



移动扫码阅读

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,2021,48(3):215-221. doi:

10.13199/j.cnki.cst.2021.03.030

CHENG Xiaolei.Stuay on effect of oxygen-enriched partial gasification on NO_x formation during pulverized coal combustion[J].Coal Science and Technology,2021,49(3):215-221. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.03.030

煤粉燃烧时富氧部分气化对 NO_x 生成的影响研究

程晓磊^{1,2,3}

(1.煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;

3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:燃煤锅炉运行中氮氧化物(NO_x)初始排放浓度高,影响其系统运行的经济性。为减少煤粉燃烧 NO_x 的生成量,从源头控制 NO_x,提出了煤粉富氧部分气化耦合燃烧的低氮燃烧技术思路。煤粉在燃烧器内低过量空气系数和富氧气氛条件下生成强还原性气体,并通过炉膛分级配风实现控制煤粉燃烧初始 NO_x 排放的目的。数值模拟,气相反应模型采用有限速率/涡耗散(FR/ED)模型,考虑了煤粉在气化反应中涉及的反应动力学机理,更适合于煤粉富氧部分气化反应模拟。结果表明:采用氧体积分数为 25.9% 的富氧气氛时,燃烧器内反应进行程度明显提升,燃烧器内温度由 897 ℃ 升至 1 007 ℃,燃烧器出口温度由 1 255 ℃ 升至 1 356 ℃,CO 体积分数由 5.48% 升至 7.17%,碳转化率由 61.54% 升至 86.27%。7 MW 双锥燃烧器的富氧试验结果验证了数值模拟的结论,燃烧器内采用合适的氧浓度和过量空气系数,可形成强还原性气氛;燃烧器内过量空气系数越低,燃烧器出口 CO 和 CH₄ 等还原性气体的浓度越高,燃烧器内空气中氧体积分数由 21.0% 升至 28.3% 时,燃烧器出口中心处 CO 体积分数由 9.540% 提高至 20.258%,燃烧器出口 NO_x 生成量为 0。工业现场试验结果表明,富氧部分气化和空气分级均能起到降低锅炉 NO_x 初始排放的作用,两者结合低氮效果更好,在富氧比例为 28.3%、分级配风比例为 41.2% 时,锅炉 NO_x 初始排放质量浓度可由 546 mg/m³ 降至 159 mg/m³。

关键词:煤粉燃烧;低氮燃烧;富氧分级燃烧;NO_x 排放控制

中图分类号:TQ171.6+23.3

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)03-0215-07

Stuay on effect of oxygen-enriched partial gasification on NO_x formation during pulverized coal combustion

CHENG Xiaolei^{1,2,3}

(1.China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China;2.State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract:The problem of high initial emission of nitrogen oxides (NO_x) is common in the operation of coal-fired boilers, which affects the economy of system operation. In order to reduce the amount of NO_x generated during pulverized coal combustion from the origin, a new low-NO_x combustion technology with oxygen-enriched partial gasification coupled combustion was proposed in this paper. The pulverized coal combustion generates strong reducing gases under the conditions of low excess air coefficient and oxygen-enriched atmosphere. The purpose of controlling the initial NO_x emission from pulverized coal combustion was achieved by air-staging technology in the furnace. The FR/ED model was used to simulate the gas phase reaction, which took into account the gasification reaction of pulverized coal. It is more suitable for the simulation of oxygen-enriched partial gasification reaction of pulverized coal. According to the simulation results, when using a 25.9% oxygen-enriched atmosphere, the combustion reactions in the burner was improved sufficiently. The inner temperature and the exit temperature in the burner were increased from 897 ℃ to 1 007 ℃, and from 1 255 ℃ to 1 356 ℃, separately, while the CO content was increased from 5.48% to 7.17%, and the carbon conversion rate was increased from 61.54% to 86.27%. The oxygen-enriched

收稿日期:2020-05-29;责任编辑:郭鑫

基金项目:中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项资助项目(2018-TD-ZD001);中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项资助项目(2019-TD-MS012)

作者简介:程晓磊(1986—),男,河北邯郸人,助理研究员,博士。E-mail:chengxl328@126.com

experimental results of 7 MW double-cone burner showed a quite good agreement with that of simulation works, strong reducing atmosphere was achieved by proper oxygen content and excessive ratio in the burner, and the lower the excessive ratio, the stronger the reductive gas composition such as CO and CH₄ at the burner outlet. When the oxygen content in the air of the burner was increased from 21% to 28.3%, the CO content in the outlet center of the burner was increased from 9.54% to 20.258%, and the NO_x production at the outlet of the burner was zero. Industrial experiments showed that, oxygen partial gasification and air-staging can both reduce the initial emission of NO_x from boilers, and the combination of the two methods could made a better low-NO_x effect. When the oxygen enrichment ratio was 28.3% and the air distribution ratio was 41.2%, the initial emission of NO_x from boilers can be reduced from 546 mg/m³ to 159 mg/m³.

Key words: pulverized coal combustion; low-NO_x combustion; oxygen enrich and air staging combustion; NO_x emission contoung

0 引言

我国新能源行业发展日益迅速,但能源结构特点决定了化石能源尤其是煤炭资源仍是我国能源行业的基础支柱。到2035年,中国基础能源消费中煤炭占比仍将接近45%^[1]。在国家对节能环保要求不断提高的背景下,超低排放、近零排放使环保设备的投资逐渐攀升,严重制约了煤粉锅炉系统的推广和应用^[2]。煤粉燃烧过程生成的NO_x可通过低氮燃烧技术从源头降低,其关键要保证燃烧初期处于还原性气氛,抑制NO_x的生成并还原部分已生成的NO_x。富氧燃烧(Oxy-Fuel Combustion)是新型低氮燃烧技术,使用氧体积分数(如无特殊说明,下文中气体浓度均指体积分数)比空气高的气体燃烧,结合烟气再循环技术,使烟气中高浓度CO₂与富氧或纯氧空气混合。富氧燃烧技术在常规电站锅炉^[3-4]和循环流化床^[5-6]上均有应用。单纯富氧燃烧并不能降低NO_x排放。ERIC等^[7]、FAN等^[8-9]、SHADDIX等^[10]研究表明,煤粉燃烧全过程采用富氧方式,无论富氧(氧体积分数21%~30%)还是纯氧燃烧,均会提高煤粉燃烧产生的NO_x总量,NO_x排放量最大增幅在30%左右。这是因为,虽然富氧条件下烟气中N₂浓度减少,热力型NO_x降低;但由于单纯富氧燃烧时煤粉处于氧化气氛,富氧气氛会提高挥发分N的析出,挥发分N的转化为NO_x的比例比焦炭N转化比例高,导致总体燃料N的转化率明显增加。

富氧燃烧一般需要结合烟气再循环和空气分级等低氮燃烧技术进行,在主燃区采用较低过量空气系数(0.15~0.40)的富氧燃烧,发生部分气化反应,形成还原性气氛(CO浓度可超过14%),在还原区和燃尽区采用空气或低氧燃烧方式,实现降低NO_x的排放。文献[11-12]在富燃O₂/CO₂火焰中观测到了比在相同配比的燃料空气火焰中更多的OH自由基,认为燃烧时链反应基团数量巨大,CO₂的反应与燃烧链反应的竞争作用可忽略。刘忠等^[13]采用

纯氧燃烧结合再循环烟气的低氮燃烧技术研究污染物生成与控制时指出,再循环烟气比例为40%时,NO_x排放量可降至原来的1/7。FAN等^[8]在20 kW中试规模条件下,以通过富氧燃烧加深度空气分级的方式,使用氧浓度为21%~30%的空气,在分级配风比例为42%的条件下,实现了还原区CO浓度大于13%、NO_x最终排放减排80%以上的效果。MACKRORY等^[14-15]、游卓等^[16-17]的研究也证明了富氧空气分级燃烧的低氮作用。OUYANG等^[18]和ZHU等^[19]利用200 kW预热式循环流化床煤粉燃烧试验平台研究了循环流化床预热气化燃烧、下行燃烧炉燃尽系统的燃烧和低氮特性。在预热式循环流化床内配风的过量空气系数为0.3~0.5,下行炉进口配风比例为0.5~0.3,燃尽风配风比例0.4~0.5的条件下,预热式循环流化床内碳转化率大于40%,烟气中CO、H₂和CH₄浓度分别为9.0%、7.5%和2.0%左右,NO_x排放可降至100 mg/m³以下。

采用富氧结合分级燃烧的方式,使主燃区配入过量空气系数较小的富氧空气,来获得较高CO浓度,实现较强还原性气氛。其关键是在主燃烧区内尽可能提高煤粉的部分气化反应,提高还原性区域的范围和还原性气氛强度,强化空气分级燃烧效果,为控制煤粉燃烧过程中NO_x含量提供有利条件。在煤粉富氧空气分级燃烧的基础上,结合煤粉气化管理理念,形成煤粉富氧部分气化耦合燃烧以降低NO_x排放。基于此,利用数值模拟研究了7 MW燃烧器的燃烧特性、气化反应特性,并在鄂尔多斯某10 t/h煤粉蒸汽锅炉系统上进行了煤粉富氧部分气化和分级燃烧的低氮燃烧试验研究,验证了富氧部分气化和降低煤粉燃烧过程NO_x生成量的作用,为低氮燃烧的实际应用提供了理论基础和数据支持。

1 煤粉富氧部分气化数值模拟

流体力学耦合燃烧的数值模拟方法在煤粉燃烧特性研究中应用日益广泛。由于煤粉在富氧部分气化条件下的反应与常规煤粉燃烧不同,需选用合适

的气相反应模型。常规煤粉燃烧过程常用混合分数 PDF(Probability Density Function)方法和组分输运模型中的涡耗散(Eddy Dissipation Model)模型,但该 2 种反应模型均未考虑反应过程,只考虑了焦炭的燃烧反应,强还原性气氛下的气化反应模拟准确性差、精度低^[20-21]。因此,气相反应采用 FR/ED(Finite Rate/Eddy Dissipation)模型,并考虑气化过程中所涉及的化学反应。该模型适合用于富氧部分气化条件下的模拟,反应方程及反应机理参数见表 1。

表 1 富氧部分气化过程的化学反应及反应动力学机理

Table 1 Some reaction and kinetic mechanisms for oxygen rich combustion

项目	化学反应方程式	指前因子 A	活化能 E _a / (10 ² kJ · mol ⁻¹)
1	V+1.342 2O ₂ →1.289 3CO+ 1.999 7H ₂ O+0.028 8N ₂	2.119×10 ¹¹	202.7
2	CO+0.5O ₂ →CO ₂	2.239×10 ¹²	170.0
3	C+0.5O ₂ →CO	267	126.0
4	C+CO ₂ →2CO	2 100	298.0
5	C+H ₂ O→CO+H ₂	36	154.0
6	H ₂ +0.5O ₂ →H ₂ O	8.830×10 ⁸	100.0
7	CO+H ₂ O→CO ₂ +H ₂	2.980×10 ¹²	369.0

注:V 为挥发分。

模拟中涉及的主要模型参数如下:湍流模型采用 Realizable k-ε 模型,该模型可相对准确模拟湍流流动中的旋转射流问题;燃烧器符合光学深度大于 1 的条件,辐射模型选用具有较高计算效率的 P1 模型;焦炭的挥发分析出选用双竞争反应模型,两反应在不同温度范围区间可控制析出速率,其反应动力学参数见表 2;气固两相流动选用拉格朗日法的 DPM 离散相模型,适用于离散相体积分数小于 10% 的模型,DPM 模型使用面源注入。数值模拟的研究利用商用软件 Ansys Fluent 进行。

表 2 双竞争反应模型动力学参数

Table 2 Reaction kinetics parameters of two competing rates model

项目	指前因子 A	活化能 E _a / (kJ · mol ⁻¹)	生成率因子
1 次(慢速)反应	2.0×10 ⁵	104.6	0.3
2 次(快速)反应	1.3×10 ⁷	167.4	1.0

燃烧器采用自主研发的 7 MW 中心逆喷双锥燃烧器^[22-23],结构如图 1 所示。燃烧器 1 次风用于输送煤粉,并在中部逆喷进入燃烧器前锥,与 2 次风在前锥混合燃烧。由于其具备独特的燃料逆喷、烟气

回流和双锥预燃室等特点,7 MW 中心逆喷双锥燃烧器在煤粉着火、稳定燃烧、低氮燃烧等方面有明显优势。

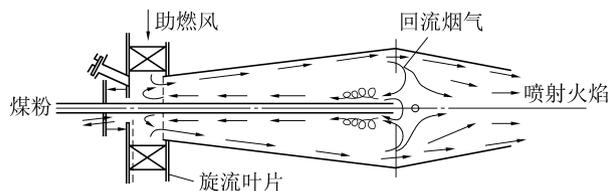


图 1 7 MW 中心逆喷双锥燃烧器

Fig.1 7 MW double cone combustor with center reverse spraying

对该燃烧器结构进行简化,可分为 1 次风进口、2 次风进口、出口、燃烧器壁面等部位,采用商用软件 ICEM 对其进行网格划分,网格数量为 46.5 万,如图 2 所示。

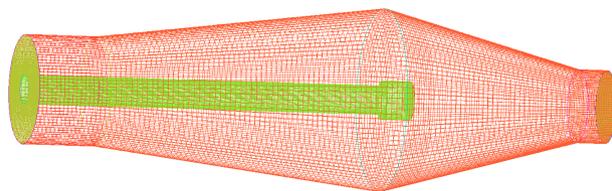


图 2 7 MW 中心逆喷双锥燃烧器网格划分

Fig.2 7 MW meshing of double cone combustor with center reverse spraying

数值模拟燃料为神府东胜烟煤,其工业分析和元素分析见表 3。

表 3 燃料的工业分析和元素分析

Table 3 Proximate and ultimate analyses of feed coal

工业分析/%				元素分析/%				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	w(C) _{ad}	w(H) _{ad}	w(O) _{ad}	w(S) _{ad}	w(N) _{ad}
5.13	9.42	32.49	52.96	68.98	3.92	11.22	0.50	0.83

模拟对比典型空气工况和富氧工况条件下的燃烧器燃烧特性。2 种工况条件下,在 2 次风过量空气系数(燃烧所需氧气量占理论所需氧气量之比)均为 0.61,空气工况氧浓度为 21.0%,富氧工况氧浓度为 25.9%条件下,模拟结果如图 3 所示。富氧工况条件下燃烧器内燃烧温度整体高于空气燃烧工况,且着火区域更加提前,燃烧器出口温度更加均匀。空气工况和富氧工况燃烧器内平均温度分别为 897 ℃ 和 1 007 ℃;燃烧器出口平均温度分别为 1 255 ℃ 和 1 356 ℃。富氧工况时,空气中氧浓度提高,与煤粉的反应速率提高,同时不参加反应的 N₂ 等气体浓度减少,吸收燃烧释放热量减少,燃烧器内反应温度提高;由于氧浓度提高,空气总量减少,烟气在燃烧器内的传播速度降低,停留时间增加,有利于促进煤粉的燃烧反应,提高燃烧器内温度;2 次风风速降低时,逆喷的 1 次风与 2 次风混合位置更接

近燃烧器前部,进一步提高了煤粉燃烧的停留时间。燃烧器出口风速降低,旋流强度降低,气体在燃烧器出口的分层现象缓解,因此,燃烧器出口温度分布更加均匀。

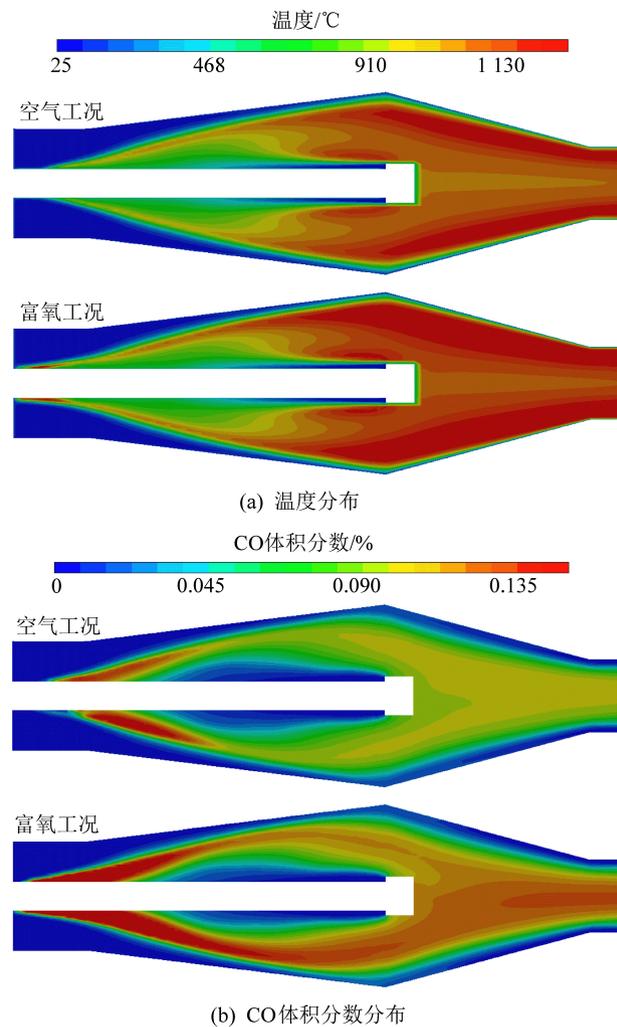


图3 典型工况数值模拟

Fig.3 Simulation of typical condition

燃烧器内2次风向前传播,1次风向后传播,两者交汇处即煤粉燃烧生成 CO_2 和部分气化反应生成CO开始的位置,此处CO浓度迅速上升。与反应温度分析类似,采用富氧方式,1次风携带煤粉向后传播距离更远,燃烧器前部的CO浓度更高。同时燃烧器内由于部分气化反应进行程度的提高以及不参加反应 N_2 等气体浓度的减少,采用富氧部分气化时,燃烧器内整体CO浓度明显高于采用空气燃烧时的工况。空气工况和富氧工况燃烧器内平均CO浓度分别为5.48%和7.17%,燃烧器出口平均CO浓度分别为5.23%和6.35%。由于采用了富氧气氛,煤粉在燃烧器内的反应进度也大幅提高,空气工况和富氧工况条件下碳转化率分别为61.54%和86.27%。

2 燃烧器富氧部分气化试验

通过数值模拟的工作初步探讨了富氧条件对促进燃烧器内部气化反应的作用,但还需通过现场试验进行对比验证。燃烧器的富氧部分气化试验主要研究富氧比例及分级配风比例对燃烧器内部气化进行程度的影响。试验在鄂尔多斯某变量10 t/h蒸汽煤粉工业锅炉上进行,锅炉燃烧器与数值模拟中所用燃烧器燃料均相同。纯氧由液氧罐气化后提供,按设定比例与2次风混合后进入燃烧器,形成试验所需富氧比例。采用Vario高温烟分仪测试测定燃烧器出口烟气成分,取样点布置在燃烧器出口中心处。由于燃烧器内煤粉反应时间有限,煤粉的碳转化率约为60%左右,燃烧器内通入过量空气会形成氧化性气氛,不利于煤粉部分气化反应进行。通过试验研究了燃烧器内不同过量空气系数对燃烧器出口中心位置烟气成分的影响。试验结果如图4所示,在过量空气系数较低条件下,燃烧器内能完成部分气化反应,且烟气中CO和 H_2 浓度均随过量空气系数下降而迅速上升。过量空气系数为1.25时,燃烧器出口中心处烟气中CO和 H_2 所占比例分别为2.512%和0.184%;当过量空气系数为0.456时,相应的CO和 H_2 比例分别增加至15.457%和0.992%。由于在形成的强还原性气氛条件下,燃烧器出口 NO_x 浓度为0,大幅降低了煤粉燃烧初期对 NO_x 生成的影响。过量空气系数越低,燃烧器还原性气氛越强,但同时煤粉中焦炭反应进行程度也越低,因此,需综合考虑还原性气氛和焦炭反应。从燃烧器本身特点出发,燃烧器内过量空气系数在0.5左右最优。数值模拟和试验结果的对比如验证了数值模拟结果的准确性。CO体积分数的模拟在过量空气系数高时略高,在过量空气系数低时略低。

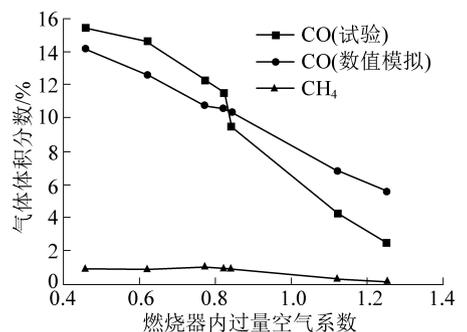


图4 过量空气系数对燃烧器出口烟气成分的影响

Fig.4 Effects of excess air ratio on air composition from combustor outlet

与空气燃烧工况相比相电,粉燃富氧燃烧形成的还原性气氛更强,烟气中CO浓度更高。在保证

燃烧器内空气中总氧量(过量空气系数)不变的条件下,进行不同富氧浓度条件下的燃烧器富氧燃烧试验。由于富氧气氛的存在,燃烧过程所需加热不参加反应的 N₂ 等成分浓度减少,燃烧反应温度提高,相同条件下焦炭反应进行程度明显提高。试验浓度结果如图 5 所示,空气中氧体积分数可由 21.0% 提高至 28.3% 时,燃烧器出口中心处 CO 体积分数由 9.540% 提高至 20.258%,即使扣除氧浓度提高的因素,CO 的生成量也提高了 49.300%;CH₄ 生成量略有降低。

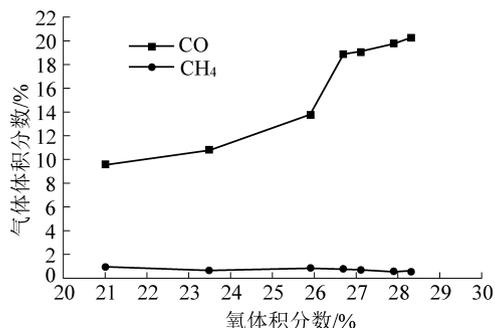


图 5 富氧比例对燃烧器出口烟气成分的影响

Fig.5 Effects of oxygen enrichment ratio on air composition from combustor outlet

由于燃烧器属强旋流燃烧器,燃烧出口截面不同直径处的烟气成分也不相同。燃烧器 2 次风为旋流助燃风,在燃烧器内紧贴壁面,在壁面附近形成空气层,起到降低燃烧器壁面附近温度的作用。而燃烧器中心位置,尤其是靠近出口处,空气中氧浓度相对较低,燃烧的还原性气氛更强。还原性气体浓度在燃烧器出口呈现中间高、边缘低的特点。在富氧工况条件下测得的还原性气体成分分布如图 6 所示。在该工况下,燃烧器出口中心处 CO 浓度为 20.025%,径向距离中心点 30 mm 处 CO 浓度迅速降低至 8.262%,距燃烧器边缘 150 mm 处 CO 浓度为 1.26%,燃烧器横截面上平均 CO 浓度为 3.15%。

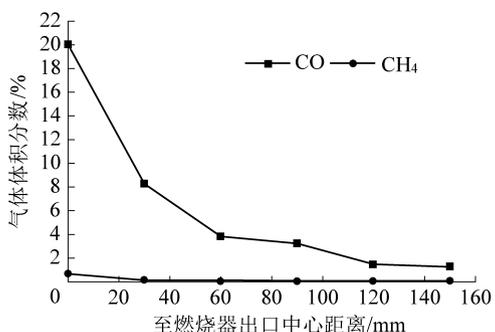
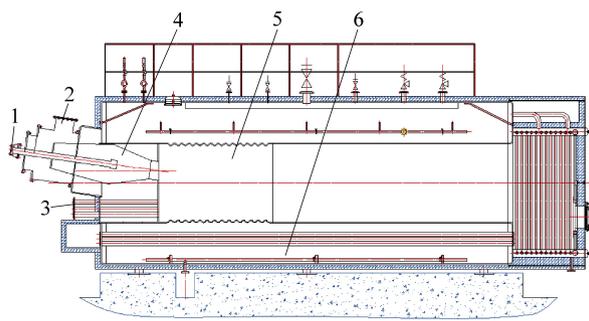


图 6 燃烧器出口不同位置烟气成分分布

Fig.6 Air distribution at different radial distance of combustor outlet

3 煤粉富氧部分气化分级燃烧试验

燃烧器内实现煤粉富氧部分气化是实现最终低氮燃烧的基础条件,燃烧器生成的 CO 等气体、以及未反应的焦炭在炉膛内燃烧产生的 NO_x 还需通过其他低氮燃烧技术进行控制,以达到控制煤粉燃烧全过程 NO_x 生成的目的。10 t/h 煤粉蒸汽锅炉系统布置如图 7 所示,燃烧器斜向下 8° 布置,配风中 1 次风和 2 次风进入燃烧器,3 次风布置在锅炉前墙燃烧器下部。在相同 2、3 次风配风比例条件下,进行不同富氧比例对低氮燃烧影响的试验,结果如图 8 所示。



1—煤粉进口;2—2次风进口;3—3次风进口;4—双锥燃烧器;
5—锅炉炉膛;6—对流换热面

图 7 10 t/h 蒸汽锅炉系统结构

Fig.7 Structure of 10 t/h steam boiler system

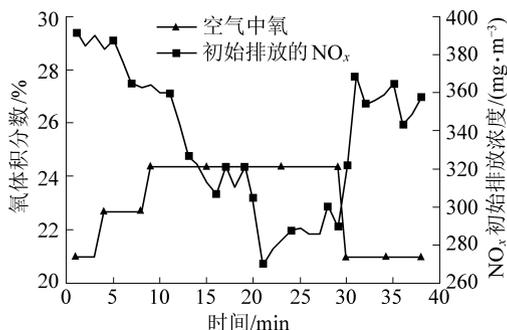


图 8 富氧气氛对锅炉 NO_x 初始排放的影响

Fig.8 Effects of oxygen enrichment ratio on original NO_x emission for boiler

锅炉不采用分级配风的工况,燃烧所需空气均由燃烧器进入炉膛,锅炉 NO_x 初始排放质量浓度为 546 mg/m³,3 次风分级比例为 35% 时,NO_x 初始排放浓度降低至 390 mg/m³。在相同分级配风比例条件下,采用富氧工况,锅炉 NO_x 初始排放明显降低,当空气中氧体积分数由 21.0% 升至 22.7% 时,NO_x 初始排放质量浓度由 390 mg/m³ 降低至 358 mg/m³,降幅为 8.20%;当氧浓度升高至 24.4% 时,NO_x 初始排放浓度降低至 285 mg/m³,降幅为 26.9%。试验结果表明,采用富氧部分气化和分级配风 2 种方式均能有效降低 NO_x 初始排放浓度,分级配风可

保证燃烧器和炉膛前部处于还原性气氛,几乎不生成 NO_x , 炉膛后部燃尽区分级风混入,生成少量 NO_x ; 燃烧器内采用富氧方式,可提高燃烧器内碳转化率和还原性气体浓度,扩大燃烧过程中还原性气氛的作用区域,同时使燃尽区需要反应的焦炭量降低,焦炭反应生 NO_x 总量降低,进一步降低 NO_x 的初始排放。在2次风氧体积分数为28.3%、3次风分级配风比例为41.2%时,锅炉初始 NO_x 排放质量浓度最低可至 159 mg/m^3 , NO_x 生成总降幅达70.9%。

4 结 论

1) FR/ED 的气相反应模型考虑了煤粉的气化反应,更适合于模拟煤粉富氧部分气化反应;富氧气氛可提高燃烧器内 CO 的反应浓度,同时提高煤粉的碳转化率;数值模拟结果表明,相比空气工况,氧浓度为25.9%的富氧工况条件下,燃烧器内平均温度由 $897 \text{ }^\circ\text{C}$ 提高至 $1\ 007 \text{ }^\circ\text{C}$, 燃烧器出口温度由 $1\ 255 \text{ }^\circ\text{C}$ 提高至 $1\ 356 \text{ }^\circ\text{C}$, 燃烧器出口平均 CO 浓度由5.23%提高至6.35%, 燃烧器内碳转化率由61.54%提高至86.27%。

2) 7 MW 双锥燃烧器的富氧试验结果表明,试验结果和数值模拟结果有较好一致性;燃烧器内过量空气系数降低至0.456时,燃烧器出口 CO 浓度可达15.457%;燃烧器内空气中氧浓度由21.0%提高至28.3%时,燃烧器出口中心处 CO 体积分数由9.540%提高至20.258%,燃烧器出口 NO_x 的生成量为0。

3) 鄂尔多斯某 10 t/h 蒸汽煤粉工业锅炉试验在单独采用富氧部分气化时, NO_x 初始排放质量浓度由 390 mg/m^3 降低至 285 mg/m^3 ; 采用富氧部分气化和空气分级相结合的低氮燃烧技术时,锅炉 NO_x 初始排放质量浓度可由 546 mg/m^3 降低至 159 mg/m^3 。

参考文献 (References):

- [1] BP. BP Statistical Review of World Energy[R]. 2019.
- [2] 尚庆雨.我国煤粉工业锅炉技术现状及发展趋势[J].煤炭科学技术,2016,44(1):201-206.
SHANG Qingyu. Current status and development trend of pulverized coal industrial boilers in China[J]. Coal Science and Technology,2016,44(1):201-206.
- [3] SCHEFFKNECHT Gunter, AL-MAKHADMEH Leema, SCHNELL Uwe. Oxy-fuel coal combustion: a review of the current state-of-the-art [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011,5:16-35.
- [4] STANGER Rohan, WALL Terry, SPORL Reinhold. Oxy-fuel combustion for CO_2 capture in power plants [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015,40:55-125.
- [5] SEDDIGHI K Sadegh, PALLARES David, NORMANN Fredrik. Carbon monoxide formation during oxy-fuel-fired fluidized-bed combustion [J]. Energy and Fuels, 2013,27(4):2275-2282.
- [6] 李伟,李诗媛,徐明新,等.循环流化床富氧燃烧 NO 和 N_2O 的排放特性 [J]. 燃烧科学与技术,2015,21(4):307-312.
LI Wei, LI Shiyuan, XU Mingxin, et al. NO and N_2O emission characteristics of oxy-fuel circulating fluidized bed combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015,21(4):307-312.
- [7] CROISET Eric, THAMBIMUTHU Kelly, PALMER Allan. Coal combustion in O_2/CO_2 mixtures compared with air [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2007,78(2):402-407.
- [8] FAN Weidong, LI Yu, GUO Qinghong, et al. Coal-nitrogen release and NO_x evolution in the oxidant-staged combustion of coal [J]. Energy, 2017,125(4):417-426.
- [9] FAN W, LIN Z, KUANG J, et al. Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2010,91(6):625-634.
- [10] CHRISTOPHER R. SHADDIX, ALEJANDRO Molina. Fundamental investigation of NO_x formation during oxy-fuel combustion of pulverized coal [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33:1723-1730.
- [11] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, OKAZAKI T. Staged combustion properties for pulverized coals at high temperature [J]. Combustion and Flame, 2011,158(11):2261-2271.
- [12] WATANABE H, HICHIRO Yamamoto J, OKAZAKI K. NO_x formation and reduction mechanisms in staged O_2/CO_2 combustion [J]. Combustion and Flame, 2011,158(7):1255-1263.
- [13] 刘忠,宋蕾,姚强,等. O_2/CO_2 燃烧技术及其污染物生成与控制 [J]. 华北电力大学学报, 2007,34(1):82-88.
LIU Zhong, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Oxy-fuel combustion technology and the production and control of its pollutants [J]. Journal of North China Electric Power University, 2007,34(1):82-88.
- [14] MACKRORY A J. A Mechanistic investigation of nitrogen evolution in pulverized coal oxy-fuel combustion [D]. Utah: Brigham Young University, 2008.
- [15] MACHRORY A J, TREE D R. Measurements and modeling of nitrogen evolution in staged oxy-fuel combustion [C]//AICHE The 2007 Annual Meeting, 2007.
- [16] 游卓,周志军,王智化,等.分级富氧燃烧控制 NO_x 的一维模型和试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014,34(26):4462-4468.
YOU Zhuo, ZHOU Zhijun, WANG Zhihua, et al. One-dimensional model and experimental study of NO_x control by staged oxy-fuel combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(26):4462-4468.
- [17] 游卓,王智化,周志军,等.燃煤锅炉富氧燃烧改造及其排放的数值模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2014,48(11):2080-2086.
YOU Zhuo, WANG Zhihu, ZHOU Zhijun, et al. Numerical simulation of NO_x emission from a 1000 MW boiler retrofitted to oxy-fuel combustion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering

- Science), 2014, 48(11): 2080-2086.
- [18] OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, LU Qinggang, *et al.* The effect of limestone on SO₂ and NO_x emissions of pulverized coal combustion preheated by circulating fluidized bed [J]. Fuel, 2014, 120: 116-121.
- [19] ZHU Shujun, LYU Qinggang, ZHU Jianguo, *et al.* Experimental study on NO_x emissions of pulverized bituminous coal combustion preheated by a circulating fluidized bed [J]. Journal of the Energy Institute, 2018(1): 1-10.
- [20] 张 勇, 张玉斌, 杨天亮, 等. 褐煤半焦旋风燃烧数值模拟 [J]. 热力发电, 2017, 46(2): 42-48, 54.
ZHANG Yong, ZHANG Yubin, YANG Tianliang, *et al.* Numerical simulation on combustion of lignite semi-char in cyclone furnace [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 42-48, 54.
- [21] 段艳松, 张立麒, 毛志慧, 等. 水煤浆 MILD 燃烧数值模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 36-41, 46.
DUAN Yansong, ZHANG Lilin, MAO Zhihui, *et al.* Numerical simulation of MILD combustion on coal-water slurry [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 36-41, 46.
- [22] 莫日根, 王乃继, 程晓磊. 水煤浆在双锥逆喷燃烧器内燃烧过程的数值分析 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(2): 83-89.
MO Rigen, WANG Naiji, CHENG Xiaolei. Numerical analysis of coal water mixture combustion in double cone reversed injection burner [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2): 83-89.
- [23] 姜思源, 王永英, 周建明, 等. 中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2014, 36(6): 1147-1153.
JIANG Siyuan, WANG Yongying, ZHOU Jianming, *et al.* Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1147-1153.