

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301020

神府烟煤和云南劣质烟煤富氧分级燃烧 特性试验研究

张定海^{1,2}, 毛宇^{1,2}, 谢勇², 韦耿^{1,2}

(1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 四川 成都 611731;

2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001)

[摘要] 为探索富氧燃烧高效低氮燃烧的途径, 在东方锅炉试验中心下行炉上开展神府烟煤、云南劣质烟煤的富氧分级燃烧特性试验研究, 探索 2 种煤在富氧分级燃烧条件下的燃尽特性及氮氧化物排放特性。试验结果表明: 在富氧燃烧条件下, 采用燃尽风分级燃烧, 合理控制氧气分级送入, 神府烟煤燃烧效率可达 99% 以上, 烟气中 NO_x 排放可控制在 19.10 mg/MJ 以内; 云南劣质烟煤因着火延迟, 燃尽需要足够长的停留时间, 其燃烧效率略低, 通过合理氧分级, 燃烧效率最高可达 90% 以上, 烟气中 NO_x 排放可控制在 16.83 mg/MJ 内; 富氧燃烧炉膛温度对 NO_x 累积生成释放曲线的影响与空气燃烧一致, 炉膛温度越高, 煤粉颗粒升温速率越快; 采用富氧分级燃烧, 合理控制氧分级送入时机和位置, 可寻找到较高的燃烧效率和较低的 NO_x 排放, 实现富氧燃烧高效低氮排放。

[关键词] 富氧分级燃烧; 下行炉; 燃烧特性; NO_x 排放量

[引用本文格式] 张定海, 毛宇, 谢勇, 等. 神府烟煤和云南劣质烟煤富氧分级燃烧特性试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 174-180. ZHANG Dinghai, MAO Yu, XIE Yong, et al. Experimental study on oxyfuel staged combustion characteristics of Shenfu bituminous coal and Yunnan inferior bituminous coal[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 174-180.

Experimental study on oxyfuel staged combustion characteristics of Shenfu bituminous coal and Yunnan inferior bituminous coal

ZHANG Dinghai^{1,2}, MAO Yu^{1,2}, XIE Yong², WEI Geng^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;
2. Dongfang Electric group Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: In order to explore the way of high efficiency and low nitrogen combustion in oxy-fuel combustion, the experimental study on oxy-fuel staged combustion characteristics of Shenfu bituminous coal and Yunnan inferior bituminous coal was carried out on the down-draft furnace of Dongfang Boiler Test Center, and the burnout characteristics and nitrogen oxide emission characteristics of two kinds of coal under oxy-fuel staged combustion conditions were explored. The experimental results show that under the condition of oxy-fuel combustion, the combustion efficiency of Shenfu bituminous coal can reach more than 99%, and the NO_x emission concentration in flue gas can be controlled within 19.10 mg/MJ by using over-fire air staged combustion and reasonable control of oxygen staged feeding. The combustion efficiency of Yunnan inferior bituminous coal is slightly lower due to the delay of ignition and the long enough residence time required for burnout. However, the combustion efficiency can reach more than 90% with reasonable oxygen classification, and the NO_x emission concentration in flue gas can be controlled within 16.83 mg/MJ. The effect of furnace temperature of oxy-fuel combustion on the cumulative formation and release curve of NO_x is consistent with that of air combustion. The higher the furnace temperature, the faster the heating rate of pulverized coal particles. The higher combustion efficiency and lower NO_x emission concentration can be found by adopting oxy-fuel staged combustion and reasonably controlling the timing and position of oxygen staged injection, so as to achieve high efficiency and low NO_x emission of oxy-fuel combustion.

Key words: oxyfuel stage combustion; down-draft furnace; combustion characteristics; NO_x emissions

收稿日期: 2023-01-03

第一作者简介: 张定海 (1985), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为煤燃烧、环保及氢能利用, zhangdh@dbc.com.cn.

CO₂ 因具有温室效应^[1-2]被普遍认为是导致全球气候变暖的重要原因之一^[3], 富氧燃烧是实现 CO₂ 捕集减排的有效途径^[4-5]。富氧燃烧是用氧气和 CO₂ 代替助燃空气, 同时结合烟气再循环, 实现烟气中 CO₂ 的高浓度富集, 从而可较低成本实现 CO₂ 封存或资源化利用的工业过程。

富氧燃烧时 NO_x 排放比空气燃烧时低, 这为国内外学者们所认同^[6-9]。日本的 Kimura 在 1.2 MW 中型试验台上研究了煤 O₂/CO₂ 循环燃烧过程中 NO_x 的排放特性^[10-11]。Croiset 等人^[12-14]就常规煤粉燃烧、O₂/CO₂ 燃烧和真实烟气再循环燃烧条件下 NO_x 释放特性作了对比, 发现烟气循环比为 63% 时, NO 排放率相比于 O₂/CO₂ 燃烧要降低 40%~50%。在湖北应城 35 MW 富氧燃烧示范项目上, 发现未进行燃料和氧分级的富氧燃烧工况下, 烟气循环比为 73% 时, 炉膛出口烟气中 NO_x 浓度是空气下的 1.54~1.83 倍, 而排放总量仅为空气工况下的 0.38 倍。尽管富氧燃烧相比空气燃烧 NO_x 排放量大大减小, 但由于环保标准日益严格, 仍有必要采取其他技术措施来进一步降低 NO_x 排放。分级燃烧技术中的空气分级将氧化剂气体分批送入炉膛, 降低了一次燃烧区火焰峰值温度, 减少热力型 NO_x。分级空气燃烧是常规电站成熟有效的低 NO_x 排放技术, 目前已在常规电厂中得到广泛的应用。氧化剂分级燃烧是一种非常有效的降低 NO_x 的方法, 富氧燃烧的氧化剂中高浓度 CO₂ 取代了 N₂, 快速型和热力型 NO_x 相应降低, 高 CO₂ 氛围促进 CO 和碳氢自由基的生成, 提高了 NO_x 还原的比例。同时, 烟气循环技术也能降低 NO_x。吴振宇^[15]进行的试验结果表明, 普通空气工况下的 NO_x 排放可达 320 mg/MJ, 富氧工况下却只有 50~150 mg/MJ, 带有烟气循环的富氧燃烧可以显著降低 NO_x 排放量。于岩等学者发现, 烟气循环使富氧燃烧在炉膛内部有较高的 NO_x 富集, 但 NO_x 总体排放富氧燃烧低于空气燃烧^[16-19]。为探究富氧燃烧和空气燃烧下 NO 生成特性的不同, Andersson 等人的实验中保持当量比不变, 设置了氧体积分数 25%、27%、29% 的富氧工况与空气工况进行对比, 富氧工况的整体 NO_x 排放下降了 70%~75%, 分析认为 NO_x 的还原以及烟气再循环中的 NO 造成了 NO_x 的减少, 对 NO_x 排放值起到较大影响作用的依然是主燃区域的当量比^[8,20-21]。富氧燃烧过程中采用分级燃烧技术是一种非常有效的降低 NO_x 的方法^[21-23]。在试验台上深入研究中国典

型动力煤富氧分级燃烧能为我国富氧燃烧技术发展和应用提供理论支持, 具有重要意义。

围绕实现富氧燃烧高效、低氮燃烧技术需求, 在东方锅炉 50 kW 下行炉煤粉燃烧试验台上, 以神府烟煤和云南劣质烟煤作为典型煤种, 开展煤粉分级富氧燃烧的燃烧稳定性、燃尽特性和 NO_x 排放特性研究, 寻找最佳的富氧分级燃烧工况, 为我国富氧燃烧碳捕集发电技术的大型示范和产业化奠定基础。

1 试验装置及条件

1.1 50 kW 下行炉试验系统

50 kW 下行炉富氧分级燃烧系统(下行炉)工艺流程如图 1 所示。从再循环烟气集中箱中引出 4 路, 将高浓度氧气(O₂ 纯度可达 99% 以上)分别按一定的比例注入 4 路再循环烟气中, 作为一次风、二次风、燃尽风(2 路), 经电加热器加热, 与煤一起从相应的入口送入下行炉炉膛, 在炉膛内组织与常规燃烧方式类似的富氧分级燃烧过程。在下行炉炉膛下部布置有水冷枪, 将炉膛出口烟温控制在 800~1 000 °C。从炉膛底部出来的烟气经 2 级水冷却器冷却到 200 °C, 随后经气冷烟冷器冷却至约 150 °C, 再经布袋除尘器除尘后进入直接接触式烟冷器中进行水洗冷却、脱水、除尘。从直接接触式烟冷器出来的烟气被冷却至 50 °C 以下, 经循环风机增压后, 大部分烟气作为再循环烟气送入再循环烟气集箱, 少部分多余的烟气经烟囱排放。

富氧分级燃烧试验主要目的在于研究富氧分级燃烧机理以及污染物控制规律^[17], 探索实现富氧燃烧的高效、低氮氧化物排放途径。在 50 kW 下行炉顶部布置 1 台小型旋流燃烧器, 向下组织燃烧。一次风作为煤粉输送介质从炉膛顶部送入。为防止煤粉在一次风管道中沉积, 一次风流速须满足最低流速要求, 一次风量相对稳定。二次风分内、外二次风也从炉顶部送入, 喷口标高与一次风相同。燃尽风分上、下 2 层布置, 每层燃尽风又分 3 个不同标高送入炉内。上层燃尽风分 3 级分别布置在从上至下第 2 节炉体上; 下层燃尽风分 3 级分别布置在从上至下第 4—6 节炉体上。试验时仅调节上、下层燃尽风总阀门开度, 各级燃尽风分支阀门开度保持不变。图 2 为各级燃尽风在炉体上的具体位置。

富氧分级燃烧主要是调节二次风与上下层燃尽风比例, 寻找合适的风率配比, 实现高效、低污染物排放。表 1 为各层燃尽风风口位置。

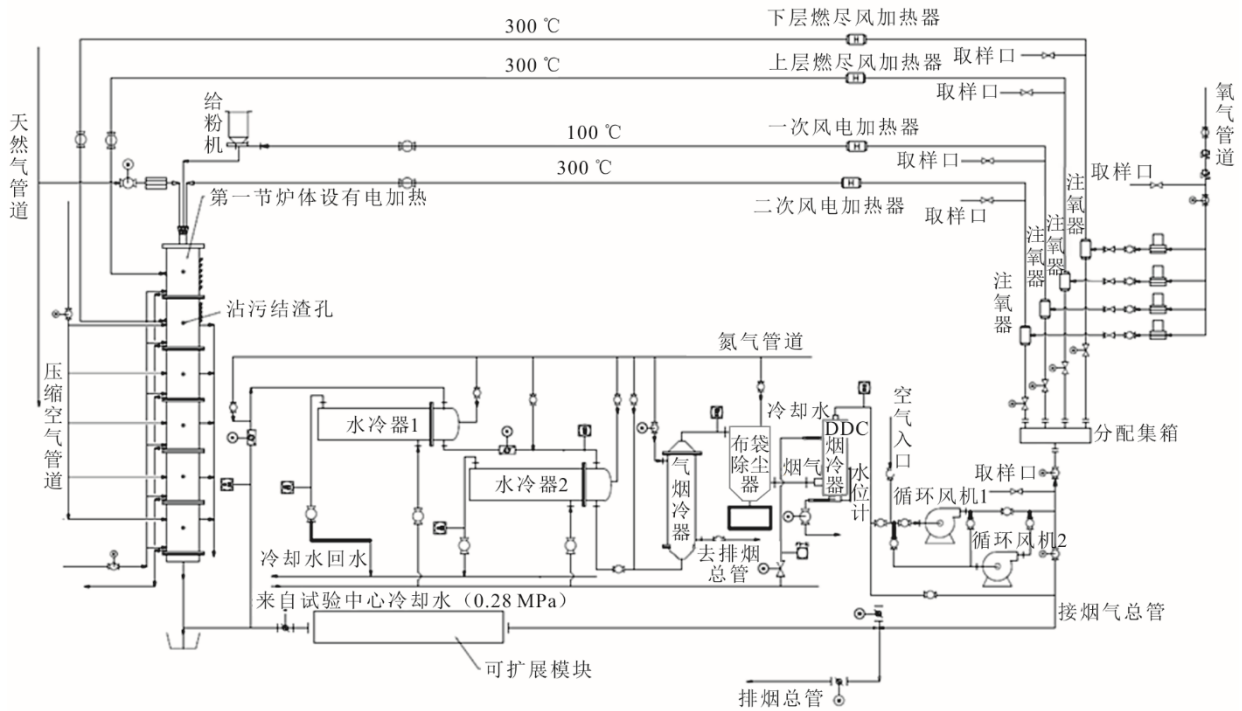


图 1 系统工艺流程示意
Fig.1 System process flow diagram

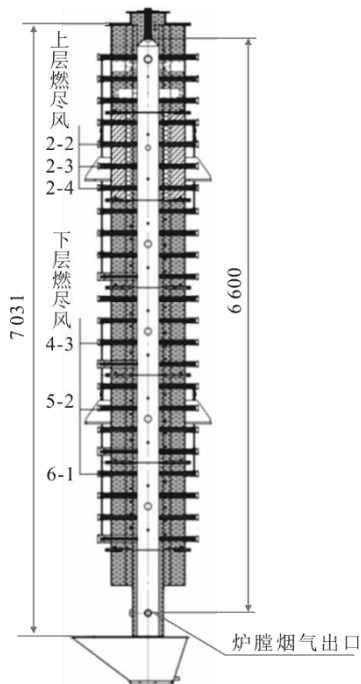


图 2 各级燃尽风在炉体上的具体位置 (mm)
Fig.2 The location of each over-fire air on the furnace (mm)

1.2 试验煤种煤质

神府烟煤灰分低,挥发分高,属比较好烧的优质烟煤。云南烟煤高灰分、高硫分,着火延迟,属比较难烧的劣质烟煤。试验期间多次取煤粉进行筛分,得到神府烟煤煤粉平均细度 $R_{90}=9.5\%$, 云南劣

质烟煤煤粉平均细度 $R_{90}=8.2\%$ 。神府烟煤、云南劣质烟煤的工业分析与元素分析结果见表 2。

表 1 各层燃尽风风口位置
Tab.1 The position of burnout air outlet in each layer

燃尽风名称	燃尽风级数	炉体位置	风口位置 (从上至下) /mm
上层燃尽风	第 1 级	2-2	1 210
	第 2 级	2-3	1 460
	第 3 级	2-4	1 710
下层燃尽风	第 1 级	4-3	3 460
	第 2 级	5-2	4 210
	第 3 级	6-1	4 960

1.3 试验工况

神府烟煤与云南劣质烟煤富氧分级燃烧各工况给粉量、炉温维持相对稳定。神府烟煤共 12 个富氧工况,给粉量维持在 8.0~8.2 kg/h,炉温在 1 230~1 370 °C; 云南劣质烟煤共 5 个富氧工况,给粉量维持在 11.5~12.0 kg/h,炉温在 1 150~1 230 °C。一次风温控制在 80 °C,二次风、燃尽风温控制在 240~300 °C。

2 试验结果及分析

试验分空气燃烧和富氧燃烧 2 部分。

2.1 空气燃烧

神府烟煤与云南劣质烟煤空气燃烧配有一次风、内外二次风和燃尽风。

表 2 煤质工业分析和元素分析
Tab.2 Industrial analysis and elemental analysis of coal

煤种	$Q_{ar,net}/(MJ \cdot kg^{-1})$	工业分析 $w_{ad}/\%$				元素分析 $w_{ad}/\%$				
		M	V	A	FC	C	H	O	N	S
神府煤	26.08	7.20	31.00	8.38	52.98	69.89	3.94	9.32	0.98	0.33
云南煤	17.97	1.60	15.84	39.45	43.07	47.31	2.62	5.18	0.71	3.09

2.1.1 神府烟煤空气燃烧

神府烟煤空气干燥基挥发分高达 31.00%，是一种易于着火和燃尽的煤。神府烟煤空气燃烧各工况各级风率、燃烧效率曲线如图 3 所示。从图 3 可知，在空气燃烧条件下，神府烟煤燃尽率较高，燃烧效率在 99.14%~99.46%。

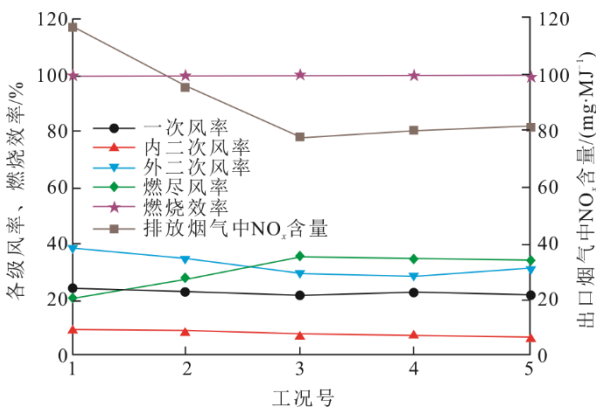


图 3 神府烟煤空气燃烧各级风率与燃烧效率曲线
Fig.3 Air rate and combustion efficiency curve of air combustion

从图 3 还可以看出，在空气燃烧条件下，采用分级送风，烟气中 NO_x 排放（折算到氧体积分数 $\varphi(O_2)=6\%$ 下）可控制在 77~117 mg/MJ（折合为 267~406 mg/m³（标准状态，下同）），小于 450 mg/m³。

随着燃尽风率从 21.18% 增加至 34.69%，CO 排放保持极低水平，可以认为 CO 没有出现升高；NO_x 排放从 117 mg/MJ（约 406 mg/m³）降低至 80 mg/MJ（约 277 mg/m³），下降 31.6%。

燃尽风率增加后，会加强炉膛在垂直方向上的分级效果，主燃烧器区域过量空气系数降低，主燃烧区域的温度降低，产生的热力型 NO_x 减少，NO_x 下降。因此，根据该组试验结果可以看出，对于烟煤而言，使用新型燃烧器时，常用的设计燃尽风率 35%，可以在保证实炉 NO_x 排放处于很低水平的同时取得较好的燃尽效果。

2.1.2 云南劣质烟煤空气燃烧

云南劣质烟煤空气燃烧各工况各级风率、燃烧效率曲线如图 4 所示。云南劣质烟煤空气干燥基挥

发分为 15.84%，灰分为 39.45%，属一种高灰分劣质烟煤，其着火略显延迟，燃尽时间长。由于试验台炉膛高度的原因，该煤在试验台上的燃尽率明显比实炉偏低。从图 4 可以看出，在空气燃烧条件下，燃烧效率在 91.24%~96.11%，烟气中 NO_x 排放 179~295 mg/MJ（约折合 434~716 mg/m³）。燃尽风的提高对 NO_x 排放有明显好处，但对燃烧效率的不利影响也很明显。

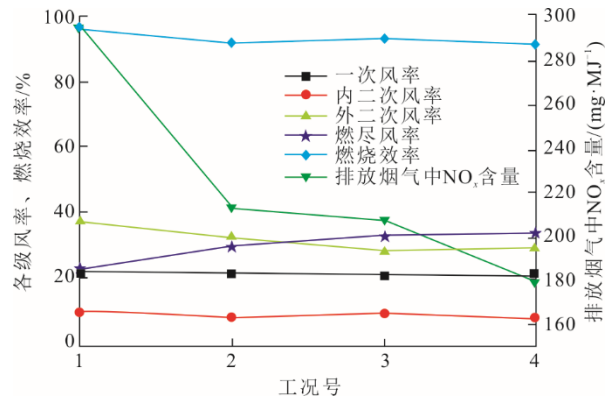


图 4 云南劣质烟煤空气燃烧各级风率与燃烧效率曲线
Fig.4 Air rate and combustion efficiency curve of air combustion

随着燃尽风率从 23.56% 增加至 34.36%，CO 排放从 84 mg/m³ 显著升高至 341 mg/m³；NO_x 排放从 295 mg/MJ（约 716 mg/m³）显著降低至 179 mg/MJ（约 434 mg/m³），降幅 40%。根据该组试验结果可以看出，对于该云南劣质烟煤而言，NO_x 排放随燃尽风率变化的变化幅度更大、更敏感，且变化趋势符合实炉经验。

2.2 富氧分级燃烧

富氧分级燃烧数据获得的试验条件：炉膛第 1—4 节（从上往下 0~4 m）维持微正压，炉膛第 5 节入口压力接近 0，第 5 节以下为微负压。在下行炉上燃用神府烟煤、云南劣质烟煤进行的富氧分级燃烧试验，烟气中 CO₂ 体积分数最高达到 83.9%（20 °C 常温下湿基），表明 50kW 下行炉改造的富氧分级燃烧系统漏风可控，密封性能较为良好。图 5 为 50 kW 下行炉富氧分级燃烧试验分散控制系统（DCS）画面。

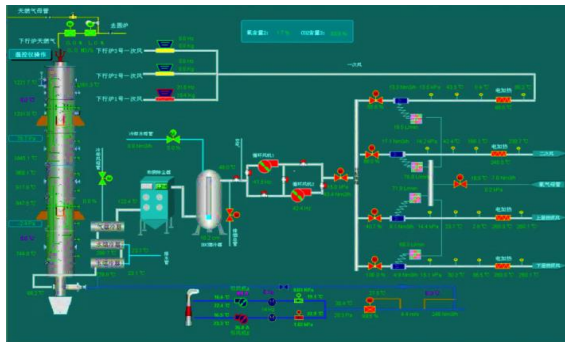


图5 50 kW下行炉富氧分级燃烧试验 DCS 画面
Fig.5 DCS screen of 50 kW oxyfuel staged combustion test furnace

2.2.1 神府烟煤燃烧效率

神府烟煤在下行炉上采用富氧分级燃烧,各主要工况燃烧效率在 98.85%~99.58%。富氧燃烧各级风合理分级,燃烧效率可高达 99% 以上。神府烟煤富氧分级燃烧总氧化学当量、炉膛温度与燃烧效率曲线如图 6 所示。从图 6 可知,富氧燃烧各级风合理分级,神府烟煤燃烧效率与空气燃烧的燃烧效率基本相当。因此,神府烟煤无论是空气燃烧还是富氧燃烧,如果配风合理,燃烧效率能达到 99% 以上,显著优于保证指标(90%),能实现高效燃烧。在工程实炉上,炉膛高度更高,煤粉在炉内停留时间更长,炉膛温度更高,燃烧更充分,燃烧效率更为理想。

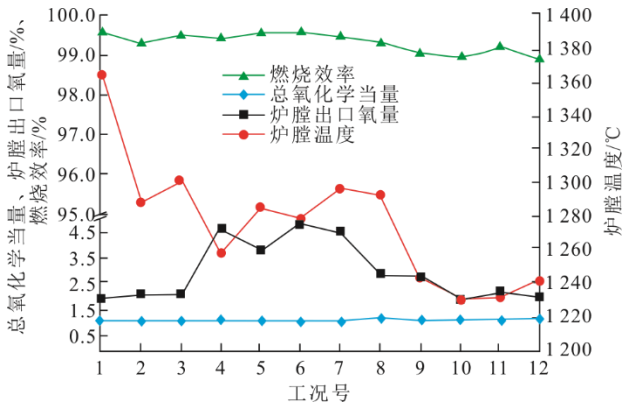


图6 富氧分级燃烧总氧化学当量、炉膛温度与燃烧效率
Fig.6 The curve of total oxygen chemical equivalent, furnace temperature and combustion efficiency of oxyfuel staged combustion

2.2.2 神府烟煤 NO_x 排放特性

神府烟煤在下行炉上采用富氧分级燃烧,更为关注的是其污染物排放方面。图 7 为神府烟煤各级风氧化学当量比与 NO_x 排放关系曲线。由图 7 可知:神府烟煤富氧分级燃烧各试验工况,燃烧器出口第 1 节炉体炉膛温度在 1 230~1 370 °C;炉膛出口烟气中 NO_x 在 10.82~148.85 mg/MJ (多数试验工况达到 21.00 mg/MJ 以下)。在富氧燃烧条件下,随着燃尽风

率的增加,NO_x 呈现下降趋势。随着炉膛主燃烧区氧量的降低,NO_x 也呈现下降趋势,多级燃尽风布置比单级燃尽风布置的 NO_x 排放更低^[24-25]。但从图 7 可以看到,富氧燃烧条件下,单级低燃尽风率下的 NO_x 初始排放非常高,达 148.85 mg/MJ (换算到 φ(O₂)=6% 下,约折合 1 784.99 mg/m³);在多级燃尽风布置高燃尽风率下,NO_x 排放又同空气燃烧比较接近,表明多级燃尽风布置对富氧燃烧的氮氧化物的控制更有效。

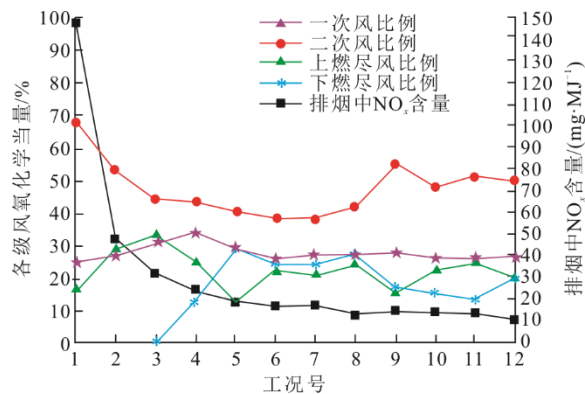


图7 各级风氧化学当量比与 NO_x 排放关系曲线
Fig.7 The relationship curve between streams chemical equivalent ratio and NO_x emission

在炉膛出口氧量差别不大的工况 1—工况 3 与工况 10—工况 12,NO_x 排放差异很大;而炉膛出口氧量相对较高的工况 4—工况 7 与炉膛出口氧量相对较低的工况 8—工况 12 相比,NO_x 排放较为接近;表明在富氧分级燃烧试验范围内,炉膛出口氧量的变化对 NO_x 的生成没有直接、明显的关系。

为防止煤粉沉积,一次风氧体积分数维持在 21% 左右,分级风的调整主要针对二次风和上、下层燃尽风。下层燃尽风是否投入,对炉膛出口烟气中 NO_x 排放影响较大。在下层燃尽风未投入,仅投入一、二次风、上层燃尽风的情况下,烟气中 NO_x 排放仅能控制在一定范围,难以进一步将 NO_x 控制在较低的水平。要实现烟气中 NO_x 低排放,需投入下层燃尽风,采用各级风深度氧分级。由图 7 可见,在下层燃尽风投入的各工况,烟气中 NO_x 排放可控制在 19.10 mg/MJ (相当于 250 mg/m³);最低可控制在 10.82 mg/MJ (相当于 150 mg/m³) 左右,比空气燃烧工况(77~117 mg/MJ) 低得多。

2.2.3 云南劣质烟煤燃烧效率

云南劣质烟煤的空气干燥基挥发分为 15.84%,灰分为 39.45%,挥发分相对较低、灰分较高,着火延迟,尤其是富氧燃烧时着火延迟较为严重,是一种难烧的劣质烟煤,着火和燃尽率相对较差。云南劣质烟煤试烧各级风参考神府烟煤富氧分级试烧

的经验,为防止堵粉,一次风维持相对稳定的流速,二次风及上、下层燃尽风选用相对合理的比例。云南劣质烟煤富氧燃烧各工况主要调整炉膛出口烟气中的含氧量。云南劣质烟煤富氧分级燃烧总氧化学当量、炉膛温度与燃烧效率曲线如图 8 所示。

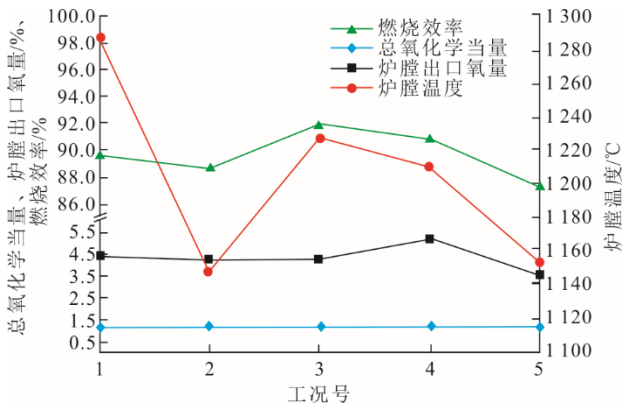


图 8 分级燃烧总氧化学当量、炉膛温度与燃烧效率曲线
Fig.8 The curve of total oxygen chemical equivalent, furnace temperature and combustion efficiency combustion efficiency of oxyfuel staged combustion

因着火延迟,燃尽需要足够长的停留时间。受下行炉炉高限制,燃烧时间不足,导致云南劣质烟煤在下行炉上的燃烧效率较低。从图 8 可以看出,在下行炉上采用富氧分级燃烧,各主要工况燃烧效率在 87.00%~91.96%,燃烧效率相对较低。通过合理氧分级,燃烧效率最高可达 90% 以上。若在大型试验台或大型工程上进行富氧分级燃烧,适当延长炉内停留时间,燃尽率会明显提升。

2.2.4 云南劣质烟煤 NO_x 排放特性

云南劣质烟煤在下行炉上富氧分级试烧,在工况的选取上参照了神府烟煤试烧较为理想的工况条件。图 9 为云南劣质烟煤在下行炉富氧燃烧各工况各级风氧化学当量比与 NO_x 排放关系曲线。

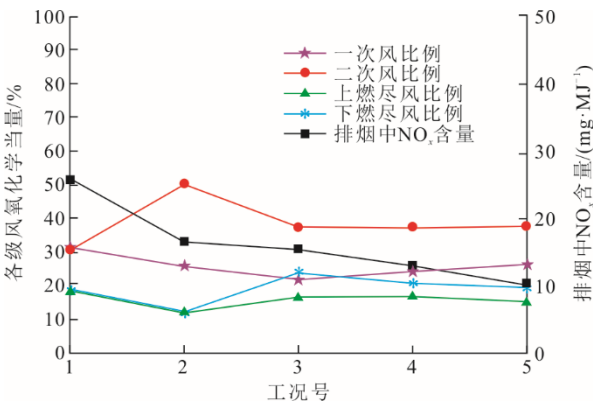


图 9 各级风氧化学当量比与 NO_x 排放关系曲线
Fig.9 The relationship curve between streams chemical equivalent ratio and NO_x emission

从图 9 可以看出:在炉膛出口氧量差别不大的工况 2、工况 3、工况 5,烟气中 NO_x 排放差异较大;而炉膛出口氧量相对较高的工况 4 与炉膛出口氧量相对较低的工况 2、工况 3 相比,NO_x 排放更低。这表明,在试验范围内,燃烧的总氧量控制对 NO_x 的影响不太明显。

从图 8、图 9 可知,云南劣质烟煤富氧分级燃烧时,工况 1、工况 3、工况 4 炉温比工况 2、工况 5 均高,但烟气中 NO_x 排放并不呈现规律性变化。因此,在炉膛温度维持在相对稳定的小范围内波动时,烟温对烟气中 NO_x 排放影响有限。

云南劣质烟煤富氧燃烧各试验工况,燃烧器出口第 1 节炉体炉膛温度在 1 150~1 300 ℃,二次风与上、下层燃尽风合理分级,可控制烟气中 NO_x 排放在 400 mg/m³ (约 28 mg/MJ) 以内。云南劣质烟煤在 50 kW 下行炉上富氧分级燃烧,炉膛出口烟气中 NO_x 排放为 10.19~25.87 mg/MJ (换算成 φ(O₂)=6% 下的为 151.38~247.53 mg/m³),相当于空气燃烧排放最低值 179 mg/MJ (约 434 mg/m³) 的 35%~57%,即在 50 kW 下行炉上富氧分级燃烧比空气燃烧 NO_x 排放减少了 65%~43%。各级风合理分级,NO_x 可控制在 16.83 mg/MJ (约 250 mg/m³) 以内,远小于 28 mg/MJ (约 400 mg/m³) 指标。

3 结 论

1) 在富氧燃烧条件下,采用燃尽风分级燃烧,氧气分级送入,神府烟煤燃烧效率可控制在 99% 以上,燃尽率较高;云南劣质烟煤富氧燃烧着火延迟,燃烧需要足够长的停留时间,合理控制氧分级送入,燃烧效率可达到 90% 以上。

2) 在富氧燃烧条件下,采用燃尽风分级燃烧,合理控制氧气分级送入,无论是神府烟煤,还是云南劣质烟煤,烟气中 NO_x 排放可控制在 250 mg/m³ 以内,远低于指标要求的 400 mg/m³。

3) 富氧燃烧炉膛温度对 NO_x 累积生成释放曲线的影响与空气燃烧是一致的,炉膛温度越高,煤粉颗粒升温速率越快。采用富氧分级燃烧,氧气分级送入,前期煤粉燃烧处于缺氧还原气氛,可有效控制前期 NO_x 的生成,下行炉炉膛出口烟气中 NO_x 可控制在较低水平。

4) 在富氧燃烧条件下,合理控制氧分级送入时机和位置,可寻找到较高的燃烧效率和较低的 NO_x 排放。

[参 考 文 献]

- [1] LI H, YAN J. Preliminary study on CO₂ processing in CO₂ capture from oxy-fuel combustion[C]//Proceedings of the

- ASME Turbo Expo, Montreal, Canada, 2007: 1.
- [2] TAN Y, DOUGLAS M A, THAMBIMUTHU K V. CO₂ capture using oxygen enhanced combustion strategies for natural gas power plants[J]. Fuel, 2002, 81(8): 1007-1016.
- [3] 郑博福, 邓红兵. 我国未来能源消费及其对环境的影响分析[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 1-6.
ZHENG Bofu, Deng Hongbing. Analysis of China's energy consumption and its impact on environment in the future[J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 1-6.
- [4] 薛宪阔, 刘彦丰. O₂/CO₂ 燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(1): 57-60.
XUE Xiankuo, LIU Yanfeng. The evolve of research on O₂/CO₂ combustion technology[J]. Clean Coal Technology, 2008, 14(1): 57-60.
- [5] SIMPSON A P, SIMON A. Second law comparison of oxy-fuel combustion and post-combustion carbon dioxide separation[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(11): 3034-3045.
- [6] 骆仲泐, 毛玉如, 吴学成, 等. O₂/CO₂ 气氛下煤燃烧特性试验研究与分析[J]. 热力发电, 2004, 33(6): 14-18.
LUO Zhongyong, MAO Yuru, WU Xuecheng, et al. The study on and analysis of burning behavior for coal under atmosphere of O₂/CO₂[J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(6): 14-18.
- [7] MCCAULEY K, FARZAN H, ALEXANDER K, et al. Commercialization of oxy-coal combustion: applying results of a large 30 MW_{th} pilot project[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 439-446.
- [8] ANDERSSON K, NORMANN F, JOHNSON F. Experiments and modeling on oxy-fuel combustion chemistry during lignite-firing[C]//The Proceedings of the 32nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, USA, 2007: 1.
- [9] 王春波, 雷鸣, 阎维平, 等. 煤在增压富氧燃烧条件下 NO_x 排放特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 27-33.
WANG Chunbo, LEI Ming, YAN Weiping, et al. Experimental study on NO_x release characteristics during pressurized oxy-fuel combustion of pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 27-33.
- [10] SCHONENBECK C, GADIOU R, SCHWARTZ D. A kinetic study of the high temperature no-char reaction[J]. Fuel, 2004, 83: 443-450.
- [11] SUDA T, MASUKO K, SATO J, et al. Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO₂/O₂ combustion[J]. Fuel, 2007, 8: 2008-2015.
- [12] 李辉, 范潇, 丁松雄, 等. 用富氧燃烧技术减少水泥生产过程 NO_x 排放的可行性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(2): 292-296.
LI Hui, FAN Xiao, DING Songxiong, et al. Feasibility analysis of oxy-fuel technology used for cement production process to control NO_x emissions[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(2): 292-296.
- [13] CROISET E, THAMBIMUTHU K V. NO_x and SO₂ emissions from O₂/CO₂ recycle coal combustion[J]. Fuel, 2001, 80: 2117-2121.
- [14] 刘彦. O₂/CO₂ 煤粉燃烧脱硫及 NO 生成特性实验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 1.
LIU Yan. The experimental and theory study of characteristics about desulfurization and NO release under O₂/CO₂ coal combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 1.
- [15] 吴振宇. 富氧燃烧方式下燃煤 SO₃ 的异相生成研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 1.
WU Zhenyu. Heterogeneous formation of SO₃ in oxy-coal combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 1.
- [16] 于岩, 阎维平, 刘彦丰, 等. 空气分离/烟气再循环技术中 NO_x 排放特性及机理分析[J]. 热力发电, 2003, 32(10): 47-49.
YU Yan, YAN Weiping, LIU Yanfeng, et al. The NO_x emission behavior in air separation/ flue gas recycling combustion technology and mechanism analysis thereof[J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(10): 47-49.
- [17] 张利琴, 宋蓄, 吴宁, 等. 煤烟气再循环富氧燃烧污染物排放特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(29): 35-40.
ZHANG Liqin, SONG Qiang, WU Ning, et al. Study on pollutant emission characters from oxy-fuel combustion of coal with recycled flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(29): 35-40.
- [18] MACKRORY A J, TREE D R. Measurements and modeling of nitrogen evolution in staged oxy-fuel combustion[C]//AICHE The 2007 Annual Meeting, 2007: 1.
- [19] YAMADA T, TAMURA M, FFJIMORI T, et al. Test results of oxy-fuel combustion and outline of demonstration project in Australia[C]//Challenges of Power Engineering and Environment. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 756-761.
- [20] 张少华. 富氧燃烧过程中污染物气相相互转化特性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014: 1.
ZHANG Shaohua. Study on gas phase conversion characteristics of pollutant during oxy-fuel combustion [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014: 1.
- [21] 毛宇, 贺红坡, 郭欣, 等. 吡咯类氮富氧燃烧的分子动力学研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(10): 59-65.
MAO Yu, HE Hongpo, GUO Xin, et al. Molecular dynamics of the oxy-enriched combustion of pyrrolic nitrogen[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(10): 59-65.
- [22] 方立军, 高正阳, 阎维平, 等. 低挥发分煤燃烧 NO_x 排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 211-214.
FANG Lijun, GAO Zhengyang, YAN Weiping, et al. Experimental study on performance of NO_x emission for low volatilization coals[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 211-214.
- [23] 张志, 李振山, 蔡宁生. 焦炭燃烧模型的改进及其 Fluent 实现与实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1681-1688.
ZHANG Zhi, LI Zhenshan, CAI Ningsheng. An improved char combustion model and its implement in Fluent and experimental validation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1681-1688.
- [24] 王春波, 乔木森, 雷鸣. 高温低氧气氛下煤粉燃烧特性[J]. 动力工程学报, 2015, 35(8): 619-631.
WANG Chunbo, QIAO Musen, LEI Ming. Investigation on combustion characteristics of pulverized coal in high-temperature low-oxygen atmosphere[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35 (8): 619-631.
- [25] 段伦博, 赵长遂, 李庆钊, 等. O₂/CO₂ 气氛下煤焦燃烧实验研究[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(6): 654-658.
DUAN Lunbo, ZHAO Changsui, LI Qingzhao, et al. Experimental investigation on coal and char combustion in O₂/CO₂ mixture[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(6): 654-658.

(责任编辑 刘永强)