

高浓度煤粉预燃式强稳燃低氮燃烧器配风组织优化研究

张瀚霖¹, 周旭^{1,2}, 张锋^{1,3}, 谭厚章¹, 郑海国¹, 刘一², 林山虎², 王学斌¹

(1. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 四川 成都 611731;

3. 山东舜业压力容器有限公司, 山东 济南 250300)

摘要: 煤粉预燃低氮燃烧技术可兼顾稳定燃烧与 NO_x 排放控制, 在燃煤锅炉灵活性调峰稳燃领域的应用潜力巨大。依托 5 MW 燃烧试验平台, 研究了团队所开发的一种带小型预燃室的高浓度煤粉预燃低氮燃烧器运行性能。通过 CFD 数值模拟, 系统研究了一次风率、内外二次风配风与分离式燃尽风 (SOFA) 对燃烧器燃烧性能及污染物排放特性的影响。结合 5 MW 燃烧试验平台测试结果对燃烧模型进行验证, 试验实际温度与数值计算结果的最大偏差为 44 °C, 误差范围±3.3%, 证明了所选燃烧模型的准确性。研究表明: 一次风率是影响预燃室环形回流区的关键因素, 过低或过高的一次风速会分别对稳燃能力与降氮能力产生影响, 在约 8.8% 的一次风率条件下能够保证有充足的回流量, 有利于煤粉着火和排放控制; 升高内二次风率能卷吸更多炉膛内高温烟气, 有利于煤粉燃尽, 但炉膛内部高温氧化性气氛区域增加, 会导致污染物排放有所升高, 约为 43.5% 的内二次风率能兼顾稳燃与降氮效果; 采取适当比率的 SOFA 替代外二次风, 能使得燃烧区域的含氮化合物更易被还原, 从而降低排放, 在 23%SOFA 风率下出现明显的低氮效果, NO_x 排放为 72 mg/m³(6%O₂), 与 0%SOFA 风率相比减排约 67%。

关键词: 预燃低氮燃烧; 燃烧器; 配风优化; 数值模拟; NO_x 排放

中图分类号: TK16

文献标志码: A

Optimization of air distribution of high concentration pulverized coal pre-combustion strong stable combustion low nitrogen burner

ZHANG Hanlin¹, ZHOU Xu^{1,2}, ZHANG Feng^{1,3}, TAN Houzhang¹, ZHENG Haiguo¹, LIU Yi², LIN Shanhu², WANG Xuebin¹

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Key Laboratory for Clean Combustion and Flue Gas Purification of Sichuan Province, Chengdu 611731, China

3. Shandong Shunye pressure vessel Co., Ltd, Jinan 250300, China)

Abstract: The low nitrogen combustion technology of pulverized coal pre-combustion can balance stable combustion and NO_x emission control, which has great application potential in the field of flexible peak shaving and stable combustion of coal-fired boilers. Based on the 5 MW combustion test rig, the operation performance of a high-concentration pulverized coal pre-combustion low-nitrogen burner with a small pre-combustion

chamber developed by the authors' team was studied. The effects of primary air rate, internal and external secondary air distribution and separate over-fire air (SOFA) on the combustion performance and pollutant emission of the burner were systematically studied by CFD numerical simulation. The combustion model was verified by the test results of the 5 MW combustion test rig. The maximum deviation between the actual temperature and the numerical calculation results is 44 °C, and the error range is $\pm 3.3\%$, which proves the accuracy of the selected combustion model. The results show that the primary air rate is the key factor affecting the backflow zone of the pre-combustion chamber, and too low or too high primary air rate will affect the combustion stability and nitrogen reduction ability respectively. Under the condition of 8.8% primary air rate, sufficient backflow can be guaranteed, which is conducive to the ignition and emission control of pulverized coal. Increasing the internal secondary air rate can entrain more high-temperature flue gas in the furnace, which is conducive to the burning of pulverized coal. However, the increase of the high-temperature oxidizing atmosphere area in the furnace will lead to the increase of pollutant emission. The internal secondary air rate of about 43.5% can both stabilize combustion and reduce nitrogen. Replacing the external secondary air with an appropriate proportion of SOFA can make the nitrogen-containing compounds in the combustion area more easily reduced, thus reducing emissions. At 23% SOFA rate, a significant nitrogen reduction effect was observed, with NO_x emissions of $72 \text{ mg/m}^3(6\% \text{O}_2)$, a reduction of about 67% compared to 0% SOFA rate.

收稿日期: XXXX-XX-XX 责任编辑:

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目 (2022YFB4100500)

作者简介: 张瀚霖 (2001-), 男, 福建晋江人, 西安交通大学能源与动力工程学院硕士研究生, 研究方向为先进煤粉强稳燃技术。

helenz0609@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 王学斌 (1984-), 男, 山东昌邑人, 西安交通大学能源与动力工程学院教授、博士生导师, E-mail:wxb005@mail.xjtu.edu.cn.

Key words: Pre-combustion low nitrogen combustion; Burner; Air distribution optimization; Numerical simulation; NO_x emission

0 引 言

在世界能源结构的发展目标下, 可再生能源将逐渐占据主要地位。我国承诺到 2030 年实现碳达峰, 到 2060 年实现碳中和。为实现“双碳”目标, 预计到 2030 年, 我国风能和太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦时^[1]。然而, 可再生能源的消纳问题现如今还未实现有效解决, 部分地区的弃风、弃光现象较为严重^[2-3]。为了提高新能源利用率, 满足电网灵活性调峰的需求, 煤电机组的灵活性改造势在必行。这意味着火电调峰问题日益突出, 而如何在低负荷或超低负荷下的稳定运行从而实现宽负荷调峰, 是必须解决的关键问题之一^[4]。

目前, 国内外大型煤电机组主要通过精细化燃烧调整、燃烧和制粉系统改造以及助燃技术改造^[5-6]等措施实现超低负荷稳燃。经过改造, 切圆和对冲燃烧锅炉一般最低可以实现 20%~30% 负荷下的短时间运行, 但在负荷要求进一步降低的情况下则显得困难^[7]。同时, 现有的改造方案往往无法兼顾低负荷运行时的污染物控制, 导致低负荷条件下 NO_x 排放较高。为了兼顾煤电机组在超低负荷下的稳燃能力与降氮能力, 煤粉预燃低氮燃

烧技术近年来持续得到重视与发展。

煤粉预燃低氮燃烧技术的核心思想即将煤粉的燃烧过程分为热解和焦炭燃烧两个部分^[8]。在煤粉送入炉膛之前, 先经过一个预热解过程, 使得煤粉被加热到高温并热解产生大量热解气和焦炭。经过这一过程, 煤粉被转化为具有一定潜热的燃料, 提高了进入炉膛后的燃烧性能, 同时还能借助煤粉热解气中的 NO_x 前驱物将生成的 NO 还原成 N_2 。国内外学者基于这一技术思路进行了大量实验室研究。全俄热工研究院率先探究了煤粉预燃降低 NO_x 的效果探究, 改造方案为: 在原有机组基础上, 增加一个燃气燃烧系统以提供煤粉预热解所需的热量。经过多次实验测试, 在 300 MW 的燃烧设备上, 该技术能够降低 NO_x 排放 60~80%, 减排效果明显, 同时还能显著改善煤粉的着火特性^[9], 但燃气辅热会对该技术大规模工程化应用经济性造成影响。吕清刚等^[10]提出了循环流化床预热燃烧技术, 并在 35 kW 实验台上开展研究。Ouyang 等^[11]进一步在 35 kW 实验台上探讨了预热温度、循环流化床空气当量比等因素对煤粉燃烧特性以及 NO_x 的排放影响。结果表明, 预热燃烧技术能够提升劣质燃料的燃烧特性, 同时有良好的降氮能力。谭厚章^[12]等人搭建了气流床

气化炉预热燃烧实验台，对煤粉的预热特性和预热燃料在燃烧室内燃烧特性进行研究，结果表明煤粉经预热后转化为高温煤气和预热半焦，燃烧特性相比于原煤得到改善，且煤中氮元素转化率高达 69.74%，大部分转化为 N_2 ，有利于抑制 NO_x 生成。

以上研究均证明了预热低氮燃烧技术在稳定燃烧和降氮能力上的优势，而如何将其应用于煤电机组的实际工程中则是未来亟需解决的问题。本文依托 5 MW 燃烧试验平台，对研究团队近年来所开发的一种带小型预燃室的高浓度煤粉预燃强稳燃低氮燃烧器进行试验验证与数值模拟，以验证其运行性能。通过分析不同配风组织下该燃烧器的燃烧性能与降氮能力，对其实际运行的参数进行优化，深入挖掘其在燃煤锅炉灵活性调峰稳燃领域的应用潜力。

1 预燃式低氮燃烧器几何模型

基于适配 5MW 燃烧试验平台的燃烧器实际尺寸，使用 Solidworks 软件对所设计的预燃低氮燃烧器进行了物理建模。燃烧器风道从内到外由中心风、一次风、内二次风和外二次风构成，内二次风道设有可调旋流叶片。同时，该燃烧器的主要特征在于具备小型预燃室，主要作用在于：一次风携带高浓度煤粉进入预燃室，由于其内部过量空气系数低，将主要发生气化预分解反应，产生的碳烟和碳氢化合物会与 NO 发生还原反应，使得预燃室内部燃料氮主要以 HCN 、 NH_3 、 N_2 和焦炭氮的形式存在。同时，通过合理控制旋流风，能够在预燃室及炉膛内形成回流区，卷吸高温烟气并使主燃区处于低氧的还原性气氛中，有利于降低 NO_x 的排放。

燃烧试验平台为 L 型结构，水平段为主要燃烧区域。本文采用 ICEM 对几何模型进行网格划分，对整个燃烧器区域使用六面体结构化网格进行划分。针对各风道及预燃室内部，其流场计算的准确性对于预燃室燃烧器的模拟结果至关重要，因此，对其进行边界层网格加密，共 15 层网格，增长率为 1.2。包括试验台与燃烧器在内的计算域最终建模与燃烧器网格划分效果如图 1 所示。

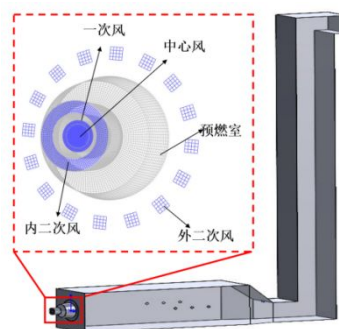


图 1 试验台结构与燃烧器网格划分

Fig.1 Furnace structure and grid of the burner

2 数值模拟设置与计算工况

2.1 数值模拟方法与边界条件设置

本文使用 ANSYS Fluent 2019 R2 对燃烧器和炉内的湍流流动、换热和化学反应进行了模拟。采用 SIMPLE 算法求解速度场和压力场。湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型，该模型已被验证带旋流的湍流流动^[13-14]，与本文所模拟对象匹配。Discrete Ordinate (DO) 辐射模型适用于有内热源的模型，而煤颗粒之间的相互辐射是煤着火的重要机理^[15]。因此，选用 DO 辐射模型来模拟辐射传热。气相辐射吸收系数采用精确性高的 Weighted Sum of Gray Gases (WSGGM) 模型计算^[16]。煤的脱挥发过程采用两步竞争反应模型来进行模拟，认为挥发分的挥发速率受挥发分含量的影响^[17]。焦炭的燃烧过程选用扩散-动力反应模型进行模拟。该模型认为焦炭表面的燃烧过程同时受焦炭表面的反应速率和 O_2 向颗粒表面的扩散速率影响，能够较好的模拟焦炭的实际燃烧状况^[18]。对于挥发分气相燃烧过程，参考 Wang 等人的工作^[19]，可以认为煤的挥发分气相为单一组分，根据元素守恒可以假设其组成为 $C_aH_bO_c$ 。经计算，本研究所选用的煤种的挥发分成分可假设为 $C_{1.44}H_{2.75}O_{0.57}$ ，并采用涡耗散模型来描述这一过程。由于 NO_x 的生成与主要燃烧反应相比速度慢、生成量少，因此可以使用先前计算的速度、温度和化学场来后期计算 NO_x 的形成^[20]。

由于预燃室整体采用导热系数极低的耐火材料浇筑形成，因此在计算时可将预燃室壁面简化设置为绝热壁面。区别于大型电站锅炉设有水冷壁，结合现场实际条件，实验台卧式炉膛壁面蓄热能力较强，在正常运行条件下壁面温度能维持

在 800 K，因此将炉膛壁面设置为恒温壁面。燃烧器各风道设置为速度入口，炉膛出口设置为压

力出口边界。模拟计算所使用的煤粉参数见表 1。

表 1 煤粉燃料特性

Table 1 Characteristics of pulverized coal

燃料	工业分析 (wt.%, ad)				元素分析 (wt.%, daf)					Q _{net} (MJ/kg,ar)
	V	FC	A	M	C	H	O	N	S	
烟煤	31.03	48.34	14.02	6.61	80.66	4.97	12.70	1.14	0.53	24.32

燃烧器

2.2 网格无关性验证

在开展数值模拟计算之前，本文选择了 54 万、95 万及 132 万 3 种不同网格数量的网格进行网格无关性验证。通过对比相同燃烧工况下水平炉膛轴线上的温度分布，选择合适的网格数进行后续计算。三种网格数量下的计算结果对比如图 2 所示。结果表明，网格数量为 54 万时，计算结果与其余两套网格存在明显差别；而当网格数量达到 132 万后，计算结果与网格数量为 95 万时相比基本不变。综合考虑计算效率与计算精度，本文选择数目为 95 万的网格进行后续模拟计算。

设置完边界条件后，先对冷态流场进行计算，得到充分发展流场后，再加入辐射和燃烧模型进行热态计算。当能量方程及传热方程的残差小于 10^{-6} ，其他各项残差小于 10^{-4} ，且出口截面的 O_2 浓度和炉膛中心截面上的平均温度和速度趋于稳定，则视为计算收敛。最终炉膛温度场中心截面温度的模拟结果与实际测量结果对比如图 3 所示。试验测量温度与数值计算结果的最大偏差 $44\text{ }^\circ\text{C}$ ，误差范围 $\pm 3.3\%$ ，小于工业上常规要求的 10% ，因此，可认为本研究所选取的模型能够较为准确的预测炉膛内的温度分布。进一步地，对比验证工况下炉膛出口截面 NO_x 浓度的模拟值与实验值。模拟炉膛出口截面 NO_x 浓度为 131 mg/m^3 ($6\% O_2$)，实际测量值为 122 mg/m^3 ($6\% O_2$)；模拟焦炭转化率 99.6% ，折算飞灰含碳量 0.67% ，实验测量炉膛出口飞灰含碳量 0.58% 。可见模拟值与实验值吻合度较高，因此可认为选择设置的计算模型与边界条件合理，模拟结果能够较好地与实际燃烧情况吻合。

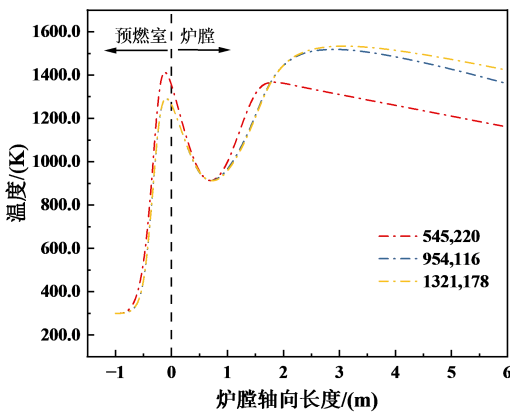


图 2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

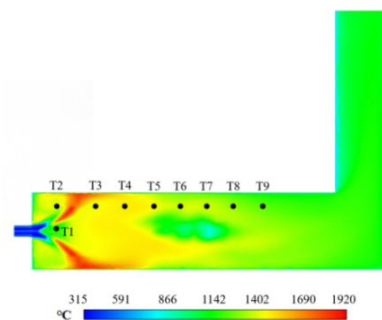
2.3 模型正确性验证

在开展配风组织的多工况计算前，首先对 5 MW 燃烧试验平台上已有的典型旋流燃烧器煤粉燃烧工况进行了模拟计算，以验证本研究所选取的燃烧模型的准确性。验证工况的主要配风参数如表 2 所示。

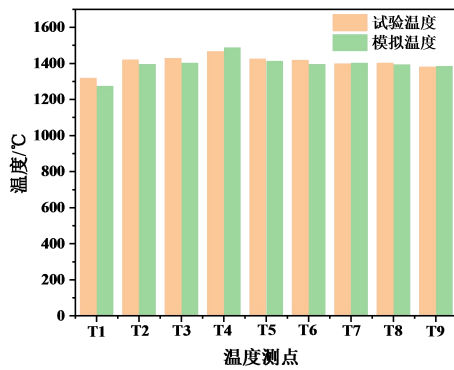
表 2 验证工况主要配风参数

Table 2 Air distribution parameters of verified condition

燃烧器	一次风	旋流风	一次风	二次风
	率/%	率/%	温/K	温/K
典型旋流	21	28	333.15	533.15



(a)典型燃烧工况模拟结果及温度测点布置



(b)典型燃烧工况试验与模拟对照

图3 试验台典型燃烧工况准确性验证

Fig.3 Test rig typical combustion condition accuracy verification

2.4 计算工况设计

高浓度煤粉燃烧器通过改变一次风率，可以直接调控煤粉浓度，从而明显缩短着火时间和稳定燃烧，是一种经济环保的燃烧技术^[21]。对于该预燃低氮燃烧器，为了保证煤粉在预燃室内有充足的停留时间，其一次风率设计约为典型旋流

燃烧器的 1/2。这意味着，其煤粉浓度约为典型旋流燃烧器的 2 倍，一般约为 1.5~1.8。但煤粉浓度提高也意味着气固两相混合变差及燃尽效果等问题，因此一次风率的优化设计对本燃烧器的应用至关重要。此外，本文所发展的预燃低氮燃烧器的旋流效果由内二次风提供，内外二次风配比对组织预燃室及炉膛内流场起着至关重要的作用。5 MW 试验平台的水平燃烧段设有分离型燃尽风 (SOFA) 的喷口，其目的主要是通过空气分级控制氮氧化物排放。本研究重点关注预燃低氮燃烧器在不同配风条件下的燃烧组织形态与降氮效果。在保证空气过量系数不变情况下，本研究分别改变基础工况的一次风率、旋流内二次风率与 SOFA 风率。模拟计算中，煤粉通过离散相模型设置由一次风入口边界进入。根据表 1 中的相关热值，计算得到满负荷下煤粉的输入量为 0.21 kg/s。一次风温为 70 °C，二次风温为 260 °C。各工况主要配风见表 3。

表3 模拟工况主要参数

Table 3 Main parameters of simulated working conditions

工况	中心风率 (%)	一次风率 (%)	内二次风率 (%)	外二次风率 (%)	SOFA 风率 (%)	
基础工况	2.7	8.8	43.5	45.0	0.0	
变一次风率工况	工况 1	2.7	5.0	45.4	46.9	0.0
	工况 2	2.7	12.0	41.9	43.4	0.0
变二次风率工况	工况 3	2.7	8.8	37.5	51.0	0.0
	工况 4	2.7	8.8	50.0	38.5	0.0
	工况 5	2.7	8.8	43.5	34.0	11.0
变 SOFA 风率工况	工况 6	2.7	8.8	43.5	22.0	23.0
	工况 7	2.7	8.8	43.5	11.0	34.0
	工况 8	2.7	8.8	43.5	0.0	45.0

3 结果与分析

3.1 一次风率影响

不同一次风率工况下的中心截面速度分布云图如图 4 所示。分析该燃烧器基础工况的速度分布，可以发现：内二次风与一次风分离布置的方式使内二次风对一次风的卷吸能力降低，且一次风气流刚性较强，不会与内二次风迅速混合，而是以一股相对独立的射流的形式进入炉膛。该送风方式保证了由一次风输送的煤粉在预燃室的还原性气氛下有充足的反应时间。同时，也控制了预燃室内的 O₂ 浓度，避免预燃室内的高温燃烧环境导致较高的 NO_x 排放量。对比三个工况下

预燃室内的速度分布，可以发现：随着一次风率的升高，预燃室内的高速区域增加。进一步分析预燃室内流场分布，可以发现预燃室内的速度分布来源于环形回流区。这说明，随着一次风率的增加，环形回流区逆向速度增大，也即回流流量增大，这将有利于煤粉在预燃室内充分反应与稳定着火^[22]。分析认为，这是因为随着一次风射流速度的增大，环形回流区内的负压增大，对内二次风的卷吸能力增强，从而使得回流区内的逆向速度增大。

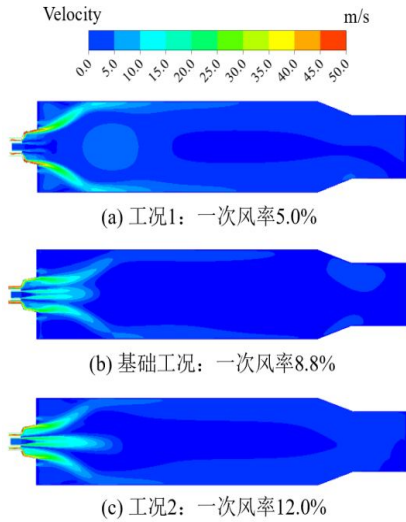


图 4 不同一次风率下中心截面速度分布
Fig.4 Velocity distribution of central section under different primary air rates

对比不同一次风率工况下中心截面的温度分布，如图 5 所示。由图可知，高温区主要分布在预燃室内及二次风与火焰的混合位置。预燃室壁面绝热且空间小，被环形回流区卷吸回预燃室的部分煤粉在预燃室内与回流的内二次风混合剧烈燃烧，为煤粉的稳定着火提供足够的热量。随着一次风速的增大，高温区逐渐向预燃室深处移动，结合三个工况的流场，分析该现象的成因为：随着一次风速的增大，环形回流区的回流流量增大，卷吸的内二次风量增大，使得着火位置向一次风靠近。此外，观察火焰形状，发现存在“火焰偏心”现象。分析其成因，认为旋流燃烧器使得火焰和烟气带旋，炉膛右侧烟气旋转方向向上，左侧烟气旋转方向向下，从而导致炉膛内两侧烟气速度不同。右侧烟气速度较高、压强小，因此火焰向右侧偏心。

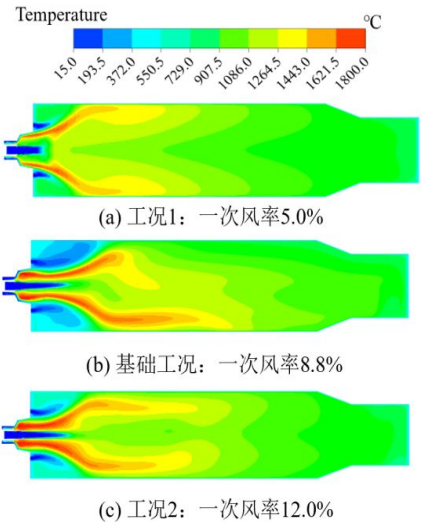
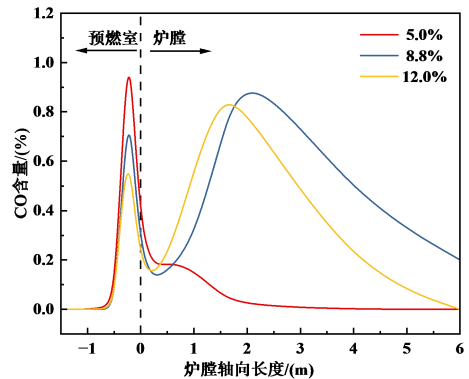
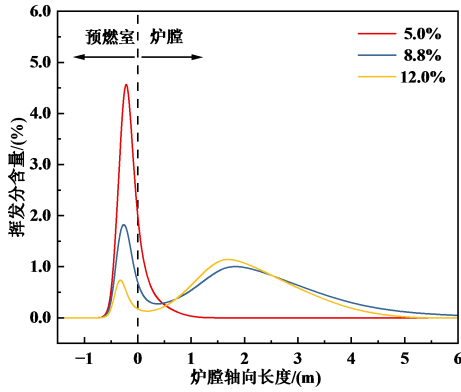


图 5 不同一次风率下中心截面温度分布
Fig.5 Temperature distribution of central section under different primary air rates

进一步比较了不同一次风率工况下沿燃烧器出口中心线的组分分布，如图 6 所示。由图可见，随着一次风速的增加，在预燃室内，CO 与挥发分浓度减小；而在炉膛内，则呈现出相反的规律。结合流场分析可知，这主要是因为一次风率的增加产生了更强的卷吸效果，充足的回流风量进入预燃室内，使得煤粉完全燃烧，所以预燃室内 CO 与挥发分浓度下降。相对的，由于炉膛内部分空气被带走，该区域的焦炭发生不完全燃烧生成大量 CO。同时，高速的一次风与炉膛内二次风的混合将会变差，从而延缓了炉膛内挥发分析出的过程，使得炉膛内挥发分的分布范围随一次风速的增大而增大。



(a) CO



(b) 挥发分

图 6 不同一次风率下沿燃烧器出口中心线的组分分布

Fig.6 Comparison of gas content along the horizontal furnace under different primary air rates

图 7 对比了不同一次风率工况下炉膛出口焦炭的燃尽程度与 NO_x 浓度。由图可见，增大一次风率后，火焰的着火和燃尽效果变差，焦炭转化率下降明显。同时，随着一次风率从 5.0% 增加到 12.0%，出口截面 NO_x 浓度呈现出先降后升的规律。结合组分分布，分析认为，高一次风速将会破坏炉膛内的大回流区，使得焦炭的燃烧速率降低，表现为 CO 在炉膛中分布区域变得更加集中且总体面积增大。由于挥发分的析出范围随一次风增加有所增大，因此适当升高一次风率将存在一个最优区域，使得挥发分析出位置包含于 CO 大量存在的还原性区域，这将有利于抑制挥发分氮向 NO 转移，同时将预燃室及炉膛大回流区内卷吸烟气中的 NO 还原成 N_2 ，从而降低排放。而当一次风速过高时，大回流区被破坏，无法卷吸并还原烟气中的 NO，将导致出口截面排放偏高。

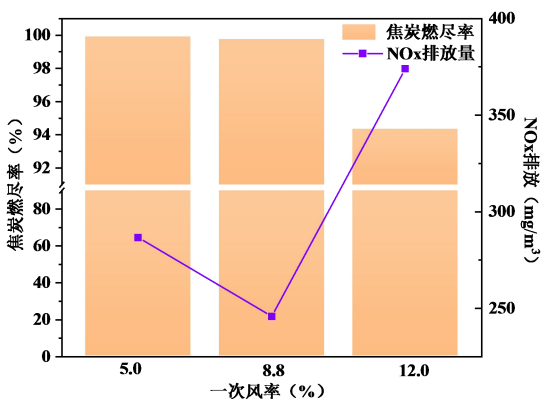


图 7 不同一次风率下焦炭燃尽率与 NO_x 排放对比

Fig.7 Comparison of burnout rate and NO_x emission under different primary air rates

3.2 内外二次风配比影响

不同内外二次配比工况下的中心截面速度分布云图如图 8 所示。内二次风率对流场的影响主要表现在旋流射流的刚性和对回流区的影响上。工况 3 的内二次风速度低，导致其刚性较小，在预燃室出口速度降低并迅速向一次风射流靠拢，与一次风射流的混入位置提前。工况 4 的内二次风速较高，在离开预燃室后还能保持较好的刚性，与一次风的混合位置偏后，从而实现控制 NO_x 排放。

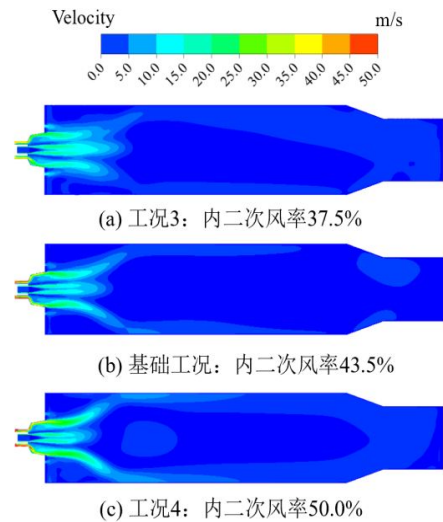


图 8 不同内二次风率下中心截面速度分布

Fig.8 Velocity distribution of central section under different internal secondary air rates

对比不同一次风率工况下中心截面的温度分布，如图 9 所示。可以发现，三个工况预燃室内的高温区变化并不大。在炉膛内，降低内二次风率，则旋流强度减弱，导致内二次风对炉膛内火焰的扰动较小，焦炭燃烧速率降低，火焰高温区整体后移。而与基础工况相比，升高内二次风率则能够在炉膛中心形成较为靠前的回流区，这有利于卷吸炉膛内的高温烟气返回预燃室，保证煤粉燃尽。同时，随着内二次风率的增大，旋流效果增强，“火焰偏心”现象也逐渐明显，在工况 4 内二次风率 50% 的条件下，火焰出现了明显的右偏贴壁现象。

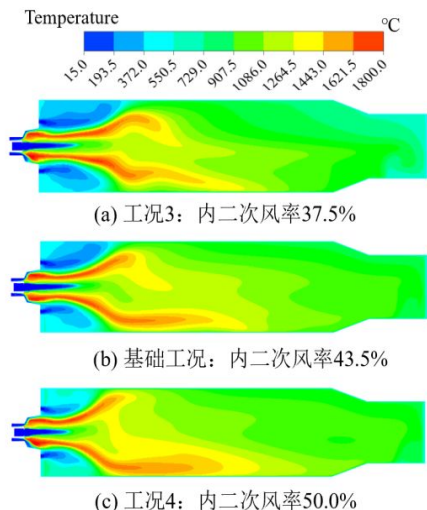
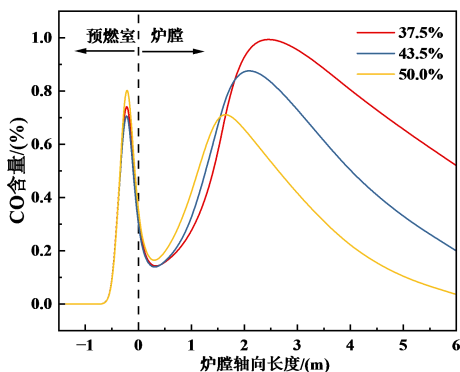


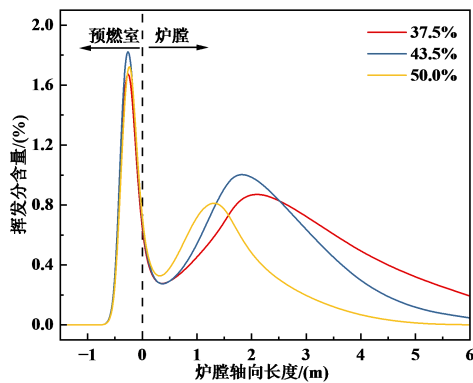
图9 不同内二次风率下中心截面温度分布

Fig.9 Temperature distribution of central section under different internal secondary air rates

进一步比较了不同内二次风率工况下沿燃烧器出口中心线的组分分布，如图 10 所示。随着内二次风率的增加，CO 分布集中于炉膛前端。结合速度与温度场分布可知，出现该现象的原因与内二次风旋流强度的变化有关。当内二次风率增加时，旋流风导致的回流效果增强，反应更多地集中发生在炉膛前端，因此 CO 分布会向炉膛前端集中分布。相同的规律在挥发分分布中也能体现，从其分布曲线的峰值位置可以明显看到，随着内二次风率的增加，挥发分的析出位置逐渐提前。



(a) CO



(b) 挥发分

图 10 不同内二次风率下沿燃烧器出口中心线的组分分布

Fig.10 Comparison of gas content along the horizontal furnace under different internal secondary air rates

图 11 进一步对比了内二次风率变化对炉膛出口焦炭的燃尽程度与 NO_x 浓度的影响。由图可知，随着内二次风率的增加，炉膛燃尽程度有所改善，但 NO_x 排放却也不断升高。结合组分分布，认为旋流强度增强导致的炉内 CO 分布变化是主要影响因素。在高内二次风率条件下，回流效果的增强能够明显改善燃烧情况，但也使得炉内还原性区域分布范围减小，对于沿程的 NO_x 转化抑制效果减弱，导致最终排放升高。

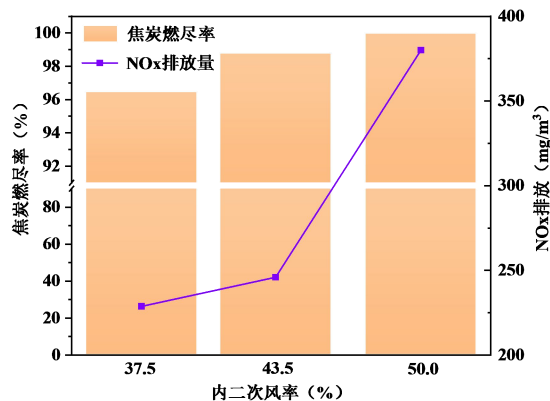


图 11 不同内二次风率下焦炭燃尽率与 NO_x 排放对比
Fig.11 Comparison of burnout rate and NO_x emission under different internal secondary air rates

3.3 SOFA 风率影响

图 12 给出了不同 SOFA 风率下炉膛内部的中心截面温度分布。由图可知，SOFA 的加入使得火焰形状发生明显改变。一方面，SOFA 风率增加，意味着等比率的外二次风被替代，其对火焰在径向的约束力减弱，受到旋流内二次风影响，火焰逐渐呈现出外扩趋势，当 SOFA 风率

增加至 34% 时，火焰出现明显贴壁现象。此外，SOFA 加入位置在原本火焰燃烧末端区域，其加入使得该区域炉膛温度有所下降，燃烧区域被分为两部分，一部分在 SOFA 加入前于低过量空气系数下燃烧，形成良好的还原性气氛；另一部分在 SOFA 补充氧量后进行充分燃烧，呈现出良好的温度均匀性。

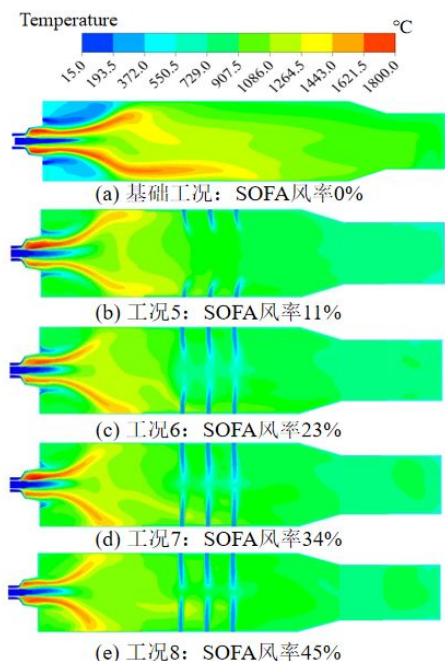


图 12 不同 SOFA 风率下中心截面温度分布

Fig.12 Temperature distribution of central section under different SOFA rates

对比不同 SOFA 风率下炉膛 NO_x 排放，结果如图 13 所示。随着 SOFA 从总风量的 0% 增加至 45%，炉膛 NO_x 呈现先降低后增加的趋势。结合温度分布，分析认为，该变化趋势形成的原因与试验台的结构及 SOFA 送入位置有关：炉膛 SOFA 送入的位置在锅炉水平段的后部，离火焰的主燃烧区不远，SOFA 风量的增大将导致燃烧器内二次风量减少，燃烧初期的 O₂ 浓度降低，使得 HCN、NH₃ 等含氮化合物更易被还原成 N₂。同时，延迟混入的 SOFA 能够扩大燃烧区域的还原性气氛区域，促进预燃室内生成的气态烃化物将 NO 还原成 N₂。当 SOFA 风量增加到 23% 后，继续增大 SOFA 风量则会导致燃烧初期 O₂ 浓度过低，燃烧发生明显延迟，火焰后移至 SOFA 喷口附近位置。在该区域，大量 SOFA 的加入提供了充足的 O₂，炉膛后部燃烧剧烈，NO_x 前驱物向 NO_x 方向迁移，导致 NO_x 生成量反而增加。在 23%SOFA 风率下出现

明显的低氮效果，NO_x 排放为 72 mg/m³(6%O₂)。

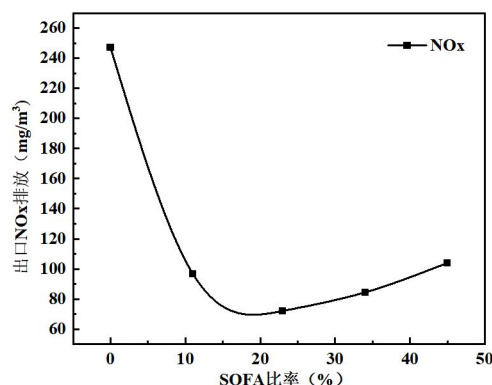


图 13 不同 SOFA 风率下 NO_x 排放

Fig.13 NO_x emission under different SOFA rates

4 结 论

本研究依托 5 MW 燃烧试验平台，研究了团队所开发的一种带小型预燃室的高浓度煤粉预燃低氮燃烧器运行性能。在验证计算模型准确性的前提下，通过 CFD 数值模拟，系统研究了一次风率、内外二次风配风与分离式燃尽风 (SOFA) 对燃烧器燃烧性能及污染物排放特性的影响，主要结论如下：

1) 过低的一次风速会导致预燃室内的烟气卷吸量下降，对煤粉燃尽不利；一次风速过大则会破坏炉膛内的大回流区，导致出口截面 NO_x 浓度增大。数模结果表明，一次风率在 ~8.8% 条件下能够保证预燃室环形回流区有充足的回流量，有利于煤粉着火和排放控制。

2) 内二次风率过低时，旋流对炉膛内火焰的扰动较小，焦炭燃烧速率降低。随着内二次风率的增加，火焰能够在炉膛中心形成较大的回流区，有利于煤粉燃尽，但炉膛内高温氧化气氛区域也增加，导致 NO_x 排放显著升高。

3) 随着 SOFA 风率的增大，炉膛 NO_x 呈现先降低后升高的变化趋势。采取适当的 SOFA 替代外二次风，能使得前端燃烧区域的含氮化合物更易被还原成 N₂。但继续增大 SOFA 风量则会导致燃烧初期 O₂ 浓度过低，燃烧发生明显延迟，反而不利于排放控制。在 23%SOFA 风率下出现明显的低氮效果，NO_x 排放为 72 mg/m³(6%O₂)。

参考文献 (References) :

- [1]黄畅, 张攀, 王卫良,等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略[J]. 热力发电, 2021, 50(04):1-6.
- HUANG Chang, ZHANG Pan, WANG Weiliang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality[J]. Therm Power Gener, 2021, 50(04):1-6.
- [2]周强, 汪宁渤, 何世恩,等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [3]周强, 汪宁渤, 冉亮, 等. 中国新能源弃风弃光原因分析及前景探究[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 7-12.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, RAN Liang, et al. Cause analysis on wind and photovoltaic energy curtailment and prospect research in China[J]. Electric Power, 2016, 49(9): 7-12.
- [4]Zhou J, Zhang L, Zhu L, et al. A data-driven operating improvement method for the thermal power unit with frequent load changes[J]. Applied Energy, 2024, 354.
- [5]鲁鹏飞, 薛宁. 超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 87-92.
- LU Pengfei, XUE Ning. Study on the stable combustion modification plan of supercritical boiler ultra-low load peaking operation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 87-92.
- [6]焦庆丰, 雷霖, 李明, 等. 国产 600 MW 超临界机组宽度调峰试验研究[J]. 中国电力, 2013, 46(10): 1-4.
- JIAO Qingfeng, LEI Lin, LI Ming, et al. Testing on domestically-made 600 MW supercritical units in broad peak-regulation of power grids[J]. Electric Power, 2013, 46(10): 1-4.
- [7]蒋宏利, 丁海波, 魏铜生. 切圆燃烧锅炉低负荷 NO_x 生成浓度偏高的原因及措施[J]. 中国电力, 2014, 47(12): 13-16.
- JIANG Hongli, DING Haibo, WEI Tongsheng. Cause analysis and prevention plans on high concentration NO_x production at low load in tangentially-firing utility boilers[J]. Electric Power, 2014, 47(12): 13-16.
- [8]吕清刚, 朱书骏, 朱建国, 等. 煤粉预热燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18):6535-6547.
- LÜ Qinggang, ZHU Shujun, ZHU Jianguo, et al. Research and development of pulverized coal preheating combustion technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18):6535-6547.
- [9]ABOVITSER Joseph, BRYAN Bruce, KNIGHT Richard, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO_x reduction from pulverized coal-fired boilers[J]. Gas, 2003, 1(2):4-8.
- [10]吕清刚, 牛天钰, 朱建国, 等. 高温煤基燃料的燃烧特性及 NO_x 排放试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23):81-86.
- LÜ Qinggang, NIU Tianyu, ZHU Jianguo, et al. Experimental study on combustion and NO_x emissions of high temperature preheated coal-based fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(23):81-86.
- [11]OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, LÜ Qinggang. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. Fuel, 2013, 113:122-127.
- [12]谭厚章, 王肖肖, 周必茂, 等. 煤粉气流床气化炉预热燃烧特性及 NO_x 排放试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11):4192-4204.
- TAN Houzhang, WANG Xiaoxiao, ZHOU Bimaog, et al. Experimental study on preheating combustion characteristics and NO_x emission of pulverized coal gas bed gasifier[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11):4192-4204.
- [13] Wang S, Mujumdar A. A comparative study of five low Reynolds number k-ε models for impingement heat transfer[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25:31-44.
- [14] Maele K, Merci B. Application of two buoyancy-modified turbulence models to different types of buoyant plumes[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41:122-138.
- [15] Wang Y, Zhou Y. Numerical optimization of the influence of multiple deep air-staged combustion on the NO_x emission in an opposed firing utility boiler using lean coal[J]. Fuel, 2020, 269.
- [16] Benim A, Canal C, Boke Y. Computational investigation of oxy-combustion of pulverized coal and biomass in a swirl burner[J]. Energy, 2022, 238.
- [17] 范永成, 张飞龙, 王永东, 等. 二次风配比和旋流强度对预热解式低氮旋流燃烧器性能影响的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(12):69-78.
- FAN Yongcheng, ZHANG Feilong, WANG Yongdong, et al. Numerical simulation on the influence of secondary air ratio and swirling intensity on the performance of a pre-combustion low nitrogen swirl burner[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(12):69-78.
- [18] Wang S, Luo K, Hu CS, et al. CFD-DEM Study of the Effect of Cyclone Arrangements on the Gas-solid Flow Dynamics in the Full-loop Circulating Fluidized Bed[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 172: 199-215
- [19] Wang X, Zhang J, Xu X, et al. Numerical study of biomass Co-firing under Oxy-MILD mode[J]. Renewable Energy, 2020, 146:2566-2576.
- [20] Peters A, Weber R. Mathematical modeling of a 2.25 MW(t) swirling natural gas flame .1. Eddy break-up concept for turbulent combustion; Probability density function approach for nitric oxide formation[J]. Combust. Sci. Technol, 1995, 111:67-101.
- [21]宋国良, 周俊虎, 刘建忠,等. 高浓度煤粉输送燃烧技术的利弊分析[J]. 动力工程, 2005, 25(1): 50-54.
- SONG Guoliang, ZHOU Junhu, LIU Jianzhong, et al. Analysis of advantages and disadvantages of conveying and combustion technology of dense phase pulverized coal[J]. Power Engineering, 2005, 25(1): 50-54.
- [22]王小龙, 张飞龙, 王里, 等. 一次风速对高浓度煤粉预燃式低氮燃烧器性能影响的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(04):132-138.
- WANG Xiaolong, ZHANG Feilong, WANG Li, et al. Numerical simulation of the effect of primary wind velocity on the performance of high concentration pulverized coal precombustion low nitrogen burner[J]. Clean Coal

