

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301018

不同比例氨与煤混燃试验研究

王志超^{1,2}, 方亮³, 贾子秀^{1,2}, 李宇航^{1,2}, 赵晨^{1,4}, 晋中华^{1,2}, 姚伟^{1,2}

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.陕西省燃煤电站锅炉环保工程技术研究中心, 陕西 西安 710054;

3.浙江浙能嘉华发电有限公司, 浙江 嘉兴 314201;

4.西安益通热工技术服务有限责任公司, 陕西 西安 710032)

[摘要] 氨作为一类技术成熟、储运成本低廉的零碳燃料, 部分替代煤可以成为“双碳”目标下火电机组前端减碳的有效途径。针对氨作为替代燃料开展研究, 利用一维火焰炉和着火炉等试验设备研究了氨与典型烟煤混合燃料的燃料特性, 详细研究并分析了氨/煤混合燃料着火性能变化、不同比例氨混合燃料强化燃烧与污染物控制技术, 发现氨与煤预混燃烧不利于 NO_x 控制, 通过燃料分级、燃烧过量空气系数或氧量控制、空气分级燃烧, 可以实现氨掺混时较低的 NO_x 生成和较好的燃烧效果, 试验得出热值比例 25%氨分别与典型烟煤混合燃烧时运行控制建议。

[关键词] 氨; 煤; 掺烧比例; NO_x

[引用本文格式] 王志超, 方亮, 贾子秀, 等. 不同比例氨与煤混燃试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 41-47.
WANG Zhichao, FANG Liang, JIA Zixiu, et al. Experimental study on co-combustion of different ratios of ammonia with coal[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 41-47.

Experimental study on co-combustion of different ratios of ammonia with coal

WANG Zhichao^{1,2}, FANG Liang³, JIA Zixiu^{1,2}, LI Yuhang^{1,2}, ZHAO Chen^{1,4},
JIN Zhonghua^{1,2}, YAO Wei^{1,2}

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Coal Fired Boiler Environmental Protection, Xi'an 710054, China;

3. Zhejiang Zheneng Jiahua Power Generation Co., Ltd, Jiaxing 314201, China;

4. Xi'an Yitong Thermal Technology Services Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: Ammonia is a kind of zero-carbon fuel with mature technology and low storage and transportation cost. Partial replacement of coal with ammonia can become an effective way to reduce carbon at the front end of coal-fired units under the dual carbon target. Ammonia fuel is studied as an alternative fuel. The fuel characteristics of ammonia and its blended fuel with typical bituminous coal are studied by using one-dimensional flame furnace and ignition furnace. The ignition performance changes of ammonia/coal blended fuel, the enhanced combustion and pollutant control technology of different proportions of ammonia blended fuel are studied and analyzed in detail. It is found that the pre-blended combustion of ammonia/coal is not conducive to NO_x control. Through fuel grading, combustion excess air coefficient or oxygen control, and air staged combustion, lower NO_x generation concentration and better combustion effect can be achieved during ammonia blending. The operation control suggestions of 25% ammonia mixed with typical bituminous coal are obtained.

Key words: ammonia; coal; blending ratio; NO_x

在“双碳”目标的引领下, 传统火电机组作为碳排放大户面临着巨大的碳减排压力。对于火电机组而言, 降低 CO_2 排放主要有2种途径: 一种是在发电系统末端进行 CO_2 捕集, 但该技术的捕集成本

目前远超火电机组能够承受的范围^[1-3]; 另一种是在发电系统源头端部分或完全燃用无碳燃料^[4-5], 如生物质、氢气以及氨气等。生物质存在能量效率低、成本高、受地域及季节影响大等缺点^[6-7]; 氢气液化

收稿日期: 2023-01-31

基金项目: 华能国际电力股份有限公司科技项目(HNKJ21-HF304)

Supported by: Science and Technology Project Huaneng International (HNKJ21-HF304)

第一作者简介: 王志超(1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电领域燃料特性、高效清洁安全燃烧技术开发, wangzhichao@tpri.com.cn。

压力高达 70 MPa, 存在难以液化、储存和运输且替代技术尚不成熟等弊端^[8-10]; 氨作为典型的零碳燃料, 常温状态下液化压力仅 1.03 MPa, 具有液化压力小、储运成本低、燃烧产物无碳无颗粒等优点^[11-16], 通过新能源电解水制氢-合成氨可以实现氨全生命周期的零碳排放^[17-19]。因此, 开发氨/煤混燃的高效低污染物燃烧技术能够解决化石能源替代问题, 是实现火电机组清洁燃烧的有效措施之一。

目前, 关于氨混燃的研究主要集中在化学反应动力学模型开发、火焰传播特性、烟气流和能源利用效率的模拟研究等理论研究方面。Wang 等人^[20]根据实验结果和化学动力学计算, 解释了氨/煤共燃过程中 NO 释放模式。Xia 等人^[21]首次报道了煤粉/氨混燃火焰传播的基本机制。Hadi 等人^[22]在不同湍流强度下对不同煤种进行了球形湍流火焰共燃传播实验, 提出了氨/煤颗粒云共燃的火焰传播机理。Xu 等人^[23]通过对某现有锅炉进行模拟仿真分析得出, 氨煤混燃不会降低锅炉机组的热经济性。但是, 现有研究关于氨掺烧技术中污染物生成特性以及低氨燃烧技术控制污染物生成等方面较为缺乏。

氨有别于常规燃料。本文首先在着火炉实验台上开展燃煤掺氨对着火性能的影响实验; 随后基于

一维火焰炉燃烧试验台, 开展不同比例氨部分替代典型煤种的试验研究, 分析了不同掺混比例、送入位置、过量空气系数、燃尽风率、预热温度、燃料分级等对混合燃料的着火、燃尽等燃烧特性变化及污染物排放的影响。本文研究结果可为火电机组掺氨提供理论支撑及技术参考。

1 试验设备

燃料的燃烧分为着火、燃烧和燃尽 3 个过程, 其中着火和燃尽对火电机组锅炉的安全和经济运行尤为重要, 也是新机组设计和已运行机组掺烧时的重要参考依据^[24]。

1.1 着火温度试验台

着火温度试验台系统由炉体、给粉机、送风机、引风机、除尘器、氨气供给及控制系统等设备构成, 同时配置空气流量、压力、温度等测量仪表, 具体如图 1 所示。炉体为立式电加热炉, 有效高度 610 mm, 内径 175 mm, 2 级炉膛均由双套管碳化硅烧制而成, 配有调压器以调节炉壁温度, 炉顶轴线上装有 1 个一次风喷嘴以及 2 个二次风喷嘴, 气流由上而下流动且被加热至着火。

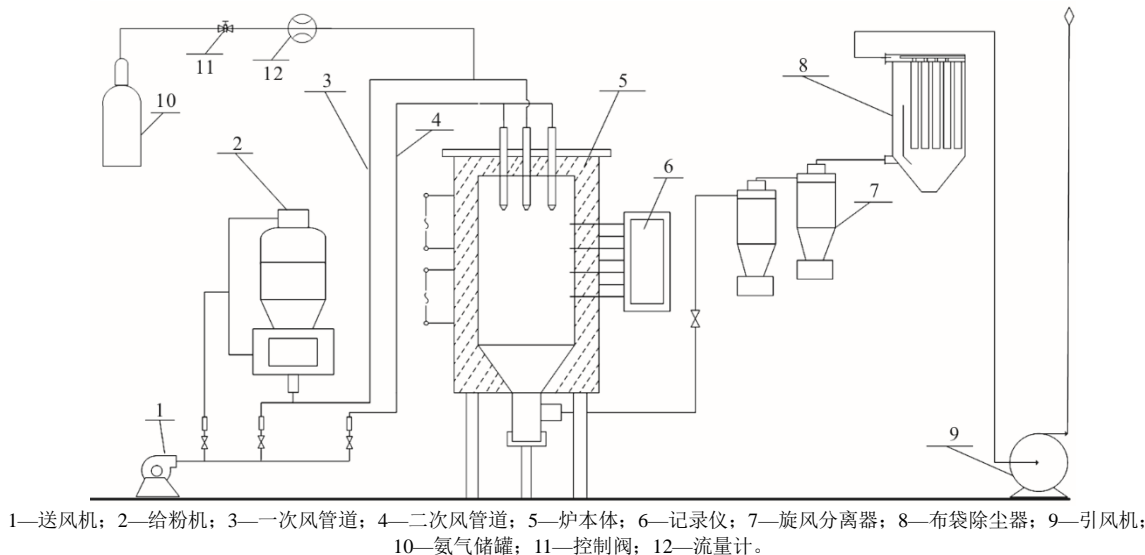


图 1 着火温度测试炉及系统示意

Fig.1 Pulverized coal ignition temperature test furnace and system schematic diagram

试验时, 按照输入热量 16.75 MJ/h 计算给粉量。用加热元件缓慢均匀加热碳化硅炉壁, 使壁温保持一定升温速率 (5~8 °C/min)。启动送、引风机, 调整一、二次风量 (风温为 20 °C; 一次风和二次风喷嘴出口风速分别为 4 m/s 和 8 m/s) 及炉膛负压 (0~-50 Pa), 同时通过一次风喷嘴以规定速度连

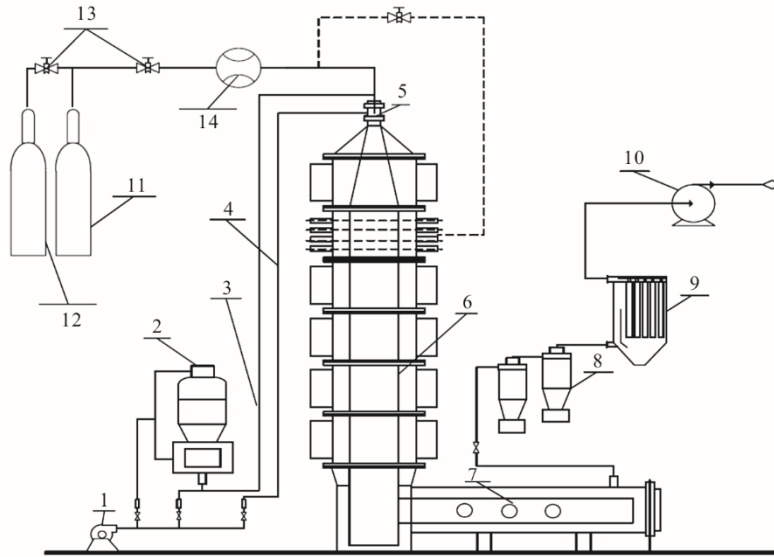
续向下喷入规定比例的煤粉。记录炉壁温度和气流温度。燃煤掺氨试验时, 氨气通过控制阀在一次风管道内与煤粉混合后送入炉内。

1.2 一维火焰炉燃烧试验台

整个系统包括氨气的供给及控制系统、送风、给粉、燃烧、除尘、测温及取样等, 具体如图 2

所示。一维火焰炉燃烧试验台炉体高 3 m，内径 175 mm。炉体立式布置、烟道水平布置，整体呈 L 型。炉体为电加热积木式结构，由锥型炉顶及 6 级可分别控制壁温的电加热级组成（从上至下依次为第 1 级至第 6 级），每一级均有 6 个测孔（从上至下依次为第 1—第 6 测孔），可根据试验要求沿火焰行程测定火焰温度，并抽取试样。气、粉混合物由锥体顶部引入，炉顶及第 1 级炉体的锥型渐扩

结构使气粉混合物在加热过程中均匀膨胀，充满截面，消除了烟气回流，形成无轴向混合的柱塞状流动。根据《煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰测试方法》(DL/T 1106—2009) [25]，沿炉膛轴向测定的参数可表征煤粉气流燃烧过程的特征。氨气可以通过一次风管道与煤粉混合后送入炉内，也可单独分级送入炉内不同位置。二次风也可以分级送入炉内不同位置，实现空气分级。



1—送风机；2—给粉机；3—一次风管道；4—二次风管道；5—燃烧器；6—炉本体；7—水平烟道；8—旋风分离器；9—布袋除尘器；10—引风机；11—氨气储罐；12—CH₄ 储罐；13—控制阀；14—流量计。

图 2 TPRI 煤粉燃烧一维火焰炉试验台
Fig.2 One-dimensional flame furnace combustion test bench

1.3 其他试验条件

试验煤样均为空气干燥基状态，入炉煤煤粉细度 R_{90} (%) 的控制标准如下：

$$R_{90} = 0.5nw(V_{daf}) \pm \begin{cases} 2.0\%, & \text{褐煤、烟煤} \\ 1.0\%, & \text{无烟煤、贫煤} \end{cases} \quad (1)$$

式中： n 为煤粉均匀性指数。

1.4 试验燃料参数

氨纯度接近 100%，热值 18.80 MJ/kg，低于试验用典型烟煤的 27.75 MJ/kg，氨与典型烟煤的燃料指标数据见表 1。文中不同比例氨煤混燃均指热值比例。

表 1 氨与典型煤燃料指标
Tab.1 Fuel indicators for ammonia and typical coal

项目	w/%								$Q_{net,v,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
	M_t	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{t,ar}$	
典型烟煤	3.30	7.55	32.53	71.46	3.95	0.99	12.57	0.18	27.75
氨	0	0		0	17.65	82.35	0	0	18.80

2 试验结果与分析

2.1 燃煤掺氨对着火性能的影响

氨与典型烟煤不同比例掺混后混合燃料的着火温度试验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，纯

氨的着火温度为 860 °C，属于极难着火等级，远高于典型烟煤 (634 °C)。随着氨掺混比例的增加，混合燃料着火温度逐渐升高。氨掺混比例 45% 以内，混合燃料着火等级基本没有变化，均处于中等着火等级范围内。

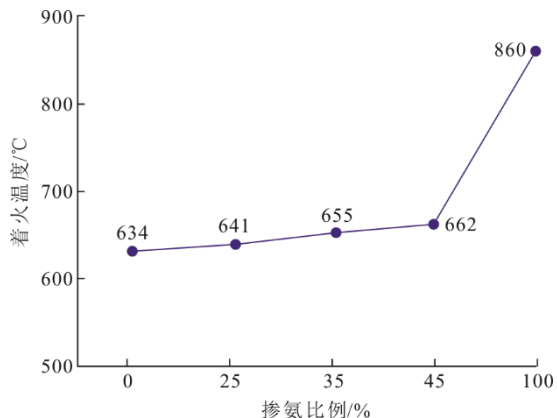
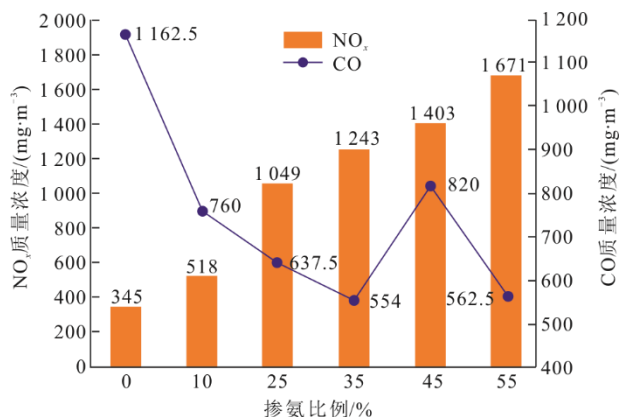


图3 氨与典型烟煤掺混后的着火温度变化趋势

Fig.3 Variation of the air flow ignition temperature of NH₃ mixed with typical coal

2.2 氨与煤粉预混掺烧时的燃烧特性

氨直接在一次粉管中与一次风混合后送入一维火焰炉内燃烧, CO 与 NO_x 生成情况如图 4 所示。

图4 氨煤预混燃烧时 CO 与 NO_x 生成情况
Fig.4 CO and NO_x concentration situation during ammonia/coal co-combustion

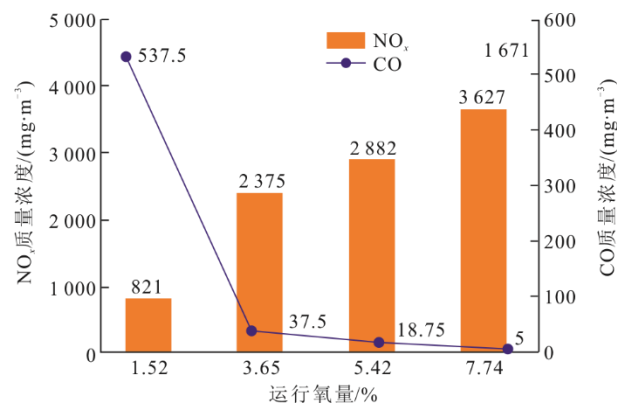
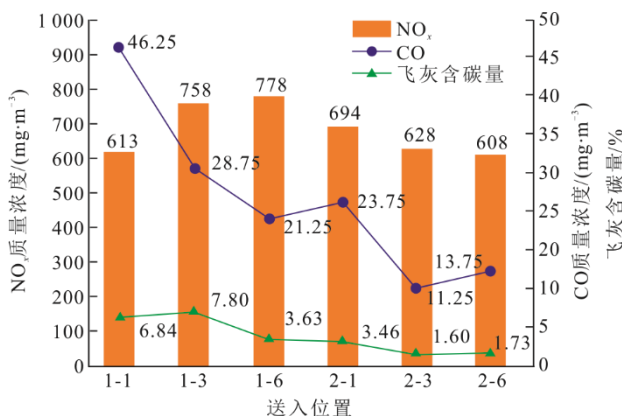
在过量空气系数 1.06~1.08 (对应氧量 1.2%~1.6%), 随着氨掺混比例的增加, 即使氧量维持在较低水平, NO_x 生成质量浓度依然显著升高, CO 质量浓度呈波动状态, 显示此时燃烧与污染物排放水平均处于不理想状态。

图 5 为 25% 氨掺混比例条件下变氧量工况的燃烧情况。由图 5 可见, 通过提高运行氧量, 虽然可以降低 CO 质量浓度, 改善燃尽过程, 但 NO_x 生成质量浓度急剧上升。分析认为, 氨在燃烧前过早与空气接触, 容易生成 NO_x, 对控制 NO_x 生成是不利的。

2.3 氨与煤粉分级掺烧时的燃烧特性

分别将 25% 比例氨从 1-1、1-3、1-6 及 2-1、2-3、2-6 测孔送入一维炉内燃烧, 该工况的燃烧特性如图 6 所示。过量空气系数 1.20 条件下, 氨煤混

合燃料均实现了较佳的燃烧效果。对比图 5、图 6 可以发现, 在相同的氧量 (3.5%) 时, 氨燃料分级燃烧在几乎不影响燃烧的情况下, 实现了 NO_x 质量浓度的大幅度降低。随着氨送入位置的变化, NO_x 质量浓度呈现先增大后降低趋势, CO 与飞灰含碳量呈现逐渐降低趋势。这可能是由于氨的送入位置横跨混合区与燃烧区, 送入过早局部温度低, 氨难以分解造成其在下流氧化, 容易产生 NO_x; 而在燃烧区, 高温强还原性气氛下, 氨易分解为 N₂ 和 H₂, 抑制了 NO_x 的产生。

图5 25%氨掺混比例条件下变氧量工况
Fig.5 Variable oxygen working condition under 25% ammonia blending ratio图6 氨不同送入位置条件下燃烧工况
Fig.6 Combustion working conditions under different feeding positions of ammonia

考虑到实际燃烧过程中需要采用空气分级燃烧, 燃料分级位置太远并不现实, 因此研究了 25% 比例氨分别从 1-1 和 1-6 测孔送入一维炉内时变氧量工况, 具体如图 7 所示。对比可以看出, 随着氧量的升高, NO_x 质量浓度均迅速升高, CO 质量浓度迅速降低, 基本上将氧量控制在 2.5% 以内, 可以实现较佳的燃烧效果和污染物控制。

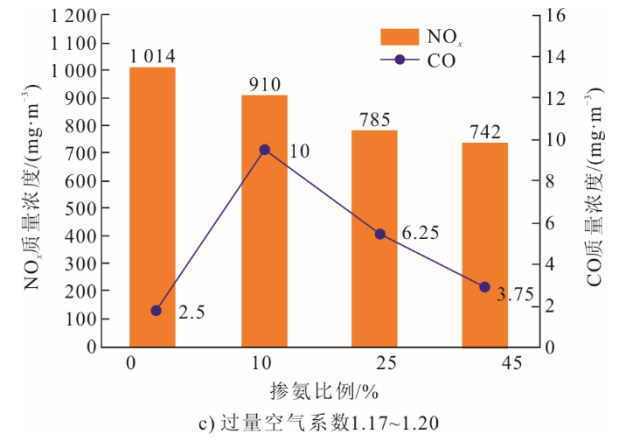
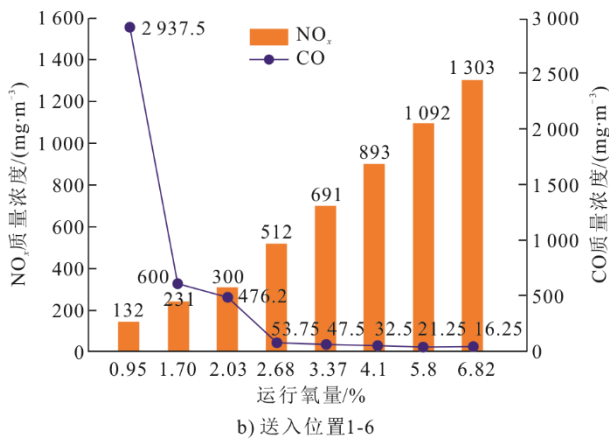
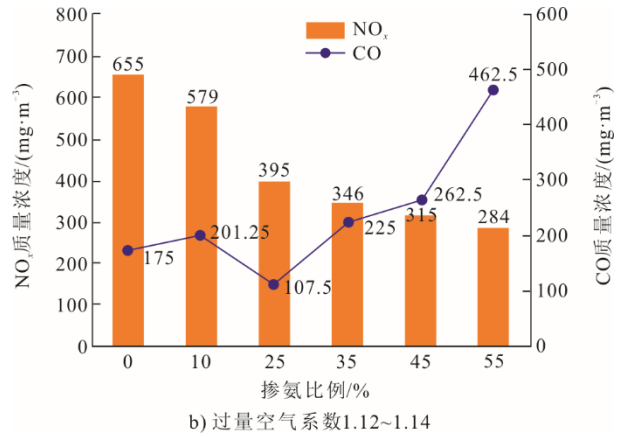
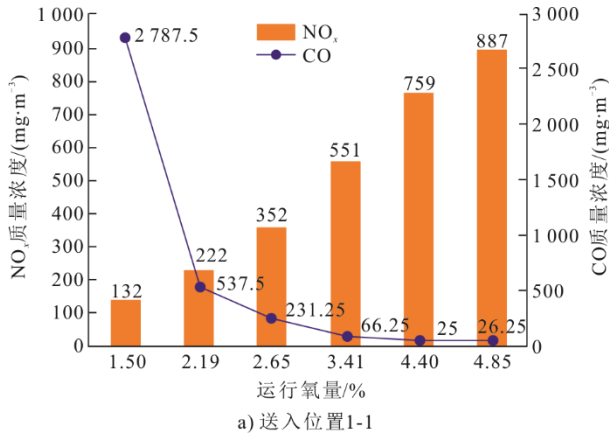
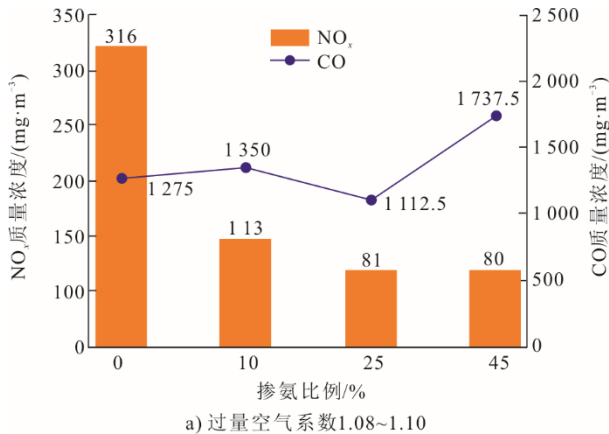


图 7 氨不同送入位置时的变氧量工况
Fig.7 Variable oxygen working conditions at different feeding positions of ammonia

图 8 送入位置 1-1 不同氨掺混比例时的变氧量工况
Fig.8 Variable oxygen content working conditions under different ammonia blending ratio at feeding position 1-1

图 8 为氨从第 1-1 测孔分级送入时不同掺混比例、不同氧量条件下的燃烧情况。由图 8 可知，随着掺烧比例由 0 逐渐增加至 10%、25%、45%，NO_x 生成质量浓度呈降低趋势。分析认为，造成这一结果的原因可能是氨在适宜的送入位置时，可以有效抑制氨本身生成 NO_x；而由于替代煤的比例越来越高，煤燃烧生成的 NO_x 质量浓度会逐渐降低；综合起来使得 NO_x 质量浓度呈降低趋势。

可以看出，过量空气系数过低(1.08~1.10)，NO_x 能得到很好的控制，但 CO 质量浓度显著升高；过量空气系数过高(1.17~1.20)，CO 质量浓度得到很好的控制，但 NO_x 质量浓度显著升高；适宜的过量空气系数(1.12~1.14)条件下，NO_x、CO 质量浓度均处于较低水平。试验过程中，烟气中的残留氨几乎均未检出，表明氨作为气体燃料其燃尽性能较佳。采用燃料分级的方式，可以显著改善氨掺混后 NO_x 生成质量浓度；辅以适宜的氧量控制，就可以实现 25% 掺氨比例下较原煤更好的燃烧效果。



2.4 空气分级对氨煤掺混的影响

图 9 为过量空气系数 1.16~1.18，25% 比例氨从 1-1 测孔送入，燃尽风从 1-6 测孔送入时的燃烧情况。由图 9 可见：随着空气分级、燃尽风的送入，NO_x 质量浓度显著降低；而随着燃尽风比例的增加，NO_x 质量浓度呈降低趋势但降幅不明显，CO 质量浓度先降低后增加，总体均处于较低水平。燃尽风比例 20%，NO_x 生成质量浓度降低近 30%。由此可见，通过空气分级，可以进一步降低 NO_x 生成质量浓度，实现较好的 NO_x 控制效果。

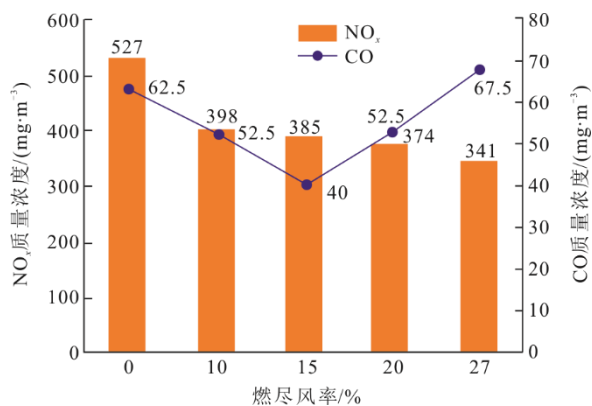


图9 变燃尽风比例工况

Fig.9 Working conditions of changing the proportion of burnout air

图10为25%比例氨从1-1测孔送入,过量空气系数1.20,燃尽风比例20%时的燃烧情况。由图10可见,燃尽风送入位置越远,NO_x控制效果越好,在CO质量浓度和飞灰含碳量几乎不影响的情况下,燃尽风从2-6测孔送入较从1-3测孔送入大幅降低近70%。这可能是由于随着燃尽风送入位置增加,进一步延迟了空气与燃料混合时间,氨在还原性气氛下更多地分解成N₂和H₂,有助于抑制NO_x的生成。

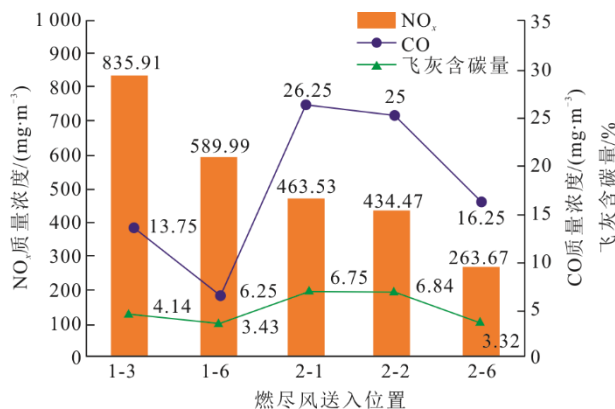


图10 变燃尽风送入位置工况

Fig.10 Working conditions of variable exhaust air feeding position

2.5 氨预热温度对氨煤掺混燃烧的影响

图11为25%比例氨分别从1-1、1-6测孔送入时的燃烧情况。由图11可以看出,通过预热改变氨的温度可以促进氨的燃烧过程,总体上可以改善NO_x生成。温度升高有利于强化氨的燃烧,氨更快速地燃烧消耗氧量,使得煤粉燃烧相对困难,所以CO质量浓度会升高,而NO_x质量浓度得到一定程度降低,但进一步提高温度对NO_x改善不显著。实际燃烧过程中将预热温度控制在48℃即可,不宜过高。

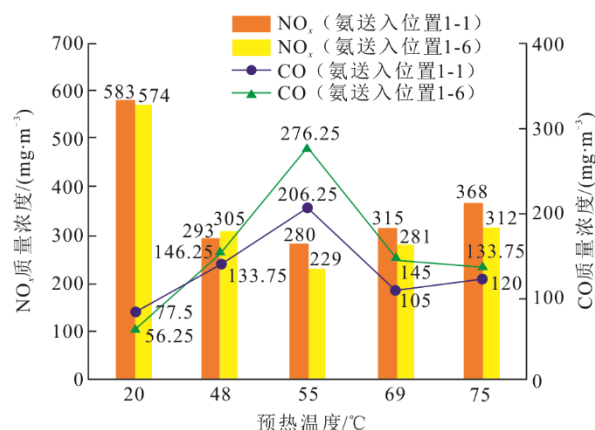


图11 变氨预热温度工况

Fig.11 Working conditions of variable ammonia preheating temperature

3 结论

本文针对零碳氨燃料作为替代燃料开展研究,利用一维火焰炉和着火炉等试验设备研究了氨及其与典型烟煤混合燃料的燃料特性,得出的主要结论如下。

1) 氨的着火温度860℃,属于极难着火等级,其着火特性较典型烟煤差,随着氨掺混比例的增加,混合燃料的着火温度升高,这将对氨煤混燃的着火提出挑战。

2) 氨在富燃条件下NO_x生成质量浓度很难控制。采用氨煤预混燃烧方式时,即使在1.06~1.08的过量空气系数条件下,掺烧10%比例氨都将使得NO_x质量浓度较不掺烧时增加1倍左右。

3) 通过将氨与煤粉分级送入,辅之以氧量控制,可以同时实现较好的燃烧效果和控制NO_x。与纯煤粉燃烧相比,25%比例氨从一维炉1-1测孔送入、过量空气系数1.12~1.14(氧量约2.5%)时,CO、NO_x质量浓度分别由175.0、655.0 mg/m³降至107.5、395.0 mg/m³。通过空气分级可以进一步降低NO_x生成质量浓度。燃尽风比例20%,NO_x生成质量浓度降低近30%,实现了较好的控制效果。

[参考文献]

- [1] MAI B, ADJIMAN C S, BARDOW A, et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 1062-1176.
- [2] PATEL H A, BYUN J, YAVUZ C T. Carbon dioxide capture adsorbents: chemistry and methods[J]. ChemSusChem, 2016, 10: 1303-1317.
- [3] CHEREPOVITSYNA A, KUZNETSOVA E, GUSEVA T, et al. The costs of CC(U)S adaptation: the case of Russian power industry[J]. Energy Reports, 2023, 9: 704-710.
- [4] MAI T, DENHOLM T, BROWN P, et al. Getting to 100%:

- Six strategies for the challenging last 10%[J]. *Joule*, 2022, 6(9): 1981-1994.
- [5] ARMAROLI N, BALZANI V. Towards an electricity-powered world[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(9): 3193-3222.
- [6] SANSANIWALS K, ROSEN M A, TYAGI S K. Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: an overview[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 23-43.
- [7] GUO Hong, CUI Jie, LI Junhao, et al. Biomass power generation in China: status, policies and recommendations[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 687-696.
- [8] ABDALLA A M, HOSSAIN S, NISFINDY O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165: 602-627.
- [9] GIELEN D, BOSHELL F, SAYGIN D, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2019, 24: 38-50.
- [10] FAYE O, SZPUNAR J, EDUOK U. A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(29): 13771-13802.
- [11] CHAI W S, BAO Yulei, JIN Pengfei, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147(39): 111254.
- [12] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 63-102.
- [13] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 37(1): 109-133.
- [14] ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, TAN Houzhang, et al. Research progress of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2021, 41(12): 4164-4181.
- [15] SALMON N, BANARES-ALCANTARA R. Green ammonia as a spatial energy vector: a review[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2021, 5(11): 2814-2839.
- [16] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 37(1): 109-133.
- [17] KOJIMA Y, YAMAGUCHI M. Ammonia as a hydrogen energy carrier[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(54): 22832-22839.
- [18] LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. Key technology of water electrolysis and levelized cost of hydrogen analysis under carbon neutral vision[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(11): 2888-2896.
- [19] LI Yulei, LIU Wei, DONG Binqi, et al. Green hydrogen ammonia synthesis in China under double carbon target: research on development basis and route[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(9): 2891-2899.
- [20] WANG Xin, FAN Weidong, CHEN Jun, et al. Experimental study and kinetic analysis of the impact of ammonia co-firing ratio on products formation characteristics in ammonia/coal co-firing process[J]. *Fuel*, 2022, 329: 125496.
- [21] XIA Yu, HADI K, HASHIMOTO G, et al. Effect of ammonia/oxygen/nitrogen equivalence ratio on spherical turbulent flame propagation of pulverized coal/ammonia co-combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4043-4052.
- [22] HADI K, ICHIMURA R, HASHIMOTO G, et al. Effect of fuel ratio of coal on the turbulent flame speed of ammonia/coal particle cloud co-combustion at atmospheric pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4131-4139.
- [23] XU YiShu, WANG Huakun, Liu Xiaowei, et al. Mitigating CO₂ emission in pulverized coal-fired power plant via co-firing ammonia: a simulation study of flue gas streams and exergy efficiency[J]. *Energy Conversion & Management*, 2022, 256: 115328.
- [24] PERRIN N, DUBETTIER R, LOCKWOOD F, et al. Oxy combustion for coal power plants: advantages, solutions and projects[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 74(5): 75-82.
- [25] 煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰炉测试方法: DL/T 1106—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1. Test methods for pulverized coal combustion slagging characteristics and burn-out rate on one-dimensional flame furnace: DL/T 1106—2009[S]. Beijing: China Electric Power Press, Beijing, 2009: 1.

(责任编辑 刘永强)