

新型预热式燃烧器氨-煤混燃特性数值模拟研究

刘坐东, 陈子轩*, 韩晓菊, 唐宏, 孙灵芳

(东北电力大学, 吉林省 吉林市 132012)

Numerical Simulation Study on Characteristics of Ammonia-coal Cofiring in a Novel Preheated Burner

LIU Zuodong, CHEN Zixuan*, HAN Xiaojun, TANG Hong, SUN Lingfang

(Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: As a carbon-free fuel, ammonia is one of the high-quality alternatives to coal. However, its high ignition temperature and low laminar flame velocity pose significant challenges for ignition systems. To enhance the combustion characteristics of ammonia-coal cofiring, this study proposes an ammonia-coal hybrid burner with preheating capability and investigates its preheating combustion performance under different ammonia blending ratios and injection configurations through numerical simulations. The results show that the burner can form a stable preheating zone in the middle and rear parts under the condition of 0~50% ammonia blending, with a core temperature above 1200 K. The preheating performance of the burner under different ammonia blending ratios is significantly higher than that under pure coal conditions. In 10%~50% ammonia-blended conditions, the burner outlet temperature increases by 1.3%~41.4% (10~315 °C) and the enthalpy increase grows by 4.7%~15.1% (130~420 kJ/s) relative to pure coal conditions. Through fuel pyrolysis and combustion within the burner, partial fuel nitrogen is released and completely converted into nitrogen gas. The fuel nitrogen fixation rate in 10%~50% ammonia-blended conditions shows 1%~28% improvement over pure coal combustion, which is expected to reduce NO_x emissions at the furnace outlet.

KEY WORDS: ammonia-coal cofiring; preheating burner; blending ratio; ammonia spraying position; numerical simulation

摘要: 氨作为一种无碳燃料, 是替代煤炭的优质选择之一, 但氨燃料着火温度高, 层流火焰速度较低, 对点火装置形成巨大挑战。为改善氨-煤混燃的燃烧特性, 提出一种带有预

热功能的氨-煤混合燃烧器, 采用数值模拟的方法研究不同掺氨比例及掺氨方式下燃烧器内的预热燃烧效果。结果表明, 燃烧器在 0~50%掺氨工况下均能在中后部形成稳定的预热区, 核心温度在 1200 K 以上。不同掺氨比例下燃烧器预热效果显著高于纯煤工况, 10%~50%掺氨工况燃烧器出口温度同纯煤工况相比升高 1.3%~41.4%(10~315℃), 焓值增长 4.7%~15.1%(130~420 kJ/s)。通过燃料在燃烧器中的热解和燃烧, 部分燃料氮被释放出来并完全转化为氮气, 10%~50%掺氨工况的燃料氮的固定率较纯煤工况下提高 1%~28%, 有望降低炉膛出口的 NO_x 排放。

关键词: 氨煤混燃; 预热式燃烧器; 掺混比例; 喷氨位置; 数值模拟

0 引言

随着双碳战略的持续推进, 我国以煤炭为主的一次能源结构正面临大规模改革。截至 2024 年 6 月, 我国清洁能源装机总量已超过火电机组装机, 约占我国发电装机总量的 53.8%^[1]。然而, 可再生能源的间歇性和波动性特征, 在其大规模并网后, 给电网调峰带来巨大挑战。如何有效消纳可再生能源发电中的弃电, 并实现电网的稳定运行, 成为当前能源转型中的关键问题。

氨作为一种潜在的能源载体, 为解决上述问题提供了新的思路。氨作为氢的载体, 可以将可再生能源中产生的这部分弃电或波峰电力合成氨^[2-5], 再通过与高热值燃料在火力发电设备中进行混燃, 既节省了成本, 又减少了煤炭的消耗, 最终达到减碳和消纳弃电的目的。根据《煤电低碳化改造建设行动方案(2024—2027 年)》要求, 到 2025 年, 针对绿氨掺烧机组, 改造后均应具有掺烧 10%绿氨的能力^[6]。2023 年, 我国约有 19.5 亿 t 标煤用于火力发电^[7], 若将 10%的煤炭等热值替换为绿氨燃料, 在

基金项目: 国家自然科学基金项目(52376096); 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20240138KJ)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52376096); Science and Technology Research Project of Jilin Provincial Department of Education (JJKH20240138KJ)。

消纳弃电的同时,燃煤机组的减碳效果将显著提升。通过氨-煤混燃下的平准化电力成本(levelized cost of electricity, LCOE)研究,伴随可再生能源成本下降和碳排放成本的升高,绿氨-煤粉混燃机组将逐渐凸显其经济优势^[8]。这一技术路径不仅为传统火电企业的低碳转型提供了可行方案,也为可再生能源的规模化利用开辟了新途径。

国内外就氨煤混烧进行一系列理论和实验研究。汪鑫^[9]等选用一台45 kW的恒定壁温电热燃烧炉对氨进行0~100%比例掺混。研究表明,燃煤锅炉产生的高温有利于掺氨燃烧锅炉的稳燃与着火。Chae等^[10]基于单燃烧器的改造测试,采用80 kW容量的炉膛进行煤粉掺氨20%燃烧试验,研究发现在掺氨20%时,不存在氨逃逸现象,但燃烧效率略有下降。Yamamoto等^[11]在一台760 kW的卧式煤粉炉中进行20%的掺氨混燃实验,研究发现,侧壁喷口越靠近燃烧器,NO_x的生成量越少。Tamura等^[12]在一台1.2 MW的卧式煤粉炉中研究氨-煤混燃比例与喷氨位置对NO_x的影响,研究表明,从燃烧器侧壁氨喷口的喷入方式比从燃烧器中央氨喷口的方式燃烧生成的NO_x更多。Zhang等^[13]在配备单只低氮旋流燃烧器的8.5 MW燃煤锅炉中进行不同掺氨比例的混燃实验,0~80%的掺氨比例,NO_x含量随着掺氨比例的增加而减少,飞灰中的未燃尽碳增加,在大于40%比例时,氨不能完全燃烧,未燃尽碳含量增加。牛涛等^[14]在40 MW燃煤锅炉氨-煤混燃试验台进行0~25%比例的掺氨实验,实验结果表明,在28 MW负荷下,不同比例的氨-煤混燃皆能很好地燃尽与稳燃;在小比例掺氨时,燃尽风的增加能有效降低NO_x生成,但会影响锅炉效率与运行。

大容量锅炉下的氨-煤混燃试验有力促进了氨煤混燃技术的研究与应用。2023年4月,皖能集团与合肥综合性国家科学中心能源研究院在铜陵完成300 MW多工况下10%~35%比例的掺氨试验^[15];同年12月,国家能源集团在台山完成600 MW燃煤机组的氨-煤混燃试验,成为国内完成掺氨混燃试验的容量最大机组;2024年上半年,日本JERA与IHI在爱知完成1 000 MW燃煤机组的20%比例掺氨试验,成为国际上完成掺氨混燃试验的容量最大机组。目前煤粉-氨混燃在实际推广应用中仍然面临一系列问题,如氨的着火温度较高,进入炉膛后需要吸收足够的热量才会开始燃烧,这会在氧气充足的

主燃区生成大量的NO_x,同纯煤燃烧比较,出口NO_x浓度增加^[16-18];其次,氨燃烧层流火焰速度较低,不利于点火装置的着火及炉内的稳定燃烧^[19-21]。

通过煤粉预热的解技术能够有效解决上述问题,该技术可以将传统燃烧器出口的冷煤粉转变为热煤粉与热煤气,释放的热量能够降低氨燃烧所需要的着火热,并在强还原氛围下将部分燃料氮完全转化为氮气,实现深度降氮^[22];受到预热后的氨气与主要成分为H₂、CO和烃类等的热煤气混合燃烧,能够极大地提高火焰层流速度^[23-25]。煤粉预热解技术因其能促进锅炉稳定燃烧、降低煤粉燃烧产生的NO_x而在近年来受到广大学者的关注,西安交通大学^[26-27]、哈尔滨工业大学^[28]、中科院工程热物理研究所^[29-32]、东北电力大学^[33-37]等科研机构进行一系列的研发与工程验证。本文基于该技术提出一种氨-煤混合预热式燃烧器,探讨不同掺氨工况在燃烧器内的预热燃烧效果和掺氨对燃烧器功能影响,对进一步推动规模化商用以及实验研究提供基础设施与技术具有积极意义。

1 研究对象

本文提出一种带有预热功能的氨-煤混合燃烧器,相较于传统煤粉燃烧器及常规氨-煤混燃系统,在燃烧组织机理与性能上实现显著突破,简化模型及燃烧器内风粉流动如图1所示。该燃烧器采用火焰内还原与煤粉预热解技术,通过在燃烧器内部快速点燃煤粉,使着火提前,降低煤粉所需的着火热;同时,煤粉在预热过程中产生H₂、CO和烃类等高温热解产物显著改善燃料进入炉膛的稳燃特性;在

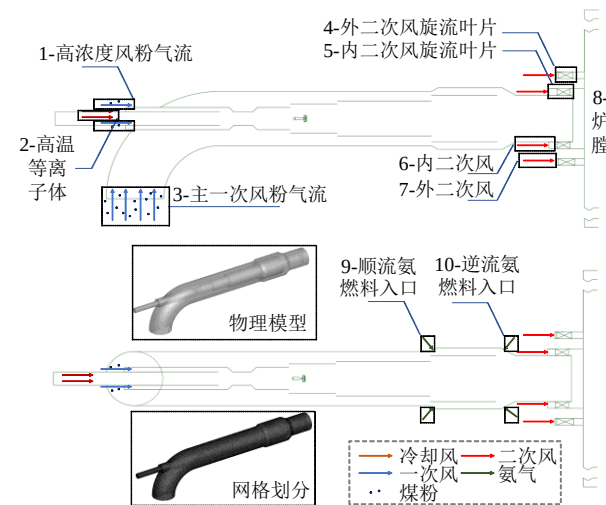


图1 燃烧器模型结构及风粉流动示意

Fig. 1 Schematic diagram of burner model structure and air powder flow

燃烧器内较低的空气系数下，高温区处于还原性气氛，能有效抑制 NO_x 生成。与传统煤粉燃烧器依赖单级直喷或空气分级燃烧，稳燃特性较差相比，新型预热式燃烧器输出的高温再燃燃料能有效改善煤粉稳燃特性，减少等离子点火能耗；与常规氨-煤混燃系统相比，本设计结合尾部预热与煤粉催化裂解产生的高温还原性气氛，强化 NH_3/NO 异相还原反应，使炉内参与燃烧的燃料氮减少，实现深度降氮目的。燃烧器内开始点火时，由点火级一次风入口进入的高浓度煤粉气流在点火级被等离子弧点燃，煤粉火焰依次通过中心钝体和各燃烧级后流入炉膛；燃烧器一次风入口进入燃烧器的主风粉气流逐级进入各燃烧级，放大燃烧级内的中心火焰。在燃烧器水平处各对称布置有两个径向角度为 60° 的顺、逆流氨喷口，分别位于末燃烧级的前端与后端，在纯煤工况时，逆流氨喷口关闭，顺流氨喷口

喷入少量一次风，避免两喷口间流动滞止；在顺流掺氨工况时，逆流喷口关闭，氨气垂直入口截面通过顺流氨喷口进入，并在主煤粉气流的携带下，流经末燃烧级和燃烧器尾部预热后进入炉膛；逆流掺氨工况时，顺流喷口关闭，氨气通过逆流氨喷口进入，经过燃烧器尾部预热后进入炉膛。模型采用非结构四面体网格，数量为 47 万，最低正交质量为 0.26，满足计算要求。

燃烧器全长 5 500 mm，出入口直径 520 mm，结合其技术特点可应用于工业煤粉锅炉或电站煤粉锅炉。燃烧器额定热负荷 62.5 MW，纯煤燃烧所需煤粉量为 2.741 kg/s，根据燃料热值对不同比例掺氨时的通入量进行折算，保证燃烧器的输入热值不变，10%~50%比例的掺氨质量为 0.332~1.66 kg/s。模拟所用煤种分析如表 1 所示。氨燃料采用减压进入管路的常压过热氨蒸气，输入参数如表 2 所示。

表 1 煤种特性分析

Table 1 Analysis of coal characteristics

工业分析/(wt%,ar)				元素分析/(wt%,ar)					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ/kg})$
A	M	FC	V	C	H	O	N	S	
18.74	8.5	44.3	28.46	59.34	3.75	8.24	0.85	0.58	22.8

表 2 氨燃料输入参数

Table 2 Ammonia fuel input parameters

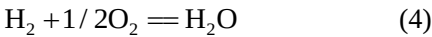
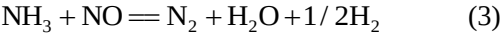
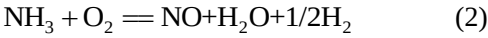
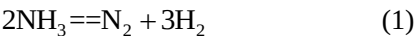
氨气温度/K	氨气密度/(kg/m ³)	低位热值/(MJ/kg)
343	0.6005	18.83

2 数学模型及计算方法

2.1 数学模型

燃烧器内发生的部分燃烧，会涉及复杂的能量和动量传输。在模拟计算中，使用可实现 $k-\epsilon$ (realizable $k-\epsilon$)模型模拟燃烧器内湍流，并选择标准壁面函数(standard wall functions)与该湍流模型形成闭包；在辐射方程求解过程中，采用离散坐标(discrete ordinates, DO)计算模型对辐射方程进行求解；采用涡耗散模型对湍流和化学反应的相互作用求解；针对燃烧过程中的挥发份析出模型选择工程实用性较高的单方程热解(single kinetic rate)模型；焦炭的燃烧则采用表面反应速率(intrinsic)模型进行求解计算。

本文根据 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{C}$ 的燃料体系模拟氨的燃烧过程，其基本过程为简化的 3 步总包^[38]，包括氨的热解、氧化和与 NO 发生的还原反应，结合反应产物氢气的燃烧过程，反应化学方程式为：



涡耗散模型适用于扩散火焰等快速燃烧场景，其湍流主导的假设在工业燃烧器中广泛成立，在保证合理精度的同时更具效率优势。为验证简化机理与详细机理结果的差异，在 30%掺氨工况对使用简化机理的涡耗散模型(eddy-dissipation model, EDM)与使用 R1~R9 的有限速率/涡耗散模型^[38](finite-rate/eddy-dissipation model, FR-EDM)结果进行数据误差对比。采用涡耗散模型的简化机理与采用有限速率/涡耗散模型的详细机理模拟结果如表 3 所示。由表 3 可知，涡耗散模型结果的相对误差均低于 10%，能够准确模拟氨-煤混合燃烧过程。

表 3 涡耗散模型与有限速率/涡耗散模型计算误差对比

Table 3 Comparison of calculation errors between eddy dissipation model and finite rate/eddy dissipation model

参数	EDM	FR-EDM	相对误差/%
出口截面平均温度/K	911.06	856.40	6.38
出口平均速度/(m/s)	96.50	89.25	8.11
出口 $\text{CO}/\%$	1.02	0.97	6.11
出口 $\text{CO}_2/\%$	0.74	0.67	9.47
出口 $\text{NO}/(\text{mg}/\text{m}^3)$	3127.85	2854.24	9.59

2.2 边界条件

1) 入口边界条件。燃烧器各入口设置均采用质量入口,一次风粉和氨燃料的入口温度为 343 K,点火工况时,冷却风管入口温度为 2000 K;自持稳燃工况时,冷却风管入口温度为 343 K。煤粉颗粒温度与输送空气温度一致,粒子速度设置为空气入口速度的 90%。

2) 出口边界条件。燃烧器出口设置采用压力出口,接入的炉膛认为处于微负压状态,燃烧器压力出口静压设置为 -80 Pa,回流温度设置为 600 K。

3) 壁面边界条件。燃烧器根据壁面两侧的流动条件不同划分为两部分,一部分壁面一侧有工质流动,一侧与外界空气接触,此类壁面温度设置为绝热,辐射系数为 0.6;另一部分壁面两侧均有工质流动,壁面温度设置为耦合,辐射系数为 1。

2.3 网格无关及热态试验验证

为确保模拟计算的准确性并控制合理的计算量,采用相同的网格划分方式划分出网格数量分别为 24 万、47 万、106 万、124 万的模型,以排除网格数量因素对计算结果的影响。图 2 和 3 分别为燃

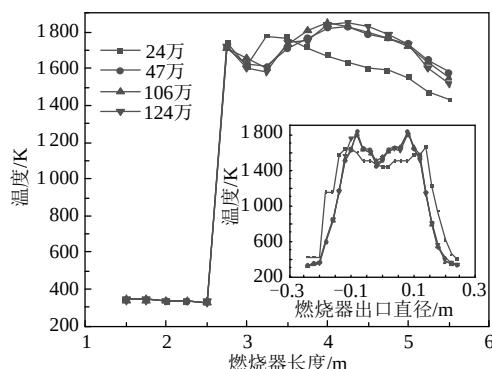


图2 网格数量对燃烧器内温度变化影响曲线

Fig. 2 Curve of the effect of grid quantity on temperature variation in the burner

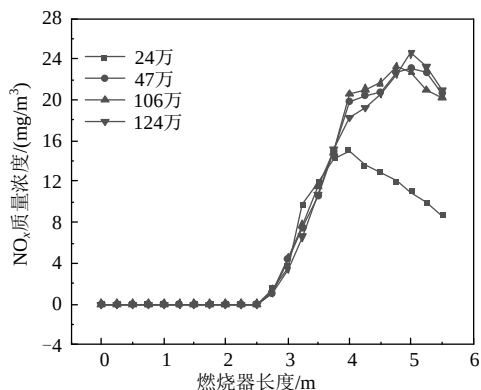


图3 网格数量对燃烧器内 NO_x 变化影响曲线

Fig. 3 Curve of the effect of grid quantity on NO_x variation in the burner

烧器额定输出功率下纯煤工况不同网格数量的度和 NO_x 分布。由图 2、3 可知,受燃烧器尾部收窄产生的高速流动影响,燃烧器中心温度和 NO_x 质量浓度会随流动沿程的增加缓慢下降,当网格数量达到 47 万之后,燃烧器内温度和 NO_x 质量浓度的计算结果变化量很小,模型最终采用 47 万网格数量。

将模拟结果与同类型的预热式燃烧器进行煤粉工况燃烧试验^[39]对照,实验煤与模拟煤在燃烧器内的温度分布曲线如图 4 所示,所得到的燃烧器出口氮氧化物浓度(@6%O₂)和燃烧器出口温度如图 5 所示。由图 4、5 可知,模拟采用的费县煤在燃烧温度分布上并未与试验用的神华烟煤存在较大的区别,模拟煤在各燃烧级和燃烧器出口温度变化均在 5% 以内,能够排除煤种及风量配比数据对模拟结果的干扰。而在热态实验验证中,燃烧器模拟结果与实验结果均处于同一数量级,两者在同风煤比下,模拟工况的出口温度较高,污染物模拟结果数值略低,考虑到模拟工况的负荷更大且工业试验存在一定的测量误差,认为该误差在工业尺度接受范围内,数值模拟结果足够可靠,计算模型选取合理。

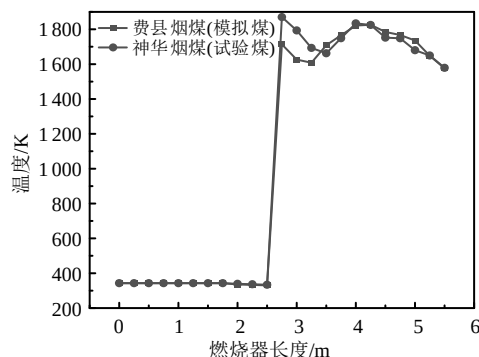


图4 实验煤对燃烧器内温度变化影响曲线

Fig. 4 Curve of the effect of experimental coal on temperature variation in the burner

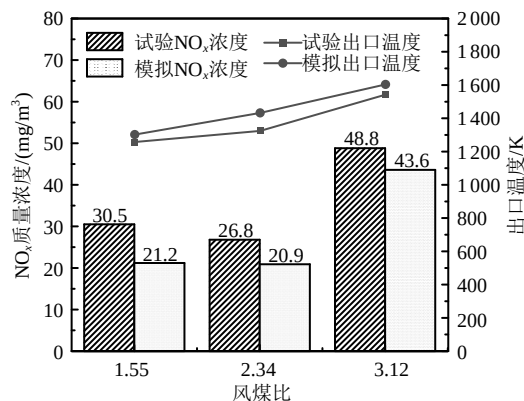


图5 燃烧器实验热态验证

Fig. 5 Thermal verification of burner experiment

3 模拟结果分析

通过对氨-煤混合预热式燃烧器额定负荷下(62.5 MW)掺氨后不同工况的燃烧特性、燃烧器出口温度场分布特性、燃烧器内预热特性的系统研究,探讨掺氨工况在燃烧器内的预热燃烧效果及掺氨对燃烧器功能影响。各工况入口参数如表 4 所示。

表 4 不同掺氨工况入口参数

掺氨比例/%	点火级入口	燃烧器一次	氨气流量 /(kg/s)	点火级入口	燃烧器一次
	煤粉流量 /(kg/s)	风入口煤粉 流量/(kg/s)		空气流量 /(kg/s)	风入口空气 流量/(kg/s)
0	0.15	2.59	0	0.37	5.75
10	0.15	2.32	0.33	0.40	6.08
20	0.15	2.04	0.66	0.45	5.99
30	0.15	1.77	1	0.52	5.90
40	0.15	1.50	1.33	0.52	5.86
50	0.15	1.22	1.66	0.52	5.83

3.1 不同掺氨情况下燃烧器内氨-煤混合燃烧特性

图 6 和 7 为额定负荷下顺流/逆流掺氨方式下燃

烧器的水平轴向截面温度场分布。由图 6、7 可知,在 0~50%的掺氨工况下,燃烧器均能实现稳定的自持预热燃烧,在燃烧器中后段形成 1 200 K 以上的高温区域。燃料在经过预热燃烧过程后,以高温姿态进入炉膛,更易燃烧,强化了燃料燃烧特性。当掺氨比例为 10%~20%时,顺流方式下的氨气在末燃烧级外和燃烧器尾部进行预热,末燃烧级内的中心火焰受到预热影响,温度降低;逆流方式下,氨气进入燃烧器后在燃烧器尾部进行预热,其进入位置并不会影响末燃烧级内的中心火焰,末燃烧级内中心高温燃烧区呈现扩大趋势并向燃烧器前段移动。当掺氨比例为 30%~50%时,顺流方式下的氨气开始大量进入末燃烧级,并在主燃区进行预热、燃烧,受大量冷工质进入燃烧级预热影响,燃烧级内煤粉燃烧产生的中心火焰温度已由纯煤工况的 1 800 K 降至 1 200 K;逆流工况下,由于燃烧级内的中心火焰不受氨气预热影响,中心火焰温度降低幅度比顺流工况小,但仍存在 1 800 K 的高温分布。

进一步选取燃烧器内 4 个截面以分析不同工况

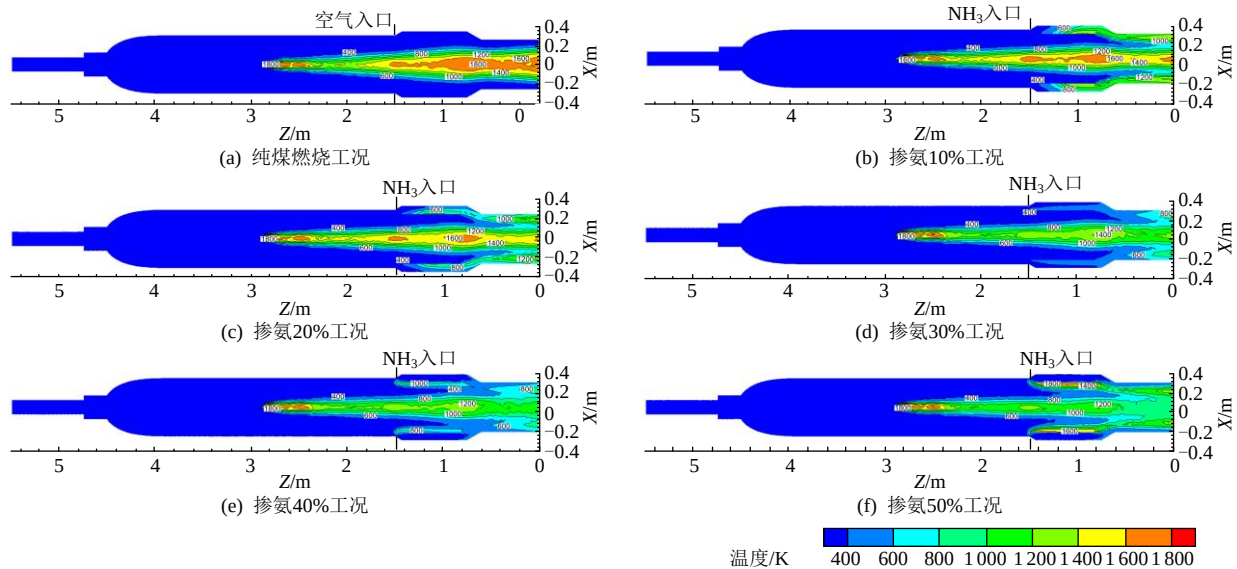
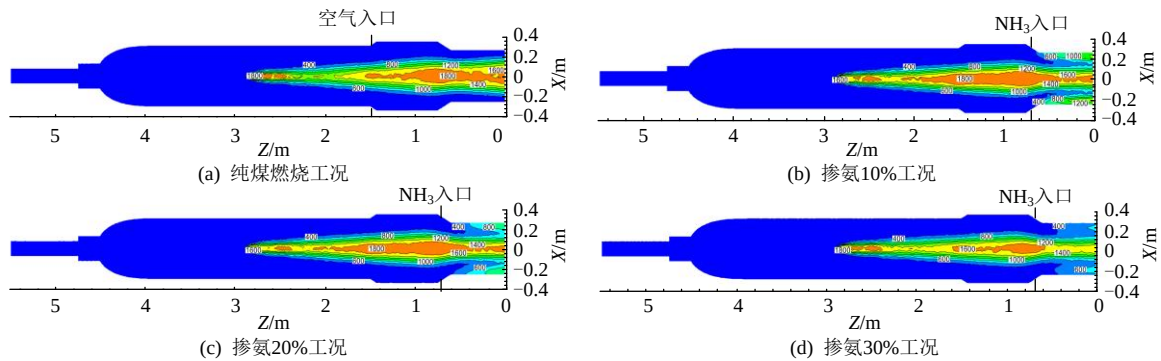


图 6 顺流掺氨下水平轴向截面温度场

Fig. 6 Horizontal-axial cross-sectional temperature field with co-flow ammonia blending



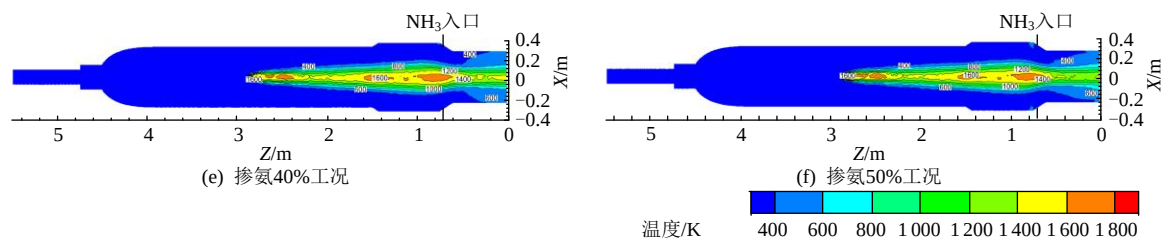


图7 逆流掺氨下水水平轴向截面温度场

Fig. 7 Horizontal-axial cross-sectional temperature field with counter-flow ammonia blending

下燃烧器内温度和流速变化规律,截面选取的具体位置如图8所示。其中,截面1与2的位置分别位于稳燃钝体后与顺流入口前,在燃烧器点火段用于

评价点火段受掺氨工况的影响;截面3与4分别位于逆流入口后与燃烧器出口,在燃烧器预热段用于评价预热段受掺氨工况的影响。

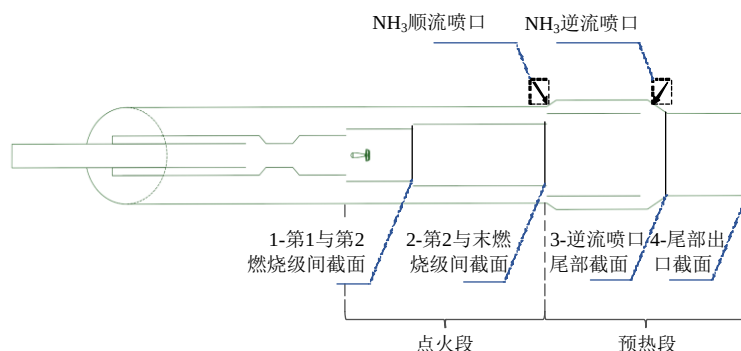


图8 燃烧器内选取截面位置

Fig. 8 Select cross-sectional locations in the burner

在图9(a)中,处于稳定自持预热状态下截面1出口平均温度在475 K以上,随掺氨比例变化很小。这是因为不同掺氨比例下,进入点火级的煤粉燃烧量相差不多,煤粉在该区域燃烧产生稳定的高温火核基本上不受掺氨燃烧影响。尽管如此,由于掺氨比例的变化,导致燃烧器内空气动力特性发生改变,使不同掺氨比例和掺氨方式变化燃烧器内的燃烧特性产生一定影响。同纯煤工况比较,顺流工况的平均温度增加2.2%~3.8%,平均速度增加24%~57.1%,逆流工况的平均温度增加7.5%~8.8%,

平均速度增加5.4%~22%,逆流比顺流方式的平均温度更高,但平均速度更低。图9(b)显示的是截面2的平均温度和速度随掺氨比例和掺氨方式的变化。由于截面2靠近氨燃料喷嘴,其温度变化受掺氨燃料比例影响较大。顺流掺氨工况下,煤粉火焰会受氨喷嘴冷工质吸收热量预热影响,使顺流掺氨的截面2平均温度随掺氨比例的增加呈现降低趋势,同纯煤工况比较降低6.6%~27.3%;逆流掺氨工况下,截面2的平均温度则随着掺氨比例增加呈现先增加后减小的变化。当掺氨比例10%~20%时,

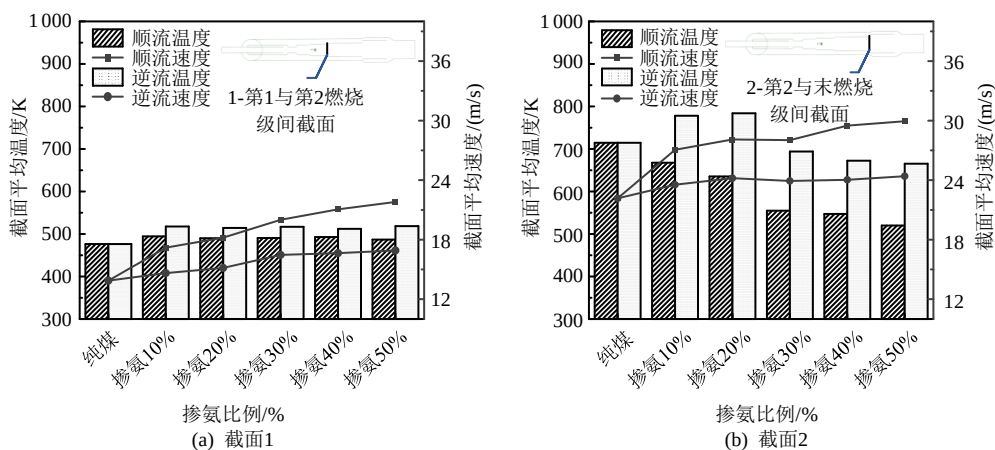


图9 额定负荷时点火段截面平均温度/速度随掺氨比例变化曲线

Fig. 9 Curve of average temperature/velocity of ignition section at rated load as a function of ammonia blending ratio

截面2平均温度较纯煤工况高出8.8%~9.7%，随着掺氨比例的进一步增加，30%~50%比例掺氨时，截面2平均温度较纯煤工况降低2.9%~6.9%。这主要是随着更大比例掺氨进入燃烧器预热，更多的氨吸收了中心火焰热量，最终使中心火焰温度下降。由此可见，掺氨比例会结合喷氨方式对点火段截面温度造成直接影响，而掺氨方式通过影响预热段的预热燃烧，间接地影响点火段截面的温度/速度变化。

图10所示为截面3和4的平均温度和速度随掺氨比例及掺氨方式的变化规律。由图10可知，随掺氨比例的增大，无论顺流还是逆流掺氨，燃烧器预热段的速度均呈现增加趋势，这主要是因为按相同热功率折算的氨燃料相比煤粉具有更大的质量流量，造成其最终速度增加。而在不同掺氨方式下，截面温度随掺氨比例的变化则略有不同，当掺氨比例为10%~20%时，预热段截面受到氨喷口进入工质增多吸热影响，截面平均温度每10%掺氨约降低6%；当掺氨比例为30%~50%时，顺流方式下的氨开

始进入燃烧级内与中心煤粉火焰进行强制对流换热，并与煤粉混合燃烧，截面平均温度每10%掺氨约升高4.7%，而逆流方式下，由于氨燃料不进入燃烧级与级内煤粉混合燃烧，氨气仅在燃烧器尾部参与预热，更多的冷氨吸收煤粉火焰热量，中心火焰温度越来越弱，致使截面温度随掺氨比例的增加持续降低，截面平均温度每10%掺氨约降低2.7%。由此可见，在顺流工况的氨气在经过末燃烧级和燃烧器尾部两段的充分预热后，预热段的温度随掺氨比例变化与逆流工况在末燃烧级后开始进入冷氨完全不同，平均温度高逆流工况9.2%~31.6%，平均速度高逆流工况17.1%~40.1%，而掺氨方式导致的截面温度/速度差异则归因于氨燃料的预热燃烧程度不同，顺流掺氨下，氨燃料的预热沿程更长，在经过燃烧级预热后，截面平均温度更高，因氨燃料进入燃烧级预热燃烧导致的截面速度更大。此外，小比例掺氨(10%~20%)相较于纯煤工况及其他掺氨工况在各截面有着较好的温度/速度数据。

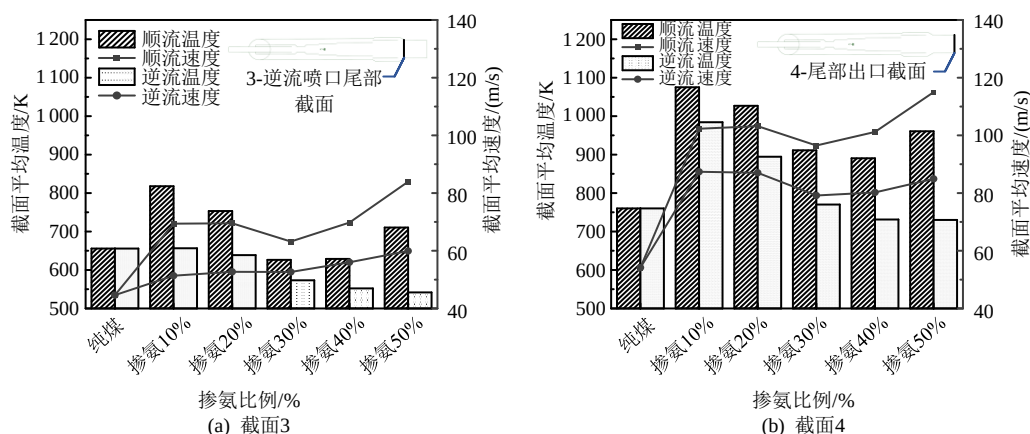


图10 额定负荷时预热段截面平均温度/速度随掺氨比例变化曲线

Fig. 10 Curve of average temperature/velocity of preheating section at rated load as a function of ammonia blending ratio

3.2 不同掺氨情况下燃烧器出口温度场分布特性

对比图11和12的出口截面温度场，进一步分析不同掺氨比例和掺氨方式对燃烧器出口温度场的影响。0~20%掺氨比例下，中心出口截面高温区缩小，水平的喷氨方式使截面左右两侧的温度梯度变化剧烈，燃烧器出口由纯煤工况输出的中心高温火焰开始向中心和环状高温火焰共存转变；30%~50%时，四周进入的更多冷氨开始压迫中心火焰，中心温度进一步降低，此时，在侧面进入的冷氨经过足够预热后，燃烧器壁面四周所形成的氨-煤混合火焰逐渐增强。根据预热程度的不同，不同掺氨方式下的输出效果差异明显，顺流掺氨温度分布更为连续，两侧高温区逐渐替代中心高温区作

用，逆流掺氨温度分布则被冷氨破碎为5部分。

根据图13的出口截面温度比例分布可以看出，由于预热程度的不同，顺流掺氨的出口截面中心高温区温度普遍高于逆流掺氨，顺流掺氨出口900、1200、1500 K温度以上的平均占有面积分别高出逆流掺氨19.97%、6.64%、0.53%。

3.3 不同掺氨情况下燃烧器内燃料的预热特性

通过计算燃烧器内工质焓增的变化，可以获得在不同工况下，燃烧器内工质的预热燃烧情况。而根据火焰燃烧的温度分布及截面的平均温度/速度变化认为，不同工况产生的工质焓增差异是由于中心煤粉火焰高温与氨预热燃烧后产生的氨-煤混合火焰高温变化造成的，下文将对预热式燃烧器

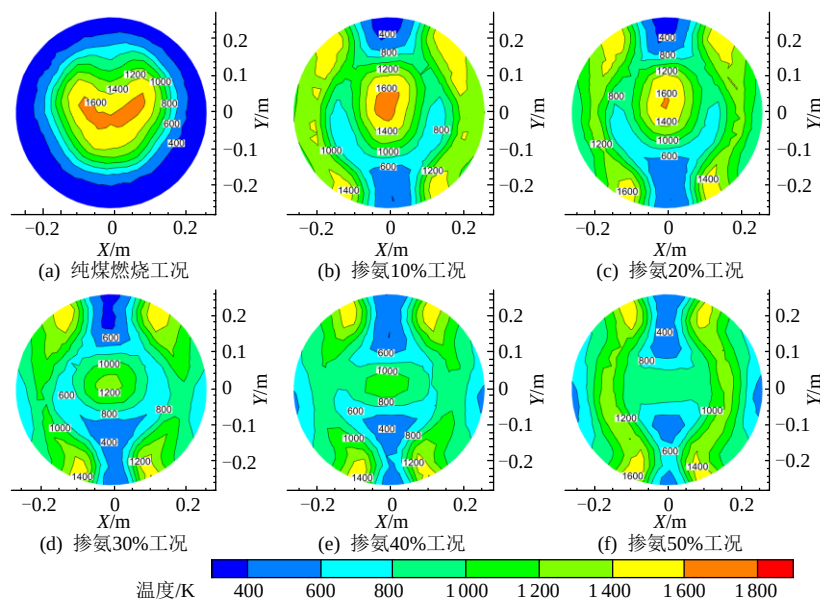


图 11 额定负荷时燃烧器顺流掺氨的出口截面温度分布

Fig. 11 Outlet cross-section temperature distribution with co-flow ammonia blending at rated load

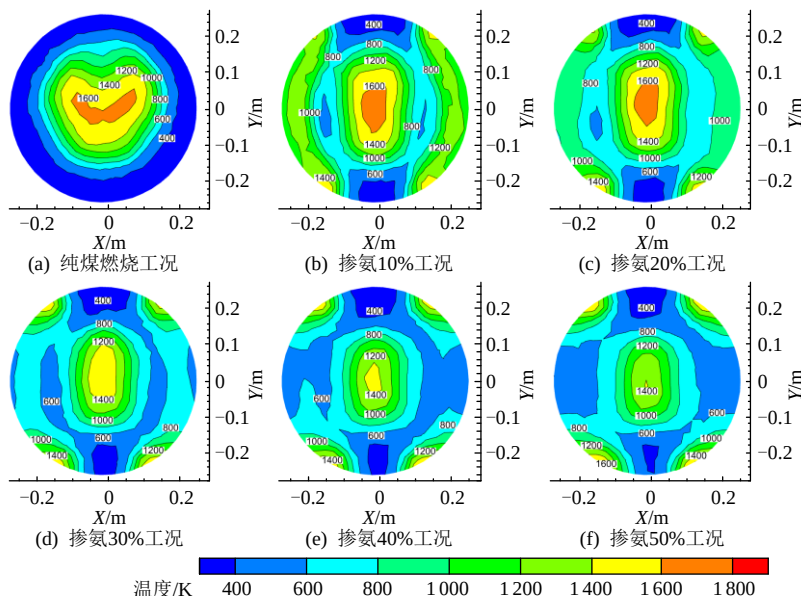


图 12 额定负荷时燃烧器逆流掺氨的出口截面温度分布

Fig. 12 Outlet cross-section temperature distribution with counter-flow ammonia blending at rated load

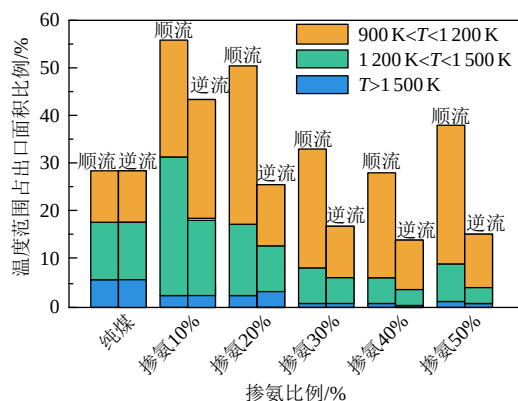


图 13 不同掺氨方式下出口截面温度比例分布

Fig. 13 Outlet cross-section temperature ratio under different ammonia blending methods

内煤粉和氨燃料的预热情况进一步分析这种差异产生的原因。燃烧器内工质焓增 ΔH 、煤粉消耗量 Δm_{coal} 及煤粉消耗率 η_{coal} 计算式如下:

$$\Delta H = h''m'' - \sum_{i=1} h'_i m'_i \quad (5)$$

$$\Delta m_{\text{coal}} = m_{\text{char}} + m_{\text{wat}} + m_{\text{vol}} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{coal}} = \frac{\Delta m_{\text{coal}}}{m'_{\text{coal}}} \quad (7)$$

式中: h'' 为出口焓值, kJ/kg ; h'_i 为 i 入口的入口焓值, kJ/kg ; m'' 为出口质量, kg/s ; m'_i 为 i 入口的入口质量, kg/s ; m'_{coal} 、 m_{char} 、 m_{wat} 、 m_{vol} 分别为煤粉入口质量、煤焦消耗质量、煤中水分挥发质量和

挥发分消耗质量, kg/s。

图 14 为燃烧器内工质焓增变化。由图 14 可知, 纯煤工况下, 燃烧器内工质焓增为 2784.2 kJ/s, 当 10% 掺氨工况时, 燃烧器内工质焓增比纯煤工况高 4.7%~15.1%, 这主要是因为, 该工况在少量减少煤粉浓度的条件下, 氨气预热导致的氨-煤混合燃烧促进了燃料的消耗, 使燃烧器内工质焓增增大; 随着掺氨比例的进一步增大, 20%~50% 掺氨工况时, 燃烧器内的工质焓增逐渐降低, 相比较纯煤工况, 燃烧器工质焓增减少 3.6%~59.2%, 这主要是因为燃烧器内氨气质量增多, 在煤粉浓度降低的同时, 大量氨气得不到有效预热, 燃料总的燃烧质量减少, 工质焓增降低。其中, 顺流掺氨的燃烧器内工质焓增比同工况的逆流高 10%~37.4%, 由此可见, 燃烧器内顺流掺氨的工质预热燃烧情况比逆流掺氨好。

预热式燃烧器通过煤粉热解燃烧产物对燃烧

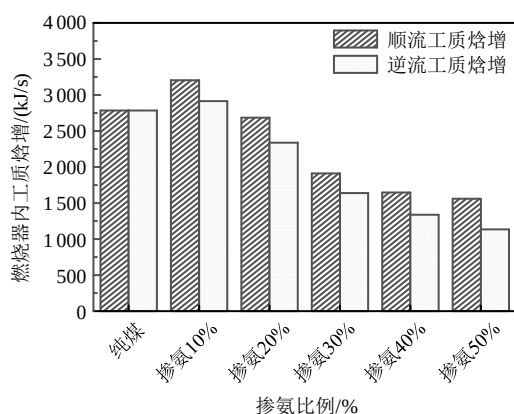


图 14 燃烧器内工质焓增变化

Fig. 14 Variation of enthalpy increase in the working fluid in the burner

器内工质进行预热, 热解产物主要包括挥发分、煤焦和水分。图 15 和 16 所示为额定负荷下顺流/逆流掺氨方式下燃烧器的 CO 浓度分布, 结合图 17 显示的煤粉消耗质量情况来看, 0~50% 掺氨工况的煤焦消耗为 0.4~2.3 g/s, 占煤粉消耗质量的 0.17%~1.02%。这表明在掺氨条件下, 预热式燃烧器内仍以通过消耗挥发分来对燃烧器内工质进行预热, 而煤粉热解燃烧导致的焓增变化主要受挥发分和水分为主的煤粉质量消耗影响。10%~20% 掺氨工况时, 除顺流 10% 工况外, 燃烧器内煤粉消耗质量比纯煤工况低 1%~26.2%, 燃烧器内每增加 10% 掺氨比例, 煤粉消耗量平均降低 16.9%; 30%~50% 掺氨比例时, 燃烧器内煤粉消耗质量比纯煤工况低 34.9%~63.5%, 此时, 煤粉消耗变化较为稳定, 顺流工况的煤粉平均消耗质量为 0.23 kg/s, 逆流工况的煤粉平均消耗质量为 0.16 kg/s。可见煤粉消耗质量会随掺氨比例的增加而减小后趋于一个较为稳定的数值, 小比例掺氨时, 燃烧器内的工质焓增以消耗煤粉热解燃烧为主, 受煤粉质量变化的影响较大, 燃烧器内煤粉消耗质量变化较快; 随着掺氨比例的增大, 更多的氨气参与了氨-煤混合燃烧, 氨-煤混合火焰范围增大, 促使煤粉消耗率升高, 一定程度上减缓了因入口煤粉质量变化导致的煤粉消耗质量持续减少。顺流情况下的煤粉消耗质量比同工况的逆流多 28.8%~69.8%, 这主要是因为氨的燃烧影响了工质的预热燃烧效果, 使不同方式掺氨的煤粉消耗产生差异, 顺流方式能因氨的预热燃烧, 在末燃烧级形成新的氨煤混合火焰, 增加煤粉消

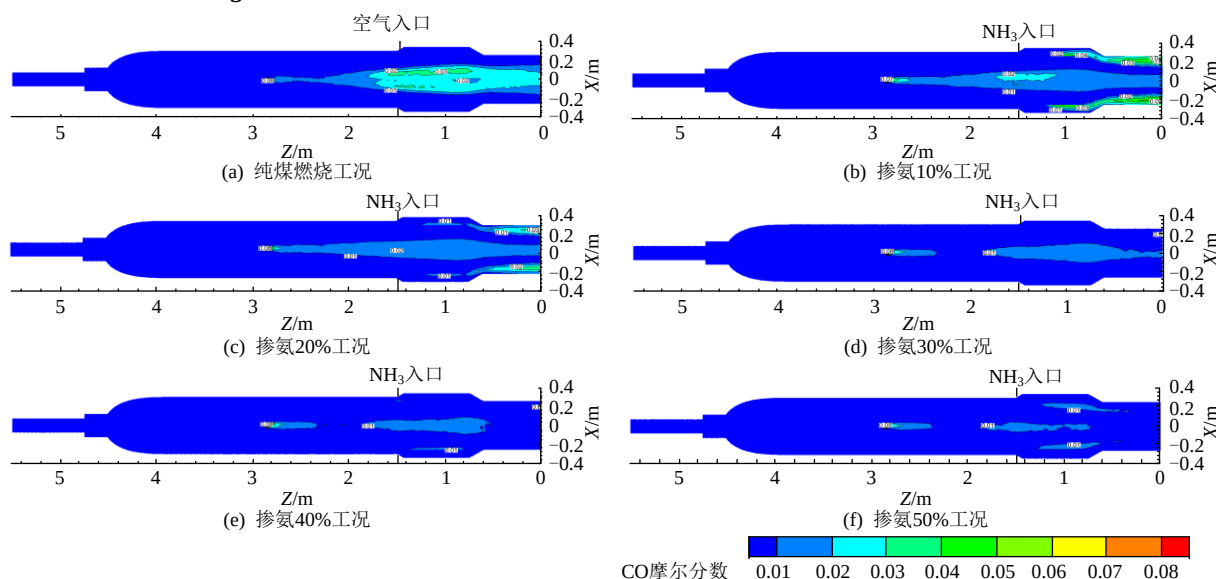


图 15 顺流掺氨下水平轴向截面 CO 浓度分布

Fig. 15 Horizontal-axial cross-sectional CO concentration distribution with co-flow ammonia blending

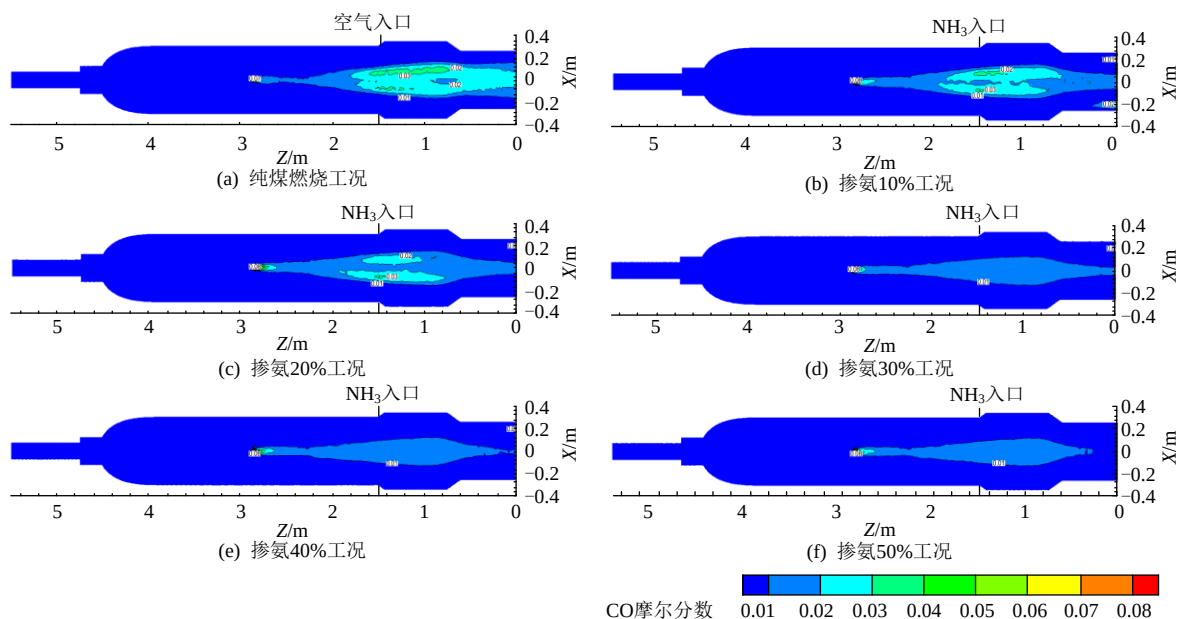


图 16 逆流掺氨下水平轴向截面 CO 浓度分布

Fig. 16 Horizontal-axial cross-sectional CO concentration distribution with counter-flow ammonia blending

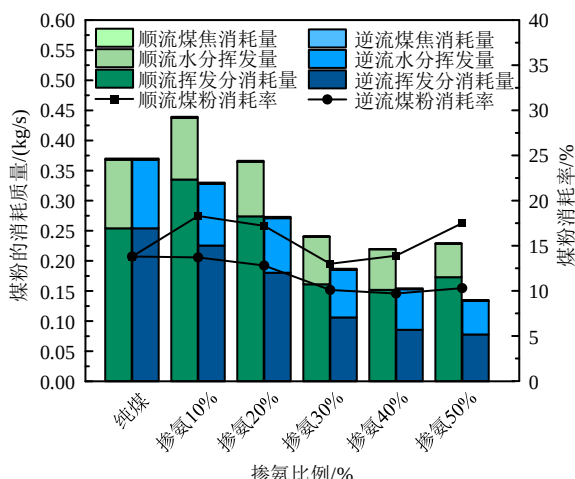


图 17 燃烧器内煤粉的消耗情况

Fig. 17 Pulverized coal consumption in the burner

耗；而逆流方式预热沿程更短，氨的预热燃烧程度有限，煤粉消耗质量相比顺流方式更少。

图 18 为不同掺氨比例下氨燃料在燃烧器内的预热和燃烧变化规律。燃烧器内氨燃料的消耗率 η_{NH_3} 、未燃氨焓增 Δh_{NH_3} 及未燃氨单位焓增 Δh_{NH_3} 计算式如下：

$$\eta_{\text{NH}_3} = \frac{m'_{\text{NH}_3} - m''_{\text{NH}_3}}{m'_{\text{NH}_3}} \quad (8)$$

$$\Delta H_{\text{NH}_3} = (h''_{\text{NH}_3} - h'_{\text{NH}_3})m''_{\text{NH}_3} \quad (9)$$

$$\Delta h_{\text{NH}_3} = \frac{(h''_{\text{NH}_3} - h'_{\text{NH}_3})}{M_{\text{NH}_3}} \quad (10)$$

式中： m''_{NH_3} 为出口氨质量，kg/s； m'_{NH_3} 入口氨质量，kg/s； h''_{NH_3} 为出口氨焓值，kg/s； h'_{NH_3} 为入口氨焓值，

kJ/kg； M_{NH_3} 为氨的摩尔质量，kg/mol。

由图 18 可知，掺氨 10% 工况的消耗率最大，氨消耗率在顺流和逆流方式下分别为 43%、34.5%；随着掺氨比例增加，氨气的消耗质量和未燃氨焓增持续增加，但氨燃料的消耗率和未燃氨的单位焓增却降低，掺氨每增加 10% 比例，顺流及逆流方式的氨消耗率平均减少 7.1%、6.3%，未燃氨单位焓增平均减少 10.6%、14.3%。结合工质焓增和煤粉消耗情况认为，随着掺氨比例的增大，参与氨-煤混合燃烧的氨气质量逐渐增多，但在有限空间内，燃烧器内氨的燃烧会被大比例掺氨条件削弱，更厚、更快的氨燃料气流让大部分氨气经过短暂的预热后快速流出燃烧器，燃烧器内工质焓增降低。而氨的燃烧会直接影响氨的预热情况，在煤粉减少的情况下，氨燃烧的质量比例下降，未燃氨的单位焓增也会相应降低。顺流工况的氨消耗率高出同工况下逆流 4.5%~8.5%，随掺氨比例的增大，顺流工况氨的燃烧消耗质量持续增加，逆流工况氨的燃烧消耗质量则在 0.12 kg/s 附近波动，掺氨比例每增加 10%，顺流工况未燃氨的能量平均增加 459.7 kJ，逆流平均增加 318.2 kJ，顺流任意工况的未燃氨单位焓增均大于逆流工况的未燃氨单位焓增。由此可见，顺流掺氨能够通过更长的预热沿程使氨吸收更多热量，促进氨在燃烧器内预热燃烧，而逆流掺氨在燃烧器内有限的预热沿程限制了氨的预热燃烧，效果较顺流掺氨差。伴随掺氨比例的增加，不同掺氨方

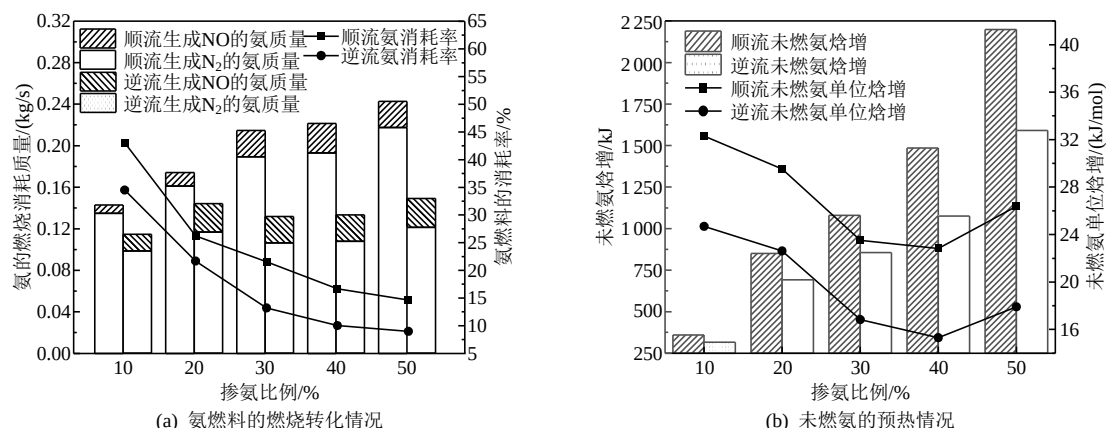


图 18 燃烧器内氨燃料的预热/燃烧情况

Fig. 18 Preheated & combustion of ammonia fuel in the burner

式下未燃氨的单位焓增差值变化基本相同, 为 7.4 ± 1 kJ/mol, 能够认为因掺氨方式不同导致的氨预热效果差异, 受掺氨比例变化影响较小。

通过燃烧器进出口的氮气质量增量, 由式(11)能得到包含煤粉和氨气所含燃料氮的固定率。

$$\eta_{\text{Fuel,N}} = \frac{m''_{\text{N}_2,\text{N}} - m'_{\text{N}_2,\text{N}}}{m'_{\text{Fuel,N}}} \quad (11)$$

式中: $m''_{\text{N}_2,\text{N}}$ 为出口氮气质量, kg/s; $m'_{\text{N}_2,\text{N}}$ 为入口氮气质量, kg/s; $m'_{\text{Fuel,N}}$ 为入口燃料氮质量, kg/s; $\eta_{\text{Fuel,N}}$ 为燃料氮的固定率, %。

如图 19 所示, 纯煤工况下燃料氮的固定率为 9.51%。在掺氨工况下, 10%掺氨工况的燃料氮固定率最大, 顺流和逆流方式下分别为 37.47%、27.8%, 而由于燃烧器内仅发生氨燃料的部分预热燃烧, 致使燃烧器内燃料氮的固定能力有限, 因此, 随着掺氨比例的增大, 燃料氮转化为氮气的质量呈现波动变化, 而燃料氮的固定率则持续降低, 掺氨工况下每增加 10%比例, 顺流及逆流方式的燃料氮

的固定率平均减少 4.9%、4.1%。顺流工况下, 燃烧氮的固定率比同工况的逆流多 5.8%~9.7%, 可以认为顺流方式能够在燃烧器内通过促进氨的预热燃烧, 固定更多的燃料氮。

4 结论

通过对新型氨-煤混合燃烧器进行模拟研究, 分析了不同工况下燃料在预热式燃烧器内的预热燃烧特性。得出结论如下:

1) 0~50%氨煤混合条件下的燃烧火焰均能稳定自持, 并在中心火核后截面能稳定形成 1200 K 以上的高温区。掺氨燃烧可以有效提高预热式燃烧器出口温度, 同纯煤工况相比增长 1.3%~41.4%。预热式燃烧器内一定比例掺氨能对工质的预热燃烧起到促进作用, 当 10%比例掺氨时, 燃烧器内工质焓增比纯煤工况高 4.7%~15.1%, 但随着掺氨比例的增大, 燃烧器内的工质焓增和煤粉消耗质量减少, 并在 20%比例开始低于纯煤工况, 氨燃料的消耗率与未燃氨的单位焓增同时降低, 每增加 10%比例, 顺流及逆流方式氨燃料的消耗率平均减少 7.1%、6.3%, 未燃氨单位焓增平均减少 10.6%、14.3%。

2) 预热式燃烧器内煤粉掺氨混合燃烧能通过炉前减少燃料氮的质量抑制燃料氮向 NO_x 的转化过程。在不考虑二次风的条件下, 掺氨混合前的纯煤工况能将 9.5%质量的燃料氮固定为氮气, 掺氨工况下, 10%掺氨比例时的燃料氮的固定率最大, 顺流及逆流方式在燃烧器内分别能够固定 37.5%、27.8%质量的燃料氮, 而掺氨比例每增加 10%, 顺流及逆流方式的燃料氮的固定质量占比平均减少 4.9%、4.1%, 燃烧器内燃料氮的固定效果逐渐降低, 逆流掺氨超过 40%后, 燃料氮比例的降氮效果将不

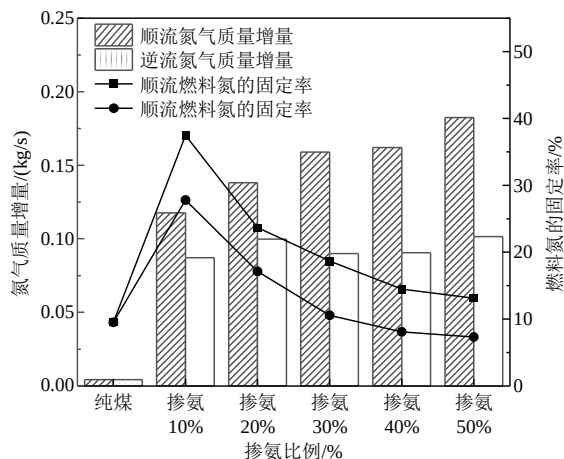


图 19 燃烧器内燃料氮的固定率

Fig. 19 Fixation rate of fuel nitrogen in the burner

如纯煤工况。

3) 顺流掺氨在燃烧器内有着更长的流动沿程,在少量降低着火稳定性且不影响着火自持的同工况条件下,燃烧器预热段及出口的温度更高、工质的预热程度更大、氨的预热燃烧效果更好。从输出效果上看,顺流掺氨出口 900、1200、1500 K 温度以上的平均占有面积分别高出逆流 19.97%、6.64%、0.53%;从工质焓增和煤粉消耗情况看,顺流掺氨的燃烧器内工质焓增高出逆流 10%~37.4%,煤粉消耗质量比逆流多 28.8%~69.8%;从氨燃料的预热和降氮效果看,顺流掺氨的未燃氨焓增比逆流高 30.6%~49.1%,氨消耗率高 4.5%~8.5%,燃料氮的固定高 5.8%~10.3%。结合温度分布、工质的预热情况及降氮效果认为,新型预热式燃烧器在顺流 10%~20%比例掺氨能够发挥出更好的预热燃烧效果。

参考文献

- [1] 国家能源局. 1-5 月份全国电力工业统计数据[R]. 北京: 国家能源局, 2024.
National Energy Administration. Statistical data of the national power industry from January to May[R]. Beijing: National Energy Administration, 2024(in Chinese).
- [2] 周上坤, 杨文俊, 谭厚章, 等. 氨燃烧研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4164-4181.
ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, TAN Houzhang, et al. Research progress of ammonia combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4164-4181(in Chinese).
- [3] VALERA-MEDINA A, XIAO Hua, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 69: 63-102.
- [4] VALERA-MEDINA A, BANARES-ALCANTARA R. Techno-economic challenges of green ammonia as an energy vector[M]. London: Academic Press, 2021.
- [5] 刘小伟, 雷乐, 周子健, 等. 双碳背景下燃煤电站掺氨燃烧研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7221-7235.
LIU Xiaowei, LEI Le, ZHOU Zijian, et al. Research progress and prospect of ammonia-doped combustion in coal-fired power plants under the background of dual carbon[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7221-7235(in Chinese).
- [6] 国家发展和改革委员会. 煤电低碳化改造建设行动方案(2024—2027 年)[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2024.
National Development and Reform Commission. Action plan for low-carbon coal power transformation and construction(2024-2027)[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2024(in Chinese).
- [7] 国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2025.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development for 2024[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2025(in Chinese).
- [8] 李晨鹏, 李政, 刘培, 等. 应用无碳氨的氨煤混燃机组平准化电力成本计算[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1042-1050.
LI Chenpeng, LI Zheng, LIU Pei, et al. Levelized cost calculation of electricity in ammonia-coal co-combustion unit using green ammonia[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1042-1050(in Chinese).
- [9] 汪鑫, 陈钧, 范卫东. 燃煤电站锅炉掺氨燃烧与排放特性综述[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(8): 25-34.
WANG Xin, CHEN Jun, FAN Weidong. Review on combustion and emission characteristics of coal-fired utility boilers ammonia/coal co-firing[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(8): 25-34(in Chinese).
- [10] CHAE T, SIM W, LEE J W, et al. An experimental study on optimization of ammonia co-firing in an 80kWth pulverized coal combustion system[J]. Fuel, 2025, 380: 132740.
- [11] YAMAMOTO A, KIMOTO M, OZAWA Y, et al. Basic co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a single burner test furnace[C]//Proceedings of the 15th NH₃ Fuel Conference. Pittsburgh: IEEE, 2018.
- [12] TAMURA M, GOTOU T, ISHII H, et al. Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2MW-thermal pulverised coal firing furnace[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115580.
- [13] ZHANG Juwei, ITO T, ISHII H, et al. Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: effect of ammonia co-firing ratio[J]. Fuel, 2020, 267: 117166.
- [14] 牛涛, 张文振, 刘欣, 等. 燃煤锅炉氨煤混合燃烧工业尺度试验研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 193-200.
NIU Tao, ZHANG Wenzhen, LIU Xin, et al. Industrial-scale experimental investigation of ammonia-coal cofiring in coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 193-200(in Chinese).
- [15] LIN Qifu, SUN Wangping, LI Haiyan, et al. Experimental study on ammonia co-firing with coal for carbon reduction in the boiler of a 300-MW coal-fired power station[J]. Engineering, 2024, 40: 247-259.
- [16] 徐连兵, 陈璟, 魏书洲, 等. 大比例掺氨下煤粉火焰区喷氨位置对燃烧及 NO 生成特性的影响[J]. 洁净煤技

- 术, 2023, 29(9): 134-144.
- XU Lianbing, CHEN Jing, WEI Shuzhou, et al. Effect of ammonia injection location in the pulverized-coal flame zone on combustion and NO formation characteristics under large proportion of ammonia blending conditions [J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(9): 134-144(in Chinese).
- [17] 谢妍, 王耿辉, 刘佳宁, 等. 混氨比例及温度对氨煤混燃 NO_x 生成特性影响实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(2): 452-461.
- XIE Yan, WANG Genghui, LIU Jianing, et al. Experimental study on the effects of ammonia cofiring ratio and temperature on the NO_x formation characteristics of ammonia-coal cofiring[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(2): 452-461(in Chinese).
- [18] 王耿辉, 谢妍, 李君, 等. 煤种对氨煤混燃 NO_x 生成特性影响[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(5): 1808-1818.
- WANG Genghui, XIE Yan, LI Jun, et al. Effects of the coal type on NO_x formation characteristics of ammonia-coal cofiring[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(5): 1808-1818(in Chinese).
- [19] VALERA-MEDINA A, AMER-HATEM F, AZAD A K, et al. Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(9): 6964-7029.
- [20] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 109-133.
- [21] 张普选, 李宇航, 田舒嫚, 等. 350 MW 锅炉煤/氨共烧数值模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(22): 8904-8915.
- ZHANG Puxuan, LI Yuhang, TIAN Shuman, et al. Numerical investigation on co-firing of coal/ammonia in 350 MW boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(22): 8904-8915(in Chinese).
- [22] 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): 6535-6546.
- LYU Qinggang, ZHU Shujun, ZHU Jianguo, et al. Research and development on preheated combustion of pulverized coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6535-6546(in Chinese).
- [23] LEE J H, KIM J H, PARK J H, et al. Studies on properties of laminar premixed hydrogen-added ammonia/air flames for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(3): 1054-1064.
- [24] LI Jun, HUANG Hongyu, KOBAYASHI N, et al. Numerical study on laminar burning velocity and ignition delay time of ammonia flame with hydrogen addition[J]. *Energy*, 2017, 126: 796-809.
- [25] KU J W, AHN Y J, KIM H K, et al. Propagation and emissions of premixed methane-ammonia/air flames[J]. *Energy*, 2020, 201: 117632.
- [26] 周旭, 张瀚霖, 张锋, 等. 高浓度煤粉预燃式强稳燃低氮燃烧器配风组织优化[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(9): 43-51.
- ZHOU Xu, ZHANG Hanlin, ZHANG Feng, et al. Optimization of air distribution of high concentration pulverized coal pre-combustion strong stable combustion low nitrogen burner[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(9): 43-51(in Chinese).
- [27] 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 Bimao, et al. Experimental study on preheating combustion characteristics and NO_x emission of pulverized coal based on an entrained-flow gasifier[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4192-4204(in Chinese).
- [28] 李佳伟, 陈智超, 张旭阳, 等. 预燃室燃烧器煤气化细灰混烧特性和数值模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(6): 1675-1683.
- LI Jiawei, CHEN Zhichao, ZHANG Xuyang, et al. Study on co-combustion characteristics and numerical simulation of coal gasification fine ash in precombustion chamber burner[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(6): 1675-1683(in Chinese).
- [29] 满承波, 高超, 欧阳子区, 等. 40 t/h 煤粉预热燃烧锅炉运行和低 NO_x 试验研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(9): 160-166.
- MAN Chengbo, GAO Chao, OUYANG Ziqu, et al. Operation and low NO_x experimental research of a 40 t/h preheating combustion pulverized coal boiler [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 160-166(in Chinese).
- [30] 田继林, 朱建国, 朱书骏, 等. 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究[J]. *热力发电*, 2024, 53(4): 133-140.
- TIAN Jilin, ZHU Jianguo, ZHU Shujun, et al. Wide load operation characteristics of a 60 t/h boiler with pulverized coal preheating[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(4): 133-140(in Chinese).
- [31] OUYANG Ziqu, SONG Wenhao, LIU Jingzhang, et al. Experimental study on NO_x emissions of pulverized coal combustion preheated by a 2 MW novel self-sustained preheating combustor[J]. *Fuel*, 2021, 294: 120538.
- [32] OUYANG Ziqu, LIU Wen, MAN Chengbo, et al. Experimental study on combustion, flame and NO_x emission of pulverized coal preheated by a preheating burner[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 179:

- 197-202.
- [33] YAO Guojia, HAN Xiaoju, LIU Zuodong, et al. Low- NO_x study of a 600 MW tangentially fired boiler based on pulverized coal preheating method[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 48: 103156.
- [34] TANG Hong, LIU Zuodong, HAN Xiaoju, et al. Experimental study on combustion characteristics of a 40 MW pulverized coal boiler based on a new low NO_x burner with preheating function[J]. Energy, 2024, 305: 132319.
- [35] TANG Hong, XU Zhiming, HAN Xiaoju, et al. Design method and experimental study on a novel self-sustaining internal combustion burner[J]. Energy, 2024, 308: 133039.
- [36] MENG Lizhi, HAN Xiaoju, LIU Zuodong, et al. Experimental study on stable combustion of pulverized coal stream in a confined small space with air jet[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 56: 103028.
- [37] 唐宏, 邵召山, 韩晓菊, 等. 一种燃煤发电机组超低氮燃烧方法: 中国, 110094725B[P]. 2020-04-28.
TANG Hong, TAI Shaoshan, HAN Xiaoju, et al. Ultra-low nitrogen combustion method of coal-fired power generator set: CN, 110094725B[P]. 2020-04-28(in Chinese).
- [38] 牛涛, 张文振, 魏书洲, 等. 不同空气分级模式下氨煤掺烧数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 145-151.
- NIU Tao, ZHANG Wenzhen, WEI Shuzhou, et al. Modeling co-firing ammonia with coal in different air staging modes[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 145-151(in Chinese).
- [39] 姚国家. 基于煤粉预热解的燃烧器与锅炉低负荷燃烧特性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- YAO Guojia. Study on low-load combustion characteristics of burner and boiler based on pulverized coal pre-pyrolysis[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024(in Chinese).



刘坐东

在线出版日期: 2025-11-10。

收稿日期: 2025-01-13。

作者简介:

刘坐东(1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为煤粉清洁燃控机理及技术、超低 NO_x 煤粉燃烧机理及技术等, liuzuodong@neepu.edu.cn;

*通信作者: 陈子轩(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为氨-煤混燃特性及相关污染物生成控制, 1403647260@qq.com。

(责任编辑 胡琳琳)