

O₂/CO₂气氛下燃煤NO排放特性的实验研究

李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 陈晓平, 董伟

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

Experimental Investigation on NO Emission Characteristic During Pulverized Coal Combustion in O₂/CO₂ Environment

LI Qing-zhao, ZHAO Chang-sui, WU Wei-fang, CHEN Xiao-ping, DONG Wei

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The NO emission characteristic in O₂/CO₂ mixture was investigated in a drop tube furnace using flue gas on-line analyzer and the effects of combustion environments, CO₂ concentration, fuel equivalence ratio and temperature on NO emission were discussed. Results show that the NO emission concentrations from O₂/CO₂ combustion process without recycled flue gas are always lower about 20%~40% than those from simulated air combustion processes. Under two environments, NO emission along the furnace shows similar trend but different accounted for coal's rank. With the increasing of CO₂ concentration in the feeding gas, NO emission concentration decrease. Compared with 21%O₂/79%Ar environment, NO mission concentrations decrease about 30%~50% in 21%O₂/79%CO₂ environment. With the increasing of combustion temperature, NO mission concentrations always increase. With the equivalence ratio (ϕ) increase, NO emission concentrations increase in fuel lean region, and then appear to slightly decrease after $\phi=0.8$. Moreover, in the more fuel rich region, the NO emission concentrations decrease to the same level.

KEY WORDS: O₂/CO₂ environment; pulverized coal combustion; fuel equivalence ratio; NO emissions

摘要: 在沉降炉上通过在线烟气分析仪研究了燃烧气氛、CO₂浓度、温度及燃料/氧气化学当量比对O₂/CO₂气氛下燃煤NO排放的影响规律。结果表明, O₂/CO₂气氛下NO的排放浓度总小于O₂/N₂气氛下的情况, 在无烟气再循环的情况下降幅约为20%~40%。2种气氛下NO的沿程析出均表现出类似的规律, 但因煤质而有所不同。随着进气中CO₂

浓度的增加, NO的排放浓度呈现降低的趋势。与21%O₂/79%Ar气氛下相比, 21%O₂/79%CO₂气氛下NO排放浓度的降幅在30%~50%。随着温度的增加, 2种气氛下NO的排放浓度均增加。随着燃料/氧气化学当量比(ϕ)的增加, NO排放浓度呈现出先增加后降低的趋势, 其最大排放浓度均出现在 $\phi=0.8$ 左右; 在 ϕ 远大于1的富燃料区, 2种气氛下NO的排放浓度基本可以降到一致的水平。

关键词: O₂/CO₂气氛; 煤粉燃烧; 化学当量比; NO排放

0 引言

在众多的CO₂捕集技术中, O₂/CO₂燃烧技术(Oxyfuel燃烧技术)作为一种既能直接获得高浓度CO₂又能综合控制燃煤污染物排放的新一代燃烧技术, 已引起了学术界和技术界的高度关注^[1-7]。

由于燃烧气氛的差异使得该方式下氮氧化物的生成及转化规律与常规燃烧方式有着显著的不同。Kimura等^[8]发现O₂/CO₂燃烧方式下NO_x的排放大约只有常规燃烧方式下的1/3左右。Okazaki等^[9]认为NO_x降低的主要原因在于约有50%~80%的循环NO_x被还原, 且在O₂/CO₂燃烧方式下燃料N向NO的转化率降低约为空气气氛燃烧时N转化率的1/4。HU等^[10-12]在小型石英管反应器上也发现燃料/氧气化学当量比在1.4时循环NO_x的还原效率最高可达80%。由于CO₂本身热物性(高密度、高比热、低物质扩散率)的特点, 在高浓度CO₂气氛下煤粉的燃烧特性明显降低, 已有的研究表明, 提高进气中氧气的浓度可获得与常规燃烧方式类似的燃烧特性和温度分布^[13-15]。

尽管如此, O₂/CO₂燃烧方式下有关氮氧化物的生成及其转化的机理并未得到详细的揭示。本文即在热力工况与煤粉炉相近的沉降炉上通过模拟不

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB705806); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX07B_091Z); 东南大学优秀博士学位论文基金项目。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2006CB705806).

同的燃烧气氛，考查了燃烧气氛、温度、CO₂浓度以及燃料/氧气的化学当量比等因素对O₂/CO₂燃烧方式NO释放的影响规律。

1 实验设备及方法

实验系统及方法的详细介绍参见文献[16]，实验所用煤质分析如表1所示。

表1 煤样的元素分析与工业分析

Tab. 1 Ultimate and proximate analysis of coal samples

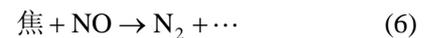
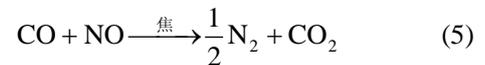
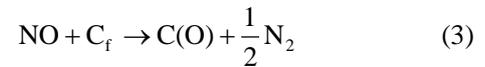
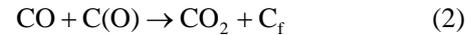
煤种	元素分析/%					工业分析/%				Q _{net,ar} /(MJ/kg)
	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	FC _{ad}	V _{daf}	A _{ad}	M _{ad}	
龙岩无烟煤(LY)	55.65	1.31	0.23	0.52	2.74	54.43	9.96	38.23	1.32	24.64
贵州烟煤(GZ)	61.46	3.57	3.04	0.70	4.26	49.68	31.95	25.52	1.45	23.95

2 实验结果与分析

2.1 不同气氛下NO排放浓度的比较

2种煤在不同O₂浓度的O₂/N₂及O₂/CO₂气氛下的实验结果如图1所示。由图可知，在实验所选取的O₂浓度范围内，O₂/CO₂气氛下NO的排放浓度总小于O₂/N₂气氛下情况，在无烟气再循环的情况下其降低幅度约为20%~40%左右。燃煤氮氧化物的排放主要包括热力型、快速型和燃料型NO，而煤粉在O₂/CO₂气氛下燃烧时避免了热力型和快速型NO的生成；同时，在O₂/CO₂气氛下，由于CO₂本身的高密度、大比热使得该气氛下煤粉的燃烧温度降低^[14-15]、燃烧速率减缓，燃料N向NO的转化率降低^[10-12]；此外，与相同O₂浓度的O₂/N₂

气氛下的燃烧相比，O₂/CO₂气氛下的燃烧状况使得该气氛中存在较高含量的还原性活性基团(CH₂/NH₃/HCN等)，同时高浓度CO₂对煤焦的气化作用^[17]也使得O₂/CO₂气氛的燃烧产物中存在着较高浓度的CO气体，气氛所发生的均相还原反应对于降低燃烧过程中生成的NO起到了一定的积极作用；再者，气氛中所存在的CO更是加速了^[18-19]煤焦对NO的还原反应((1)~(6))^[20-22]，这是O₂/CO₂气氛下NO降低的一个重要原因：



随着进气中O₂浓度的增加，燃烧气氛中的氧化性逐渐增强，还原性物质(CH₂/C等)被氧化为CO₂，大部分的NH₃/HCN则被直接氧化为NO，使得NO的均相还原效应降低；同时，由于进气中O₂浓度的提高使得煤粉在O₂/CO₂气氛下的燃烧特性得到改善^[14-15]，相同停留时间煤粉的燃尽程度增加，燃料N向NO的转化率增加^[10-12]，也使得2种气氛下烟气中NO的浓度随着进气O₂浓度的增加而升高。但由图1可知O₂/N₂气氛下的NO浓度随进气O₂浓度的变化较为明显，而O₂/CO₂气氛下NO的变化趋势与之相比则较为缓慢，其主要原因在于高浓度CO₂气氛中较高水平CO的存在促进了煤焦对NO的异相还原。

2.2 NO沿程排放特性分析

为了保证各实验工况时煤粉在炉内恒温段的停留时间基本一致，实验中所通载气的流量在考虑温度修正后基本保持一致。以煤粉在炉膛内入口处为

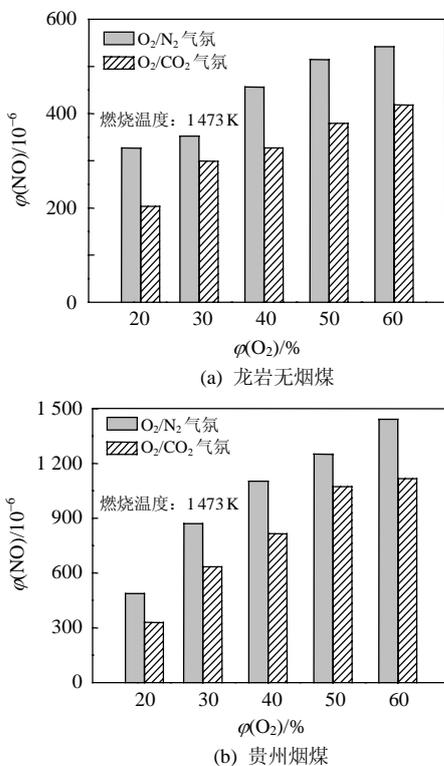


图1 进气O₂浓度对燃煤NO排放的影响

Fig. 1 Effect of O₂ concentration in feeding gas on NO emissions

基点, 通过调整取样枪插入炉膛的深度来获得不同轴向位置处的气体试样并同时送入烟气分析仪进行气体成分测定。实验分别在 2 个典型气氛(21%O₂/79%N₂和 21%O₂/79%CO₂)下进行, 燃料/氧化学当量比 $\phi=0.8$, 实验结果如图 2、图 3 所示。

燃煤过程超过 80%氮氧化物的排放是燃料N转化的结果^[21], 燃料N的释放是伴随着挥发分的析出和煤焦的燃烧而一起发生的过程, 而大部分燃料型NO的生成则是由挥发分N氧化而成, 因此, 挥发分的成分(焦油和轻质气态组分)对于燃烧型NO的生成有着至关重要的影响。已有的研究表明, 挥发分的成分以及伴随而析出的挥发分N主要取决于燃料的类型、温度及其燃烧(热解)的时间, 其随着煤中含O量的增加以及煤质的降低而有所增加^[23-24]。煤粉进入炉膛升温热解的过程包括一次脱挥发分过程(主要产物为焦油和轻质气体组分)和二次脱挥发分过程(煤焦的分解、焦油的重整, 并伴随有CO、H₂、CH₄及含N组分的产生)^[25], 在此过程中, 挥发分N的析出主要发生在一次脱挥发分过程的后期^[26-29], 且随着煤质的降低, 该过程也有所延迟。对于低品质煤, 其一次脱挥发分过程中所析出的含N组分较少, 挥发分N的析出则主要发生在二次脱

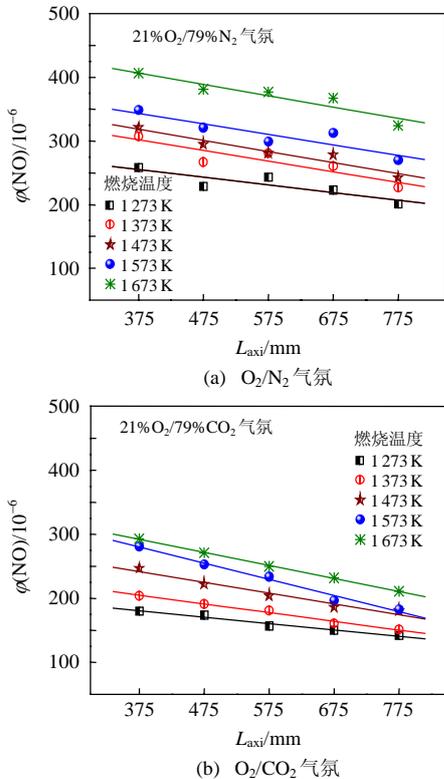


图 2 龙岩无烟煤燃烧 NO 的沿程排放
Fig. 2 NO emission along the furnace of Longyan anthracite coal

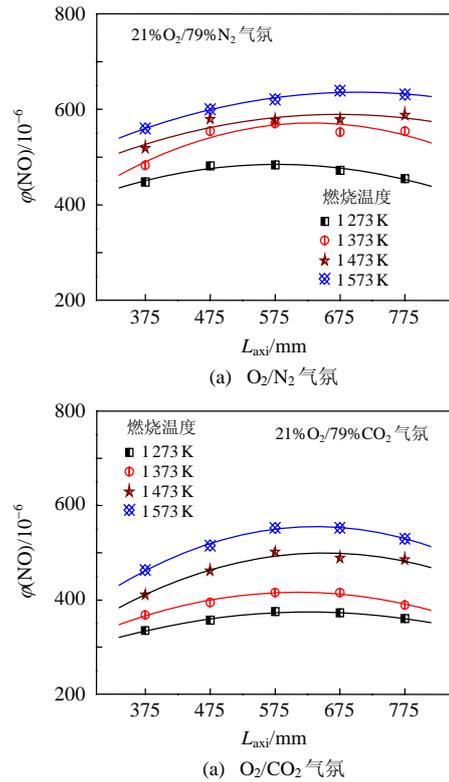


图 3 贵州烟煤燃烧 NO 的沿程排放
Fig. 3 NO emission along the furnace of Guizhou bituminous coal

挥发分过程中焦的分解^[29]。

由实验结果(图 2、图 3)可知, 由于煤质的差异, 2 个煤种在所有工况下均表现出显著不同的 NO 沿程析出特性, 但不论那种煤, 在 2 种气氛下均表现出类似的变化规律。从图中可以看出, 在 CO₂ 气氛下燃煤 NO 的析出浓度均小于 N₂ 气氛下的情况。2 种煤之间的差异主要在于其煤质的不同, 无烟煤煤化程度较高, 挥发分含量较低, 属于较难燃的煤种, 相同条件下无烟煤的燃尽较差; 相比之下贵州烟煤挥发分含量较高, 且煤中含 N 量及含 O 量较龙岩煤稍高, 由以上的分析可知, 其挥发分 N 的析出量较大且稍有迟缓, 故 NO 的沿程排放浓度表现为逐步增加而后稍有降低的趋势。由于实验设备的原因, 最短轴向距离只可测到据炉膛入口 375 mm 的位置, 因此, 无烟煤挥发分受热初期析出含 N 物质而使得 NO 浓度增加的部分未能测到。

2.3 配气中 CO₂ 含量对 NO 排放浓度的影响

实验中固定 O₂ 含量为 21%, 以 Ar 作为平衡气体 (Ar 与 N₂ 分子量接近, 具有相似的热力性质), 调整进气中的 CO₂ 含量来考查进气中 CO₂ 浓度对 NO 释放浓度的影响, 实验结果如图 4 所示。

可以看出, 2种煤的NO排放浓度均随燃烧进气中CO₂浓度的增加呈现降低的趋势。与21%O₂/79%Ar气氛下相比, 21%O₂/79%CO₂气氛下NO排放浓度的降幅在30%~50%。由于CO₂本身的热力性质(高密度、高比热、低的物质扩散能力)的特点, 配气中CO₂浓度的增加改变了燃烧气氛的热物性, 使得煤粉在其中的燃烧特性有着不同程度的变化。已有的研究发现, 在高浓度CO₂的存在使得煤粉的燃烧速率降低, 煤粉的着火及燃烧过程延迟^[8-9,14-15,30], 相同O₂浓度、燃烧温度及停留时间的条件下煤焦的燃尽程度有所降低。与21%O₂/79%Ar气氛相比, 燃烧气氛中CO₂浓度的增加使得煤粉的气化反应加剧, 使得气氛中存在较高浓度的还原性组分(CO/CH₄/HCN/NH₃等), 特别是在CO存在的情况下, 加快了煤焦对NO的还原反应。使得高浓度CO₂气氛下生成的NO得到还原。再者, 高浓度CO₂气氛下较低的煤焦燃尽率也使得燃料N向NO的转化率降低, 这也是21%O₂/79%CO₂气氛下NO生成浓度较低的原因之一。

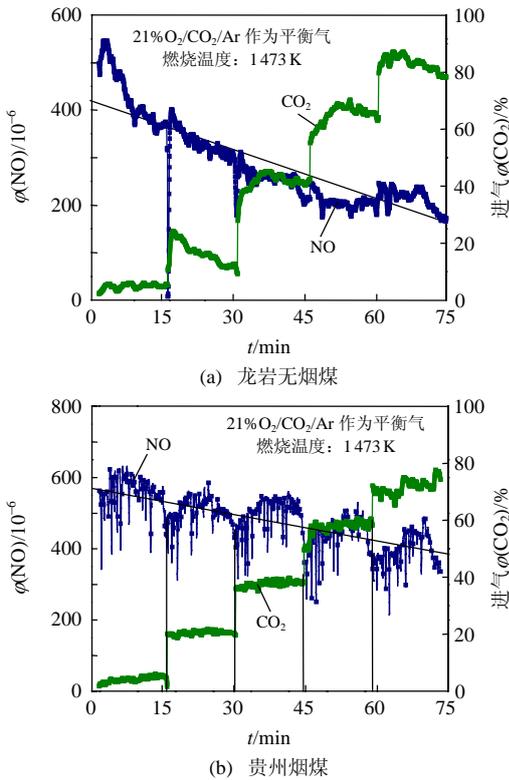


图4 进气中CO₂浓度对燃煤NO排放的影响
Fig. 4 Effect of CO₂ concentration in feeding gas on NO emissions

2.4 燃烧温度对NO排放浓度的影响

2种气氛下温度对NO排放的结果如图5、图6所示。在所选取的温度范围内, 2种气氛下NO的

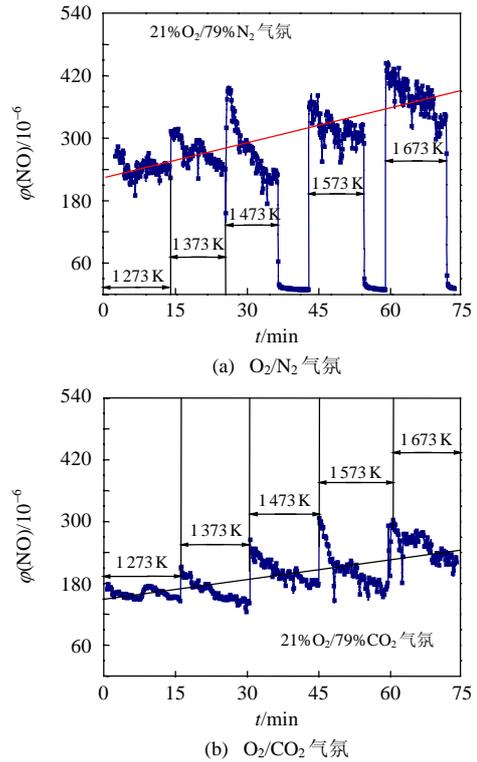


图5 温度对龙岩无烟煤燃烧NO的排放的影响
Fig. 5 Effect of combustion temperature on NO emissions of Longyan anthracite coal

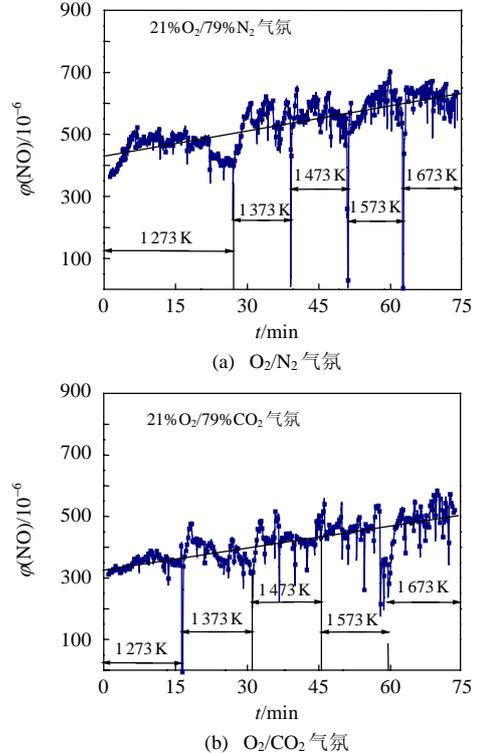


图6 温度对贵州烟煤燃烧NO的排放的影响
Fig. 6 Effect of combustion temperature on NO emissions of Guizhou bituminous coal

整体变化趋势表现出随温度变化一致的跟随性, 但增加的幅度因煤种和燃烧气氛的差异而有所不同,

其主要在于煤质及气氛引起的燃烧特性的差异使得不同燃烧阶段燃料 N 的析出也有所不同。

由图可知,当温度从 1273 K 增加到 1473 K 时,在 21%O₂/79%N₂ 气氛下 NO 的排放浓度增加了 50%~76%,而在 21%O₂/79%CO₂ 气氛下 NO 的排放浓度增加约 30%~50%。HU 等^[10-12]在其实验中也发现与此类似的 NO 排放随温度变化的规律。但由实验结果可以发现,在每一个实验的温度水平下,2 种煤在 21%O₂/79%CO₂ 气氛下 NO 排放的浓度均小于相同 O₂ 浓度的 O₂/N₂ 气氛下的情况(见 2.1 节)。

对于燃煤系统,氮氧化物(主要为 NO)的生成主要来自于燃料 N 的转化以及部分热力型 NO。温度对燃煤 NO 排放的影响比较复杂,相关的研究发现其与实验过程燃料/氧气的化学当量比 ϕ 以及煤质特性都有紧密联系^[31-33]。在 21%O₂/79%N₂ 气氛下,温度对 NO 排放影响的主要原因在于高温环境加快了热力型和快速型 NO 的转化,而在相同的实验条件下,较高的燃烧温度也增加了煤粉的燃尽程度,提高了燃料 N 向 NO 的转化率,使得 NO 的排放浓度表现出与温度增加相同的变化趋势。在 O₂/CO₂ 燃烧方式下,由于燃烧系统避免了因 N₂ 存在而生成的热力型 NO 及快速 NO;同时,在相同的燃烧温度和炉内停留时间时,高浓度 CO₂ 气氛下煤粉表现出的较低的燃尽水平也使得燃料 N 向 NO 的转化率较 O₂/N₂ 气氛下时有所降低。在 O₂/CO₂ 气氛下,随着燃烧温度的增加,燃烧状况得到改善,使得燃料 N 以及其他气相含 N 组分向 NO 的转化率增加,但高温环境也使得高浓度的 CO₂ 对煤焦的气化作用加剧,气氛中较高水平的 CO 水平也使得煤焦/CO/NO 的还原反应加快,从而使得 O₂/CO₂ 气氛下 NO 排放浓度随温度的变化较相同 O₂ 浓度的 O₂/N₂ 气氛下的变化缓慢。

2.5 燃料/氧气化学当量比对 NO 排放浓度的影响

煤中的燃料 N 的析出可分为挥发分 N 和焦炭 N,在煤的燃烧过程中,挥发分 N 首先从煤中释放出来且多存在于焦油和碳氢化合物中,随后生成中间产物 HCN 和 NH₃,其中一部分 HCN 和 NH₃ 被氧化为 NO,另一部分则与生成的 NO 发生还原反应生成 N₂,同时在 CO 存在的情况下 NO 也会与煤焦发生还原反应。相关的研究表明,燃料 N 向挥发分 N 的转换率对最终 NO 的排放有重要的影响且其受热解及燃烧条件的影响较大^[10-12]。

实验过程控制通入炉内的载气量保持不变(即煤粉在炉内的停留时间基本一致),通过调整加料

器的给粉量来获得实验所需的燃料/氧气化学当量比 ϕ ,实验结果如图 7、图 8 所示。由图可知,所

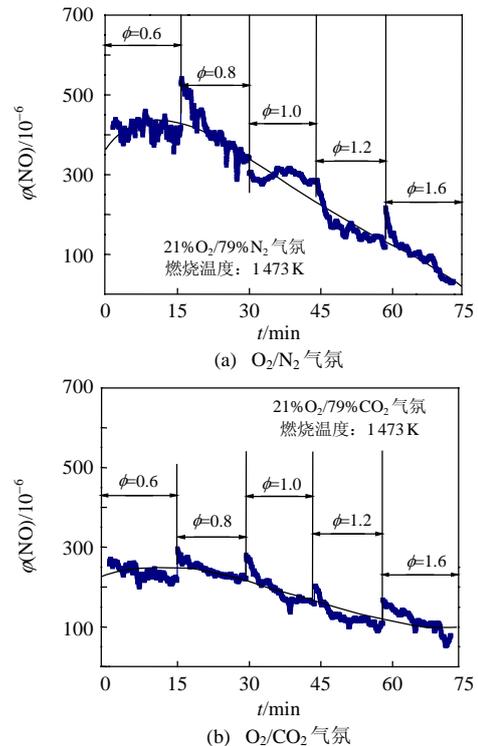


图 7 燃烧/氧气化学当量比对龙岩无烟煤燃烧 NO 排放的影响
Fig. 7 Effect of fuel equivalence ratio on NO emissions of Longyan anthracite coal

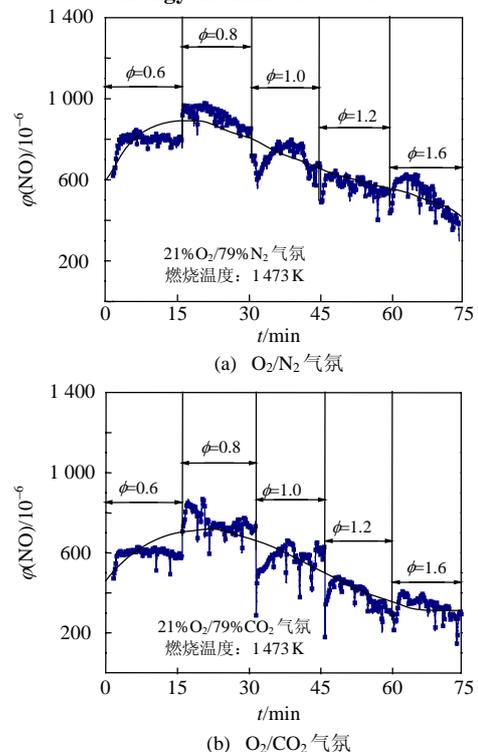


图 8 燃烧/氧气化学当量比对贵州烟煤燃烧 NO 排放的影响
Fig. 8 Effect of fuel equivalence ratio on NO emissions of Guizhou bituminous coal

有的实验工况下 NO 随燃料/氧气化学当量比 ϕ 的变

化均呈现先增加后降低的趋势,在所选取的2个典型气氛下2种煤NO的最大排放浓度均出现在 $\phi=0.8$ 左右, HU^[10-12]等的研究也报道了类似的变化趋势。

在 ϕ 较小的贫燃区,燃烧气氛具有较强的氧化性,含N组分的析出大多均被氧化为NO,燃料N向NO的转化率较高且在氧化性气氛,NO的还原反应被抑制,随着入炉煤量的增加使得燃烧气氛中NO的浓度随燃料/氧气化学当量比 ϕ 逐渐增加;而在富燃料区,燃烧气氛具有较强的还原性,气氛中大量存在的CH、未燃尽碳、CO以及HCN、NH₃等都有助于NO以及其他含N物质的还原。可以发现,在 ϕ 远大于1的富燃料区,2种气氛下NO的排放浓度基本可以降到一致的水平。

3 结论

1) 在实验所选取的O₂浓度范围内, O₂/CO₂气氛下NO的排放浓度总小于O₂/N₂气氛下情况,在无烟气再循环的情况下降低幅度约为20%~40%左右。随着进气中O₂浓度的提高,2种气氛下NO的浓度均呈现逐步升高的趋势,但O₂/CO₂气氛下NO的变化趋势较为缓慢。

2) 由于煤质的差异,2个煤种之间在所有工况下均表现出明显不同的NO沿程析出特性,但不论哪种煤,在2种气氛下(21%O₂/79%N₂和21%O₂/79%CO₂)均表现出类似的变化规律,且不同温度时在O₂/CO₂气氛下NO的排放浓度均小于O₂/N₂气氛下相应的排放浓度。

3) 随着进气中CO₂浓度的增加,2种煤燃烧NO的排放浓度均呈现降低的趋势,与21%O₂/79%Ar气氛下相比,21%O₂/79%CO₂气氛下NO排放浓度的降幅在30%~50%。

4) 2种气氛下NO的整体变化趋势表现出随温度变化一致的跟随性,但增加的幅度因煤种和燃烧气氛的差异而有所不同,其主要在于煤质及气氛引起的燃烧特性的差异使得不同燃烧阶段燃料N的析出也有所不同。

5) 所有的实验工况下,NO排放浓度随燃料/氧气化学当量比 ϕ 的变化均呈现先增加后降低的趋势,其最大排放浓度均出现在 $\phi=0.8$ 左右;在 ϕ 远大于1的富燃料区,2种气氛下NO的排放浓度基本可以降到一致的水平。

参考文献

- [1] Singh D, Croiset E, Douglas P L, et al. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(19): 3073-3091.
- [2] Rezvani S, Huang Y, McIlveen-Wright D, et al. Comparative assessment of sub-critical versus advanced super-critical oxyfuel fired PF boilers with CO₂ sequestration facilities[J]. Fuel, 2007, 86(14): 2134-2143.
- [3] Kakaras E, Doukelis A, Giannakopoulos D, et al. Economic implications of oxyfuel application in a lignite-fired power plant [J]. Fuel, 2007, 86(14): 2151-2158.
- [4] Kakaras E, Koumanakos A, Doukelis A, et al. Oxyfuel boiler design in a lignite-fired power plant[J]. Fuel, 2007, 86(14): 2144-2150.
- [5] Wall T F. Combustion processes for carbon capture[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 31-47.
- [6] 刘彦, 周俊虎, 方磊, 等. O₂/CO₂气氛煤粉燃烧及固硫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 224-228.
Liu Yan, Zhou Junhu, Fang Lei, et al. A study on coal combustion and desulfurization characteristics in atmosphere containing O₂/CO₂ [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 224-228(in Chinese).
- [7] 刘彦, 韦宏敏, 徐江荣, 等. O₂/CO₂与空气对燃煤汞形态分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 48-53.
Liu Yan, Wei Hongmin, Xu Jiangrong, et al. Effect of O₂/CO₂ and air on mercury speciation in coal fired flue gases[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 48-53(in Chinese).
- [8] Kimura N, Omata K, Kiga T, et al. The characteristics of pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures for CO₂ recovery[J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(6-9): 805-808.
- [9] Okazaki K, Ando T. NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂[J]. Energy, 1997, 22(2/3): 207-15.
- [10] Hu Y, Naito S, Kobayashi N, et al. CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases[J]. Fuel, 2000, 79(15): 1925-1932.
- [11] Hu Y Q, Kobayashi N, Hasatani M. The reduction of recycled-NO_x in coal combustion with O₂/recycled flue gas under low recycling ratio[J]. Fuel, 2001, 80(13): 1851-1855.
- [12] Hu Y Q, Kobayashi N, Hasatani M. Effects of coal properties on recycled-NO_x reduction in coal combustion with O₂/recycled flue gas[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(14): 2331-2340.
- [13] Nozaki T, Takano S, Kiga T. Analysis of the flame formed during oxidation of pulverized coal by an O₂-CO₂ mixture[J]. Energy, 1997, 22(2/3): 199-205.
- [14] Liu H, Zailani R, Gibbs B M. Pulverized coal combustion in air and in O₂/CO₂ mixtures with NO_x recycle[J]. Fuel, 2005, 84(16): 2109-2115.
- [15] Liu H, Okazaki K. Simultaneous easy CO₂ recovery and drastic reduction of SO_x and NO_x in O₂/CO₂ coal combustion with heat recirculation[J]. Fuel, 2003, 82(11): 1427-1436.
- [16] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. O₂/CO₂气氛下燃煤SO₂排放特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 41-46.
Li Qingzhao, Zhao Changsui, Wu Weifang, et al. Investigation on SO₂ emission characteristic during pulverized coal combustion in O₂/CO₂ environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 41-46(in Chinese).

- [17] Liu H, Luo C H, Kato S, et al. Kinetics of CO₂/Char gasification at elevated temperatures. Part I: Experimental results[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(9): 775-781.
- [18] Aarna I, Suuberg E M. A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. Fuel, 1997, 76(6): 475-491.
- [19] Aarna I, Suuberg E M. The role of carbon monoxide in the NO-carbon reaction[J]. Energy Fuels, 1999, 13(3): 1145-1153.
- [20] Li Y H, Radovic L R, Lu R Q, et al. A new kinetic model for the NO-carbon reaction[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(19): 4125-4136.
- [21] Chu X, Schmidt L D. Intrinsic rates of NO_x-carbon reactions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1993, 32(7): 1359-1366.
- [22] Hosoda H, Hiramata T, Azuma N, et al. NO_x and N₂O emission in bubbling fluidized bed coal combustion with oxygen and recycled flue gas: macroscopic characteristics of their formation and reduction [J]. Energy & Fuels, 1998, 12(1): 102-108.
- [23] Pershing D W, Wendt J O L. Relative contributions of volatile nitrogen and char nitrogen to NO_x emissions from pulverized coal flames[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1979, 18(5): 60-67.
- [24] Bassilakis R, Zhao Y, Solomon P R. Nitrogen evolution in the Argonne coals: modeling[J]. Energy Fuels, 1993, 7(6): 710-720.
- [25] Howard J B. Fundamentals of coal pyrolysis and hydrolyrolysis [M]. New York: Wiley, 1981: 91-92.
- [26] Haussmann G J, Kruger C H. Evolution and reaction of coal fuel nitrogen during rapid oxidative pyrolysis and combustion [J]. Symposium (International) on Combustion, 1991, 23(1): 1265-1271.
- [27] Pohl J H, Sarofim A F. Devolatilization and oxidation of coal combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1976, 16(1): 491-501.
- [28] Blair D W, Wendt J O L, Bartok W. Evolution of nitrogen and other species during controlled pyrolysis of coal[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1976, 16(1): 475-489.
- [29] Zhang H, Fletcher T H. Nitrogen transformations during secondary coal pyrolysis[J]. Energy Fuels, 2001, 15(10): 1512-1522.
- [30] 李庆钊, 赵长遂. O₂/CO₂气氛下煤粉燃烧特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 39-43.
Li Qingzhao, Zhao Changsui. Investigation on characteristic of pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(35): 39-43(in Chinese).
- [31] Pershing D W, Wendt J O L. Pulverized coal combustion: The influence of flame temperature and coal composition on thermal and fuel NO_x[J]. Symposium (International) on Combustion, 1977, 16(1): 389-399.
- [32] Yang Y B, Hampartsoumian E, Gibbs B M. The effects of temperature, mixing and volatile release on NO reduction mechanisms by coal reburning[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27(2): 3009-3017.
- [33] Greul U, Spliethoff H, Magel H C, et al. Impact of temperature and fuel-nitrogen content on fuel-staged combustion with coal pyrolysis gas[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2): 2231-2239.



李庆钊

收稿日期: 2008-12-08。

作者简介:

李庆钊(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事 O₂/CO₂ 气氛煤燃烧及燃煤污染物控制方面的研究, qingzhaolee@yahoo.com.cn;

赵长遂(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤燃烧、气化及燃煤大气污染防治方面的研究。

(责任编辑 王庆霞)