

大型秸秆振动炉排炉振动模式的优化

张睿智¹, 赵善辉², 汪林正³, 邓睿渠¹, 罗永浩^{1*}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200240; 2. 南京工程学院能源与动力工程学院, 江苏省 南京市 211167; 3. 麻省理工学院机械工程系, 美国马萨诸塞州 剑桥市 02139)

Optimization on Vibration Mode of Large-scale Straw Vibrating Grate Boilers

ZHANG Ruizhi¹, ZHAO Shanhui², WANG Linzheng³, DENG Ruiqu¹, LUO Yonghao^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu Province, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, USA)

ABSTRACT: Vibration mode of straw vibrating grate boilers has a comprehensive effect on the solid-phase combustion in the fuel bed and the homogeneous combustion in the freeboard, as well as on pollutant emissions. To improve boiler efficiency and reduce fuel consumption, this paper proposes optimization of vibration mode by means of the numerical simulation based on the developed multiple thermally thick particle (MTTP) grate combustion model. First, a model is built for the typical 130 t/h vibrating grate boiler, and issues like insufficient combustion of straw are reproduced by numerical simulation. Further, through numerical simulation, the basic reaction processes of layer combustion are clarified, the effects of vibration parameters in different combustion stages are revealed, and evolutions of CO, NO_x and SO₂ are analyzed in a grate vibration cycle. Finally, the optimization strategy in vibration mode is proposed and applied in an actual furnace, to evaluate the improvements in combustion efficiency and pollutant control. The results indicate that, in a bottom-ignited layer combustion mode, the residence time of fuel on the grate significantly influences the length of the ignition preparation zone at the front end, while the length of the flame propagation zone remains unchanged. With the time requirement for the ignition of fuel bed fulfilled, the application of a vibration mode with short intervals, high frequency, rapid ramp-up, and short duration contributes to coke block breaking and fuel burnout, and mitigates the adverse effects associated with concentrated pyrolysis and combustion. After applying the adjustment in vibration in an actual boiler, its steam production efficiency has been significantly improved, with substantial reductions in NO_x and SO₂ emissions. Optimization based on numerical simulation provides a new way to increase the profits of power generation and heat supply from straw combustion.

KEY WORDS: straw; vibrating grate boiler; vibration mode; steam production efficiency; pollutants

摘要: 秸秆振动炉排炉的振动模式对炉内的多相燃烧过程及污染物排放有全面影响, 为提升锅炉效率、降低蒸汽单耗, 该文提出基于多热厚颗粒(multiple thermally thick particle, MTTP)层燃模型数值模拟的振动模式优化方法。首先, 针对典型的 130 t/h 振动炉排炉构建模型, 模拟复现常见的出生料、燃尽差问题; 进而利用模拟, 厘清层燃基本反应过程, 揭示不同阶段振动参数的影响机制, 并分析振动过程中 CO、NO_x 和 SO₂ 的演变; 最后, 提出振动优化策略, 实炉验证对燃烧效率和污染物排放的优化效果。结果表明, 在底部着火层燃方式中, 燃料停留时间显著影响前端着火准备区长度, 但火焰传播区长度不变。满足着火需求前提下, 采用短间隔、高频率、快爬坡、短持续的振动, 有助于破焦与燃尽, 缓解集中热解与燃烧的不利影响。经实炉优化, 锅炉产汽效率显著提升, NO_x 和 SO₂ 排放大幅降低。基于精细化数值模拟的优化方法能为秸秆直燃发电供热的效益提升提供新思路。

关键词: 秸秆; 振动炉排炉; 振动模式; 产汽效率; 污染物

0 引言

我国农作物秸秆每年产量约 8.6 亿 t^[1], 秸秆能源化利用是实现“双碳”目标的有效手段。目前, 秸秆的大规模利用以直燃发电和供热为主, 振动炉排炉是当前的主流方式之一, 在国内外得到广泛应用^[2]。我国应用较多的是 130 t/h 水冷振动炉排炉, 以丹麦生物质直燃发电技术为基础, 国内多家锅炉企业研制, 锅炉基本结构较为相近。

振动炉排不仅有常规炉排的支撑燃料和控制燃烧时间的作用, 还能以周期性的振动对炉排上堆积的燃料进行扰动、破焦和混合, 对于秸秆这类燃

烧快、易结焦和结渣的燃料^[3-4],燃烧速率和稳定性较其他炉排更具优势。但是,受到秸秆燃料特性和设计运行理念等因素的影响,实际运行常存在出生料、燃尽差的现象,燃烧效率普遍偏低,同时 NO_x 和 SO_2 等污染物的排放较高,使炉排炉的运行成本高昂、经济效益较差。

炉排的振动模式对炉排上秸秆的着火、燃烧和燃尽影响显著,优化振动模式是改善炉排炉运行状态的有效途径,受到研究人员的关注。炉排振动时,炉排上的燃料和灰渣形成的流动阻力会随炉排振动周期性变化,并引起炉膛压力周期性地变化^[5]。振动初期灰渣下沉堵塞炉排风孔使流动阻力增大,一次风量减小、炉膛压力降低;随着灰渣排出和燃料被松动抛起,炉排和床层风阻降低,一次风量增大、炉膛压力升高^[6]。针对炉膛压力的大幅波动,在炉排振动前调整一、二次风的配风量,能减少压力的波动幅度^[7],这也是目前普遍采取的方法。振动期间,燃料被松动抛起,使床层的孔隙率增大、颗粒混合增强、换热受到强化,燃料快速热解并释放气体产物^[8],还会与一次风反应发生“爆燃”^[6-7]。

对于炉排振动模式的设置,目前尚未形成统一的观点。毕涛等^[9]提出通过炉排振动参数的设置,保持炉排上薄料层的燃烧状态,提高床层一次风的穿透性,以增强干燥、着火和燃烧。Silva等^[10]指出,将振动的间隔时间从3 min延长至10和15 min,可以增加非振动状态下CO低浓度排放的持续时间,从而整体降低CO平均排放浓度。Hu等^[11]也采用长达13 min的振动间隔时间。

尽管从原理上分析,增强振动以强化对床层的破焦和混合效果,有利于秸秆的着火和燃尽、提升燃烧效率。但实际运行过程中,振动过程还与多个方面相关,包括床层移动、固相停留时间、气相停留时间、炉膛压力、一/二次风流量、烟气中的CO浓度、 NO_x 浓度和 SO_2 浓度等,振动模式的优化要全面考量对于床层固相和炉膛均相的影响。薄料层运行模式尽管有利于一次风穿透床层,但是也相应地缩短了燃料在炉排上的停留时间。较长的振动间隔时间,虽保障了充裕的燃烧时间,但同时也增加了床层的厚度,对于一次风流动有不利影响,尤其是对于秸秆等堆积密度较低的燃料,容易导致炉排前端堵料,影响炉排炉运行的稳定性。因此,必须综合评估与平衡振动对燃烧效率以及污染物排放等方面的影响,而数值模拟是有效的方法^[12-15]。

综上所述,科学有效的振动模式优化,需要对炉排上床层固相和炉膛中挥发分均相的燃烧机理有充分的理解,厘清在炉排振动过程中炉排炉燃烧状态的发展演化过程,并明确振动时间、间隔时间、振动电机频率等参数对各方面的影响机制。因此,本文以常见的130 t/h水冷振动炉排炉为对象,选用典型的燃料小麦秸秆,基于前期针对炉排炉开发的多热厚颗粒(multiple thermally thick particle, MTTP)层燃模型^[16-18],通过数值模拟方法,对床层与炉膛燃烧过程开展全面分析,综合评估振动过程对各方面的影响机制,探究科学的振动模式,并进行实炉调试校验,以优化秸秆振动炉排炉的燃烧效率和污染物排放。

1 秸秆振动炉排炉的基本燃烧过程

1.1 秸秆振动炉排炉的层燃反应过程

炉排炉床层的燃烧过程是典型的层燃反应过程,其本质是火焰锋面在床层高度方向上的传播。常见的层燃过程中,空气穿过炉排由底部进入床层,燃烧反应则由床层表面开始、向底部传播。在炉膛高温辐射下,床层表面的燃料颗粒升温并依次经历干燥和热解,进而与底部进入的空气发生氧化反应、颗粒着火,高温颗粒通过以辐射为主的方式向下方颗粒传递热量,使下方颗粒继续发生升温 and 着火,形成向下传播的火焰锋面。

然而,对于秸秆振动炉排炉,因秸秆易着火的特点和预热一次风的作用,能够呈现出截然不同的层燃方式。如图1所示,在床层底部200℃左右的预热一次风的吹扫下,秸秆逐渐升温,并开始干燥和热解,进而在挥发分均相氧化和焦炭异相氧化的共同作用下,在床层底部发生着火,热量通过高温颗粒的辐射和高温烟气的对流两种方式,传递给上方燃料颗粒,使其继续发生升温 and 着火,从而形成向上传播的火焰锋面。如图2所示,实炉上也观察到了这一底部着火的层燃方式。

需要指出的是,在一般表面着火的层燃方式

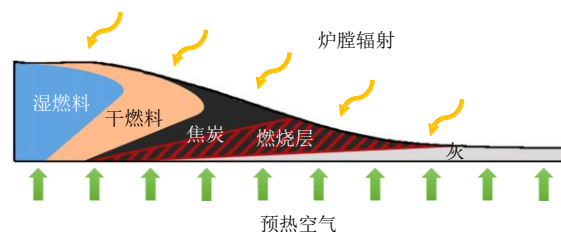


图1 秸秆振动炉排炉的层燃反应过程

Fig. 1 Layer combustion in straw vibrating grate boiler



图 2 底部着火层燃方式的实炉照片
Fig. 2 On-site photo of bottom-ignited layer combustion

下，火焰传播方向与一次风方向相反，干燥和热解反应主要受高温辐射的驱动，传热量取决于焦炭颗粒的温度。因此，干燥和热解的传播与焦炭的着火位置紧密关联，即干燥层和热解层的厚度基本保持稳定，Porteiro 等^[19]在研究中也获得相同的结论。

而在底部着火的层燃方式下，火焰的传播方向与一次风方向相同，热量不仅可通过高温颗粒的辐射传递，还可以通过燃烧烟气的对流换热传递，上方颗粒对燃烧热量的吸收更为充分。由于焦炭的燃烧速率通常较低，而传热不再单一依赖于焦炭的辐射，使干燥和热解反应在床层中的传播要明显快于焦炭燃尽，并在床层内呈现出各层厚度持续增加的分布形态。

1.2 秸秆振动炉排炉的典型运行状态

在厘清底部着火的基本层燃反应过程后，下文对振动炉排炉的运行状态展开讨论。图 3 所示为典型 130 t/h 秸秆振动炉排炉示意图，在国内秸秆的燃烧发电和供热中有广泛的应用。该炉型采用倾斜布

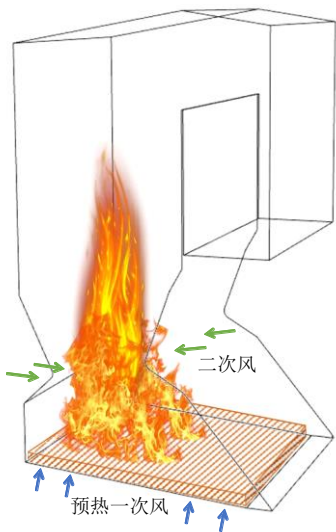


图 3 典型 130 t/h 振动炉排炉示意图
Fig. 3 Sketch of a typical 130 t/h vibrating grate boiler

置的水冷炉排，通过炉排的整体振动推动燃料前进。一次风分高、中、低 3 段穿过炉排从底部进入床层，风温一般为 190~200℃。二次风则从喉口位置的前后两侧分多排喷入炉膛，帮助挥发分的燃烧。

国内该炉排炉常用的燃料为小麦秸秆，其工业分析及元素分析如表 1 所示。本文分析和优化工作也都是针对该燃料开展的。

表 1 小麦秸秆工业分析及元素分析

Table1 Proximate and ultimate analysis of wheat straw				
元素分析/%				
C	H	O	N	S
35.43	5.49	34.09	0.55	0.32
工业分析/%				
水分	挥发分	固定碳	灰分	
13.42	61.29	14.59	10.7	

如引言所述，振动炉排不仅起着支撑燃料的作用，更重要的是，针对秸秆类燃料易结焦、结渣的特点，具有扰动破焦、促进燃烧的功能，同时还能够调控燃料的燃烧时间。因此，炉排振动模式的设置对燃烧过程尤为关键。

炉排振动一般通过变频器控制，整个振动过程包括爬坡、持续和降坡 3 个阶段，如图 4 所示。通常需对峰值频率、振动爬坡时间、持续时间、降坡时间分别进行设置，同时还需设置振动之间的间隔时间。

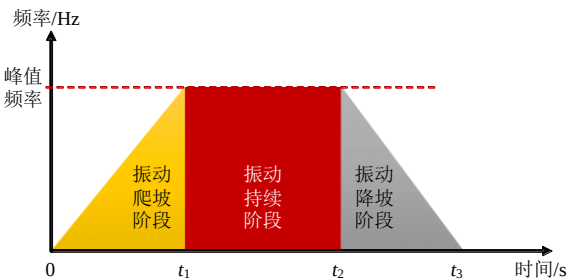


图 4 振动过程示意图
Fig. 4 Sketch map of a grate vibration cycle

图 5 为某台 130 t/h 秸秆振动炉排炉在日常运行情况下、振动前后的火线移动情况，其振动模式设置如下：振动峰值频率 40 Hz、振动爬坡 11.0 s、持续 13.0 s、降坡 15.0 s、振动间隔时间为 200.0 s。振动前火线靠近屏幕左侧，如图 5(a)所示，振动后已观察不到火线位置，部分燃烧中的燃料已直接落入了排渣口，如图 5(b)所示。而排渣口处也观察到了生料与未燃尽焦炭，如图 6 所示，该现象在秸秆振动炉排炉的运行中较为常见，导致锅炉运行效率低、发电单耗高、经营效益差。

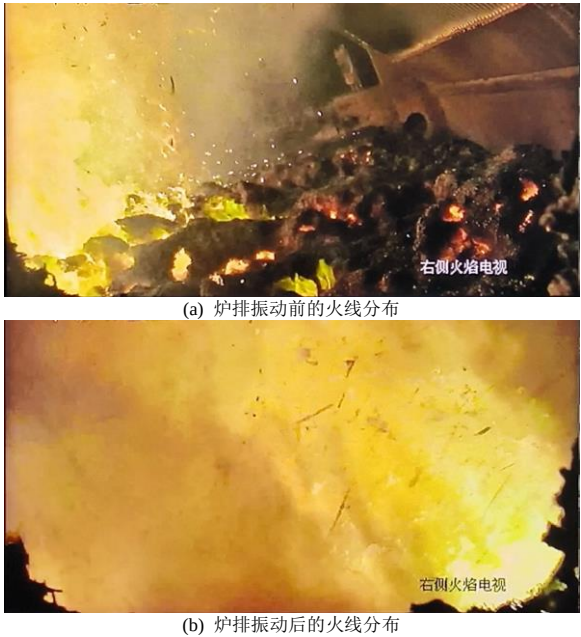


图 5 日常运行时振动过程中的火线移动情况
Fig. 5 Propagation of fire line in a grate vibration cycle under common state



图 6 排渣口的生料与未燃尽焦炭
Fig. 6 Unburned straw and char at the outlet of grate

2 数值模拟分析与振动优化策略

针对秸秆振动炉排炉常见的效率低、单耗高的问题，将引入数值模拟方法以剖析问题的根本原因，通过炉排振动模式的科学设置，优化秸秆燃烧过程。

2.1 炉排炉燃烧模型

数值模拟主要基于前期针对炉排炉所开发的并行颗粒 MTTP 层燃模型^[16-18]，炉排炉分为炉排上的床层多相燃烧模型和炉膛内的均相燃烧模型^[20]，通过交换表面辐射强度和气相组分、流动及温度等信息，以实现耦合计算。

床层燃烧模型的基本任务是处理颗粒内外的物质转化、传热传质以及颗粒运动，主要假设如下：

- 1) 床层为多孔介质，反映燃料质量和体积变化；
- 2) 燃料为热厚颗粒，能量和物质存在径向传递；
- 3) 颗粒分为湿燃料、干燃料、焦炭和灰 4 层；
- 4) 各步转化反应发生在对应的组分层内；
- 5) 颗粒内生成的气体会立即释放到气相中；
- 6) 假设气相为不可压缩的理想气体。

各守恒方程如表 2 所示，源项及其他信息可参考文献[17,21]，此处不再赘述。相较于常规层燃过程(如链条炉排炉)，该炉排炉床层下炉排的周期性振动是主要特征，模型将振动炉排上燃料的运动拆分为沿炉排方向和垂直方向的两个移动速度，以及燃料在床层内的随机混合 3 部分。床层内颗粒的随机混合运动被近似视为一种扩散过程，应用菲克定律(Fick's law)构建固体子相的质量守恒方程中的扩

表 2 床层转化模型的气相和固相守恒方程
Table 2 Governing equations for gas and solid phases of the fuel bed model

守恒方程		表达式
质量守恒	气相	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon \rho_g u_{j,g}) = - \sum_N \sum_k S_k^M$
	固相	$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\varepsilon)\alpha_k \rho_k] + \frac{\partial}{\partial x_j}[(1-\varepsilon)\alpha_k \rho_k u_{j,s}] = D_s \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}[(1-\varepsilon)\alpha_k \rho_k] + S_k^M$
动量守恒	气相	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_g u_{i,g}) + \frac{\partial}{\partial x_j}[\varepsilon \rho_g u_{i,g} u_{j,g} - \mu(\frac{\partial u_{i,g}}{\partial x_j})] = S_{i,M} + S_i(U_{i,g})$
能量守恒	气相	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_g \bar{c}_{p,g} T_g) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon \rho_g \bar{c}_{p,g} u_{j,g} T_g) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda_{eff,g} \frac{\partial T_g}{\partial x_j}) + S_{rxn,g} + S_{s-g}$ 其中，$S_{rxn,g}$ 来自气相反应焓；S_{s-g} 来自气固换热
	固相	$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\varepsilon)\alpha_k \rho_k \bar{c}_{p,s} T_k] + \frac{\partial}{\partial x_j}[(1-\varepsilon)\alpha_k \rho_k \bar{c}_{p,s} u_{j,s} T_k] = S_k^E$
组分守恒	气相	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_g Y_{i,g}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon \rho_g u_{j,g} Y_{i,g}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g D_{g,eff} \frac{\partial Y_{i,g}}{\partial x_j}) + M_{i,g} + M_{i,s}$ 其中，$M_{i,g}$ 为组分 i 来自气相反应的源项；$M_{i,s}$ 为组分 i 来自固相反应的源项

散项(见表 2)。同时,考虑固相转化颗粒收缩导致的床层下降,可由式(1)计算:

$$u_{y,s} = -\frac{1}{1-\varepsilon} \int_0^y \sum_N (R_{\text{drying},N} \theta_{\text{drying},N} + R_{\text{devol},N} \theta_{\text{devol},N} + R_{\text{char},N} \theta_{\text{char},N}) dy \quad (1)$$

式中 $\theta_{\text{drying},N}$ 、 $\theta_{\text{devol},N}$ 和 $\theta_{\text{char},N}$ 分别为因干燥、热解和焦炭反应带来的颗粒收缩系数^[22]。干燥速率采用热模型与扩散模型联合的形式,热解假定遵循单步总包反应,焦炭异相反应包括与 O_2 、 H_2O 和 CO_2 的反应,总体反应速率考虑了动力学、气膜阻力和灰层阻力 3 方面的贡献。

气相燃烧的反应速率通过湍流的有限速率和涡流耗散速率进行计算。有限速率反应动力学基于阿伦尼乌斯表达式计算,而涡流耗散模型中,化学反应速率由大涡混合时间尺度控制,在床层内部的涡流耗散速率采用 Hermansson 和 Thunman 针对多孔介质的修正版本^[22]:

$$R_{\text{eddy},i} = 0.63 \frac{\rho}{W} \left[\frac{1.75(1-\varepsilon)V}{\varepsilon d_p} \right] \min \left(\frac{y_i}{v_{i,j}} \right) \quad (2)$$

式中 y_i 和 $v_{i,j}$ 分别为参与均相反应 j 的反应物的摩尔分数和化学计量系数。各反应速率表达式以及均相燃烧模型守恒方程与湍流、辐射等算法的具体设置可参考文献[17,21]。

2.2 床层固相的燃尽

基于所构建的炉排炉模型,针对炉排排渣口出生料、燃尽差的问题,根据前文所述小麦秸秆燃料特性和炉排振动模式设置,对床层燃烧过程开展数值模拟。燃料转化过程中,会依次经历湿燃料、干燃料、焦炭和灰 4 个阶段,图 7 所示为各组分在床层中的分布情况。

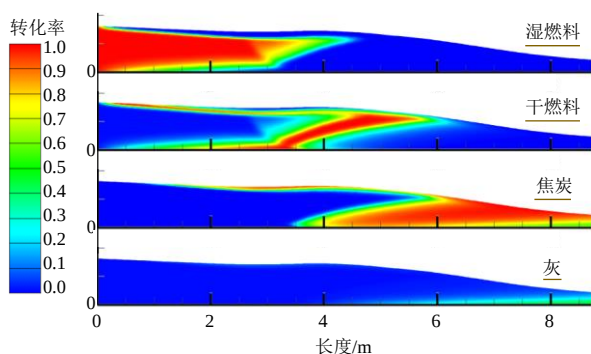


图 7 固相燃尽不佳时各组分在床层中的分布

Fig. 7 Distribution of fresh straw, dry straw, char and ash in bed under a poor burnout condition

模拟结果与实炉现象一致,较大比重的焦炭在

炉排长度范围内未能燃尽。在该振动模式下,振动推动燃料前移的距离过大,缩短了燃料在炉排上的停留时间,使床层着火位置延后,且不能满足火焰传播所需的时间,从而导致焦炭无法燃尽。

现场运行人员面对焦炭燃尽的问题,通常选择增加振动的间隔时间,使燃料更久地保留在炉排上。但是,由于秸秆的燃烧特性,床层易烧穿形成沟流、易结焦阻碍燃烧,过长的间隔时间会削弱振动的扰动破焦、平整床层的功能,同样不利于床层的燃尽。

可见,在设置振动模式时,一方面要保障燃料在炉排上充裕的停留时间,另一方面要充分发挥振动的扰动破焦功能,要综合考虑平衡两方面影响。为进一步分析该平衡,在 3 段炉排均匀布风的情况下,模拟不同停留时间下的床层燃烧情况,结果如图 8 所示,可以将整个床层的层燃过程分为着火准备区和火焰传播区。

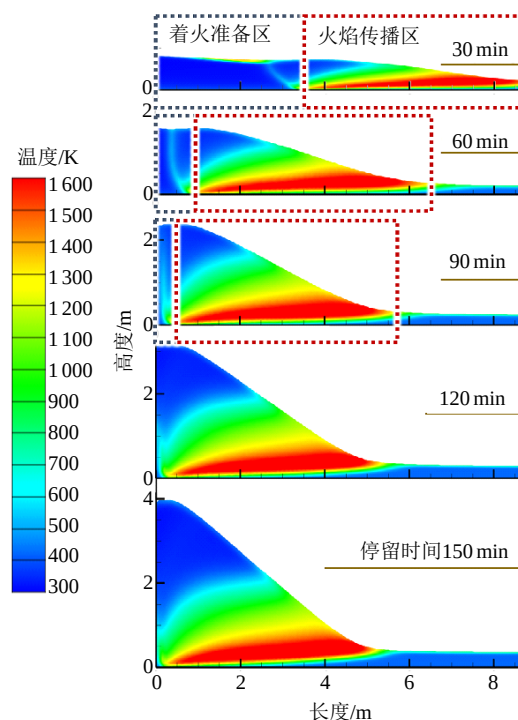


图 8 不同停留时间下的床层燃烧情况

Fig. 8 Bed combustion with different residence times

着火准备区内,燃料在预热一次风吹扫下积累热量、提升温度,并逐渐达到着火的条件,此阶段干燥、热解等反应的速率较低,可以参考图 7 中的分布,该阶段所占据的炉排长度与燃料在炉排上的停留时间密切相关。

床层底部颗粒着火后进入火焰传播区,燃烧的快速放热使干燥、热解等反应速率显著提高,并形

成稳定传播的火焰锋面。此阶段所需要的炉排长度基本保持稳定,并未表现出与停留时间相关性。这是因为,燃料在炉排上停留时间的增加,实际是同比增加了床层的高度,即火焰传播到床层表面的距离。因此,综合考虑以上因素,设置振动模式时可在满足着火所需停留时间的前提下,缩短振动的间隔以强化振动的扰动破焦能力,从而实现较好的床层燃尽。

2.3 炉膛气相的燃尽

分析床层燃尽问题后,下文继续讨论炉膛气相的燃尽。图9所示为日常运行条件下典型的烟气CO排放情况,整体呈现宽幅波动的形态,峰值超过 $10\,000\text{ mg/Nm}^3$,造成化学不完全燃烧热损失,导致锅炉效率的下降。

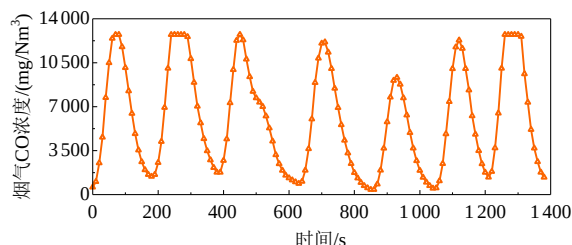


图9 日常运行时烟气中的CO排放浓度

Fig. 9 CO emission concentration under common state

同样利用数值模拟,分析振动过程中CO在炉膛中分布的变化规律,如图10所示,按照时间先后依次从分布状态1变化到6,完成一个振动周期。振动开始后一次风量会迅速减小,原因1是运行人员为避免炉膛正压过大而调小风阀开度;原因2是振动初期床层内的灰颗粒沉至底部堵塞炉排上的

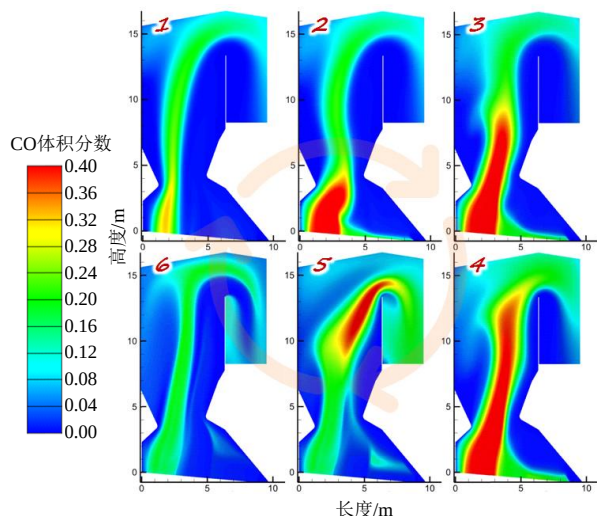


图10 振动过程中炉膛CO分布的演变过程

Fig. 10 Evolution of CO distribution in the freeboard in a grate vibration cycle

风孔。与此同时,振动的扰动混合作用使热解反应显著增强。在两个因素共同作用下,床层表面CO的析出显著增多。随着振动进行,炉排的风孔逐渐重新打开,积压的一次风涌入炉膛,造成瞬时流量急剧增大,炉膛压力快速上升,气体组分在炉膛内的停留和反应时间减小,CO在短时间内被推挤至炉膛出口难以燃尽。因此,对应每次振动,烟气CO的浓度都会快速上升,如图9所示。

尽管实炉运行时不同项目的振动参数设置有所不同,烟气中CO浓度跟随振动的变化情况也存在时间上的差异,但是整体的演变过程与快速上升的趋势是相似的。考虑到CO峰值与振动的关联性,降低振动间隔、减弱床层CO析出集中度是有效的降低CO峰值、提高燃烧效率的途径。

2.4 烟气污染物排放的控制

污染物排放也与振动过程密切相关,这里主要考虑 NO_x 和 SO_2 排放。图11为日常运行条件下典型的烟气 NO_x 排放情况,整体也呈现了宽幅波动的形态, NO_x 浓度峰值与CO峰值交替出现。如前文讨论,振动对床层热解反应的增强,会使CO和烃类等热解产物显著增多,具有还原NO的能力,可能是两者浓度峰值交替出现的原因之一。

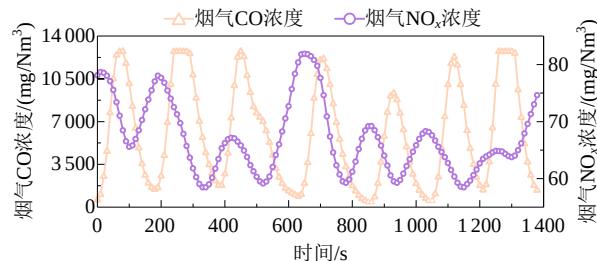


图11 日常运行时烟气中的 NO_x 排放浓度

Fig. 11 NO_x emission concentration under common state

为了更清晰地理解 NO_x 在振动周期中的增多机制,也采用数值模拟方法,在与2.3节相同的时间尺度下分析了振动过程中NO在炉膛中分布的演变过程,如图12所示,按时间先后依次从分布状态1变化到6。NO的演变与CO不同,其增多并不是直接由床层集中析出导致的。 NH_3 和HCN等含氮组分在热解过程中集中析出,随后在一次风涌入时被集中氧化,反应锋面处形成高浓度的NO(见状态5和6)。尽管NO增多的机制与CO不同,但是同样与振动过程的集中热解具有较强的关联性,因此,同样可以采用降低振动间隔的方法予以控制。

SO_2 方面,控制重点应在于抑制原料中无机硫的析出。降低振动间隔有利于减弱床层燃烧集中

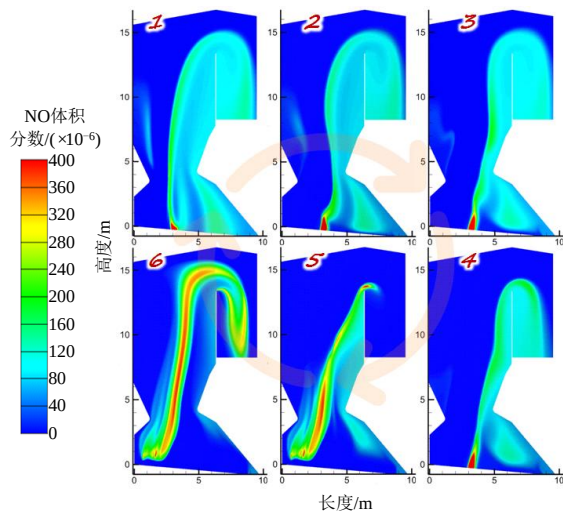


图 12 振动过程中炉膛 NO 分布的演变过程

Fig. 12 Evolution of NO distribution in the freeboard in a grate vibration cycle

度，而增加振动频次有利于促进床层颗粒的混合，避免局部高温区域的形成，这都有利于抑制无机硫析出。

3 实炉运行调试与效果验证

3.1 振动模式的调整

基于以上数值模拟的分析讨论，以某台典型的秸秆振动炉排炉为例，针对振动模式设置，开展实炉的运行优化调试，具体设置的改变如表 3 所示。

表 3 炉排振动模式设置的调整

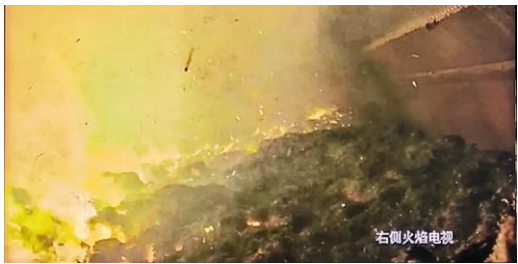
Table 3 Adjustments in the grate vibration settings

参数	调整前	调整后
振动间隔/s	200.00	90.00
爬坡时间/s	11.00	5.00
振动时间/s	13.00	2.00
降坡时间/s	15.00	3.00
电机频率/Hz	40.00	46.00

调试过程中，大幅降低振动间隔时间，增加振动的频次，对于燃烧和污染物控制都有利。增大振动电机的峰值频率，以增强振动扰动破焦能力。同时，优化振动爬坡、持续和降坡的时间，以期在保留扰动能力的情况下，缩短床层的移动距离，下文讨论调整对各方面的效果。

3.2 调整后床层固相的燃尽

床层燃烧方面，对比图 13 和 5 监测器图像，调整后单个振动周期内床层前进的距离明显缩短，小于 1m。此外，对比图 13(a)和 5(a)可知，床层平整度也有显著提升，大焦块明显减少。结果表明，基于数值模拟分析提出的调整方法有效。



(a) 振动前的火床分布



(b) 振动后的火床分布

图 13 优化调整后振动过程中的火线移动情况

Fig. 13 Propagation of fire line in a grate vibration cycle after the adjustment in vibration settings

高振动电机频率配合短间隔、高频次的振动，提升了振动对床层的扰动破焦作用，而振动爬坡、持续和降坡时间的优化，在保留破焦效果的同时，减弱了对床料的前推作用，提供了更为充裕的燃烧时间。综合优化后，捞渣口灰渣中几乎不存在生料，如图 14 所示，床层燃尽显著改善。



(a) 调整前

(b) 调整后

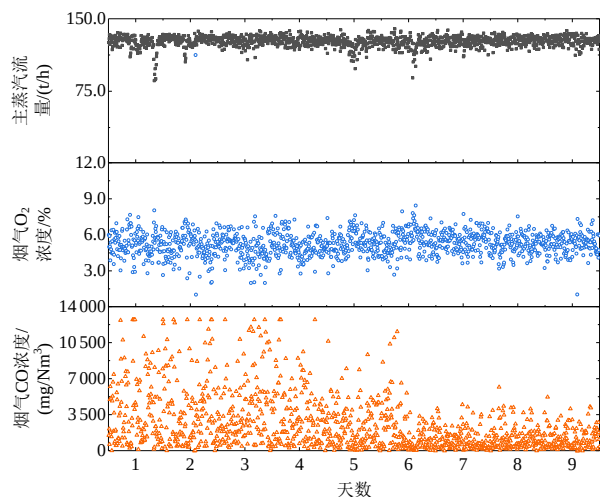
图 14 调整前后排渣口的出渣情况对比

Fig. 14 Comparison of the solid residues at the outlet of grate before and after the adjustment

3.3 调整后炉膛气相的燃尽

炉膛气相燃尽方面，以烟气的 CO 浓度为指标。如图 15 所示，振动设置的调整在图中第 6 日完成，CO 浓度整体下降趋势明显，其峰值浓度从调整前 12 000 mg/Nm³ 下降至 3 500 mg/Nm³ 以下。该过程中，锅炉负荷未减小，烟气氧浓度未发生明显变化，表明 CO 减少是炉排振动模式改变的结果。

如前文所述，短间隔、高频次的振动使床层热解和 CO 析出的集中度大幅降低，因而调试在未改变配风等其他因素的情况下，已使烟气 CO 排放出现台阶式下降，气相燃尽改善。

图15 调试期间的锅炉负荷与O₂、CO烟气浓度Fig. 15 Boiler load, O₂ and CO concentrations in flue gas during the adjustment

床层固相和气相两方面燃尽的改善,可以有效提升锅炉燃烧效率。该项目同时发电和供热,可以用“产汽效率”直观反映燃烧效率,具体定义为单位质量的秸秆通过燃烧产生的蒸汽量。图16汇总了调试前后几日内,该炉排炉的日蒸汽产量、日燃料消耗量和产汽效率。

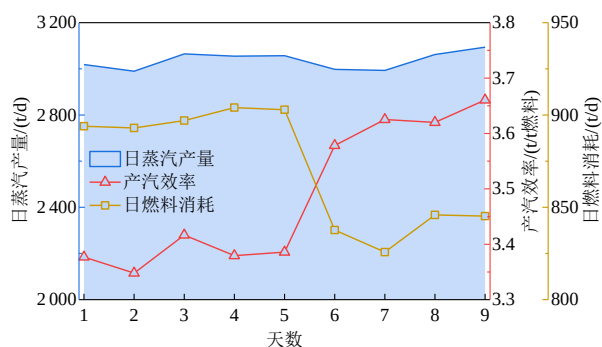


图16 调试期间的日蒸汽产量、日燃料消耗与产汽效率

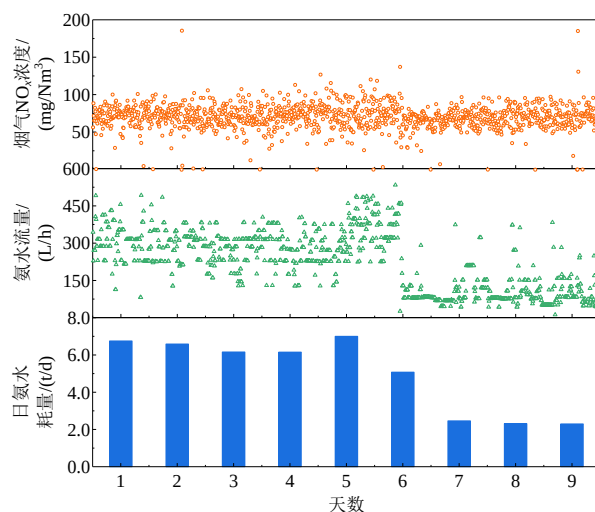
Fig. 16 Daily steam production, daily fuel consumption and steam production efficiency during the adjustment

在第6日完成调试后,锅炉的产汽效率显著提高,从原先约3.4t蒸汽/t秸秆升高至约3.6t蒸汽/t秸秆,对应的日燃料消耗量则从900t/d左右下降至850t/d以下。整个调试期间,日蒸汽产量维持在高位小幅波动,产汽效率的提升并未以锅炉负荷为代价。

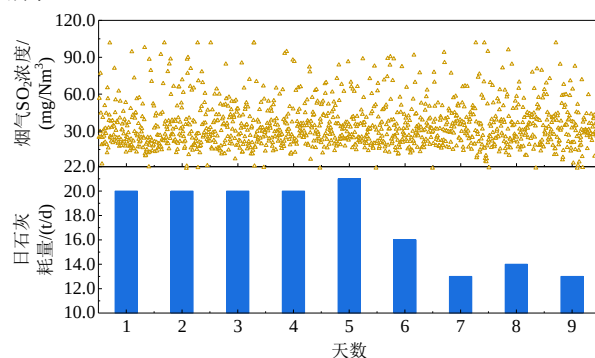
3.4 调整后的烟气污染物排放

NO_x方面,整理了调试前、后几日的烟气NO_x浓度、氨水流量和日氨水消耗量,如图17所示。在运行人员的控制下,调试期间烟气NO_x浓度基本维持稳定,而氨水流量可以观察到台阶式的下降,统计的日氨水消耗量从调试前的6.0t/d左右下降至

接近2.0t/d,表明NO_x的原始排放浓度大幅降低。如前文所述,这是因为短间隔、高频次的振动降低了床层热解析出NH₃和HCN等含氮组分的集中度,从而减少了其被氧化生成NO。

图17 调试期间的NO_x烟气浓度与氨水耗量Fig. 17 NO_x emission concentration and ammonia consumption during the adjustment

在SO₂方面,整理了调试前、后几日的烟气SO₂浓度和日石灰消耗量,如图18所示。同样,烟气SO₂浓度在运行人员的控制下基本保持稳定,石灰耗量方面则在调试后出现明显下降,从约20.0t/d减少至约13.0t/d。通过振动模式的调整,床层燃烧集中度下降、床层混合增强,避免了局部高温区域的形成,抑制了无机硫析出,减少了脱酸药剂消耗。

图18 调试期间的SO₂烟气浓度与石灰耗量Fig. 18 SO₂ emission concentration and lime consumption during the adjustment

4 结论

本工作以典型130t/h秸秆振动炉排炉为对象,针对炉排的振动模式,基于数值模拟的计算与分析,提出综合优化方法。主要结论如下:

1) 秸秆振动炉排床层层燃过程为底部着火

模式,可分为着火准备区和火焰传播区。其中,着火准备区占据的炉排长度与燃料的停留时间密切相关,而火焰传播区所需要的炉排长度则基本保持稳定,与停留时间无直接的相关性;

2) 满足着火时间需求前提下,短间隔、高频次的振动可充分发挥振动破焦作用,改善床层燃尽。同时,提高振动电机频率可增强破焦作用,而缩短振动爬坡、持续和降坡时间可以减少床层移动、增加停留时间,提供更大调整空间;

3) 对于气相燃烧,振动过程中,在风阀调整、灰颗粒沉降、扰动混合等多因素共同作用下,会导致床层的集中热解和 CO 的集中析出。通过缩短振动间隔,能减弱床层 CO 析出集中度,降低烟气中 CO 的排放浓度,改善气相燃尽;

4) 烟气中 NO_x 浓度的增大滞后于 CO,源于床层集中热解析出的 NH_3 和 HCN 等含氮组分、在炉膛气相中的集中氧化。短间隔、高频次的振动同样减弱了含氮组分的析出集中度,缓解了集中氧化反应生成 NO,降低了氨水消耗;

5) SO_2 控制的重点在于抑制原料中无机硫的析出,降低振动间隔减弱床层燃烧集中度,增加振动频次促进床层颗粒混合,避免局部高温区域的形成,抑制了无机硫析出,减少了药剂消耗。

实炉应用振动的优化设置后,床层固相和炉膛气相的燃尽改善,锅炉的产汽效率从 3.4t 蒸汽/t 秸秆提升至 3.6t 蒸汽/t 秸秆以上, NO_x 和 SO_2 的环保物料消耗显著降低,氨水消耗量从 6.0 t/d 左右下降至近 2.0 t/d,石灰消耗量从约 20.0 t/d 减少至约 13.0 t/d。锅炉的运行成本显著下降、效益提升。需要指出的是,本文仅针对炉排振动模式展开研究和讨论,调整后的秸秆振动炉排炉仍有较大的优化空间,需结合一、二次风的优化分配和布置,甚至烟气再循环技术的引入,以实现更高效清洁的燃烧。

参考文献

- [1] ARAVANI V P, SUN Hangyu, YANG Ziyi, et al. Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China : comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 154: 111821.
- [2] YIN Chungun, ROSENDAHL L A, KÆR S K. Grate-firing of biomass for heat and power production[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(6): 725-754.
- [3] 苏现强,何芳,李秀华,等. 秸秆燃烧中 KCl 逸出的原位共熔蒸发模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2268-2274.
SU Xianqiang, HE Fang, LI Xiuhua, et al. A model describing evaporation of KCl after in-situ eutectic melting during combustion of agro-stalks[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2268-2274(in Chinese).
- [4] 方璐瑶,刘颖祖,朱燕群,等. 水稻秸秆燃烧过程中硫对钾迁移释放的影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1562-1568.
FANG Luyao, LIU Yingzu, ZHU Yanqun, et al. Effect of sulfur on potassium migration and release during rice straw combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1562-1568(in Chinese).
- [5] 王乐,杨秀媛,王志凯,等. 生物质振动炉排锅炉的炉膛压力周期性波动分析[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 84-88.
WANG Le, YANG Xiuyuan, WANG Zhikai, et al. Analysis on furnace pressure cyclical fluctuations of biomass vibrating-grate boiler[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 84-88(in Chinese).
- [6] 刘莹,周常来. 生物质振动炉排锅炉炉膛压力控制改进及试验[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(2): 60-64.
LIU Ying, ZHOU Changlai. Control strategy improvement and field tests on furnace pressure of biomass vibrating-grate boiler[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(2): 60-64(in Chinese).
- [7] 宋纯龙,宋永富,潘大勇,等. 生物质水冷振动炉排锅炉运行优化的分析研究[J]. 锅炉制造, 2022(6): 32-33.
SONG Chunlong, SONG Yongfu, PAN Dayong, et al. Analysis and research on operation optimization of biomass water-cooled vibrating grate boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2022(6): 32-33(in Chinese).
- [8] 史辉,郝莉. 生物质振动炉排锅炉炉膛压力温度周期性波动的原因及影响[J]. 能源技术, 2009, 30(4): 209-211.
SHI Hui, HAO Li. The analysis and infection of furnace pressure and temperature periodic fluctuations of biomass vibrating-grate boiler[J]. Energy Technology, 2009, 30(4): 209-211(in Chinese).
- [9] 毕涛. 生物质水冷振动炉排锅炉的性能优化分析[J]. 工业炉, 2024, 46(1): 25-29.
BI Tao. Analysis on performance optimization for biomass water-cooled vibrating grate boilers[J]. Industrial Furnace, 2024, 46(1): 25-29(in Chinese).
- [10] SILVA J P, TEIXEIRA S, GRILOÉ, et al. Analysis and monitoring of the combustion performance in a biomass power plant[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2021, 5: 100334.
- [11] HU Zhongfa, WANG Xuebin, ZHANG Lan, et al.

- Emission characteristics of particulate matters from a 30 MW biomass-fired power plant in China[J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 225-236.
- [12] 苏现强, 马仑, 方庆艳, 等. 基于一次风精细配风的生物质炉排炉燃烧数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3975-3986.
- SU Xianqiang, MA Lun, FANG Qingyan, et al. Numerical simulation research on combustion of biomass-fired grate boiler based on refined primary air distribution[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3975-3986(in Chinese).
- [13] 赵征, 周孜钰, 卢叶, 等. 炉排式垃圾焚烧炉燃烧过程动态建模方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(11): 4360-4372.
- ZHAO Zheng, ZHOU Ziyu, LU Ye, et al. Research on dynamic modeling method of waste incinerator combustion process[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(11): 4360-4372(in Chinese).
- [14] 汪靖良, 江茂强, 方庆艳, 等. 高长径比生物质圆柱颗粒阻力模型的直接数值模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(11): 4372-4383.
- WANG Jingliang, JIANG Maoqiang, FANG Qingyan, et al. Direct numerical simulation of drag model of cylindrical biomass particles with high aspect ratio[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(11): 4372-4383(in Chinese).
- [15] 蒋海威, 高明明, 李杰, 等. 生物质振动炉排炉燃烧过程建模及动态特性分析[J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 250-259.
- JIANG Haiwei, GAO Mingming, LI Jie, et al. Modeling and dynamic characteristic analysis of combustion process of biomass vibrating grate furnace[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(2): 250-259(in Chinese).
- [16] 张睿智, 汪林正, 赵善辉, 等. 大型炉排炉清洁高效燃烧的问题剖析与实炉优化[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(5): 681-691.
- ZHANG Ruizhi, WANG Linzheng, ZHAO shanhui, et al. Analysis and optimization for practical applications of clean and efficient combustion of large-scale grate furnace[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(5): 681-691(in Chinese).
- [17] ZHANG Ruizhi, WANG Linzheng, DENG Ruiqu, et al. Numerical analysis of NO_x reduction in large-scale MSW grate furnace through in-bed combustion optimization using multi-section fuel bed model with thermally thick treatment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257: 124156.
- [18] ZHOU Hongquan, ZHANG Ruizhi, WANG Linzheng, et al. Comprehensive assessment and optimization of a middle-arch dual-channel municipal solid waste incinerator using numerical simulation methods[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(40): 42010-42026.
- [19] PORTEIRO J, PATIÑO D, MIGUEZ J L, et al. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3): 1296-1302.
- [20] 庄家宾, 汤健, 夏恒, 等. 炉排固相和炉膛气相燃烧耦合的 MSWI 过程模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(24): 8961-8971.
- ZHUANG Jiabin, TANG Jian, XIA Heng, et al. MSWI process simulation based on coupling combustion of solid phase on grate and gas phase in furnace[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(24): 8961-8971(in Chinese).
- [21] WANG Linzheng, ZHANG Ruizhi, DENG Ruiqu, et al. Comprehensive parametric study of fixed-bed co-gasification process through multiple thermally thick particle (MTTP) model[J]. *Applied Energy*, 2023, 348: 121525.
- [22] HERMANSSON S, THUNMAN H. CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(5): 988-999.



张睿智

收稿日期: 2024-10-08。

作者简介:

张睿智(1985), 男, 工学博士, 助理研究员, 研究方向为生物质及固废的清洁高效燃烧与气化, zhang.ruizhi@sjtu.edu.cn;

*通信作者: 罗永浩(1962), 男, 教授, 研究方向为大颗粒固体燃料的燃烧与气化, yhluo@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 胡琳琳)