网络首发时间:2021-08-03 09:23:15

网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.TM.20210802.1526.002.html

热力发电

THERMAL POWERGENERATION

预热燃烧模式下热态焦炭 NO 排放和燃尽 特性实验研究

吕钊敏 1 ,秦大川 2 ,谭厚章 1 ,刘 兴 1 ,王学斌 1 ,李鹏 1 (1.西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室,陕西 西安 710049) (2. 华电电力科学研究院有限公司,浙江 杭州 310030)

[摘 要] 随着煤粉预热燃烧技术的不断发展,焦炭氮在最终氮氧化物生成的贡献中占据主导地位。为研究预热燃烧模式下入炉热态焦炭(区别于常规冷态焦炭)的 NO 排放和燃烧特性,本文自行搭建两段沉降炉系统,着重考察了煤粉热解温度、燃烧温度及过量空气系数对高温焦炭燃烧生成 NO 及燃尽率的影响规律。结果表明:区别于冷态焦炭实验结果,提高煤粉热解温度有利于热态焦炭燃烧降低 NO 排放,α=1.0 时,最大降氮效率为 21.1%;燃烧温度对热态焦炭 NO 排放的影响主要依赖于燃烧区域过量空气系数,当炉内呈现较强还原性气氛时,随燃烧温度升高,NO 排放量降低,当炉内呈现氧化性气氛时规律则相反;提高煤粉预热温度及燃烧区域温度均有利于降低飞灰含碳量,α=1.0 时,飞灰含碳量最大降幅 28.6%

[关 键 词] 预热燃烧; 热态焦炭; NO 排放; 燃尽特性; 热解温度; 燃烧温度; 过量空气系数 [中图分类号] TK227.1 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfd.202103067

Experimental study on NO emission and burnout characteristics of thermalchar in preheating combustion mode

LYU Zhao-min¹, QIN Da-chuan², TAN Hou-zhang¹, LIU Xing¹, WANG Xue-bin¹, LI Peng¹

1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shan Xi, China

2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China

Abstract: With the continuous development of pulverized coal preheating combustion technology, char-N occupies a dominant position in the formation of nitrogen oxides. In order to study the NO emission and combustion characteristics of thermal char (different from room-temperature char) in the preheating combustion mode, a two-stage drop-tube furnace was built, focusing on the pyrolysis temperature, combustion temperature and excess air ratio. The results show that increasing the pyrolysis temperature of pulverized coal is beneficial to reduce NO emissions for thermal char which is different from the experimental results of room-temperature char. When α =1.0, the maximum NO reduction efficiency is 21.1%. The influence of combustion temperature on NO emissions strongly depends on the excess air ratio in the combustion zone. The effects of combustion temperature on NO emission strongly depend on the stoichiometry parameters. In air-deficient conditions, the NOx emission decreased with increasing temperature, whereas in oxygen-rich conditions the opposite trend occurred. Increasing the preheating temperature and the combustion temperature are beneficial to reduce the carbon content of fly ash. When α =1.0, the maximum decrease of carbon content of fly ash is 28.6%

Key words: preheating combustion, thermal char, NO emission, burnout characteristics, pyrolysis temperature, combustion temperature, excess air ratio

氮氧化物(NO_r)诱导产生酸雨和光化学烟雾 严重危害大气环境和人体^[1],根据 NO_r源解析^[2],

收稿日期: 2021-03-30

基 金 项 目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0604203)

Supported by: the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0604203)

第一作者简介: 吕钊敏(1996), 男,博士研究生,主要研究方向为固体燃料气化燃烧技术, mx1029@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者简介: 谭厚章(1965), 男, 教授, 主要研究方向为煤粉高效清洁燃烧技术, hzt@xjtu.edu.cn。

燃煤电厂是重要来源之一,因此各国政府均对燃煤电厂采取了严格的限排措施,欧盟和美国的排放限值为 150 mg/m³和 95.3 mg/m³,而中国采取更为严格的超低排放标准,限值为 50 mg/m³[3]。为实现超低排放标准,中国电厂普遍在传统空气分级、燃料分级以及低氮燃烧器降氮技术上联合使用 SCR 技术,然而 SCR 前期投资大、设备维护困难,而且氨逃逸问题严重[4-5],因此开发新型炉内降氮技术一直是业界研究重点。

近年来, 煤粉预热燃烧技术在降氮方面展现出 明显优势,该技术由全俄热工研究所((All-Russian Thermal Engineering Institute, VTI))最早提出,后 由美国燃气技术研究院(Gas Technology Institute, GTI)进一步发展形成较为完整的工艺^[6-7],可在不采 取空气分级措施下实现 NO_x 排放达到 153 mg/m^3 ; 国内中国科学院工程热物理研究所利用流化床作 为预热场所对无烟煤、半焦等低挥发分燃料进行了 试验研究[8-10], 西安交通大学分别在 35 kW 试验台 和两段炉机理试验台上发现了约 70%的降氮潜力 [11-12]。与传统燃烧模式下煤粉在炉膛内热解、挥发 分释放以及焦炭燃烧着火交叉进行不同, 预热燃烧 工艺采用预燃室作为挥发分集中释放的场所, 使得 挥发分释放和焦炭燃烧依次连续进行,同时在炉膛 空气分级模式下, 主燃区一般为还原性气氛, 因此 挥发分对于 NO_x排放的贡献非常小,研究表明由焦 炭生成的 NOx 可占到最终 NOx 排放的 60%~90%^[13-14],因此控制焦炭氮向 NO_x的转化过程 是充分发挥煤粉预热燃烧技术降氮能力的关键。对 于焦炭燃烧产生 NOx, 已经有大量文献做了深入报 道。其中焦炭氮转化为 NO 的份额从 30%[15-18]到 100%[19-22]不等的原因可以归结为试验条件与燃料 的不同; Xu 等[23-24]人在固定床研究了焦炭粒径及 二次热解对焦炭燃烧释放 NO 的影响,发现随粒径 降低及二次热解均可以降低 NO 的排放, 其将该现 象归结于焦炭孔隙率和比表面积的差异; Zhang 等 [25]人利用沉降炉研究了热解温度对焦炭释放 NO 的 影响,发现 800 ℃时 NO 最低,与该温度下最大 BET 比表面积一致。

在上述研究过程中,学者们都先采用沉降炉或 者固定床在惰性气氛下制焦,然后利用热天平、固 定床或沉降炉对焦炭燃烧释放的 NO 进行测定。然 而在煤粉预热燃烧技术中,进入炉膛的焦炭并不是 常温冷态焦炭而是本身具有一定温度的热态焦炭, 遇到空气时甚至能立即着火,与冷态焦炭进入炉膛需要先进行一段加热过程具有较大差异,C 析出规律和焦炭燃尽特性将会发生较大变化,主要体现在热态焦炭具有更高的燃尽率^[26],伴随焦炭氮的析出规律也将会有较大差异。笔者在以前的研究中发现,在预热温度低于焦炭热解温度时,会造成 NO 排放升高^[11],因此有必要对热态焦炭的 NO 排放特性和燃尽特性进行更为全面的研究。

沉降炉可以较好模拟实际锅炉中焦炭的燃烧过程,因此本文自行搭建两段沉降炉,焦炭在第一段沉降炉中被加热到预设温度,在第二段沉降炉中发生燃烧反应,较为详细地研究了预热温度、燃烧温度以及过量空气系数对高温焦炭燃烧生成 NO 及燃尽率的影响规律,为进一步完善预热低氮燃烧工艺提供科学依据。

1 实验材料和方法

1.1 煤质参数

选取典型的神华煤种石炭煤,利用自行搭建的竖直固定床在 Ar 气氛(~2 L/min)下分别制备热解温度为 600、800、1000 $^{\circ}$ 0的焦炭,制备后的焦炭经球磨机磨制并筛选至<97 μ m,筛分测得 R_{90} 约为 6%。其工业分析及元素分析见表 1,其中 O_d *由差分所得。

表 1 石炭煤、石炭焦工业和元素分析 w/% **Tab.1** Proximate and Ultimate Analyses of Coal and Semi-coke

		工业分	析	元素分析				
	A_d	V_{d}	FC_d	C_{d}	H_{d}	${O_d}^*$	N_{d}	S_d
石炭煤	28.7	24.6	46.7	56.3	3.6	9.8	1.2	0.4
石炭焦 1 000 ℃	39.2	4.3	56.5	55.9	0.7	2.8	1.1	0.3
石炭焦 800 ℃	37.7	4.39	57.91	54	1.3	5.3	1.3	0.4
石炭焦 600 ℃	33	4.58	62.42	54.1	2.5	8.8	1.2	0.4

1.2 实验台

两段串联电加热一维炉示意如图 1 所示。主要由电加热系统、螺旋给粉系统、供气系统、水冷系统及取样测量系统组成,详见文献[11]。实验时,焦炭由螺旋给粉机给入,给料速率(0.4±0.05)g/min,整个实验过程关闭二次风,预燃区空气由一次风提供。上段炉作为预热区域仅为焦炭预热提供热量,其设置温度与制焦温度一致,一次风根据实验需要,通入 30~50 ml/min 氮气作为载气携带焦炭

顺利下落,下段炉燃烧区域空气从中部法兰连接处给入,控制过量空气系数 α 为 0.6~1.2,运行时通过旁路控制炉内真空度在-40~-100 Pa,利用 MRU 仪器对尾部烟气成分进行测量,NO 最终结果均折算到 6% O_2 标准。

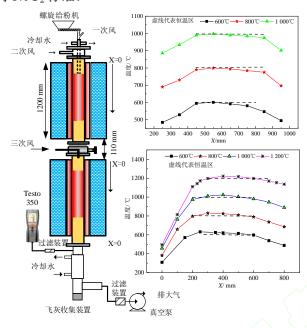


图 1 预热燃烧试验平台 Fig.1 Schematic diagram of the preheating combustion system

2 实验结果与讨论

2.1 热解温度和过量空气系数对 NO 排放的影响

焦炭挥发分含量极低,燃烧过程中可以忽略挥 发分氮释放。同时,本研究沉降炉设置温度均低于 热力型 NO_x产生的温度 (1 500 ℃), 因此可认为 NO 主要来源于焦炭氮的转化。图 2 为不同热解温 度下热态焦炭燃烧 NO 释放量随过量空气系数 α 的 变化规律。由图 2 可以看出: 过量空气系数对 NO 的生成影响较大,随过量空气系数增加,NO 迅速 升高; 热解温度 1000 ℃, 燃烧温度 1200 ℃时过 量空气系数由 0.6 增大至 1.2, NO 质量浓度由 41.5 mg/m³迅速增大至 409.5 mg/m³; 当过量空气系数较 低时, NO 与 α 呈现线性变化, 增幅较大, 当 $\alpha > 1$ 时,NO 的增幅变缓。此现象可归结于氧气扩散过 程,一般认为煤粉粒径为 0.1 mm 左右时,燃烧温 度 700~1 400 ℃为过渡区,因此随着过量空气系数 提高,氧气传质加快,生成大量 NO; 当过量空气 系数进一步增加, 焦炭氮释放趋于完全, N 自由基 浓度成为影响化学反应速率的决定因素,同时高过

量空气系数下, C 燃烧反应速率加快, 焦炭颗粒燃烧反应后期, 颗粒体积缩小, 内部孔隙缩小, 同时易被灰堵塞阻碍了氧自由基和 N 自由基的接触: 因此进一步提高过量空气系数并不能使得氧气传质加快, 最终使得 NO 生成速率变缓。

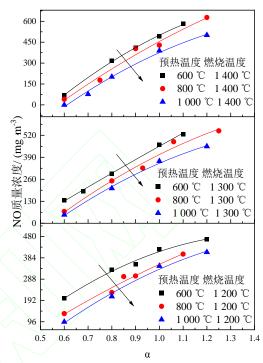


图 2 热解温度和过量空气系数对 NO 排放的影响 Fig.2 The influence of pyrolysis temperature and excess air coefficient on NO emission

由此可见,提高制焦温度有利于降低 NO 排放。 前人冷态焦炭燃烧热解温度对 NO 排放影响研究 中,采用 BET 面积表征的焦炭活性被认为是影响 NO 排放的重要因素[8,25,27]。图 3 给出了本文不同热 解温度下焦炭 BET 面积。由图 3 可以看出, 热态焦 炭燃烧过程NO排放量与BET面积并不存在绝对的 相关性。Walker等[28]人也发现随着脱挥发分停留时 间的增加, 焦炭的反应性大大降低, 但总表面积 (TSA) 却略有增加。但基于本文的研究结果可以 推测冷态焦炭经过预热成为热态焦炭, 其反应性可 能发生较大差异,对热态焦炭而言,预热后1000 ℃ 焦炭颗粒表面温度更高,在下段炉遇到空气时会更 快地发生燃烧反应,根据 C 燃烧理论,颗粒表面会 瞬间被大量 CO_2 和 CO 混合气体包裹, 虽然 C 可以 通过与CO2的二次反应继续被消耗,但N却无法及 时接触到 O_2 , 只能转化为 N_2 或 XN, 最终使得 1 000 ℃热态焦炭生成更低的 NO。

焦炭氮转化率计算如下

$$N_{\text{tran}} = 1 - \frac{N}{N_0} \cdot \frac{A_0}{A} \times 100\%$$
 (1)

式中: N_{tran} 为氮转化率,N为焦炭氮质量分数, N_0 为煤中氮质量分数, A_0 为煤中灰质量分数,A为焦炭中灰质量分数。由式(1)计算得到 600、800、1 000 °C下焦炭 N 转化率分别为 13.03%、17.53%和32.89%。随热解温度升高,N 转化率逐渐升高,尤其热解温度升高至 1 000 °C时,N 转化率增幅显著,尽管在元素分析中 3 种制焦温度下的焦炭氮质量分数较为一致,但热解使得易释放的氮提前转化,残留的焦炭。氮结构更稳定。

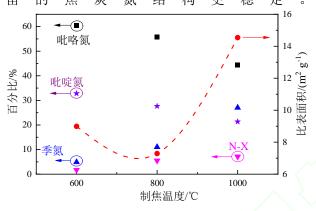


图 3 不同热解温度焦炭含氮官能团量化分析

Fig.3 Quantitative analysis of nitrogen-containing functional groups

图 4 给出了不同热解温度下石炭焦炭的 X 射线 光电子能谱分析(X-ray photoelectron spectroscopy, 简称 XPS) 结构示意。由图 4 可以看出, 煤粉热解 后焦炭中含氮官能团主要包括吡啶氮、吡咯氮、季 氮以及小部分的 N-X。由图 3 可以看出: 随着制焦 温度升高吡啶氮和吡咯氮比例逐渐降低,季氮的体 积分数则大幅升高,1000℃焦炭中吡咯氮和吡啶 氮体积分数分别为 44.49%、21.34%, 较 600 ℃焦 炭降低 26.52%和 35.00%; 而季氮则由 4.91%升高 至 27.01%,增加 5.5 倍。含氮官能团分布形式和比 例对燃烧过程中焦炭氮的释放具有重要影响[29-30], 吡咯氮和吡啶氮在焦炭燃烧初期几乎全部转化为 HCN, 极易被氧化生成 NO; 而季氮由于呈现较大 的多核芳香族结构则更容易先转化为 NH3[31], NH3 作为常用氨基脱硝分子在 O2 存在的条件下依然对 NO 具有较强的还原作用,较 HCN 更倾向于转化成 N₂, 研究表明^[32]随着 NH₃/HCN 比例升高, NO 生 成量呈下降趋势,因此受焦炭氮结构影响,1000 ℃

焦炭氮在沉降炉燃烧过程中释放更为缓慢,NO生成量较低。

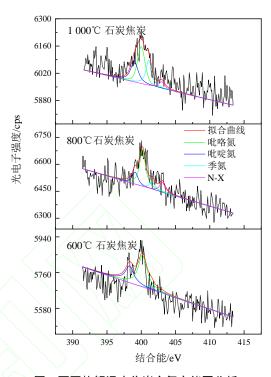


图 4 不同热解温度焦炭含氮官能团分析 Fig.4Analysis of nitrogen-containing functional groups of semi-coke at different pyrolysis temperatures

图 5 给出了热解温度和过量空气系数对飞灰含碳量的影响。由图 5 可以看出,随热态半焦温度升高,飞灰含碳量逐渐降低。一般认为,随热解温度升高,碳原子有序化程度升高,焦炭活性逐渐降低,燃烧特性发生恶化 $^{[33]}$,本文的非等温热重实验结果也得到了类似结论。但在热态焦炭研究中,由于热解后的焦炭在上段炉被重新加热至热解温度,本身具有一定潜热,根据 Arrhenius 定律,反应速率常数与温度成指数关系, $k\sim e^{-ERT}$,1 000 $^{\circ}$ C的焦炭反应性要优于 600 $^{\circ}$ C焦炭。

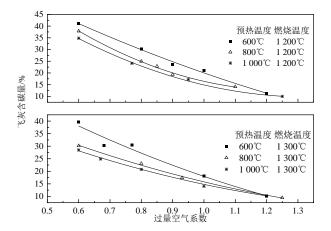
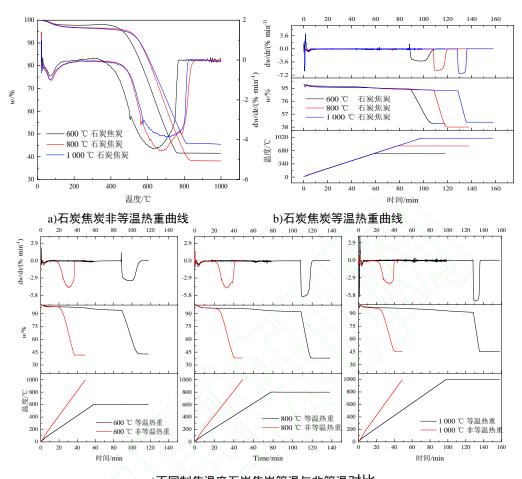


图 5 热解温度和过量空气系数对飞灰含碳量的影响 Fig.5 Effect of pyrolysis temperature and excess air coefficient on the carbon content of fly ash

为探讨热态焦炭温度对燃烧特性影响的原因, 本研究在热重分析仪上对3种焦炭的燃烧特性进行 了进一步研究,结果如图 6 所示。采用 DTG 峰值、 DTG半高宽及着火温度3个参数对燃烧特性进行定 量描述,其中图 6a)给出了制焦温度分别为 600、、 800、1 000 ℃所得石炭焦炭的非等温热重曲线示 意。表 2 为石炭焦炭热重分析参数。结合表 2 可发 现: 制焦温度由 600 ℃升高至 800 ℃, 虽然 DTG 峰值及半高宽变化不大,但着火温度上升了约 50 ℃; 当制焦温度升高至 1 000 ℃时 DTG 峰值有 了较为明显的下降,降幅 14.6%,表明热解温度的 升高降低了煤焦的反应性。由图 6b)和图 6c)可以看 出,高温焦炭的反应活性与常温焦炭具有较大差 异,非等温热重 DTG 峰值附近曲线呈左右对称, 而 800、1 000 ℃焦炭等温热重在气氛切换的时刻 曲线更陡峭, 表明此时热态焦炭瞬间着火导致快速 失重。值得指出的是,600 ℃焦炭在切换气氛时并 未表现出明显的失重,从着火温度看,虽然 600 ℃ 焦炭等温热重恒温温度(600 ℃)已经高于着火温 度(503.84℃),但由于热重气氛切换需要一定时 间,同时切换的 O2无法瞬间充分扩散至焦炭表面, 这都会使得着火延迟, 亦可认为着火温度升高, 而 800 ℃和1000 ℃焦炭由于本身恒温温度更高,着 火延迟相对更短, 因此曲线更为陡峭。另外, 除 600 ℃焦炭,800 ℃和 1 000 ℃焦炭的 DTG 峰值 较常温焦炭均大幅提高,尤其是1000 ℃热态焦炭 DTG 峰值相较冷态半焦增幅 78.2%, 表明焦炭反应 性大幅升高,同时 3 种焦炭的 DTG 半高宽都有明 显的降低,表明燃尽时间缩短。此外,1000℃热 态半焦 DTG 峰值相较 600 ℃热态半焦提高一倍, 同时 DTG 半高宽仅为 600 ℃热态半焦五分之一, 表明 1 000 ℃热态半焦的反应活性明显高于 600 ℃热态半焦。

图 5 的结果还表明,随过量空气系数增加,热态半焦温度的影响逐渐减弱,原因在于虽然提高焦炭温度能够促进燃烧初期着火加快,但当过量空气系数较大和炉内停留时间较长时(3 s~),燃烧初期的未燃尽碳可在燃烧后期得到补偿,因此从整个燃烧过程看飞灰含碳量差别不大,但当停留时间较短时,热态半焦温度的影响将较为显著。



c)不同制焦温度石炭焦炭等温与非等温对比

图 6 石炭焦炭热重分析 Fig.6 Thermogravimetric analysis

表 2 石炭焦炭热重分析参数 Tab.2Thermal gravimetric analysis parameters

	等温过程			非等温		
温度/℃	600	800	1000	600	800	1 000
DTG 半高宽/min	8.9	1.85	1.86	13.36	13.2	12.71
DTG 峰值/(% min	1)3.36	5.92	6.79	4.46	4.57	3.81
着火温度/℃				503.84	552.61	550.48

2.2 燃烧温度和过量空气系数对 NO 排放的影响

图 7 给出了燃烧温度和过量空气系数对 NO 排放的影响。由图 7 可以看出:针对不同温度的热态焦炭,均存在一临界过量空气系数;当 α 高于临界过量空气系数时,NO 随燃烧温度增加而增加,主要是因为温度升高加速了焦炭氮与 O_2 的反应速率;而当 α 低于临界过量空气系数时,升高燃烧温度可抑制 NO 生成,一是因为缺氧气氛下提高燃烧温度促进了焦炭氮向 N_2 及 XN 的提前转化,另一方面从

NO 生成及还原的动态平衡分析,燃烧温度的升高既可通过式(2)促进 NO 的生成,又可通过式(3)—(5)促进焦炭对 NO 的还原作用。但考虑到本研究的焦炭燃烧处于过渡区,低 α 下 O 原子传质速度缓慢,是限制 NO 生成的主要原因,因此温度对 NO 生成贡献较小,但低 α 下提升温度却可以加快焦炭与 NO 的还原反应速率,最终使得低 α 下 NO 随燃烧温度升高而降低。NO 生成及还原的具体反应过程如下:

$$C(N)+O_2 \rightarrow NO+C(O)$$
 (2)

式(2)中, C(N)和 C(O)分别表示碳表面的氮和氧。所形成的 NO 可通过离解化学吸附在碳表面重新吸收:

$$2C_f + NO \rightarrow C'(N) + C(O)$$
 (3)

式(3)中, C_f 表示自由碳位,而 C'(N)是氮表面分子,与焦炭氮位 C(N)不同。反应(3)导致 N 在碳表面上的积累。气相中的 C'(N)与 NO 之间的反应导致形成游离氮:

$$C'(N) + NO \rightarrow N_2 + C(O)$$
 (4)

反应(4)是形成 N_2 的主要步骤,而两个 C' (N)的固态重组是次要的:

$$C'(N) + C'(N) \rightarrow N_2 + 2C_f \tag{5}$$

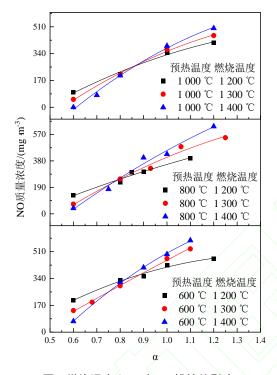


图 7 燃烧温度和 α 对 NO 排放的影响 Fig.7The influence of combustion temperature and α on NO emissions

从不同温度热态半焦的临界过量空气系数看,随着热解温度升高,临界过量空气系数从 0.75 增加至 0.85,略有增加但变化不明显。本研究认为,1 000 ℃焦炭中季氮含量较高,因此可以在较大的过量空气系数下依然保持较低的 NO 生成速率,这与2.1 节中相同过量空气系数下 1 000 ℃热态焦炭生成更低 NO 的规律一致;但随着 α 增加,C 燃烧反应速率加剧,N 释放随之加快,因此临界过量空气系数虽有增加但不会相差太多。

2.3 燃烧温度和过量空气系数对飞灰含碳量的影响

图 8 给出了燃烧温度和过量空气系数对飞灰含碳量的影响。由图 8 可以看出:随过量空气系数增加,飞灰含碳量急剧下降;以 600 ℃热态焦炭、燃

烧温度 1 200 ℃为例, 当 α 从 0.6 增加至 1.2 时, 飞灰含碳量从 41.1%降低至 11.2%, 降幅 72.2%, 这主要与 O₂ 的扩散传质加快有关; 同时, 提高燃 烧温度可以进一步降低飞灰含碳量,以600 ℃热态 焦炭为例, α=1.2 时, 当燃烧温度从 1 200 ℃提高 至 1 400 ℃,飞灰含碳量从 11.2%降低至 9.1%,降 幅 18.8%。Arrhenius 定律指出温度是影响化学反应 速率的关键因素, 焦炭颗粒燃烧过程中 C 的消耗主 要通过一次反应(6)(7)和二次反应(8)(9)进行,燃烧 温度的提高促进了上述反应的反应速率, 使得燃尽 率提高。从图 8 还可以看出,燃烧温度对富燃料工 况下燃尽影响更为明显,同样以600 ℃热态焦炭为 例, α=0.6 时, 当燃烧温度从 1 200 ℃提高至 1 400 ℃, 飞灰含碳量由 41.1%降低至 33.0%, 降幅 19.8%。原因在于燃烧温度虽然增加了 C 消耗反应 速率,但由于炉内停留时间较长,过量空气系数较 大,从整个燃烧反应周期和边际效应看, C 的消耗 总量趋于稳定,继续增加燃烧温度带来的收益不再 明显,这一特点1000 ℃热态焦炭更为显著,由前 文分析可知 1 000 ℃热态焦炭燃尽率要高于 600 ℃热态焦炭,换言之 1 000 ℃热态焦炭在过量 空气系数较大时更容易出现边际效应。C 消耗的一 次反应和二次反应如下:

$$C+O_2=CO_2 \tag{6}$$

$$2C+O_2=2CO (7)$$

$$C+CO_2=2CO (8)$$

$$2CO+O_2=2CO_2$$
 (9)

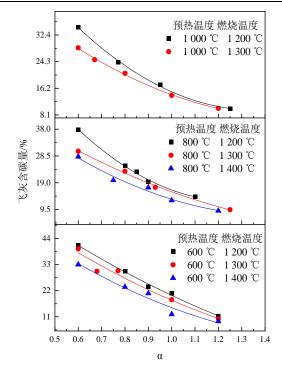


图 8 燃烧温度和 α 对飞灰含碳量的影响 Fig.8The influence of combustion temperature and α on the carbon content of fly ash

3 结 论

- 1)对于热态焦炭,提高热解温度有利于降低 NO 排放,α=1.0 时,最大降氮效率为 21.1%;热态焦炭的提前着火导致 C、N 析出规律变化以及原始热解过程含氮官能团的分布形式和比例是影响热态焦炭 NO 排放的两个主要因素。热态焦炭 NO 排放与冷态焦炭 NO 排放不同,与 BET 面积不存在绝对相关性。
- 2)燃烧温度对热态焦炭 NO 排放的影响主要依赖于燃烧区域过量空气系数,当炉内呈现较强还原性气氛时,随燃烧温度升高,NO 排放量降低,当炉内呈现氧化性气氛,随燃烧温度提高,NO 排放量增加。热态焦炭温度从 600 ℃增加至1000 ℃时,临界过量空气系数由 0.75 缓慢增加至 0.85。
- 3)提高煤粉热解温度有利于降低飞灰含碳量,α=1.0 时,飞灰含碳量最大降幅 28.6%,区别于冷态 焦炭制焦温度越高反应活性越差,热态焦炭潜热的 存在使得着火提前,但当过量空气系数较大,停留 时间较长时,该趋势不明显;燃烧温度对飞灰含碳 量的影响中也观察到类似的现象。

[参考文献]

- [1] Atkinson R, Lloyd AC. Evaluation of Kinetic and Mechanistic Data for Modeling of Photochemical Smog[J]. Journal of Physical & Chemical Reference Data, 1984, 13 (2): 315.
- [2] McAllister S, Chen J-Y, Fernandez-Pello AC. Fundamentals of combustion processes[M]: Springer, 2011,10.1007/978-1-4419-7943-8.
- [3] 郦建国,朱法华,孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状 及挑战[J]. 中国电力, 2018, 51 (6):2-10.
- Li Jianguo, Zhu Fahua, Sun Xueli. Current Status and Challenges of Air Pollution Prevention and Control for Thermal Power in China[J]. China Electric Power, 2018, 51 (6): 2-10
- [4] 何陆灿, 葛铭, 陈国庆, 等. 火电厂 SCR 脱硝系统喷 氨优化调整[J]. 热力发电, 2019, 48 (11): 129-134.

 He Lucan, Ge Ming, Chen Guoqing, et al. Optimization and adjustment of ammonia injection for SCR denitration system in thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48 (11): 129-134
- [5] 王乐乐, 杨敏, 吴善森, 等. 典型燃煤电厂 SCR 脱硝 系统超低排放运行优化[J]. 热力发电, 2020, 49 (9): 156-162.
 - Wang Lele, Yang Min, Wu Shansen, et al. Ultra-low emission operation optimization of SCR denitration system in a typical coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49 (9): 156-162.
- [6] Bryan B, Nester S, Rabovitser J, et al. Methane de-NO_x for Utility PC Boilers. Institute Of Gas Technology, 2005: 引用页码.(著录参数不全,请补充)(马老师,这个文献找不到页码,我们在英文期刊上也是这样引用的,不好意思)
- [7] Rabovitser J, Bryan B, Knight R, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO_x reduction from pulverized coal-fired boilers[J]. Gas Separation and Purification, 2003, 1 (2): 4.
- [8] Zhang Y, Zhu J, Lyu Q, et al. The ultra-low NO_x emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating[J]. Fuel, 2020, 277: 118050.
- [9] Zhu S, Lyu Q, Zhu J, 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, 2019, 92 (2): 247-256.
- [10] Zhu S, Lyu Q, Zhu J, et al. Effect of Air Distribution on NO_x Emissions of Pulverized Coal and Char

- Combustion Preheated by a Circulating Fluidized Bed[J]. Energy & Fuels, 2018, 32 (7): 7909-7915.
- [11] Lv Z, Xiong X, Yu S, et al. Experimental investigation on NO emission of semi-coke under high temperature preheating combustion technology[J]. Fuel, 2021, 283: 119293.
- [12] Liu C, Hui S, Pan S, et al. Experimental Investigation on NO_x Reduction Potential of Gas-Fired Coal Preheating Technology[J]. Energy and Fuels, 2014, 28 (9): 6089-6097.
- [13] Thomas KM. The Release of Nitrogen Oxides During Char Combustion[J]. Fuel, 1997, 76 (6): 457-473.
- [14] Glarborg P, Jensen AD, Johnsson JE. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2003, 29 (2): 89-113.
- [15] Pershing D, Wendt J. Pulverized coal combustion: The influence of flame temperature and coal composition on thermal and fuel NOx[C]: Elsevier, 1977: 389-399.
- [16] Pohl JH, Sarofim AF. Devolatilization and oxidation of coal nitrogen[C]: Elsevier, 1977: 491-501.
- [17] Song YH, POHL JH, BEÉR JM, et al. Nitric oxide formation during pulverized coal combustion[J]. Combustion Science and Technology, 1982, 28 (1/2): 31-40.
- [18] Chen S, Heap M, Pershing D, et al. Influence of coal composition on the fate of volatile and char nitrogen during combustion[C]: Elsevier, 1982: 1271-1280.
- [19] Baumann H, Schuler J, Schiller R.

 Drahtnetzversuchezum Verbleibdes Kohlestickst of fsbei Pyrolyseund Verbrennung[J]. Erd äl, Erdgas, Kohle, 1989, 105 (5): 227-232.
- [20] Jensen LS, Jannerup HE, Glarborg P, et al. Experimental investigation of NO from pulverized char combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28 (2): 2271-2278.
- [21] Miettinen H, Paulsson M, Stroemberg D. Laboratory study of N_2O formation from burning char particles at FBC conditions[J]. Energy & Fuels, 1995, 9 (1): 10-19.
- [22] Ninomiya Y. Characteristics of emission of char NO during the combustion of a single particle of coal char[J]. 1989 年 [23] Xu J, Sun R, Ismail TM, et al. Effect of Char Particle Size on NO Release during Coal Char Combustion[J]. Energy & Fuels, 2017, 31 (12): 13406-13415.

- [24] Xu J, Sun R, Ismail TM, et al. Nitrogen/NO conversion characteristics of coal chars prepared using different pyrolysis procedures under combustion conditions[J]. Fuel, 2018, 211: 484-491.
- [25] Zhang J, Wang Ca, Jia X, et al. Experimental study on combustion and NO formation characteristics of semi-coke[J]. Fuel, 2019, 258: 116108.
- [26] Man C, Zhu J, Ouyang Z, et al. Experimental study on combustion characteristics of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 172: 72-78.
- [27] Yao Y, Zhu J, Qinggang LU, et al. Experimental Study on Preheated Combustion of Pulverized Semi-coke[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24 (004): 370-377.
- [28] Radović LR, Walker PL, Jenkins RG. Importance of carbon active sites in the gasification of coal chars[J]. Fuel, 1983, 62 (7): 849-856.
- [29] Nelson PF, Buckley AN, Kelly MD. Functional forms of nitrogen in coals and the release of coal nitrogen as NO_x precursors (HCN and NH3)[C]: Elsevier, 1992: 1259-1267.
- [30] Pels J, Kapteijn F, Moulijn J, et al. Evolution of nitrogen functionalities in carbonaceous materials during pyrolysis[J]. 1995, 33 (11): 1641-1653.
- [31] Kelemen SR, Gorbaty ML, Kwiatek PJ, et al. Nitrogen Transformations in Coal during Pyrolysis[J]. Energy & Fuels, 1998, 12 (1): 159-173.
- [32] Kambara S, Takarada T, Toyoshima M, et al. Relation between functional forms of coal nitrogen and NO_x emissions from pulverized coal combustion[J]. Fuel, 1995, 74 (9): 1247-1253.
- [33] Khan MR. Significance of char active surface area for appraising the reactivity of low-and high-temperature chars[J]. Fuel, 1987, 66 (12): 1626-1634

(责任编辑 马昕红)