引文格式:张聪,王浩伟,贾欣雨,等. 小型生物质锅炉燃烧模型构建及送风参数优化研究[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):973-980.

ZHANG Cong, WANG Haowei, JIA Xinyu, et al. Construction of small biomass boiler combustion model and optimization of air supply parameters[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(5): 973-980.

小型生物质锅炉燃烧模型构建及送风参数优化研究

张 聪[1],王浩伟[1],贾欣雨[1],张兴惠[1],孟金英[2]

(1. 太原理工大学 土木工程学院,山西 太原;2. 山西山安蓝天节能科技股份有限公司,山西 太原)

摘 要:**【目的】**生物质锅炉作为一项典型清洁供暖技术,在推动乡镇清洁供暖绿色转型方面扮演着至关重要的角色。本文将生物质锅炉的燃烧过程分为固相热解燃烧和气相燃烧两部分,通过构建多孔介质模型,并引入可燃气体质量和能量源项来模拟生物质燃料在炉床上的堆积状态和一次风穿透燃料的燃烧现象,随后,将可燃气体作为源项导入模拟域,利用Fluent软件中气相化学反应模型进行气相燃烧的模拟。**【方法】**通过模拟与实验相结合,分析不同送风参数对炉膛内部速度场、温度场、以及烟气中一氧化碳(CO)和氮氧化物(NO_x)分布的影响,阐明温度分布对燃烧效率和污染物排放的重要作用。**【结果】**模拟结果与实验数据的吻合验证了所采用简化模型在预测中小型生物质锅炉燃烧行为方面的有效性和准确性,既可为同类生物质锅炉的优化设计和高效运行提供理论依据,又可为清洁供暖技术的创新和应用提供科学指导。

关键词:生物质;燃烧模型;数值模拟;送风参数

中图分类号:TK16 **文献标识码**:A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240523 **文章编号**:1007-9432(2026)05-0973-08

Construction of Small Biomass Boiler Combustion Model and Optimization of Air Supply Parameters

ZHANG Cong[1], WANG Haowei[1], JIA Xinyu[1], ZHANG Xinghui[1], MENG Jinying[2]

(1. *College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*; 2. *Shanxi Shan'an Blue Sky Energy-saving Technology Co., Ltd, Taiyuan, Shanxi, China*)

Abstract:**【Purposes】** As a typical clean heating technology, the biomass boiler plays a vital role in promoting the green transformation of clean heating in rural and urban areas. Here, the combustion process of biomass boilers is divided into solid-phase pyrolysis combustion and gas-phase combustion. By constructing a porous medium model and introducing combustible gas mass and energy source terms, the accumulation state of biomass fuel on the grate and the combustion phenomenon of primary air penetrating the fuel are simulated. Subsequently, the combustible gases are imported into the simulation domain as source terms, and the gas-phase combustion is simulated by using the gas-phase chemical reaction model in Fluent software. **【Methods】** According to the combination of simulation with experiments, the impact of different air supply parameters on the internal velocity field, temperature field, and the distributions of carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x) in the flue gas

收稿日期:2024-07-02;**修回日期**:2024-08-16

第一作者:张聪,博士,讲师,(E-mail)zhangcong@tyut.edu.cn

通信作者:张兴惠,博士,教授,主要从事智慧供热研究,(E-mail)zhangxinghui@tyut.edu.cn

were analiped, and the important role of temperature distribution in combustion efficiency and pollutant emissions was clarified.【**Results**】The consistency of simulation results with experimental data verifies the effectiveness and accuracy of the simplified model used in predicting the combustion behavior of small and medium-sized biomass boilers. It can not only provide a theoretical basis for the optimized design and efficient operation of similar biomass boilers but also provide scientific guidance for the innovation and application of clean heating technology.

Keywords:biomass; combustion model; numerical simulation; air supply parameters

随着全球对减少温室气体排放和推动能源转型需求的日益增长,生物质锅炉作为一种清洁、可再生的供暖技术,在满足城乡清洁采暖需求中受到广泛关注。生物质资源来源广泛[1-3],包括农业废弃物、林业副产品、城市有机垃圾等,这些原本可能被废弃或焚烧的材料,通过生物质锅炉转化为热能或电能,在实现废物的资源化利用的同时,还有效地降低了传统燃煤锅炉的温室气体排放和空气污染物排放,对改善空气质量和实现供热领域"双碳"目标具有显著贡献[4-9]。通过技术创新和政策支持,生物质锅炉在提升能源利用效率、保障供暖安全、实现可持续发展等方面发挥着重要作用,是城乡清洁供暖领域不可或缺的力量。因此,许多国家和地区已经开始实施一系列如财政补贴、税收优惠、绿色信贷等激励措施,降低生物质锅炉的投资和运营成本,鼓励企业和个人优先采用这种清洁能源技术。同时,政府也在制定和完善相关标准和法规,确保生物质锅炉的安全、高效运行,同时减少对环境的影响。

生物质锅炉的燃烧过程包括干燥、热解、挥发分释放和焦炭氧化等多个阶段[10],同时还涉及气体对颗粒的输运和辐射传热等复杂现象[11]。由于通过实验优化锅炉结构难度大,成本高[12],近年来,学者们开始致力于通过计算流体力学(CFD)模拟来优化锅炉结构,提高燃烧效率,减少污染物排放。

Zadravec等[13]用一维床模型简化三维问题,成功地用CFD模型实现了小型锅炉燃烧室温度、烟气中CO浓度以及操作参数的有效预测;Buchmayr等[14]利用实验数据作为气相燃烧模型的边界条件,通过稳态火焰模型(SFM)简化复杂燃烧过程,实现了生物质锅炉的快速预测和优化设计;Kær等[15]采用"行走柱"模型描述了移动炉排的特性;马括等[16]使用FLIC软件模拟了生物质层燃锅炉的燃烧过程,并将数据导入CFD,通过迭代计算得到燃料稳定燃烧的模拟结果;Gómez等[17]将燃料床视为多孔介质实现动态耦合。为深入分析单个固体颗粒的运动,Wiese等人[18-20]采用拉格朗日模型对燃料床每个固体颗粒进行了追踪,并与生物质热转化模型耦合。同样,Chapela等人[21-23]采用欧拉模型描述了燃烧过程中流场的整体特性。为进一步分析固体燃料颗粒的燃烧问题,Thunman等[24]建立了一维燃料颗粒模型,结合颗粒内部结构和燃烧机理,详细描述了颗粒内部的物质和温度变化。

基于上述研究,本文以提高生物质锅炉的燃烧效率和降低污染物排放为目标,将其燃烧过程拆分为固相热解燃烧和气相燃烧部分并分别建立模型,根据经验关联式[13]和燃料颗粒模型[24]计算燃烧产物数据,将其作为多孔介质源项输入Fluent软件进行计算,通过数值模拟研究一、二次风送风比和过量空气系数对生物质锅炉炉膛内温度分布和不同位置烟气组分浓度的影响,用实验验证模拟结果,为锅炉结构优化提供理论和实践支持,推动生物质锅炉的推广应用,为清洁能源转型和应对气候变化提供支持。

1 研究对象

本文以某民用生物质锅炉为研究对象,生物质的燃烧是一个复杂的过程,主要包括固相热解燃烧和气相燃烧两个过程。在燃烧模拟过程中,固相燃烧的模拟需综合考虑燃料堆积的孔隙率、一次风穿透燃料的阻力、燃烧温度以及释放的气体质量流率等因素。大多数研究者采用FLIC软件模拟固相燃烧情况,但其应用中需处理软件间的耦合问题,且将计算结果输入CFD计算域时,无法充分考虑到一次风穿透燃料时遇到的阻力,这导致模拟结果与真实燃烧情况存在一定偏差。为提高模拟的直观性和普适性,本研究对燃烧过程模型进行了必要的简化,通过构建多孔介质模型来再现生物质燃料在炉床上的堆积状态和一次风穿透燃料的现象,此外,引入可燃气体质量源项和能量源项,精确模拟燃烧温度、气体组分以及质量流率的变化,之后将根据经验关联式和燃料颗粒模型计算出的燃烧产物数

据作为多孔介质源项输入Fluent软件进行计算，通过数值模拟研究一、二次风送风比和过量空气系数对生物质锅炉炉膛内温度分布和不同位置烟气组分浓度的影响。图1展示了生物质锅炉的结构图，该锅炉由燃烧系统和水循环系统两大部分构成。生物质成型燃料的燃烧主要在燃烧系统中进行。燃料从侧面进入并落在炉排上，与空气混合后实现高效燃烧。炉膛底部与炉排相连，顶部设有一段收缩壁面，上方则是烟室和烟道。燃烧所需的空气被分为三个部分：一次风、二次风和炉排下进风（进风位置如图1所示）。一、二次风采用分段喷射的方式供给，根据炉膛的上下壁面的喷嘴布局，将燃烧过程在空间和时间上划分为一次和二次燃烧区。炉排风是室内空气，在压差作用下从灰仓进入，从下向上吹动堆积的燃料，以促进燃烧。

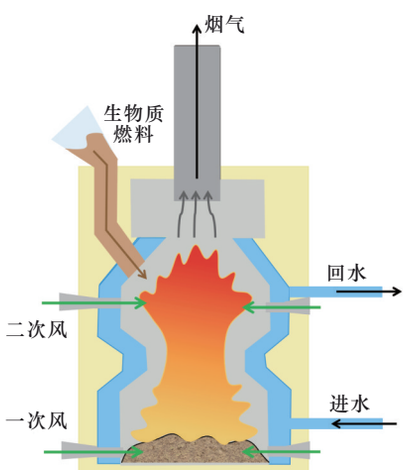


图1　生物质锅炉结构图

Fig. 1　Schematic diagram of biomass boiler

炉膛两端宽中间窄的沙漏型结构设计在中间部分形成瓶颈，烟气通过瓶颈区域产生的压力差和高流速有助于将一次燃烧产生的未完全燃烧产物迅速输送到二次燃烧区，与二次风混合，实现高效燃烧；此外，瓶颈效应还可增强烟气的湍流程度，从而提高烟气与换热面的热交换效率，同时也有助于烟气中颗粒物的分散和混合，从而减少沉积和结渣的风险。由于NO_x的生成与燃烧过程中的高温温度和O_2浓度有关，较低的流速有助于减少NO_x的生成，而适当的湍流则有助于NO_x的分散和稀释，从而有助于NO_x生成，故实际运行中可通过优化沙漏型炉膛结构控制烟气流速和湍流程度，以优化烟气的流动特性，提高燃烧效率，减少污染物排放，并提高整个锅炉系统的热效率和可靠性。

2　研究方法

2.1　数学模型

生物质锅炉的燃烧涉及到固相分解和气相燃烧过程。固相分解发生在床层区域，三维多孔介质模型能够综合考虑燃料堆积的物理特性，如渗透性、惯性损失和孔隙率，故本文采用该模型对床层进行建模，同时引入代表燃料在燃烧过程中释放热量的能量源项和代表热解和燃烧过程中生成气体的质量源项，以便更准确全面地模拟和预测生物质燃料在固相热解燃烧过程中的复杂现象。此外，计算由干燥、热解、焦碳氧化三部分生成的可燃气体并将其作为源项被引入到模拟域中[25]，进一步进行气相燃烧过程，该过程通过计算流体动力学软件Fluent内的气相化学反应模型来描述。炉内区域采用Fluent基于压力的稳态求解器求解；湍流对平均流量的影响采用标准k-epsilon模型；辐射计算选用Do模型；控制方程压力项采用二阶标准格式离散，其他项采用二阶迎风格式离散；速度和压力耦合采用Coupled算法；组分模型选用eddy-dissipation模型和Finite-rate/eddy-dissipation模型，通过eddy-dissipation模型快速化学反应在锅炉内形成热流场，然后使用Finite-rate/eddy-dissipation模型进行详细化学反应；模型选用速度入口和压力出口。

2.2　网格划分

本文对固相分解对应的多孔区域和气相燃烧对应的自由流体区域分别进行网格划分，两区域间采用共享拓扑，允许流体域内部的流体自由通过。面网格最小尺寸0.5 mm，最大尺寸4 mm，maximum-skewness为0.458，averaged-skewness为0.01，面网格数量为215 149。体网格最小长度0.6 mm，最大单元长度2.4 mm填充体网格poly-hexcore，最小正交质量为0.5，图中的计算网格由4 276 590个多面体单元组成，面网格和体网格质量，已是该结构下的最优值，此处不再做网格无关性分析。此外，边界层是指流体在靠近固体表面处速度和其他物理性质发生急剧变化的区域，正常模拟添加1—3层边界层，本文添加4层边界层以更准确模拟流体在近壁面附近的行为。

2.3　边界条件和定义域

CFD研究中使用的模拟域在x、y和z方向的主要尺寸分别为0.53 m、0.65 m和0.70 m。如图所示，计算域表示锅炉的内部容积，包括一、二次燃烧室，一、二次风道，收缩段和烟道。助燃气体垂直于

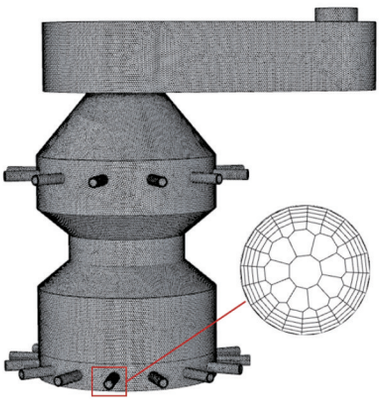


图2 生物质锅炉网格划分

Fig. 2 Biomass boiler mesh division

炉排表面进入区域，一、二次风通过风道供应到燃烧室中，入口湍流和水力直径分别设置为35%和19 mm[26]。燃料转换模型依赖于燃料床顶部吸收的入射辐射热量，这些辐射热量由热壁面和炉内气体释放出来，内壁的内部辐射率设定为0.8[27]。

2.4 模型验证

为验证本文生物质锅炉简化模型及数值模拟结果的可靠性，针对不同送风参数的燃烧过程进行了一系列现场实测试验，并采集相关数据与模拟值做对比。其中炉膛出口温度和喉部收缩区温度通过在测量端口插入的K型热电偶探头进行测量，同一个区域至少设3个热电偶探头，热电偶信号由JK804多路温度测试仪（−200 ℃～1 300 ℃，0.2%+1 ℃）采集并记录取平均值；炉膛出口CO和O_2质量分数采用凯恩KM9106烟气分析仪（对NO_x的测量精度为$\pm5\times10^{-6}$，分辨率为1×10^{-6}，对烟气氧浓度的测量精度为−0.1%～0.2%，测量分辨率为0.1%）进行采集和分析，同一个位置至少取测3次，最后取平均值。采集的相关数据和数值模拟结果详见表1，其中表中数据均为多个测点或多次测量结果的平均值。

表1 模拟和实测结果对比

Table 1 Comparison of simulation and experimental results

参数	模拟结果	实际值
炉膛出口温度/K	591.54	610.25
炉膛喉部收缩区温度/K	842.99	830.32
炉膛出口CO质量分数/%	1.28	1.24
炉膛出口O_2质量分数/%	17.25	16.43

从表1中可以看出，炉膛出口温度、炉膛喉部收缩区温度、炉膛出口CO质量分数及O_2质量分数的模拟结果与实际值误差分别为3.07%、1.53%、3.23%和4.99%，误差均在5%以内，说明本文中采用的生物质锅炉简化模型是有效的，模型能够较好地模拟实际的燃烧过程，包括燃料的燃烧效率、热量的产生、污染物的排放等关键参数。

2.5 最佳送风参数确定

首先，根据锅炉结构和燃料特性（本文实验所用生物质燃料全为红木）计算理论空气量，按照过量空气系数为1，模拟并分析不同一、二次风送风比对炉膛中心截面速度矢量分布以及炉膛内温度分布的的影响，并根据高效燃烧过程炉膛中心的速度和温度分布特征确定本文中生物质锅炉在理论空气量下的最佳一、二次风送风比[28,29]，随后，在此基础上，将过量空气系数作为单一变量进行一系列燃烧模拟，对不同过量空气系数下的燃烧情况进行分析比较，确定最佳过量空气系数。以上过程确定的一、二次风送风比及过量空气系数即为本文中生物质锅炉的最佳送风参数。生物质燃烧过程中，除机械送风外，自然送风也是一个不可忽视的因素。根据文献提出的生物质燃烧自然渗风量[13]，本文将炉排下送风的自然风设计为生物质燃料燃烧所需总风量的5%。

3 数值模拟及实验结果分析

3.1 理论空气量下不同一、二次风送风比对炉膛中心速度场分布影响

炉膛中心的速度场分布对锅炉的燃烧效率、稳定性以及安全性有重要影响。中心气流速度分布直接影响燃料的混合和燃烧效率，如果中心区域存在低速区，可能会导致燃料混合不充分，从而不利于燃料充分燃烧；同时，中心区域较低的气流速度可能会造成负压，影响温度场分布，导致局部过热。

图3展示了在理想燃烧条件下，不同一次风与二次风送风比例对炉膛中心截面速度矢量分布的影响，其中一、二次风送风比例4∶6、5∶5、6∶4和7∶3分别对应工况1、2、3和4（图4、5相同）。从图3中可以明显看出，一、二次风比例的调整对生物质燃料的燃烧过程有显著影响。随着二次风增加，炉膛内部烟气在二次风推动下形成了不同强度的涡流。这些涡流的存在改变了烟气在二次燃烧区的停留时间，进而影响烟气中可燃组分的进一步燃烧。虽然增加二次风的比例可以加强炉内烟气流场的扰动，形成紊流，有助于可燃挥发分与空气的混合，但过多的二次风射流可能会导致可燃气体在未充分燃烧的情况下就被带出炉膛，同时对炉壁造成冲蚀

和高温腐蚀的风险。进一步对比分析模拟结果发现，在工况 3 中，二次风对炉膛内烟气的扰动程度相对较大，烟气的流动轨迹更加集中并趋向于炉膛中心。这种集中的流动模式不仅意味着高速气流对炉壁的冲击力度相对较小，有利于保护炉壁，减少侵蚀现象，还表明在工况 3 下，二次风与一次风携带的燃料和已有烟气之间实现了有效的热质交换，这确保了氧气、燃料和烟气之间的充分接触，为燃料的充分燃烧和炉膛内温度场的均匀分布提供了坚实的基础。综合以上，在理论空气量下，四种模拟工况中，一、二次风比例为 6∶4 的工况 3 可能是获得炉内最优温度场的最佳送风比例，这有助于实现高效、稳定和环保的燃烧过程。

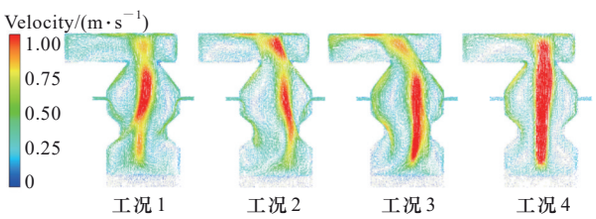


图 3　不同一、二次风送风比例下炉膛中心截面速度分布

Fig. 3　Velocity distributions at the furnace center cross-section with different primary and secondary air supply ratios

3.2　理论空气量下一、二次风送风比对炉膛内温度场分布影响

锅炉炉膛内的温度分布对于确保热效率至关重要。一个均匀的温度分布模式可以最大化能量转换效率，而温度分布的不均匀则可能导致热能的浪费。热效率与燃料的燃烧效率密切相关，而燃烧效率又受到一、二次风送风比的显著影响。恰当的送风比例对于燃料的完全燃烧很关键，这直接关系到炉膛内的温度分布。送风比例不当，可能会导致燃烧不完全，产生局部的高温或低温区域，不仅会降低能量转换效率，还可能增加污染物排放。因此，研究一、二次风送风比对炉膛温度分布的影响，对于理解燃烧效率的机制、优化锅炉运行参数具有重要价值。通过精确调控送风比例，可以提高燃烧效率，减少能源浪费，并降低污染物排放，从而实现锅炉的高效、环保运行。

本文中炉膛内的温度分布均匀性主要通过炉膛温度分布不均匀系数定量评估，该系数通过计算炉膛内最高温度与最低温度之差，再将其与平均温度相比得出，不均匀系数越小表明炉膛内的温度分布越均匀。此外，炉膛内火焰中心的位置变化也对温度分布具有一定影响，火焰中心位置保持稳定且分布均匀有助于炉膛内各区域温度的平衡。

图 4 为理想燃烧时，不同一、二次风送风比例下炉膛内温度分布模拟图。对于本文中沙漏型锅炉，一次燃烧区内的温度、炉膛内中心火焰的高度以及炉内温度分布等均受一次风量显著影响。从图 4 中可以发现，总空气量一定时，随着一、二次风送风比例增大，一次燃烧区内温度升高、炉膛内火焰中心上移，高温烟气在一次燃烧区域内上升的高度下降，但炉膛内温度分布并未呈现出类似的线性变化趋势。相比工况 1、2 和 4，一、二次风比例为 6∶4 所对应的工况 3 炉膛内形成的温度场相对比较均匀，火焰形态也较为规则。由于炉膛内的换热特性受多种因素的影响，其中火焰特性较为显著。火焰是炉膛内主要的热辐射源，火焰中心较高，辐射面积可能更大，热辐射强度增加，利于形成均匀的温度场，但较高的火焰中心可能会缩短烟气在上升过程中与受热面的接触时间，从而不利于对流换热。同样，较低的火焰中心可能会导致烟气在炉膛内的流动路径和速度发生变化，从而影响到烟气与受热面的接触效率，进而影响对流换热。综合以上分析，工况 3 中合适的一、二次风送风比例使得其燃料气化后的可燃组分燃烧主要发生在二次风风口周围，燃烧相对集中、充分，从而使其炉膛内温度分布较其他工况更均匀，有利于锅炉的安全、经济和环保运行。

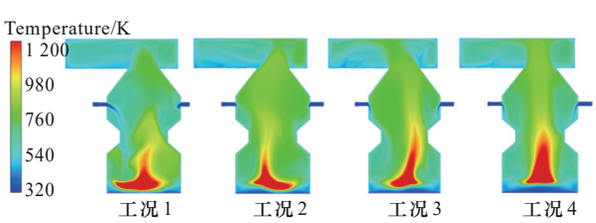


图 4　不同一、二次风送风比例下炉膛内温度分布

Fig. 4　Temperature distributions in the furnace with different primary and secondary air supply ratios

3.3　理论空气量下一、二次风送风比对炉膛内 CO 和 O_2 浓度场分布影响

CO 和 NO_x 是生物质锅炉在燃烧过程中可能产生的主要污染物，控制生物质锅炉中 CO 和 NO_x 的排放对于提高燃烧效率和减少环境污染至关重要[30]。CO 的生成主要与生物质燃料的燃烧效率有关，调整一、二次风送风比，确保燃料与空气充分混合，提高燃烧效率，可有效减少 CO 的生成。锅炉燃烧过程中 NO_x 的生成来源主要有 3 种，其中热力型 NO_x 由空气中气体氮氧化而成，受炉膛温度影响；燃料型 NO_x 由燃料中的化学氮转换而成，主要与燃料中的氮含量、燃烧温度、氧气浓度以及燃料在高温

区的停留时间有关；快速型NO_x生成机理较为复杂，在一般的燃烧装置中生成量很少[31-33]。本文中生物质锅炉烟气中的NO_x主要是热力型和燃料型。因此，控制生物质锅炉中NO_x的排放需要综合考虑热力型和燃料型NO_x的生成机制。综合以上讨论，实际运行中可通过调整一、二次风送风比控制燃烧温度，维持炉膛内温度在一个最佳范围内，避免过高温度促进NO_x形成的同时，又能确保足够的温度支持燃料充分燃烧，最终减少CO和NO_x的生成。

图5所示为理论空气量下，不同工况炉膛纵向截面CO浓度分布云图，颜色较深区域表示CO浓度较高，存在不完全燃烧现象。由图可知，随着一、二次风量配比率的增加，炉膛中心CO的浓度整体上呈现出先降低再上升趋势，这是因为二次风量比例增大，提高了空气与燃料的混合效率，氧气与气相组分充分接触，促进燃烧反应；此外，二次风的引入可能会使烟气在炉膛内的停留时间延长，为CO的进一步氧化提供更多时间；但在二次风助燃的同时，CO也受“烟气虹吸”作用影响，与空气混合受阻，而难以继续氧化，因此，CO浓度在工况3时达到最低值。该结果说明工况3所对应的一、二次风送风比例最佳。

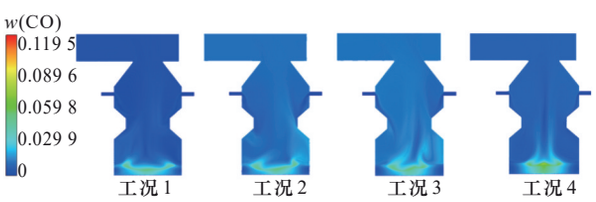


图5 炉膛纵向截面CO分布云图

Fig. 5 CO distribution cloud charts on the longitudinal section of the furnace

由于目前文献中关于NO_x形成反应的指前因子和活化能的数据较为有限，本文在模拟NO_x浓度分布时选择了谨慎的态度，并未直接列出模拟结果。为了确保研究的准确性和可靠性，此处主要依据实际测量的炉膛出口NO_x浓度数据来分析一、二次风送风比对炉膛内NO_x浓度的具体影响。其中NO_x的基准氧含量折算浓度依据GB13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》等[34,8]计算。

为更准确地分析不同燃烧工况下NO_x的排放情况，必须考虑烟气中氧含量的影响。因此，此处根据基准氧含量下的折算值讨论一、二次风送风比对NO_x排放的影响。如表2中数据所示，随着一次风比例增加，NO_x的折算浓度在工况2达到最高点后开始下降。工况1中较低的NO_x浓度归因于一次

表2 理论空气量下，不同工况炉膛出口NO_x实际排放情况

Table 2 Actual emission values of NO_x at furnace outlet with different operating conditions at the theoretical air volume

一、二次风送风比	NO_x平均排放质量浓度/(mg·m^{-3})	折算浓度/(mg·m^{-3})	炉膛出口O_2质量分数/%
工况1(4:6)	75.51	128.35	13.94
工况2(5:5)	81.80	135.39	13.75
工况3(6:4)	84.25	127.17	13.05
工况4(7:3)	58.13	127.06	15.51

燃烧阶段氧气供应不足抑制了燃料型NO_x的生成；同时，二次燃烧区空气过量导致燃烧温度降低，不利于热力型NO_x的生成，因此NO_x浓度维持在较低水平。工况3中NO_x浓度较低的原因在于较大的一次风比例促进了燃料更充分的燃烧，并在炉膛内形成了低氧环境，从而使得炉膛内的氧化性气氛逐步转变为还原性气氛，这种转变不仅会抑制NO_x的直接生成，还会促使部分已生成的NO_x发生还原反应，进一步降低NO_x的浓度。此外，尽管工况4的NO_x折算浓度比工况3略低，但这是由于一次燃烧区氧气供应过量、二次燃烧区氧气供应不足而导致可燃气体无法完全燃烧，从而抑制了NO_x生成。这种情况虽然在一定程度上降低了NO_x浓度，但也表明燃烧效率不理想，在锅炉的实际运行中，需要综合考虑燃烧效率与污染物控制的平衡。综合上述分析可知工况3所对应的一、二次风送风比例最佳。通过调节一、二次风的比例，可以有效控制炉膛内的温度和氧气浓度，从而优化CO和NO_x的生成过程，实现更高效的污染物排放控制。

3.4 最佳一、二次风送风比下不同过量空气系数对炉膛内温度场分布影响

一、二次风送风比和过量空气系数是锅炉燃烧过程中的两个重要参数，前者直接影响燃烧的稳定性、火焰形态和炉膛内的温度分布，而后者则关系到燃烧的完全性、热效率以及污染物的生成。燃烧过程中确定最佳一、二次风送风比和最佳过量空气系数的目的是为了实现燃烧效率最大化和污染物排放最小化。由于两者之间存在相互作用，实际燃烧过程中最佳一、二次风送风比可能不是在过量空气系数为最佳时达到的，实际操作中，需要通过多次实验和模拟优化才能确定最佳的送风参数，以达到最佳的燃烧效率和最低的污染物排放。本课题组前期研究表明在实际的燃烧过程中，一、二次风送风比对燃烧效率和污染物排放的影响更为显著，并且更易于调节控制。为简化模拟过程，本文在理论空气量下最佳一、二次风送风比的基础上优化过

量空气系数，最终以此确定的一、二次风送风比及过量空气系数为最佳送风参数。

图 6 为一、二次风送风比例为 6∶4 时，不同过量空气系数工况炉膛内温度分布模拟图，其中工况 5、6、7 和 8 分别对应过量空气系数 1.0、1.1、1.2 和 1.3。过量空气系数直接影响到空气和燃料的混合程度以及燃烧的均匀性，当空气和燃料的混合比例不当，燃烧不均匀时，火焰可能会呈现黄色或橙色，并出现异常形状或长度不一的现象；同时，烟气中的 CO 成分含量较高，烟气温度分布不均。由图可知，工况 8 的炉膛中心温度明显低于其他工况，且有明显的温度梯度，说明过量的空气燃烧不充分或空气和燃料混合不均匀，这可能是由于过量空气系数为 1.3 时对应的送风量过大造成，过大的送风可能会吹散燃料，导致其无法在燃烧室内充分燃烧，以致热量释放不足，进而造成炉内温度降低且高低温区域分布不均匀。工况 6 对应的图中在炉膛收缩段的冷点（温度较低的区域）较多，这可能是二次风和燃料没有充分混合造成的。此外，工况 7 的中心火焰高度和炉膛出口温度高于工况 5，说明该工况下炉膛内烟气中的可燃组分的燃烧更加充分。综合以上，过量空气系数为 1.2 的工况对应的炉膛内温度分布较其他工况更均匀，预示着更稳定的燃烧过程和更高的燃烧效率。

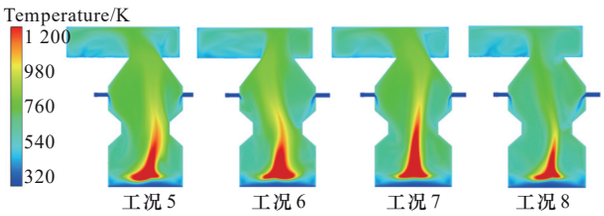


图 6　不同过量空气系数下炉膛内温度分布

Fig. 6　Temperature distributions in the furnace with different excess air ratios

4　结论

为推动暖通领域实现“双碳目标”，本文通过数学建模和求解方法对清洁供暖中生物质锅炉的燃烧过程进行了简化模拟。模拟结果显示：1）在理论空气量条件下，一、二次风比例为 6∶4 时，生物质锅炉的炉膛内速度场和温度场分布最为合理，且采用此送风比例不仅能有效控制 NO_x 和 CO 的生成，还能通过还原反应降低已生成 NO_x 的浓度，从而实现更高效的污染物排放控制；2）当一、二次风比例维持在 6∶4 时，采用 1.2 的过量空气系数，炉膛内的温度分布更为均匀，预示着燃烧过程更为稳定，燃烧效率也更高；3）实验数据与模拟结果吻合，说明采用构建多孔介质模型并引入可燃气体质量源项和能量源项来对固相燃烧过程进行描述，并将可燃气体作为源项引入到模拟域中，进一步通过 Fluent 软件内的气相化学反应模型来描述气相燃烧过程的模型简化方法在预测本文中小型生物质锅炉燃烧行为方面是相对有效和准确的，可为同类型生物质锅炉的性能优化提供参考，还可为清洁供暖技术的发展和应用提供理论基础和技术支持。

参考文献：

[1] Chen L，Msigwa G，Yang M，et al.Strategies to achieve a carbon neutral society：A review[J].Environmental Chemistry Letters，2022，20(4)：2277-2310.

[2] 陈冠益，夏晒歌，李婉晴，等.面向碳中和的生物柴油制备及应用研究进展[J].太阳能学报.2022，(9)：343-353.

[3] Sarker T R，Nanda S，Meda V，et al.Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets：A review[J].Environmental Chemistry Letters，2023，21(1)：231-264.

[4] Guan Y，Tai L，Cheng Z，et al.Biomass molded fuel in China：Current status，policies and suggestions[J].Science of the Total Environment，2020，724：138345.

[5] Kang K，Qiu L，Sun G，et al.Codensification technology as a critical strategy for energy recovery from biomass and other resources：A review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews，2019，116：109414.

[6] Kusuma R T，Hiremath R B，Rajesh P，et al.Sustainable transition towards biomass-based cement industry：A review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews，2022，163：112503.

[7] 苏俊林，罗小金，矫振伟，等.燃用生物质颗粒燃料锅炉的燃烧及排放特性[J].吉林大学学报（工学版），2010，40(4)：953-958.

[8] 翟雨轩.农村新型家用生物质锅炉结构脱氮设计研究[D].太原：太原理工大学，2021.

[9] 孙锦余，刘晓伟，戴高峰，等.15 MW 生物质循环流化床 NO_x 和温室气体排放特性[J].洁净煤技术，2023，29(9)：32-37.

[10] Nunes L J R，Matias J C O，Catalão J P S.Mixed biomass pellets for thermal energy production：A review of combustion models[J].Applied Energy，2014，127：135-140.

[11] Gómez M A，Porteiro J，De la Cuesta D，et al.Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler[J].

Fuel,2016,184:987-999.
[12] Zadravec T,Rajh B,Kokalj F,et al.Influence of air staging strategies on flue gas sensible heat losses and gaseous emissions of a wood pellet boiler:An experimental study[J].Renewable Energy,2021,178:532-548.
[13] Zadravec T,Rajh B,Kokalj F,et al.CFD modelling of air staged combustion in a wood pellet boiler using the coupled modelling approach[J].Thermal Science and Engineering Progress,2020,20:100715.
[14] Buchmayr M,Gruber J,Hargassner M,et al.A computationally inexpensive CFD approach for small-scale biomass burners equipped with enhanced air staging[J].Energy Conversion and Management,2016,115:32-42.
[15] Kær S K.Numerical modelling of a straw-fired grate boiler[J].Fuel,2004,83(9):1183-1190.
[16] 马括,邬思柯,王小聪,等.生物质颗粒燃料层燃燃烧的FLIC数值模拟与分析[J].可再生能源,2015,33(5):766-770.
[17] Gómez M A,Martín R,Chapela S,et al.Steady CFD combustion modeling for biomass boilers:An application to the study of the exhaust gas recirculation performance[J].Energy Conversion and Management,2019,179:91-103.
[18] Wiese J,Wissing F,Höhner D,et al.DEM/CFD modeling of the fuel conversion in a pellet stove[J].Fuel Processing Technology,2016,152:223-239.
[19] Gómez M A,Porteiro J,De la Cuesta D,et al.Dynamic simulation of a biomass domestic boiler under thermally thick considerations[J].Energy Conversion and Management,2017,140:260-272.
[20] Somwangthanaroj S,Fukuda S.CFD modeling of biomass grate combustion using a steady-state discrete particle model (DPM) approach[J].Renewable Energy,2020,148:363-373.
[21] Chapela S,Porteiro J,Miguez J L,et al.Eulerian CFD fouling model for fixed bed biomass combustion systems[J].Fuel,2020,278:118251.
[22] Bermúdez C A,Porteiro J,Varela L G,et al.Three-dimensional CFD simulation of a large-scale grate-fired biomass furnace [J].Fuel Processing Technology,2020,198:106219.
[23] Diba M F,Karim M R,Naser J.Numerical modelling of a bubbling fluidized bed combustion:A simplified approach[J].Fuel,2020,277:118170.
[24] Thunman H,Leckner B,Niklasson F,et al.Combustion of wood particles-a particle model for Eulerian calculations[J].Combustion and Flame,2002,129(1/2):30-46.
[25] Rajh B,Gómez M A,Álvarez-Bermúdez C,et al.Assessment of experimental 1D and analytical 3D steady approaches of packed bed thermal conversion through the simulation of a 60 kW biomass boiler operating at half and full load[J].Energy Conversion and Management,2022,268:116003.
[26] Patronelli S,Antonelli M,Tognotti L,et al.Combustion of wood-chips in a small-scale fixed-bed boiler:Validation of the numerical model through in-flame measurements[J].Fuel,2018,221:128-137.
[27] Porteiro J,Granada E,Collazo J,et al.A model for the combustion of large particles of densified wood[J].Energy & Fuels,2007,21(6):3151-3159.
[28] 杨照,刘雪敏,张肖阳,等.循环流化床锅炉炉膛流动特性数值模拟进展[J].煤炭学报,2021,46(10):3365-3376.
[29] 陆燕宁,章洪涛,许岩韦,等.烟气再循环对生物质炉排炉燃烧影响的数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(10):1898-1906.
[30] 余有芳,尚鹏鹏,盛奎川.生物质燃烧烟气排放特性与污染物控制[J].农业工程,2017,7(2):50-54.
[31] 罗永浩,张敏,邓睿渠,等.生物质层燃锅炉低NO_x燃烧技术的研究[J].动力工程学报,2018,38(12):957-964.
[32] 郑闽锋,孙加康,龚凌诸,等.垃圾焚烧锅炉二次风风速对NO_x污染控制及热效率影响的研究[J].锅炉技术,2023,54(5):8-16.
[33] 程晓磊.煤粉燃烧时富氧部分气化对NO_x生成的影响研究[J].煤炭科学技术,2021,49(3):215-221.
[34] GB13271—2014锅炉大气污染物排放标准[S].

(编辑:贾丽红)