅炉蒸发量减少,炉渣灼减率和

飞灰产量增加,但炉渣总量变化不大;炉排上方最高温度出现在燃烧炉排的后段,污泥掺烧对挥发物气化和燃烧阶段有影响,但对垃圾质量减少速率影响不大。冯淋淋等<sup>[7]</sup>采用数值模拟方法,分析了825 t/d大型垃圾焚烧炉排炉中添加质量分数为10%污泥的焚烧过程,发现污泥的低热值、高灰分和低挥发分特性导致炉膛前后拱截面平均温度和第三烟道出口温度有所下降,但影响较小;掺烧污泥对燃烧热稳定性影响有限,炉膛结构和二次风配比能满足掺烧燃尽要求。杨栩聪等<sup>[8]</sup>利用CFD数值模拟方法,研究了350 t/d垃圾焚烧炉掺烧不同比例半干化污泥的燃烧特性和污染物排放特性,发现第一烟道烟气温度与污泥掺烧量成反比,氧含量与污泥掺烧量成正相关;7%的污泥掺烧量较为合适,污泥掺烧量低于10%时能满足二恶英控制的燃烧要求。LIN等<sup>[9]</sup>数值模拟研究了5%~25%比例的湿污泥或半干污泥与垃圾的掺混燃烧,结果表明掺烧10%湿污泥或20%半干污泥的均可保持焚烧炉正常运行。炉排式垃圾焚烧炉掺烧污泥的研究集中在分析污泥掺烧对燃烧过程的影响,相关研究成果为实现污泥的有效协同处置提供了科学依据和技术支持。

然而,现有研究多是关于市政污泥与生活垃圾的掺混燃烧。相较于市政污泥,渗滤液污泥未经过干化处理,而是离心脱水后由污泥泵直接送入给料斗,水分含量较干化的市政污泥高,在与生活垃圾掺烧时对焚烧炉内燃烧状况会产生不同的影响。探究掺烧渗滤液污泥时焚烧炉内的流场、温度场和气体组分分布,对优化焚烧炉内生活垃圾掺烧渗滤液污泥的燃烧状况具有重要意义。笔者以郑州某700 t/d垃圾焚烧炉为研究对象,研究渗滤液污泥和生活垃圾的掺烧。借助FLIC软件对焚烧炉炉排上床层固相燃烧过程进行模拟,并借助FLUENT软件对焚烧炉燃烧室气相燃烧进行CFD模拟,得到炉内的温度场、速度场和气体组分浓度场。通过与现场运行数据的比较,验证模拟结果的可靠性,并通过调整炉排移动速度和污泥质量分数对炉内燃烧工况进行优

化, 为垃圾焚烧炉焚烧渗滤液污泥过程中获得良好的空气动力场和温度场提供参考。

## 1 研究概况

以郑州某 700 t/d 逆推式垃圾焚烧炉为研究对象, 炉膛高度约 26.86 m, 深度为 13.4 m, 炉排长度 9.745 m, 炉排倾斜角度约为 23°, 焚烧炉结构如图 1 所示。炉排下方沿炉排移动方向布置 4 排一次风室, 一次风通过蒸汽空气预热器进行预热后由炉排底部送入, 对炉内垃圾进行干燥并提供焚烧所需要的空气。一次风量设置为 105 000 Nm<sup>3</sup>/h, 沿炉排移动方向上各排风室的一次风量占比分别为 10%、65%、15% 和 10%, 对应垃圾在炉排上焚烧的干燥区、主燃烧区、尾部燃烧区和燃烬区, 从而为 4 个焚烧阶段提供所需空气。二次风由前后墙分上下两层送入, 共布置 77 个二次风喷口, 二次风总量设置为 43 000 Nm<sup>3</sup>/h, 一二次风比例为 7: 3。入炉垃圾和渗滤液污泥的成分分析结果分别见表 1 和表 2。

## 2 几何模型及网格划分

根据炉膛实际结构尺寸, 建立三维几何模型, 如图 2 所示。将炉膛进行分块处理, 各块单独划分网格, 网格均采用结构化网格, 二次风入口采用局

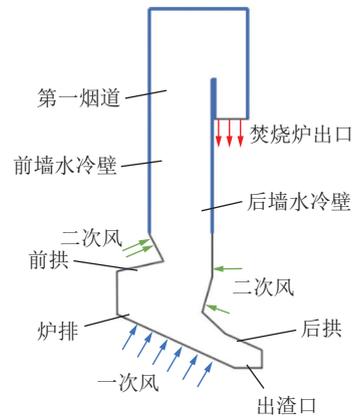


图 1 垃圾焚烧炉结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the moving grate incinerator

部加密处理。为探究网格数量对数值模拟结果的影响, 分别生成总网格数为 67 万, 134 万, 246 万, 357 万和 416 万的计算模型, 并在相同条件下进行数值模拟。基于不同网格数模拟出的焚烧炉温度如图 3 所示, 随着总网格数增加, 焚烧炉的平均温度和焚烧炉出口温度趋于稳定, 当总共网格数达到 246 万时, 继续增加网格数量焚烧炉以及出口处的温度变化不超过 1%, 为平衡计算精度与计算资源, 最终确定模型总网格数 357 万, 网格质量良好。

表 1 入炉生活垃圾的成分分析

Table 1 Component analysis of the municipal solid waste feedstock

元素分析 (干基) /%						工业分析 (干基) /%			含水率 $M/\%$	可燃物 (干基) $w_{com}/\%$	低位热值 (湿基) $Q_{net}/(MJ \cdot kg^{-1})$
C	H	O	N	S	Cl	FC	V	A			
57.39	7.74	18.31	0.91	0.22	0.099	6.00	78.67	15.33	45.51	84.67	9.518

表 2 渗滤液污泥的元素分析和工业分析

Table 2 Ultimate analysis and proximate analysis of leachate sludge

元素分析 /%						工业分析 /%			含水率 $M_{ar}/\%$	低位发热量 $Q_{ar,net}/(MJ \cdot kg^{-1})$
$C_d$	$H_d$	$O_d$	$N_d$	$S_d$	$Cl_d$	$FC_d$	$V_d$	$A_d$		
52.06	6.99	33.39	1.47	0.17	0.24	11.79	82.53	5.68	67.69	5.198

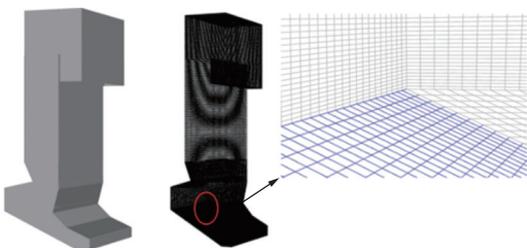


图 2 垃圾焚烧炉炉膛三维几何模型及网格划分

Fig. 2 Geometric model and mesh division of the incinerator

## 3 模拟方法

垃圾进入焚烧炉后, 首先在炉排上进行床层固相燃烧, 经历干燥、热解、燃烧、燃烬 4 个阶段<sup>[10]</sup>。热解产生的可燃气体进入炉膛, 继续进行气相燃烧反应, 燃烧过程产生的高温烟气通过对流传热和辐射传热方式将热量传递给锅炉水冷壁。根据炉排式垃圾焚烧炉层燃燃烧特点, 对垃圾的燃烧传热过程采用分块计算和迭代耦合来实现, 分为垃圾床层固

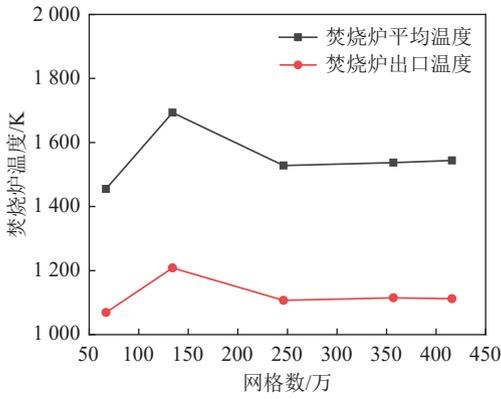


图3 基于不同网格数模拟出的焚烧炉温度

Fig. 3 Flue gas temperatures obtained from simulations based on different mesh numbers

相燃烧和床层上方气相燃烧两部分<sup>[11]</sup>。

### 3.1 固相燃烧模型与假设

固相燃烧过程基于 PETERS<sup>[12]</sup> 和 YANG<sup>[13]</sup> 等开发的 FLIC 软件, 该软件采用 SIMPLE 算法, 结合多个子模型求解气相和固相质量、动量、能量和组分的控制方程, 采用四阶龙格-库塔方法求解辐射方程。固相燃烧过程涉及的主要控制方程如下: 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_{\text{msw}} V_s}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_{\text{msw}} (V_s - V_b)] = S_s \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho_{\text{msw}} V_s}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_{\text{msw}} (V_s - V_b) V_s] = -\nabla \cdot \sigma - \nabla \cdot \tau + \rho_{\text{msw}} g + A \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial \rho_{\text{msw}} H_s}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_{\text{msw}} (V_s - V_b) H_s] = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + \nabla \cdot q_r + Q_{\text{sh}} \quad (3)$$

组分输运方程:

$$\frac{\partial \rho_{\text{msw}} Y_{\text{is}}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_{\text{msw}} (V_s - V_b) Y_{\text{is}}] = \nabla \cdot [D_s \nabla (\rho_{\text{msw}} Y_{\text{is}})] + S_{y_{\text{is}}} \quad (4)$$

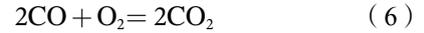
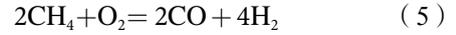
式中:  $V_s$  为颗粒平均速度;  $V_b$  为炉排移动速度;  $S_s$  为质量源项;  $\rho_{\text{msw}}$  为垃圾密度;  $\sigma$  和  $\tau$  分别为切应力和剪应力;  $A$  为机械扰动引起的质点运动源项;  $H_s$  为固相给料焓;  $\lambda_s$  为炉排上堆料垃圾的导热系数;  $q_r$  为辐射热流密度;  $Q_{\text{sh}}$  和  $S_{y_{\text{is}}}$  分别代表气体与颗粒之间的热传递和非均相燃烧产生的热量的源项;  $Y_{\text{is}}$  为颗粒成分的质量分数, 包含水分、挥发分、固定碳以及灰分;  $D_s$  为颗粒在床上的混合系数。

鉴于垃圾焚烧过程的复杂性, 根据 YANG<sup>[14-16]</sup> 等的研究, 在其模拟计算中提出以下主要假设: 垃圾床层为多孔介质, 其孔隙率在燃烧过程中不变; 炉排以恒定速度向前移动; 床层上的参数在宽度方

向上是一致的; 燃料由水分、挥发分、固定碳和灰分组成; 忽略燃烧过程中固相颗粒的破碎、灰熔融和结渣等情况<sup>[17]</sup>; 将气体均视为理想气体; 溢出床层的物质只包含气相, 不包含固相的飞灰颗粒<sup>[18]</sup>; 模型中气相仅由  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$  组成。

### 3.2 气相燃烧模型与边界条件

气相燃烧过程简化如下<sup>[19-20]</sup>:



气相燃烧过程借助 Fluent 软件进行数值模拟。

气相燃烧反应采用组分输运有限速率/涡耗散反应, 气体流动状态采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 炉内辐射传热采用 P-1 辐射模型<sup>[21]</sup>。模拟中焚烧炉四周采用绝热边界条件, 炉膛水冷壁段采用定温边界条件<sup>[22]</sup>。求解过程采用 SIMPLE 算法求解, 离散格式采用二阶迎风格式<sup>[23]</sup>。

床层固相燃烧的 FLIC 计算结果, 包括气相组分、温度、速度等, 作为 FLUENT 模拟的燃烧室气相燃烧的进口边界条件, FLUENT 计算所得炉膛对炉排辐射热作为床层辐射边界条件, 两个过程相互迭代直至收敛<sup>[24]</sup>。数值模拟参数设置见表 3, 条件与实际运行工况相同。

表3 数值模拟参数设置

Table 3 Parameter settings for numerical simulations

参数	数值
初始床层空隙率	0.675
床层上方辐射发射率	0.8
颗粒混合系数	$2 \times 10^{-6}$
一次风温度/K	493
二次风温度/K	293

### 3.3 数值模拟准确性验证

为验证模拟结果准确性, 将垃圾焚烧炉实际运行工况下测量的烟气温度、焚烧炉出口烟气中氧气体积分数与模拟结果进行对比, 结果见表 4 所示, 误差在允许范围之内。垃圾焚烧炉在标高 24.3 m 和 20.91 m 处分别布置有 3 个温度测点, 对应温度分别为  $T_{1X}$  ( $T_{1a}$ 、 $T_{1b}$  和  $T_{1c}$ ) 和  $T_{2X}$  ( $T_{2a}$ 、 $T_{2b}$  和  $T_{2c}$ ), 如图 4 所示为温度测点对应的横截面位置以及数值模拟得到的温度分布。2 个横截面上烟温的模拟结果与实测结果 (3 个温度测量值取中位数)

相对误差较小, 分别为 6.3% 和 2.2%, 而焚烧炉出口氧气体积分数  $\varphi(\text{O}_2)$  的模拟误差为 2.1%, 说明模型和网格划分合理, 模拟结果可以准确地反映炉内燃烧状况<sup>[25]</sup>。

表 4 焚烧炉模拟结果与实际测量结果对比

Table 4 Comparisons between simulation results and actual measuring data

结果	实测结果	模拟结果
$T_{1X}/\text{K}$	1 224	1 147
$T_{2X}/\text{K}$	1 287	1 259
$\varphi(\text{O}_2)/\%$	8.907	6.84

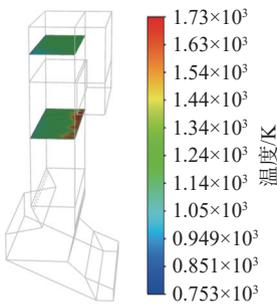


图 4 温度测点对应的横截面位置及模拟得到的温度分布

Fig. 4 Cross-section positions of temperature measuring points and simulation results of temperature distributions

## 4 结果与讨论

### 4.1 实际运行工况模拟

对炉排移动速度  $u_{\text{gr}} = 4.45 \text{ m/h}$ 、渗滤液污泥质量分数  $w_{\text{sl}} = 4\%$  的实际运行工况下垃圾焚烧炉内燃烧过程进行了数值模拟, 图 5 所示为沿炉排长度  $L_{\text{gr}}$  方向上垃圾床层表面的烟气温度  $T_{\text{bed}}$  分布。在炉排长度  $0 \sim 4 \text{ m}$  处, 烟气温度变化不大, 垃圾中有大量水分发生蒸发, 吸收了一部分挥发分燃烧释放的热量。在炉排接近  $2 \text{ m}$  处, 温度出现下降趋势, 之后伴随一次风送入以及挥发分的析出和燃烧, 温度逐渐恢复到  $600 \text{ K}$  左右。垃圾移动到炉排长度  $4 \text{ m}$  处进入主燃烧区, 大量挥发分析出并燃烧, 烟气温度快速上升, 并在  $5 \text{ m}$  处达到最大值  $1296 \text{ K}$ 。炉排长度  $6 \sim 8 \text{ m}$  处为焦炭燃烧区, 焦炭燃烧主要发生在该区域, 随着焦炭的不断燃烧, 烟气温度在  $6.4 \text{ m}$  处又出现峰值。炉排长度  $8 \text{ m}$  后为燃烬段, 此阶段焦炭燃烧反应的量很少, 烟气温度逐渐降低。

床层表面烟气中各气体组分质量分数  $w_i$  沿炉排长度方向的分布如图 6 所示。在干燥段, 水分大量蒸发, 伴随有挥发分的析出和燃烧, 氧气质量分数有明显下降。在炉排的主燃烧区, 随着一次风大量

送入, 大量挥发分析出并燃烧,  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  含量达到峰值, 氧气被快速消耗, 生成大量二氧化碳。进入焦炭燃烧区以后, 氧气消耗量逐渐减少, 其在烟气中的质量分数逐渐增大。

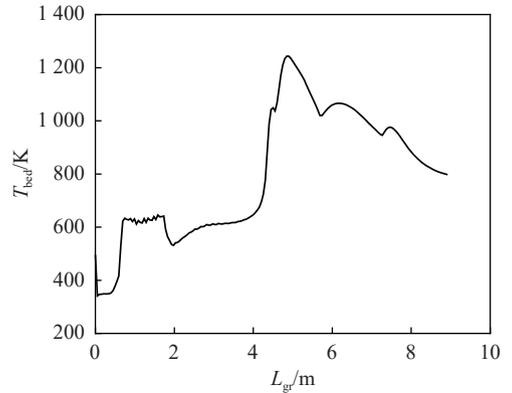


图 5 垃圾床层表面烟气温度分布

Fig. 5 Flue gas temperature at the bed surface

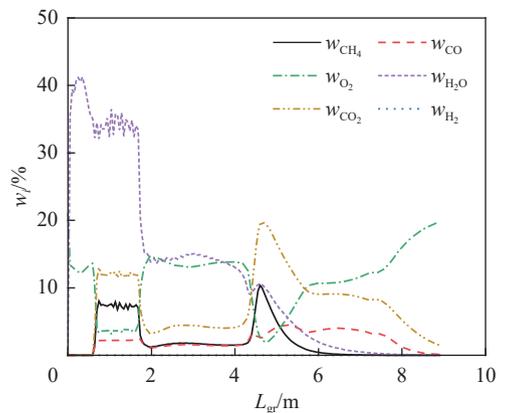


图 6 床层表面各气体组分质量分数

Fig. 6 Mass fraction of each gas component at the bed surface

图 7 所示为焚烧炉炉膛中部截面温度分布和速度分布, 可以看出炉排干燥段以及主燃烧区前部附近炉膛烟温较低, 这是由于干燥及热解吸收大量热量, 随着挥发分析出并燃烧, 炉膛温度升高。在后墙下排二次风喷口上方, 由于二次风的送入提供了充足的氧气, 使得燃烧更加充分, 温度达到最高值。在第一烟道内, 高温区主要集中在靠近后墙区域, 使炉膛内出现了燃烧贴壁的现象, 这会造成后墙水冷壁结渣倾向增大, 进一步引起传热恶化, 不利于焚烧炉的高效运行。焚烧炉在实际运行过程中存在后墙二次风喷口处结焦比较严重的问题, 也验证了数值模拟的结果。

由于炉膛前拱较短, 烟气从床层上方径直进入炉膛中上部, 在炉内无明显回流区域, 炉排后段烟气绕后拱倾斜向上流动。冷灰斗上方, 由于后拱较长, 烟气流动阻力大, 形成明显的回流区。在焚烧

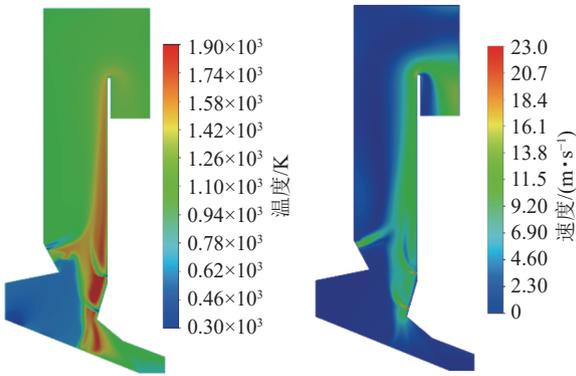


图7 焚烧炉炉膛中部截面温度场与速度场分布

Fig. 7 Distributions of the temperature and velocity in the central cross-section of the incinerator

炉二次风喷嘴处气流速度最大,适当提高二次风速能够加强气流混合从而使炉内烟气分布更均匀,并

且还可以增加烟气在炉内的停留时间,保证其中的有害物质被充分燃烧分解。由图7还可以看出,烟道内速度分布不够均匀,在出口处存在一个小的回流区,烟气的流动状况有待改善<sup>[26]</sup>。

炉内气流速度场不仅影响温度分布,还对烟气中可燃组分的燃尽产生影响。图8所示为炉膛中部截面各气体组分质量分数分布。图8a反映出水分在炉排前部大量蒸发,在第一烟道内靠前墙侧水蒸气质量分数明显高于后墙侧。在炉排干燥段2 m处,挥发分开始析出,到炉排中段靠近后拱区域,挥发分大量析出并燃烧,并且发生焦炭的燃烧,因此消耗了大量的O<sub>2</sub>并产生大量CO<sub>2</sub>,如图8b—8f所示。挥发分和焦炭燃烧消耗氧气,CO<sub>2</sub>作为气固两相燃烧反应的产物,其质量分数与O<sub>2</sub>呈现相反分布。

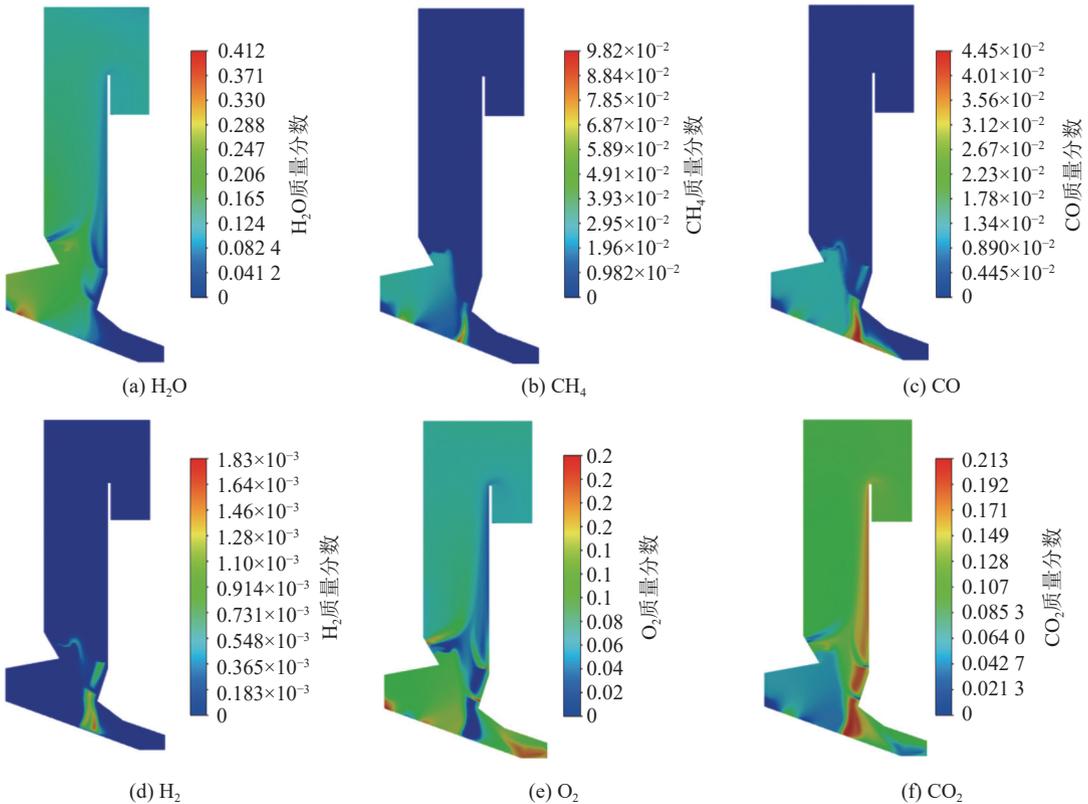


图8 炉膛中部截面各气体组分质量分数分布

Fig. 8 Mass fraction distributions of each gas components in the central cross-section of the incinerator

由图7和图8可知,实际运行工况下的焚烧炉存在挥发分析出段滞后的问题,从而引起在后墙下排二次风喷口上方以及第一烟道靠近后墙区域出现高温。结合现场实际运行条件分析,可能是由于炉排移动速度过快。理想情况下,挥发分析出的峰值出现在第一烟道正下方所对应的炉排主燃烧区。因此,降低炉排移动速度是改善炉内燃烧状态的关键,同时考虑垃圾在炉排上停留时间为1.5~2.5 h,

将炉排移动速度由原来的4.45 m/h调整为3.56 m/h。

#### 4.2 炉排移动速度的影响

在数值模拟研究炉排移动速度影响时,保持渗滤液污泥质量分数 $w_{sl}$ 为4%。图9所示为不同炉排移动速度下床层表面烟气温度沿炉排长度方向的分布情况。在焚烧炉日垃圾处理量恒定的情况下,降低炉排移动速度,会导致垃圾层厚度增加。料层厚度增加一方面使得单位面积放热量增大,烟气温度

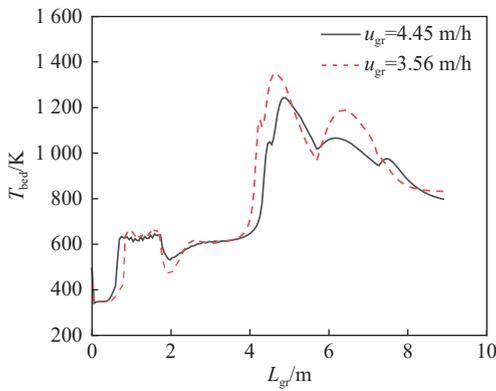


图9 不同炉排移动速度下床层表面烟气温度

Fig. 9 Flue gas temperatures at the bed surface for different moving speeds of mechanical grate

升高, 另一方面导致空气通过床层的阻力增大, 使配风更加均匀, 同时使热空气在床层的停留时间增加。随着炉排移动速度由 4.45 m/h 减小到 3.56 m/h, 温度最大值在炉排上的位置也出现前移, 由 4.84 m 前移到 4.64 m。

图 10 所示为床层表面烟气中  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的质量分数沿炉排长度方向的分布情况。随着炉排移动速度降低, 垃圾在炉排上的停留时间延长,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的析出峰在炉排长度方向的位置前移。

不同炉排移动速度下炉膛中部截面温度分布如图 11 所示。由于炉排移动速度为 4.45 m/h 时挥发分析出位置更靠近后拱折焰角和后墙二次风喷口区域, 导致气相燃烧更加集中, 出现局部区域的高温 and 燃烧贴壁现象。当炉排移动速度降低到 3.56 m/h 后, 炉内燃烧状况得到明显改善。

图 12 所示为不同炉排移动速度下炉膛中部截面气流速度分布, 当炉排移动速度由 4.45 m/h 降低到 3.56 m/h 后, 烟气速度场得到一定程度改善, 炉内烟气速度分布更加均匀, 烟气对第一烟道后墙的冲刷程度减小, 出口处烟气流速趋于均匀, 回流区明显减小。

图 13 所示为不同炉排移动速度下炉膛中部截面的  $\text{CO}$  质量分数分布。当炉排移动速度为 4.45 m/h 时, 在干燥段上方靠近前拱区域的  $\text{CO}$  质量分数相对较高, 该区域的  $\text{CO}$  没有完全燃烧, 并沿前拱进入第一烟道; 炉排移动速度降低到 3.56 m/h 后,  $\text{CO}$  分布更加集中于炉排上, 在靠近前拱的局部区域已实现  $\text{CO}$  的充分燃烧, 该区域烟温略高于下方区域。

### 4.3 污泥掺混比例的影响

由图 7 可知, 焚烧炉炉膛中部截面的最高烟温接近 1900 K, 且高温区域靠近后墙, 这对焚烧炉水冷壁的安全运行是十分不利的。研究发现, 近年来

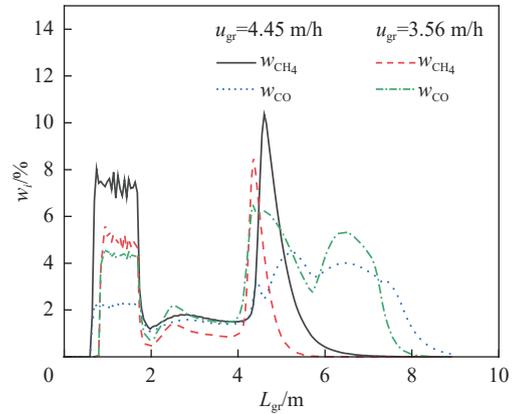
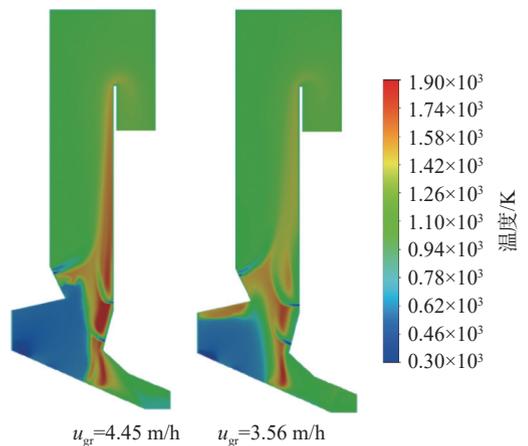
图 10 不同炉排移动速度下床层表面  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  质量分数Fig. 10 Mass fractions of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}$  at the bed surface for different moving speeds of mechanical grate

图 11 不同炉排移动速度下炉膛中部截面温度分布

Fig. 11 Temperature distributions in the central cross-section of the incinerator at different moving speeds of mechanical grate

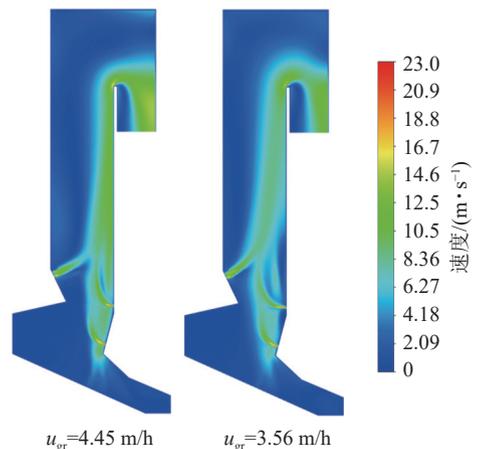


图 12 不同炉排移动速度下炉膛中部截面速度分布

Fig. 12 Velocity distributions in the central cross-section of the incinerator at different moving speeds of mechanical grate

城市生活垃圾中塑料、皮革和纸制品等高热值成分的占比不断增大, 使入炉垃圾热值普遍高于设计热值, 而污泥含水率高、热值低, 可以通过污泥的掺混燃烧来降低炉膛温度<sup>[27]</sup>。因此, 在炉排移动速度

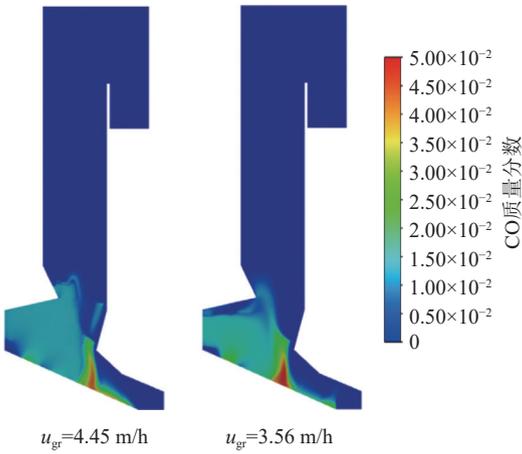


图 13 不同炉排移动速度下炉膛中部截面 CO 质量分数分布  
Fig. 13 Distributions of CO mass fraction in the central cross-section of the incinerator at different moving speeds of mechanical grate

3.56 m/h 的基础上, 进一步研究了污泥质量分数对炉膛温度分布的影响。

不同污泥质量分数条件下床层表面烟气温度分布如图 14 所示。随着污泥质量分数的提高, 床层表面烟气温度略有下降, 但并不明显。图 15 所示为不同污泥质量分数下床层表面烟气中的水蒸气和 CO 质量分数, 随着污泥质量分数的增加, 混合燃料含水率由 45.9% 逐步增加到 47.0%、48.1% 和 49.1%, 烟气中水分含量增大, CO 在整体上有所下降。由于渗滤液污泥中碱金属元素的催化作用, CO 在床层上的析出过程可能会提前。

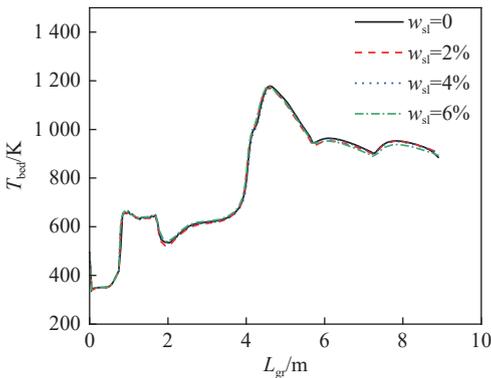
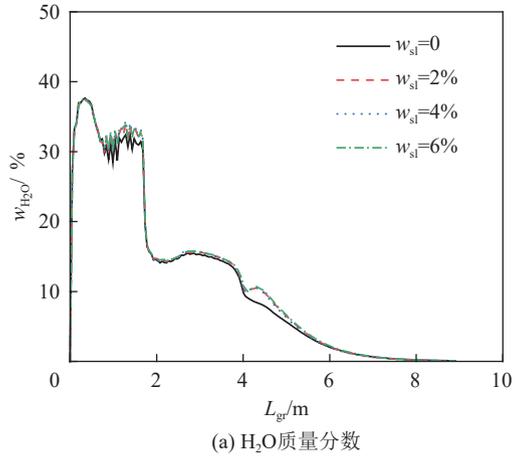
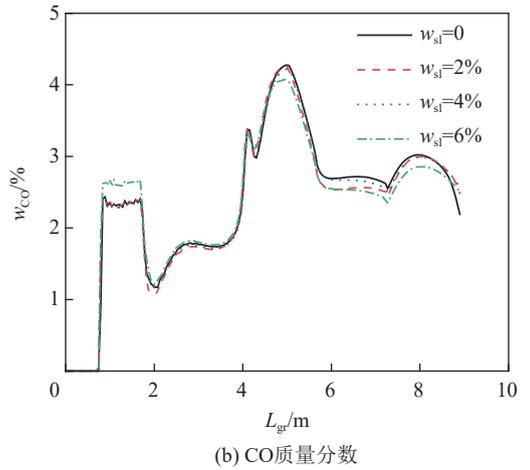


图 14 不同污泥质量分数下床层表面烟气温度  
Fig. 14 Flue gas temperatures at the bed surface for different mass fractions of leachate sludge

图 16 所示为不同渗滤液污泥掺烧质量分数下炉膛中部截面温度分布, 炉排移动速度均为 3.56 m/h。当污泥质量分数在 0% ~ 2% 时, 焚烧炉内靠近后墙二次风喷口区域温度仍然较高。当污泥质量分数达到 4% 时, 这一情况得到了明显改善, 高温区域到后墙二次风喷口有一定距离。伴随污泥质量分数进



(a) H<sub>2</sub>O 质量分数



(b) CO 质量分数

图 15 不同污泥质量分数下烟气中 H<sub>2</sub>O 和 CO 质量分数  
Fig. 15 Mass fractions of H<sub>2</sub>O and CO in flue gas under different mass fractions of leachate sludge

一步增大, 虽然床层上方烟气温度变化较小, 但水分含量增多导致的干燥段延长使焚烧炉内气相燃烧状况有所恶化, 炉排上方高温区域反而向后墙靠近。

图 17 所示为不同污泥质量分数下炉膛中部截面的 H<sub>2</sub>O 质量分数分布。随着污泥质量分数增大, 烟气中水蒸气的质量分数明显升高。伴随干燥段的延长, 挥发分析出峰在炉排长度方向的位置也会相应后移, 这会导致靠近后墙二次风喷口处出现高温区域以及第一烟道内的燃烧贴壁现象, 不利于炉膛内的气相燃烧过程。

## 5 结 论

1) 焚烧炉 2 个温度测点位置的数值模拟结果相比现场实测数据分别低 6.3% 和 2.2%, 炉膛出口氧气质量分数模拟结果为 6.84%, 在允许范围内, 验证了数值模拟方法的合理性和模拟结果的准确性, 借助数值模拟可有效预测焚烧炉内温度场、速度场和烟气中各组分质量分数等。

2) 炉排移动速度与固相和气相燃烧位置密切相关。在合理范围内降低炉排移动速度可缩短干燥段

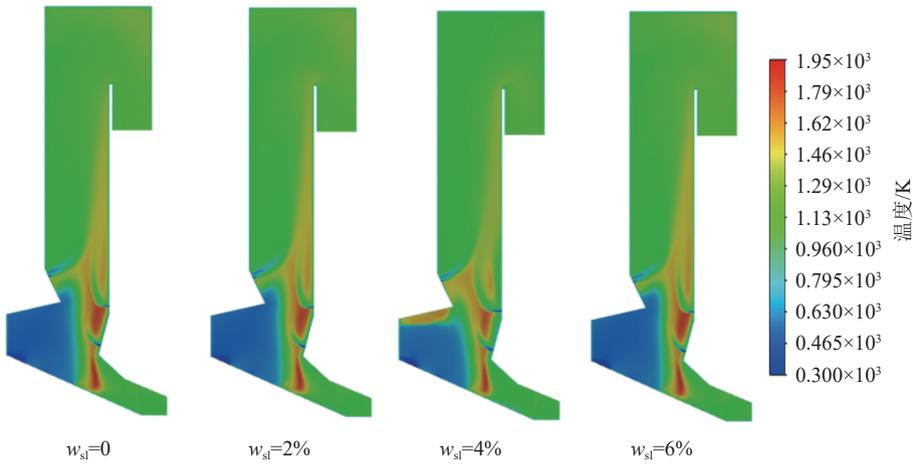
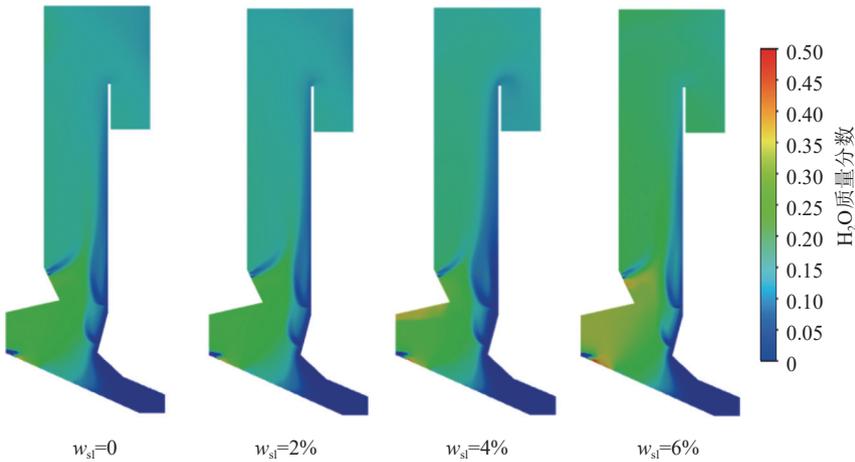


图 16 不同污泥质量分数下炉膛中部截面温度分布

Fig. 16 Temperature distributions in the central cross-section of the incinerator for different mass fractions of leachate sludge

图 17 不同污泥质量分数下炉膛中部截面 H<sub>2</sub>O 质量分数分布Fig. 17 Mass fractions of H<sub>2</sub>O in flue gas for different mass fractions of leachate sludge

长度并使固相和气相燃烧提前, 避免燃烧过于靠近后墙水冷壁和二次风喷口。在日处理垃圾量一定时, 3.56 m/h 的炉排移动速度使炉内燃烧状况得到明显改善。

3) 掺烧适量的渗滤液污泥能有效降低焚烧炉内的局部高温, 改善燃烧贴壁问题, 但过量的渗滤液污泥导致干燥段延长, 使焚烧炉内气相燃烧状况有所恶化, 炉排上方高温区域反而向后墙靠近。渗滤液污泥的最佳掺烧质量分数为 4%。

### 参考文献 (References) :

- [1] 刘心雨. 350 t/d 垃圾焚烧炉受热面积灰对温度场的影响及改进分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2023: 1-2.
- [2] 杨旭, 余昭胜, 何玉荣, 等. 垃圾焚烧炉中城市生活垃圾掺烧高热值工业固废的数值模拟 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 98-108. YANG Xu, YU Zhaosheng, HE Yurong, et al. Numerical simulation of municipal domestic waste blending with combustion of high calorific value industrial solid waste in waste incineration furnace[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 98-108.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2022[M]. 北京: 中

国统计出版社, 2023: 32-37.

- [4] 汤健, 夏恒, 余文, 等. 城市固废焚烧过程智能优化控制研究现状与展望 [J]. 自动化学报, 2023, 49(10): 2019-2059. TANG Jian, XIA Heng, YU Wen, et al. Research status and prospects of intelligent optimization control for municipal solid waste incineration process[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(10): 2019-2059.
- [5] 王天义. 生活垃圾焚烧厂渗滤液处理技术与工程实践 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 37-45.
- [6] 喻武, 朱浩. 协同焚烧污泥对垃圾焚烧炉燃烧过程的影响实验和模拟研究 [J]. 可再生能源, 2021, 39(11): 1435-1440. YU Wu, ZHU Hao. Experimental and simulation study on the effect of co-incinerating sludge on the combustion process of waste incinerator[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(11): 1435-1440.
- [7] 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. FENG Linlin, SHI Zifu, ZHOU Yonggang, et al. Study on numerical simulation of large-scale waste incineration grate furnace co-incineration with sludge[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(3): 32-37.

- [8] 杨栩聪, 廖艳芬, 林涛, 等. 350t/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): 6964–6973.  
YANG Xucong, LIAO Yanfen, LIN Tao, et al. Numerical study of 350t/d MSW incinerator on sludge blending combustion and SNCR denitration characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6964–6973.
- [9] LIN Y, LIAO Y F, YU Z S, et al. The investigation of co-combustion of sewage sludge and oil shale using thermogravimetric analysis[J]. *Thermochimica Acta*, 2017, 653: 71–78.
- [10] 张品, 杜海亮, 王苑, 等. 基于床层下降的链条炉数值模型与计算 [J]. 热能动力工程, 2012, 27(3): 324–328, 393.  
ZHANG Pin, DU Hailiang, WANG Yuan, et al. Numerical model and calculation of a chain-grate stoker based on a descending of the bed[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(3): 324–328, 393.
- [11] 林海, 马晓茜, 余昭胜. 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.  
LIN Hai, MA Xiaoqian, YU Zhaosheng. Numerical simulation of large-scale municipal solid waste incinerator[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(2): 128–132.
- [12] PETERS B. A detailed model for devolatilization and combustion of waste material in packed beds[C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB). Lisbon, Portugal, 1995, 31(4): 183–197.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] YANG Y B, PHAN A N, RYU C, et al. Mathematical modelling of slow pyrolysis of segregated solid wastes in a packed-bed pyrolyser[J]. *Fuel*, 2007, 86(1-2): 169–180.
- [16] YANG Y B, RYU C, GOODFELLOW J, et al. Modelling waste combustion in grate furnaces[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2004, 82(3): 208–222.
- [17] 施子福. 适用于分类后高热值干垃圾的焚烧炉优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [18] YAN M, ANTONI, WANG J Y, et al. Numerical investigation of MSW combustion influenced by air preheating in a full-scale moving grate incinerator[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119193.
- [19] 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.
- [20] YANG X C, LIAO Y F, MA X Q, et al. Effects of air supply optimization on NO<sub>x</sub> reduction in a structurally modified municipal solid waste incinerator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117706.
- [21] 朱新才, 王传宾, 邵毅敏, 等. 垃圾焚烧炉二次燃烧的数值模拟 [J]. 动力工程, 2009, 29(3): 261–264, 306.  
ZHU Xincan, WANG Chuanbin, SHAO Yimin, et al. Numerical simulation of secondary combustion in waste incinerator[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(3): 261–264, 306.
- [22] 马晓茜, 刘国辉, 余昭胜. 基于 CFD 的城市生活垃圾焚烧炉燃烧优化 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 101–106.  
MA Xiaoqian, LIU Guohui, YU Zhaosheng. Combustion optimization of municipal solid waste incinerator based on CFD[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(2): 101–106.
- [23] 罗翠红, 张钦华, 孟德润, 等. 垃圾焚烧锅炉数值模拟及高温腐蚀研究 [J]. 锅炉技术, 2023, 54(6): 68–75.  
LUO Cuihong, ZHANG Qinhu, MENG Derun, et al. CFD study and high-temperature corrosion study for the waste incinerator[J]. Boiler Technology, 2023, 54(6): 68–75.
- [24] 王俊杰. 基于 CFD 数值模拟的垃圾焚烧炉防结渣炉优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 47–49.  
WANG Junjie. Study on optimization of slagging prevention furnace of waste incinerator based on CFD numerical simulation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 47–49.
- [25] 曾祥浩. 高热值垃圾焚烧炉燃烧过程数值模拟及其耦合污泥焚烧特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [26] 刘瑞媚. 大型炉排炉垃圾焚烧过程的 CFD 模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 94–97.
- [27] 曾祥浩, 马晓茜, 廖艳芬, 等. 900 t/d 高热值垃圾焚烧炉污泥焚烧数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(9): 2324–2332.  
ZENG Xianghao, MA Xiaoqian, LIAO Yanfen, et al. Numerical simulation of co-combustion of sludge in a 900 t/d waste incinerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(9): 2324–2332.