

DOI:10.13205/j.hjgc.202506020

孟德润,张宏博,张晴,等.垃圾焚烧炉数值模拟及燃烧优化研究[J].环境工程,2025,43(6):197-203.

MENG D R, ZHANG H B, ZHANG Q, et al. CFD simulations and combustion optimization for a waste incinerator [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(6): 197-203.

垃圾焚烧炉数值模拟及燃烧优化研究

孟德润^{1,2} 张宏博³ 张 晴¹ 朴哲龙⁴

(1. 福思力智科技(北京)有限公司,北京 100020; 2. 海南科技职业大学,海口 571126; 3. 中国大唐集团科技创新有限公司,河北 雄安 071800; 4. 北京首创环境科技有限公司,北京 100037)

摘 要:焚烧法是处理城市固体垃圾的有效手段,层燃焚烧炉是应用最广泛的城市垃圾焚烧设备。计算流体力学CFD作为一种研究工具,被广泛应用于垃圾焚烧炉的设计优化工作中,最常用的为FLIC和Fluent耦合的方法,但其无法对燃烧过程全面考虑,并且只能采用人工的方式进行耦合,计算结果误差较大。开发了床层燃烧优化模型,并对比了床层燃烧优化模型及FLIC模型,分析了2种模型的差异,对2种模型的计算结果进行了对比分析。进一步采用床层燃烧优化模型+STAR CCM+自动耦合的计算方法,对某900 t/d的焚烧炉进行了CFD计算。最后采用SHERPA的优化算法,对该焚烧炉配风进行优化计算。优化结果显示其热灼减率从3.1%降低到0.25%,燃料燃烧地更加充分;炉内850℃以上烟气停留时间由4.22 s增加到4.55 s,更有利于二噁英的去除。整体来看,模拟计算获得了理想的优化效果,为垃圾焚烧炉的优化设计提供了新方法。

关键词:垃圾焚烧炉;计算流体力学;床层模型

CFD simulations and combustion optimization for a waste incinerator

MENG Derun^{1,2}, ZHANG Hongbo³, ZHANG Qing¹, PIAO Zhelong⁴

(1. Fosi Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2. Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 571126, China; 3. China Datang Group Technology Innovation Co., Ltd., Xiong'an 071800, China; 4. Beijing Capital Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Incineration is an effective way for solid waste treatment, with grate incinerators being the most widely used equipment. As a tool, CFD is widely used in the waste incinerator design and optimization, the typical model is coupled by FLIC and FLUENT. However, it cannot fully consider the combustion process and can only be coupled manually, which results in significant errors. This study developed an optimized bed model and compared it with the FLIC model. In addition, the calculation results from the two models were compared and analyzed. Furthermore, CFD simulations were performed for a 900 t/d incinerator using the optimized bed model coupled with STAR CCM via an automatic coupling method. Finally, the optimization algorithm of SHERPA was used to optimize the air distribution of the incinerator. The optimization results showed that the thermal burn-off rate decreased from 3.1% to 0.25%, and the fuel combustion became more complete; the residence time of flue gas above 850℃ in the furnace increased from 4.22 s to 4.55 s, which was more conducive to the removal of dioxins. Overall, the simulation calculation achieved ideal optimization effects and provide an improved CFD method for waste incinerator design.

Keywords: waste incinerator; CFD; bed model

收稿日期:2024-04-03; 修改日期:2024-06-02; 接收日期:2024-07-09

第一作者:孟德润(1979—),男,高级工程师,主要从事垃圾焚烧、环保等领域的研发工作。18911287998@163.com

* 通信作者:张宏博(1983—),男,高级工程师,主要从事节能环保和储能相关技术的研发设计工作。13366054830@163.com

0 引言

城镇化进程的推进和人民生活水平的提升,使得城市生活垃圾(municipal solid waste, MSW)年产生量的急剧上升。2011—2020年期间,城镇化率从51.2%增长到63.9%,生活垃圾清运量也从15804.8万t飙升到23511.7万t^[1]。预测未来这2个数据还会持续攀升。如何有效地处理城市生活垃圾,实现资源化、减量化和无害化的目标,是当前能源和环境领域亟需解决的问题。

垃圾焚烧发电技术的关键设备是垃圾焚烧炉。垃圾在焚烧后转化为残渣,从灰渣口排出后进行固化处理,最终送入填埋场进行无害化封存。随着《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》^[2]的实施,我国越来越重视固体废物污染防治工作,对于垃圾焚烧工艺行业的要求标准趋严,也为垃圾焚烧行业的发展带来了新的挑战。机械炉排式垃圾焚烧炉工艺因其一系列优势,是当前新建垃圾焚烧发电厂的首选技术,也是本文研究对象。如何优化机械炉排式垃圾焚烧炉的运行状态,使其实现高效低污染焚烧,对于垃圾焚烧处理行业的发展至关重要。

垃圾在焚烧炉内的固相燃烧过程包含4个阶段:水分挥发、挥发分裂解和燃烧、焦炭燃尽,这4个阶段之间无明确划分,可能同时或顺序发生。实际上,焚烧炉的运行会受到垃圾组成和热值的影响,容易造成运行不稳定等问题。为了更好地控制焚烧炉的运行状态,需要获取炉内各种有效参数,但由于焚烧炉体积庞大,测量非常困难,利用数值模拟方法进行研究是目前最重要的手段之一。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)作为一种广泛应用的数值计算工具,既可以显著降低运行成本,又可以灵活调整运行工况,对新思路进行快速验证^[3],在焚烧炉的设计和参数优化方面有着广泛应用。目前较为成熟的垃圾焚烧过程数值模拟方法是利用“FLIC+FLUENT”对气固相反应区域和气相反应区域分别进行模拟^[4-8],该计算方法在一定程度上可以描述垃圾在炉排上的燃烧过程,但由于模型自身特点,一些燃烧过程被简化,无法对燃料跌落引燃的过程进行模拟,且其耦合过程采用人工的方式,无法获得完全耦合的结果,导致计算结果出现一定的误差。本研究通过对炉排燃烧模型模型的优化,采用新的床层燃烧优化模型+ STAR CCM+自

动耦合的方式,获取更准确的焚烧结果,为焚烧炉的设计优化提出更准确的计算方法和工具。

1 研究对象介绍

以某处理量为900 t/d的生活垃圾焚烧炉为研究对象,整个炉排区长15.6 m,宽14 m,共分4个风室。焚烧炉底部辐射绝热材料,喉口以上为水冷壁。炉膛设置有前拱二次风、后拱二次风、燃尽风和OFA风。由于炉排进口及二次风口流场变化较大,几何尺寸较小,因此对该区域网格进行适当加密。采用多面体网格进行网格划分,并进行网格无关性验证,选取燃烧最剧烈的第一通道入口截面,统计不同网格密度下其平均温度的变化规律,最终确定总体网格数量380万的整套网格作为计算基础。焚烧炉结构如图1所示,局部网格划分及网格无关性验证结果如图2所示。

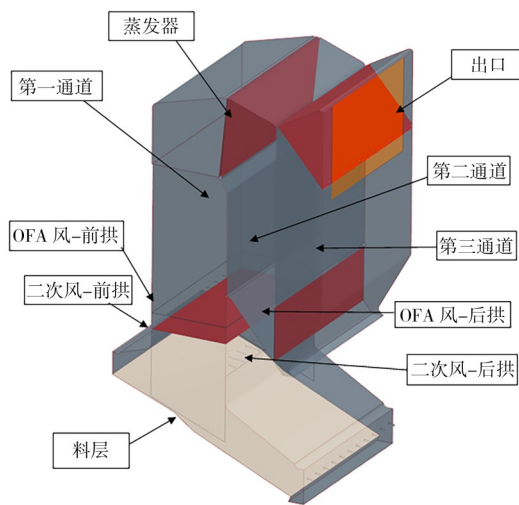


图1 焚烧炉结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the incinerator structure

计算采用的垃圾为城市生活垃圾,其工业分析、元素分析和低位发热量(LHV)如表1所示,焚烧炉助燃空气的分配如表2所示。从燃料分析来看,该燃料为高热值燃料,有机物含量较高,较易燃烧。一次风占总风量的63%,一次风各风箱的分配比为15%:35%:35%:15%。二次风和燃尽风是二次燃烧和完全燃烧的关键,二者通过喷嘴喷到炉膛内,具有较高的烟气搅拌速度,约占总燃烧空气的35%。

2 床层模型介绍

由于炉排炉燃烧的特点,其料层区和炉膛区的燃烧特点完全不同,炉膛区域燃烧的计算比较成熟,其重难点在于料层区的模型。英国谢菲尔德大学的

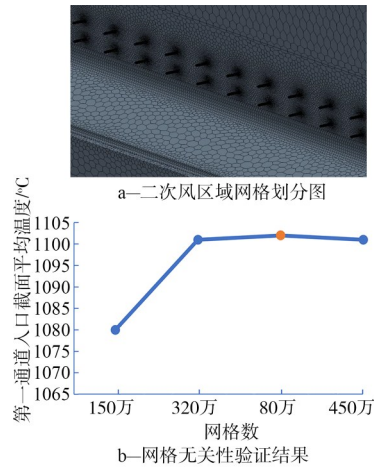


图2 焚烧炉网格划分及网格无关性验证结果
Figure 2 Meshing and mesh independence verification results for the incinerator

固废课题组发展了FLIC固体废弃物炉排料层燃烧模型^[9,10],用来模拟床层的燃烧,预测燃烧的气体产物成分和温度,同时可以给出料层内固体的温度分布。该模型在一定程度上可以较合理地描述料层的燃烧过程,但由于燃料的复杂性以及不同炉排厂家运动方式的多样性,其应用仍存在一定的局限。同时由于需要手动耦合,故其耦合的收敛性较难把握,将对最终的计算结果造成影响。优化模型同FLIC模型类似,本研究对其存在的问题进一步优化,加入了翻料过程的影响以及料层和炉膛自动耦合计算的过程。

2.1 FLIC 模型介绍

FLIC 床层燃烧模型的模拟对象是层燃炉排上垃圾的焚烧过程,如图3所示。床层的主要热源来自于炉排上方自由空间辐射热,而燃烧所需空气从炉排下方供给,配风可以分段按照不同速度供给。在重力和炉排的作用下,燃料向前运动同时吸收来自物料上方自由空间的辐射热量,并将此热量传递给下

层物料。FLIC 采用一维燃料柱燃烧为基础,在炉排上热量传递主要在料层高度方向上,且炉排上燃料供给以一定速度进行,燃料在炉排上各个水平位置燃烧状态与炉排运动时间相对应^[9,10]。在 t 时刻时,燃料在炉排上水平位置计算见式(1):

$$X = X_0 + ut \quad (1)$$

式中: X 为 t 时刻炉排上燃料水平位置,m; X_0 为燃料在炉排上初始水平位置,m;一般设定 $X_0=0$ m; u 为炉排在单位时间内前进的距离,m/s; t 为炉排运行时间,s。

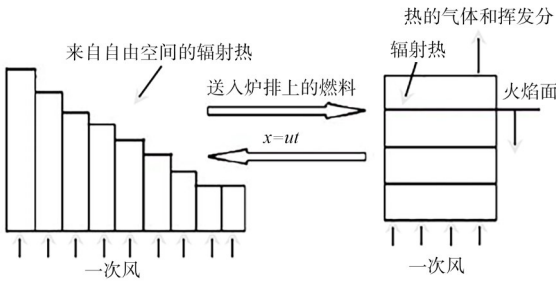


图3 连续运动床层与固定料层转换的示意
Figure 3 Schematic diagram of continuous-moving bed to fixed-bed transition

根据FLIC模型的假设,燃料的燃烧过程如图4所示,一次风从不同风箱进入料层区,进一步穿过料层进入炉膛。由于炉膛区辐射到料层区的能量,其顶部开始发生干燥以及灰分析出燃烧;随着料层的移动,料层的燃烧位置慢慢下移,同时挥发分析出完成的燃料进一步发生焦炭气化燃烧;随着燃烧位置的下移以及一次风的作用,焦炭燃烧从底部开始,同顶部焦炭燃烧的部分重合后燃料燃烧结束。一次风在后级炉排进一步对高温的灰渣进行冷却,并带走一部分热量,冷却后的灰渣进入排渣口^[11-13]。

在对焚烧炉进行模拟计算如图5所示。首先采

表1 焚烧炉燃料收到基分析
Table 1 As-received basis analysis of incinerator fuel

垃圾给料 量/(t/h)	垃圾低位发热 量/(kJ/kg)	$\omega(\text{C})/\%$	$\omega(\text{H})/\%$	$\omega(\text{O})/\%$	$\omega(\text{N})/\%$	$\omega(\text{H}_2\text{O})/\%$	$\omega(\text{S})/\%$	$\omega(\text{Cl})/\%$	$\omega(\text{灰})/\%$
37.50	9000.00	23.78	3.27	12.28	0.15	42.82	0.15	0.37	17.18

表2 焚烧炉助燃空气分配
Table 2 Air distribution for the incinerator

一次风流量/ (Nm ³ /h)	一次风温 度/°C	二次风流量/ (Nm ³ /h)	二次风温 度/°C	燃尽风 OFA 量/(Nm ³ /h)	燃尽风 OFA 温度/°C	补燃燃烧器 空气/(Nm ³ /h)	补燃燃烧器 空气温度/°C	吹扫风量/ (Nm ³ /h)	吹扫风温/°C
105840	220	49400	25	8800	25	3800	25	2400	25

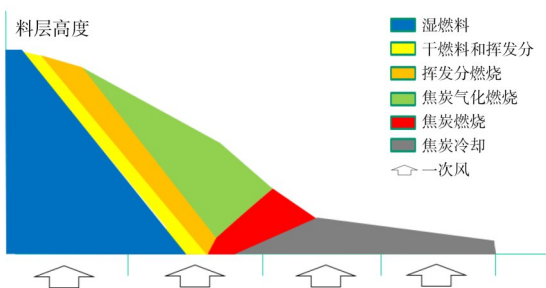


图4 FLIC模型燃烧过程示意

Figure 4 Combustion process diagram for the FLIC model

用FLIC床层燃烧模型对料层的燃烧进行模拟,以床层燃烧模拟的输出参数作为炉膛自由空间燃烧模型的输入条件,炉膛自由区采用STAR CCM+进行模拟,计算出炉膛燃烧特性后,迭代计算自由空间对床层的辐射换热能量,作为床层校核的边界条件,再算出床层表面的速度和气体产物,导入炉膛模型,如此反复迭代,直到2个条件相吻合。

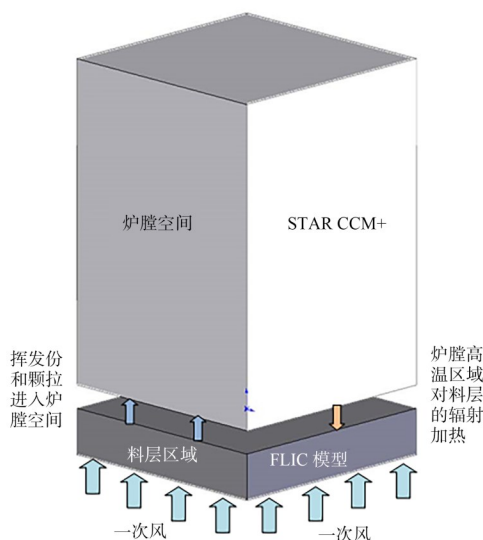


图5 FLIC模型同炉膛燃烧模型耦合计算示意

Figure 5 Coupling calculation between the FLIC and furnace combustion models

2.2 优化模型

通过对FLIC模型计算的燃烧过程进行分析,其忽略了余热一次风对燃料的干燥及热解过程,更重要的是,由于炉排的移动,料层翻滚运动很剧烈,必然会出现顶部已经引燃的燃料翻落到料层底部的情况,在这种情况下,必然会发生燃烧从底部同步发生的状态。

新的优化模型综合考虑了料层燃烧的实际过程,并可根据不同的炉排结构选择不同的燃料翻料

系数,从而实现对不同炉排形式的焚烧炉均可获取合理的结果。通过优化模型计算的燃料典型的燃烧过程如图6所示。顶部的燃烧传递过程同FLIC类似,不同点在于料层底部的燃烧过程。由于余热的一次风从料层底部开始干燥燃料,同时顶部已经引燃的燃料跌落到料层底部,料层底部的燃烧在顶部燃烧开始之后不久就已经发生。在一次风的作用下,底部的燃烧向上发展,同顶部传递过来的燃烧位置重合后燃烧结束。这个过程同现场运行的实际过程也是吻合的。故新的优化模型得到的计算结果更接近于实际过程,在焚烧炉的计算优化过程中可获得更准确的结果。

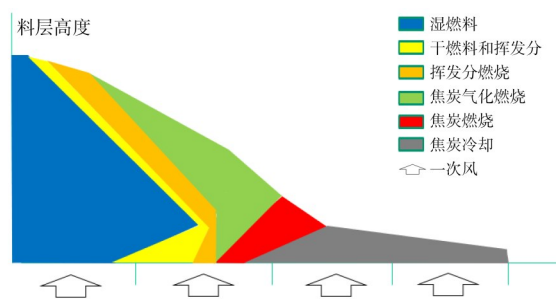


图6 优化模型燃烧过程示意

Figure 6 Combustion process diagram for the optimized combustion model

优化模型中对料层燃烧和炉膛燃烧2个区域的耦合进行了进一步的自动迭代,可在计算过程中同步更新料层同炉膛之间的能量交换,自动迭代至平衡。相对于FLIC需要手动输入输出的方式,其计算更加准确,而且可以避免认为导入导出造成的误差,使结果更加准确。

3 床层模型计算结果

分别采用FLIC模型及优化模型对焚烧炉料层的燃烧进行计算模拟,FLIC模型燃烧计算的温度分布如图7所示,优化模型燃烧计算温度分布如图8所示,结合两个分布结果可以看出燃烧过程的差异。

由图7FLIC模型的计算结果可知:随着燃料从推料口到排渣口,经历了干燥、热解燃烧及燃尽的过程,料层高度也随着燃烧过程的推进而越来越薄。燃烧从料层顶部开始,同时料层底部由于热一次风的作用从下向上发生干燥过程;随着燃烧从料层顶部传递到料层底部,其高温区逐渐集中,直至焦炭燃烧区达到最高温度;随着焦炭燃尽,剩余渣在一次风的作用下逐渐冷却,最终到达排渣口。整体上来看,

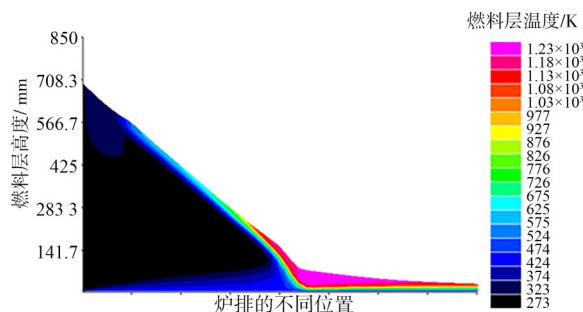


图7 FLIC模型燃烧计算温度分布

Figure 7 Temperature distribution for the FLIC model

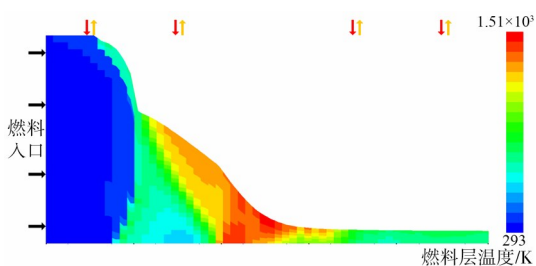


图8 优化模型燃烧计算温度分布

Figure 8 Temperature distribution for the optimized combustion model

FLIC模型的计算结果基本符合燃料在炉排上的燃烧过程,但其对燃料的翻滚造成的影响不能协同考虑。从图8可以看出:优化模型计算出的结果整体规律同FLIC相似,最大的不同在于其燃烧起始位置。图8中,燃料顶部发生燃烧后,由于燃料的翻转,已点燃物料到达物料底部,在一次风的作用下进一步向上燃烧。相对于FLIC的结果,优化模型的结果更接近实际情况。

综合考虑两个模型的计算结果,选择优化模型的结果作为炉膛燃烧优化的基础模型,对焚烧炉进行整体结构及配风的优化设计。

4 焚烧炉配风优化

针对某台处理量为900 t/d的生活垃圾焚烧炉,其炉膛结构均已固定,合理的配风可以使焚烧炉燃烧更加优化。故本研究对该焚烧炉内配风进行优化设计计算,获取最佳的运行工况,为焚烧炉实际运行提供指导。

4.1 优化算法

焚烧炉配风包括一次风,二次风及不同风口的配比等参数,排列组合之后数量非常大。若采用传统的计算方法,计算量非常庞大。为了控制其优化工况数量,本优化研究使用了西门子公司商业优化算法方法SHERPA,以科学量化评估设计变量、目标参数之间的相关性,并找到优化解决方案。

SHERPA是一种独特的搜索算法,可执行R(稳定)、P(渐进)和A(自适应)的S(同步)H(混合)E(探索)。

与传统的根据经验逐一尝试优化算法不同,SHERPA在综合考虑计算的可靠性、渐进性和自适应前提下,使用多个优化算法进行寻优计算,若某个算法被认为是无效的,则SHERPA算法将减低此算法的参与程度。图9为传统优化方法与SHERPA方法的区别。

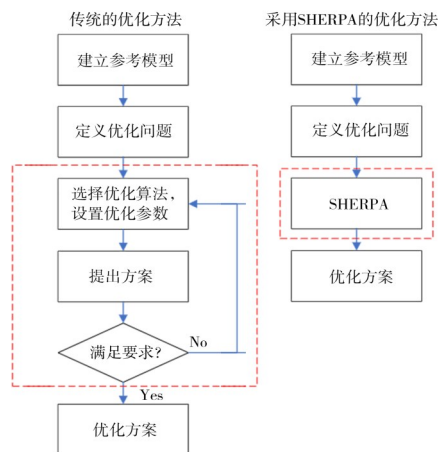


图9 使用SHERPA优化与传统优化的区别

Figure 9 The difference between SHERPA optimization and traditional optimization

优化算法会根据每次迭代获得的结果再次提供输入,以最小化/优化整体性能。这个工作流程将持续执行,直到确定的设计实验的数量。在确定迭代次数后,系统将根据从整体实验中获得的性能参数来确定最佳设计。整个工作,从几何更新到仿真和后期处理的结果是完全自动化的。

4.2 评估参数及优化参数

根据焚烧炉的燃烧特点以及运行参数,结合焚烧炉排放标准的要求,对每个模拟进行了评估。优化算法会对以下参数进行评估:焚烧炉出口CO浓度;焚烧炉出口NO_x浓度;第一通道温度分布的均匀性;温度>850℃的烟气停留时间>2 s;炉排排渣口热灼减率<3%。

在以上参数中,温度>850℃烟气停留时间>2 s和炉排排渣口热灼减率<3%被设定为约束条件,若2个条件中任意一条不满足,则该工况作为无效工况。在此基础上对其他参数评分进行加权,通过对比加权总分的方式获得最佳的运行工况。每个参数的加权系数根据经验会有不同的范围,同时根据不同项目的具体优化目的,加权系数会适当调整。

根据焚烧炉现有的配风设计对以下的优化参数在合理范围内进行优化:空气过量系数 λ 值;二次风喷嘴风量和OFA_喷嘴风量之间的比率;总一次风和总二次风之间的比率;一次风不同风箱的分配比率;二次风后拱喷嘴和前拱喷嘴风量之间的比率;OFA风与前拱二次风、OFA风之间的比例。

4.3 计算结果

通过对焚烧炉配风系统的优化,对其运行参数进行了优化计算。表3为优化前后其配风比例的对比。从结果上看,同基础工况相比,优化工况的空气过剩系数从1.674降低到1.509,一次风占比由64.5%降低到46%,同时其一次风风室的风量占比及二次风的风量占比得到了重新分配。

表3 焚烧炉助燃空气配风优化前后分配比例
Table 3 Air distribution ratios before and after optimization of combustion air in the incinerator

项目	基础工况	优化工况
总风量/(Nm ³ /h)	164040	147922
一次风/(Nm ³ /h)	105840	68558
二次风/(Nm ³ /h)	58200	79365
空气过剩系数 λ	1.674	1.509
一次风占比/%	64.5	46
二次风占比/%	35.5	54
第一风室/(Nm ³ /h)	15120	9794
第二风室/(Nm ³ /h)	37800	24485
第三风室/(Nm ³ /h)	37800	24485
第四风室/(Nm ³ /h)	15120	9794
前拱喷嘴/(Nm ³ /h)	5600	13254
后拱喷嘴/(Nm ³ /h)	3200	8333
OFA风1/(Nm ³ /h)	24700	28889
OFA风2/(Nm ³ /h)	24700	28889

优化前后焚烧炉各个评估指标如表4所示。从结果上看,各个指标都有不同程度的提高。热灼减率从3.1%降低到0.25%,燃料燃烧地更加充分;炉内温度>850℃的烟气停留时间由4.22s增加到4.55s,更有利于二噁英的去除。

表4 焚烧炉助燃空气配风优化前后计算结果
Table 4 Calculation results of combustion air distribution before and after optimization in the incinerator

项目	基础工况	优化工况
炉排排渣口热灼减率/%	3.1	<0.25
850℃以上烟气停留时间/s	4.22	4.55
CO/[mg/Nm ³ ,dry, 11% O ₂]	0.91	0.023
第一通道出口温度分布均匀性	8.26	6.9
NO _x /[mg/Nm ³ ,dry, 11% O ₂]	202.6	185.7

优化前后焚烧炉内的烟气流速分布如图10所示。可以看出:从基础工况下前/后墙二次风没有深入炉膛太远,在优化工况中,二次风喷嘴添加了更多的助燃空气,使二次风喷嘴刚性更强。在优化工况下,在二次风和OFA中增加了更多的助燃空气量,OFA喷嘴周围的流速显著增加,这有利于在焚烧炉炉膛和第一通道形成更强的湍流混合作用,更有利于燃烧充分。

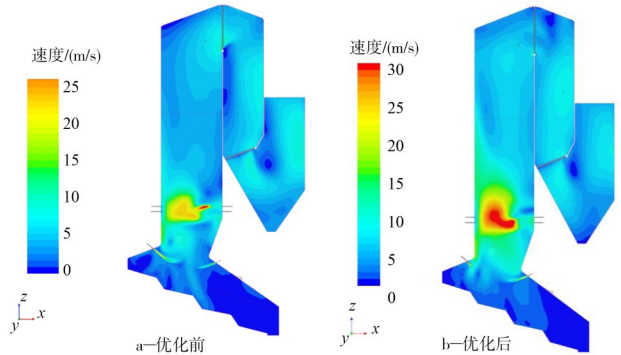


图10 配风优化前后炉膛内流速分布
Figure 10 Velocity distribution before and after optimization of combustion air distribution in the furnace chamber

优化前后焚烧炉内的烟气温度分布如图11所示。可以看出:优化配风后焚烧炉炉膛内的燃烧更加剧烈更加充分,炉排主燃烧区的长度有一定的延长。此外,优化工况下炉排末端的炉膛温度较高,部分原因是,由于优化工况下一次风比率的变化,炉排处的空气减少。

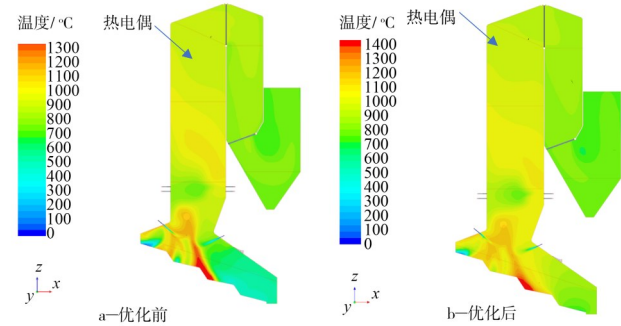


图11 配风优化前后炉膛内温度分布
Figure 11 Temperature distribution before and after optimization of combustion air distribution in the furnace chamber

实际运行现场的第一通道末端安装有热电偶,具体位置如图11所示。在优化前后分别读取该位置的烟气温度数据,并进一步截取该位置的CFD模拟结果进行对比,如表5所示。可知:CFD模拟数据同现场测试数据具有较好的吻合度,且优化前后的变

化趋势是一致的,说明床层优化模型可以较准确地对炉排焚烧炉进行模拟仿真,这为焚烧炉的精细化设计和运行提供了新方法。

表5 CFD模拟同现场测试结果对比

Table 5 Comparison between CFD simulations and field test results

工况	现场测试结果/℃	CFD模拟结果/℃
基础工况	912	905
优化工况	925	928

5 结 论

本文对比了FLIC模型和床层燃烧优化模型的差异。相对于FLIC模型,床层优化模型综合考虑了料层燃烧的实际过程,可对顶部燃烧的燃料由于翻滚点燃底部燃料的过程进行计算,并可根据不同的炉排结构选择不同的燃料翻料系数,进而对不同炉排形式的焚烧炉均可获取合理的结果。相对于其他采用FLIC进行模拟计算的研究,使用床层燃烧优化模型的结果更接近实际情况。

采用床层燃烧优化模型+STAR CCM+自动耦合的计算方法,可对料层燃烧和炉膛燃烧2个区域的耦合进行自动迭代,可在计算过程中同步更新料层同炉膛之间的能量交换,自动迭代至平衡。相对于FLIC需要手动输入输出的方式,其计算更加准确而且可以避免人为导入导出造成的误差,使结果更加准确。

针对某台处理量为900 t/d的生活垃圾焚烧炉,采用SHERPA的优化算法,对该焚烧炉配风进行了优化计算,优化结果显示:热灼减率从3.1%降低到0.25%,燃料燃烧地更加充分;炉内温度>850℃的烟气停留时间由4.22 s增加到4.55 s,更有利于二噁英的去除。整体来看,数值模拟获得了理想的优化效果。

CFD结果同现场测试结果进行了对比,CFD模拟数据同现场测试数据具有较好的吻合度,且优化前后的变化趋势是一致的,说明床层优化模型可以较准确地对炉排焚烧炉进行模拟仿真,为焚烧炉的精细化设计和运行提供了新方法。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2021[M]. 北京:中国统计出版社,2021.
National Bureau of Statistics, People's Republic of China. China statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委住房城乡建设部关于印发《“十四五”城镇生活垃圾分类和处

理设施发展规划》的通知(发改环资〔2021〕642号). [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/14/content_5606349.htm

National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the National Development and Reform Commission on the issuance of the "14th Five-Year Plan" for the development of urban domestic waste classification and treatment facilities (No. 642) [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/14/content_5606349.htm

- [3] 刘先荣, 罗翠红, 唐玉婷, 等. 大型城市生活垃圾焚烧炉结构改造的数值模拟研究[J]. 锅炉技术, 2019, 50(5): 64-70.
LIU X R, LUO C H, TANG Y T, et al. Study on numerical simulation of structural renovation of large municipal solid Waste incinerator [J]. Boiler Technology, 2019, 50 (5): 64-70.
- [4] GODDARD C D, YANG Y B, GOODFELLOW J, et al. Optimisation study of a large waste-to-energy plant using computational modelling and experimental measurements [J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 78(3): 106-116.
- [5] YU Z S, MA X Q, LIAO Y F, Mathematical modeling of combustion in a grate-fired boiler burning straw and effect of operating conditions under air- and oxygen-enriched atmospheres [J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 895-903.
- [6] 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.
LIU R M. CFD simulation of waste incineration process in large grate furnace [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [7] YAN M, ANTONI, WANG J, et al. Numerical investigation of MSW combustion influenced by air preheating in a full-scale moving grate incinerator[J]. Fuel, 2021, 285: 119193
- [8] 李德波, 陈兆立, 陈智豪, 等. 垃圾焚烧炉掺烧陈腐垃圾及其配风优化的数值模拟[J]. 环境工程, 2022, 40(11): 113-119.
LI D B, CHEN Z L, CHEN Z H, et al. Numerical simulation of mixing stale waste and air distribution optimization in waste incinerator [J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (11): 113-119.
- [9] YANG Y B, SHARIFI V N, SWITHEBANK J. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds[J], Fuel, 2004, 83: 1553-1562.
- [10] 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.
- [11] GODDARD C D, YANG Y B, GOODFELLOW J, et al. Optimisation study of a large waste-to-energy plant using computational modelling and experimental measurements [J]. Journal of Energy Institute 2005, 78: 106-16.
- [12] RYU C, YANG Y B, SHARIFI V N, et al. Thermal reaction modelling of a large municipal solid waste incinerator [J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176: 1891-907.
- [13] YANG Y B, GOODFELLOW J, SHARIFI V N, et al. Study on the transient process of waste fuel incineration in a full-scale moving-bed furnace [J]. Combustion Science and Technology 2005, 177: 127-50.