

不同温度时煤热解中 HCN/NH₃ 的析出与 CFB 锅炉中 NO_x 生成的关联性研究

曾光¹, 孙绍增², 赵志强¹, 赵义军²

(1. 东北电力科学研究院有限公司调整试验研究所, 辽宁省 沈阳市 110006;

2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Correlation Study of HCN/NH₃ Releasing During Coal Pyrolysis and NO_x Formation in a CFB Boiler Under Different Temperatures

ZENG Guang¹, SUN Shaozeng², ZHAO Zhiqiang¹, ZHAO Yijun²

(1. Commissioning & Test Department, Northeast Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, Liaoning Province, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Correlation between the characteristics of HCN/NH₃ releasing from coal during rapid pyrolysis and the NO_x formation trend in the circulating fluidized bed boiler that burns the same coal was studied. First, experiments were carried out in the high temperature drop tube furnace to analyze releasing characteristics of HCN/NH₃ under the condition that pyrolysis temperatures are 830, 880 and 930 °C, and the fed pulverized coal rate is constant; Second, experiments were carried out in the boiler which was maintained with a constant coal flow, and running at bed temperatures of 830 °C, 880 °C and 930 °C to analyze NO_x formation trend, and study the correlation of two experiments. Results indicate that as the temperature increases, the releasing amount of HCN decreases slightly first and then increases, meanwhile, that of NH₃ increases first and then decreases; temperature ranges of HCN/NH₃ releasing during pyrolysis of different nitrogen forms in coal are different. As the temperature increases, NO_x precursors releasing during pyrolysis and NO_x formation in the boiler will both increase. Changes of releasing trends of NO_x precursors as the temperature increases will cause the increase of NO_x formation in the CFB boiler; there exists a critical temperature for NO_x transformation in coal-fired CFB boilers.

KEY WORDS: rapid pyrolysis; circulating fluidized bed (CFB); HCN; NH₃; NO_x; correlation

摘要: 为研究快速热解时煤中 HCN/NH₃ 的析出规律与燃用此煤的循环流化床锅炉 NO_x 生成趋势的关联性, 一方面在

高温沉降炉上, 定速率给煤粉在 830, 880 和 930 °C 的温度下热解, 分析产物中 HCN/NH₃ 的析出规律; 另一方面在 CFB 锅炉上, 稳定煤量时调整床温在 830, 880 和 930 °C 下运行, 分析烟气中 NO_x 的生成趋势, 研究两方面的关联性。研究表明: 随着温度的增加, HCN 的热解析出量先略微减小后增加, NH₃ 是先增加后减少, 煤中不同的氮大量热分解产生 HCN/NH₃ 的温度区间不同。随着温度的增加, 热解中析出的 NO_x 前驱物与锅炉中生成的 NO_x 均增加。煤样中 NO_x 前驱物的热解析出规律随温度增加的变化会引起 CFB 锅炉生成 NO_x 的增加, 认为燃煤 CFB 锅炉存在一个 NO_x 转化临界温度。

关键词: 快速热解; 循环流化床(CFB); HCN; NH₃; NO_x; 关联性

0 引言

氮氧化物(NO_x)是一种大气污染物, 它的产生及化学行为与酸雨、臭氧耗损、温室效应三大全球性环境问题有着密切的关系, NO_x 对人类自身及生存环境的直接和间接危害也已远超其他污染物。燃煤锅炉是 NO_x 的主要排放来源之一^[1], 在煤燃烧过程中生成的 NO_x 几乎全是 NO 和 NO₂, 其中 NO 占 90% 以上, 其余 NO₂ 占 5%~10%^[2]。在煤粉热解、气化及燃烧过程中, 产生的 HCN 与 NH₃ 是 2 种重要的 NO_x 前驱物^[3-4], HCN 与 NH₃ 的析出规律直接关系到 NO_x 的生成趋势^[5]。

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉燃烧技术是目前商业化程度最好的清洁煤燃烧技

基金项目: 辽宁省电力有限公司 2011 年度科学技术项目 (2011YB1023)。

Science and Technology Project in Year 2011 of Liaoning Province Electric Power Company Limited (2011YB1023).

术之一,有着广泛的应用市场,与其他锅炉相比,CFB 锅炉的 NO_x 排放量较低,但随着火电厂大气污染物排放标准的提高,CFB 锅炉的燃烧已经无法满足对 NO_x 排放的严格要求,国外很多 CFB 锅炉已经开始使用 NO_x 脱除系统^[6],CFB 锅炉 NO_x 的生成和减排机制还有待进一步完善。

煤中的氮在热解过程中一部分以挥发分氮的形式释放到气相,一部分以焦炭氮的形式滞留,在后续的反应过程中它们通过不同的途径进一步转化为 NO_x ^[7]。CFB 锅炉产生的热力型 NO_x 和快速型 NO_x 非常少,而燃料型 NO_x 占 95% 以上,且主要来自挥发分氮^[8],挥发分氮主要是 HCN 和 NH_3 ,热解过程中煤中氮析出为 HCN 及 NH_3 的转化率与锅炉燃烧过程中煤中氮生成 NO_x 的转化率具有重要的关联性。

目前对煤样热解时 HCN/ NH_3 析出特性的研究及燃煤锅炉 NO_x 排放特性的研究分别有文献报道,但对快速热解条件下无烟煤中 HCN/ NH_3 的析出规律与燃用此煤样的 CFB 锅炉 NO_x 的生成趋势的关联性研究少见报道。本文一方面以连续给粉的高温沉降炉(drop tube furnace, DTF)试验台为依托,在不同温度热解时,分析煤样中的 HCN/ NH_3 的析出规律;另一方面以电站 CFB 锅炉为依托,在对应热解温度的床温下运行,分析 CFB 锅炉中 NO_x 的生成趋势,研究相同温度背景下热解时析出的 HCN/ NH_3 与 CFB 锅炉生成的 NO_x 之间的关联性,为研究 CFB 锅炉 NO_x 的生成及控制机制拓展了新的方向。

1 试验部分

1.1 试验台部分

1.1.1 试验装置

DTF 试验系统如图 1 所示,主要由反应炉本体、预热器、配气系统、给粉系统、取样系统和水冷系统等组成,主要设计参数见表 1。

1.1.2 试验方法

DTF 系统试验分 3 个工况,分别将反应炉本体终温设置为 830, 880 和 930 $^{\circ}\text{C}$,配气系统均采用 99.99% 的高纯 N_2 ,一部分作为反应气流先通过预热器预热(4L/min),然后送入反应炉本体,另一部分作为携带煤粉气流(2L/min)。煤粉以恒定速率进入反应炉本体后,经历快速热解反应,产生的气体

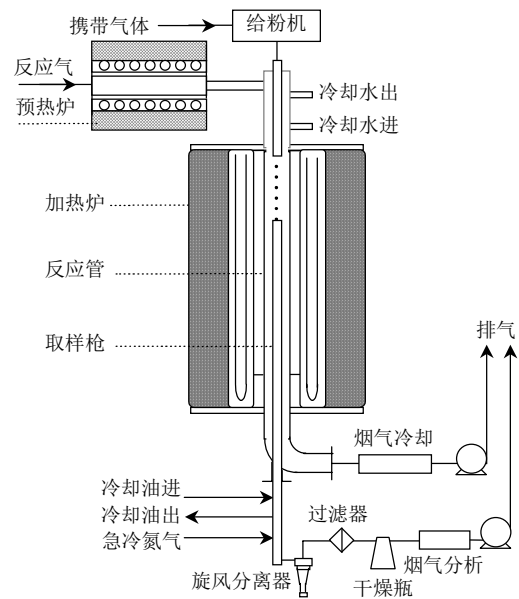


图 1 DTF 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic of DTF system

表 1 DTF 试验系统的主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of DTF system

参数	数值
粒子供入速率/(g/min)	0.48
粒子停留时间/s	0.2~2
粒子加热速率/(K/s)	$>10^4$
反应炉最高加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	1400
预热炉最高加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	800
反应管内径/m	0.05
反应管长度/m	1.7
恒温区长度/m	0.7

产物经取样系统处理后,进入在线便携式傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)气体分析仪(GASMET-DX4000,可同时定量显示 23 种气体组分的分析结果数值),直接测量出产物中 HCN 和 NH_3 的析出浓度,结合给粉量、热解温度等相关数据,计算出煤样中的氮在热解时析出为 HCN/ NH_3 的转化百分比。

1.2 电站部分

1.2.1 CFB 锅炉

现场试验对象为越南某热电厂 1[#]锅炉,该机组为美国 Foster Wheeler 公司设计的一台 545t/h 亚临界参数、单汽包、中间再热、自然循环 CFB 锅炉,于 2010 年 1 月正式投入商业运行,主要设计参数见表 2。

1.2.2 试验方法

CFB 锅炉试验分 3 个工况,各工况均维持锅炉

表 2 CFB 锅炉的主要设计参数
Tab. 2 Main design parameters of CFB boiler

项目	数值
最大连续出力/(t/h)	545
过热蒸汽压力/MPa	17.65
过热蒸汽出口温度/℃	541
设计煤量/(t/h)	90
(再热蒸汽进/出口压力)/MPa	3.61/3.54
(再热蒸汽进/出口温度)/℃	325.9/541
锅炉效率/%	86.9

给煤量稳定，改变锅炉空气量大小及配比，分别将各工况的密相区床温稳定在 830，880 和 930 ℃，待各工况稳定后采用 IMR1 600 烟气分析仪测量锅炉空预器入口烟气中 NO_x 的生成浓度，利用锅炉床温、给煤量、空气量、NO_x 等数据的积分平均值，计算出煤样中的氮在 CFB 锅炉中燃烧时生成 NO_x 的转化百分比。

1.3 气相含氮化合物的计量方法

为了将煤样在 DTF 内快速热解时析出的 HCN/NH₃ 与 CFB 锅炉生成的 NO_x 进行关联研究，这里采用以煤中的氮转化为含氮化合物中的氮为基准的转化率 C_R 计算^[9]，如下：

$$C_R = \frac{\text{产生的氮化合物的含氮量}}{\text{原煤中的含氮量}} \times 100\% \quad (1)$$

本研究计算中涉及的 NO_x 是 NO 与 NO₂ 之和，NO_x 前驱物是 HCN 与 NH₃ 之和。

1.4 煤样

试验室和现场锅炉均采用越南 No 6B 无烟煤，试验室的煤样粒径为 0~200 μm，而 CFB 锅炉的煤样采用平均粒径为 0.48 mm 的全筛分颗粒，含氮组分的析出与煤粉粒径无关^[10]，煤样分析结果见表 3。

表 3 煤样的工业分析和元素分析

Tab. 3 Proximately and ultimately analysis of coal %

工业分析				元素分析				
M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	O _{ad}
6.4	6.06	39.13	48.41	48.71	1.73	0.24	0.41	3.38

2 试验结果与分析

2.1 不同热解温度时 HCN/NH₃ 的析出规律

目前认为煤中的氮主要以吡啶型氮，吡咯型氮和季氮的形态存在^[11-12]，有研究认为^[13]，煤样快速热解时 HCN 和 NH₃ 的主要来源分别是煤中的吡啶型氮和吡咯型氮。

随着温度的增加，试验中煤样快速热解时 HCN/NH₃ 的析出规律如图 2 和图 3 所示，煤样中的 HCN 转化率先略微减小后增加，与文献^[14]的结论一致；NH₃ 的转化率先增加后减少，与模型化合物吡咯快速热解时的主要含氮产物 NH₃ 的转化率随温度变化的趋势相似^[13]。830~880 ℃，HCN 的析出较少，NH₃ 的析出较多，说明煤样中的吡咯型氮在 830 ℃时先行大量分解，产生 HCN 和 NH₃，NH₃ 为主要气相含氮产物；880~930 ℃，HCN 的析出急剧增大，NH₃ 的析出急剧减小，说明煤样中吡啶型氮分解变弱而吡啶型氮在 880 ℃后开始大量分解，产生 HCN 和 NH₃，HCN 为主要气相含氮产物，吡啶型氮大量分解的温度区间与文献^[15]中的研究结果一致。

煤样的热解在 800~900 ℃时处于半焦转焦炭阶段^[11,16]，半焦/焦炭不断收缩^[17]，热解易结焦，结焦会阻碍挥发分的逸出^[13]，试验煤样在 880 ℃热解时的结焦对析出较少的挥发分 HCN 的抑制影响较大，造成 HCN 在 880 ℃时析出的转化率较 830 ℃减少。煤样在 930 ℃时热解更完全，析出的 HCN 的转化率远远大于 NH₃，这也与文献中 HCN 是快速热解的产物^[12]的结论一致。

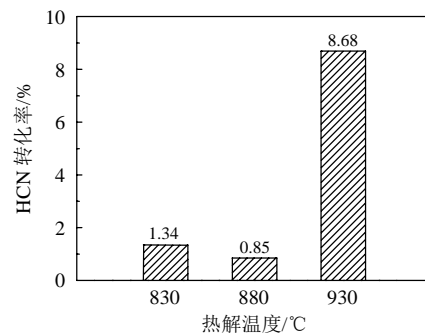


图 2 不同热解温度时 HCN 转化率

Fig. 2 HCN conversion rate under different temperature

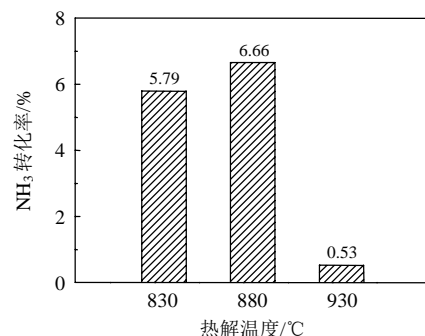


图 3 不同热解温度时 NH₃ 转化率

Fig. 3 NH₃ conversion rate under different temperature

2.2 不同运行床温时 CFB 锅炉 NO_x 的生成趋势

CFB 锅炉的床温是燃烧密相区内流化物料的温度,是关系到锅炉安全稳定运行的关键参数,床温的高低直接决定了锅炉的热负荷和燃烧效果。锅炉试验中维持给煤量稳定、改变空气量,如图 4 所示,调节床温稳定在 830, 880 及 930 $^{\circ}\text{C}$, CFB 锅炉燃烧生成 NO_x 的转化率如图 5 所示。尽管在较高床温工况下,空气量小,过量空气系数小,有利于形成富燃料还原性气氛来抑制 NO_x 的生成^[18],但此抑制影响远小于锅炉运行床温的增加对 NO_x 生成趋势增加的影响^[19], 830~930 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,煤样在试验的 CFB 锅炉中生成的 NO_x 随床温的增加而增加,这与文献[18-20]的试验结果一致。

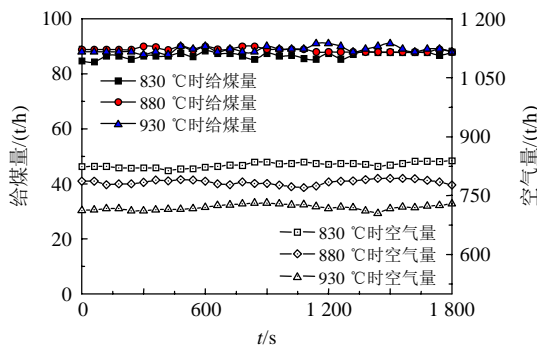


图 4 CFB 锅炉试验中给煤和空气量变化图

Fig. 4 Coal and air change curve during CFB boiler test

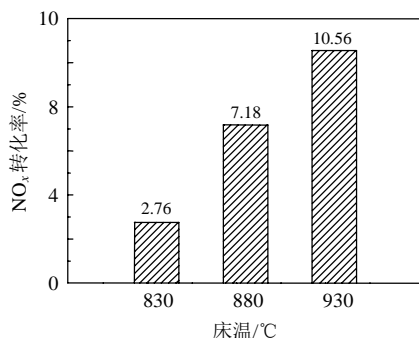


图 5 不同床温时 NO_x 转化率

Fig. 5 NO_x conversion rate under different temperature

2.3 煤样在快速热解条件下 NO_x 前驱物的析出规律与 CFB 锅炉中 NO_x 生成趋势的关联性

不同温度时,煤样在 DTF 热解试验中析出的 HCN/NH_3 的转化率与 CFB 锅炉试验中生成的 NO_x 的转化率如图 2、3 及 5 所示,热解试验中析出的 NO_x 前驱物(HCN 与 NH_3 之和)的转化率与锅炉试验中生成的 NO_x 的转化率如图 6 所示。 HCN 与 NH_3 各自在热解中的析出与锅炉中生成的 NO_x 趋势不

相似, 880 $^{\circ}\text{C}$ 前 NH_3 与 NO_x 的趋势相似, 880 $^{\circ}\text{C}$ 后 HCN 与 NO_x 的趋势相似,这可以用煤样中的吡啶型氮和吡咯型氮大量分解产生 HCN/NH_3 的温度区间不同来解释。DTF 热解试验中煤样析出的 NO_x 前驱物的转化率随着温度的增加而增加,与文献^[21-22]的研究结果一致,CFB 锅炉试验中生成 NO_x 的转化率也随着温度的增加而增加, NO_x 的前驱物作为直接反应物会在燃烧过程中转变成 NO_x , 故锅炉试验中 NO_x 的生成趋势与其前驱物在热解试验中的析出规律相似。

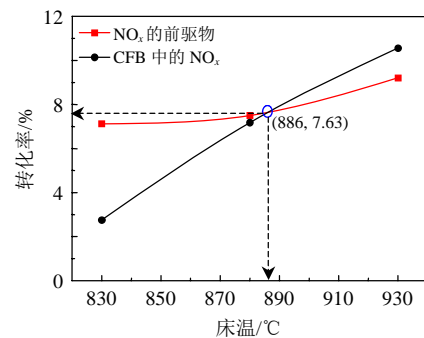


图 6 NO_x 与其前驱物($\text{HCN}+\text{NH}_3$)转化率对比

Fig. 6 Conversion rate contrast of NO_x and its precursor ($\text{HCN}+\text{NH}_3$)

图 6 中在 886 $^{\circ}\text{C}$ 后,煤中的氮在 CFB 锅炉试验中生成 NO_x 的转化率大于煤中的氮在 DTF 热解试验中析出 NO_x 前驱物的转化率,分析认为,随着温度的增加,煤样中的 NO_x 前驱物的析出规律变化会引起锅炉中生成 NO_x 的增加,在较低温度时析出的 NO_x 前驱物中以 NH_3 为主,较高温度时以 HCN 为主, NH_3 更容易反应生成 N_2 , HCN 更容易生成 NO_x ^[23-24],这是造成 CFB 锅炉在床温增加时 NO_x 转化率增加的原因之一。另外煤中其余氮的反应也会引起 CFB 锅炉随着温度的增加生成 NO_x 的增加^[25],这将有待深入试验研究。

分析认为,煤样在试验的 CFB 锅炉中燃烧时存在一个 NO_x 转化临界温度,此温度后煤在锅炉中生成 NO_x 的转化率向着比热解中析出的 NO_x 前驱物的转化率大的方向转变。文中试验采用无烟煤,分析认为对于其他煤种,煤阶的不同,含氮官能团裂解生成的 HCN 和 NH_3 会改变,但热解析出的 NO_x 前驱物与锅炉中生成的 NO_x 仍存在转化临界温度,定量分析还有待进一步的试验研究。 NO_x 转化临界温度对于燃煤 CFB 锅炉燃烧技术的丰富及 NO_x 减排机制的研究具有重要意义。

3 结论

1) 830~930 °C 内, 随着温度的增加, 煤样热解时 HCN 的转化率先略减小后增加, NH₃ 的转化率先增加后减少; 煤样中的吡咯型氮先分解产生大量的 NH₃ 而吡啶型氮后分解产生大量的 HCN。煤样热解时的结焦对 HCN 在析出较少时的影响较大, HCN 是快速热解的主要产物。

2) 830~930 °C 内, 随着温度的增加, CFB 锅炉过量空气系数变小对 NO_x 生成抑制的影响小于运行床温增加对 NO_x 生成增加的影响, CFB 锅炉生成的 NO_x 随着运行床温的增加而增加。

3) 830~930 °C 内, 随着温度的增加, HCN 与 NH₃ 各自的 DTF 热解试验的析出与 CFB 锅炉生成的 NO_x 趋势不相似, 但 NO_x 前驱物的析出与锅炉中 NO_x 的生成均随温度的增加而增加; 煤样中 NO_x 前驱物的热解析出规律随温度增加的变化会引起 CFB 锅炉生成 NO_x 的增加, 认为燃煤 CFB 锅炉存在一个 NO_x 转化临界温度。

致 谢

本文中部分试验是在燃煤污染物减排国家工程实验室(哈尔滨工业大学)试验人员的大力帮助下完成的, 在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 王学栋, 栾涛, 程林, 等. 锅炉燃烧调整对 NO_x 排放和锅炉效率影响的试验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 19-23.
Wang Xuedong, Luan Tao, Cheng Lin, et al. Experimental study of the effect of boiler combustion control on NO_x emission and boiler efficiency[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(1): 19-23(in Chinese).
- [2] 王晓宇. 循环型 NO 在富氧燃烧条件下转化的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Wang Xiaoyu. Experimental study of recycled no reduction in oxy-fuel combustion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009(in Chinese).
- [3] Liu Y, Che D. Releases of NO and its precursors from coal combustion in a fixed bed[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(4): 355-362.
- [4] 孟德润, 赵翔, 周俊虎, 等. 水煤浆热解过程中 HCN 和 NH₃ 释放特性的分析[J]. 热能动力工程, 2006, 21(4): 394-400.
Meng Derun, Zhao Xiang, Zhou Junhu, et al. An analysis of HCN and NH₃ release characteristics of coal-water slurry in its pyrolysis process[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(4): 394-400(in Chinese).
- [5] 鲍卫仁, 章劲草, 申曙光, 等. 大同煤在等离子体热解中生成 HCN 和 NH₃ 的研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 232-236.
Bao Weiren, Zhang Jincao, Shen Shuguang, et al. Formation of HCN and NH₃ during Da tong coal pyrolysis in arc plasma jet[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 232-236(in Chinese).
- [6] 姜鹏志. 循环流化床锅炉低 NO_x 排放特性及利用 SNCR 脱氮技术[J]. 电力技术, 2010, 19(6): 6-10.
Jiang Pengzhi. Application of SNCR in CFB boilers for low NO_x emission[J]. Electric Power Technology, 2010, 19(6): 6-10(in Chinese).
- [7] 陈小利, 何秀风, 秦玲丽, 等. 含钠煤热解过程中 NH₃ 的形成和释放[J]. 燃料与化工, 2009, 40(3): 11-13.
Chen Xiaoli, He Xiufeng, Qin Lingli, et al. Formation and release of NH₃ during pyrolysis of Na-containing coal[J]. Fuel & Chemical Processes, 2009, 40(3): 11-13(in Chinese).
- [8] 路春美, 程世庆, 王永征. 循环流化床锅炉设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 136-137.
Lu Chunmei, Cheng Shiqing, Wang Yongzheng. Circulating fluidized bed boiler equipment and operation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 136-137(in Chinese).
- [9] 宋国良, 吕清刚, 周俊虎, 等. 煤粉浓度对 HCN 与 NH₃ 析出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 49-54.
Song Guoliang, Lü Qinggan, Zhou Junhu, et al. Effect of pulverized coal concentration on emission characteristics of HCN and NH₃[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 49-54(in Chinese).
- [10] Puente G, Fuente E, Pis J J. Reactivity of pyrolysis chars related to precursor coal chemistry[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2000, 53(1): 81-93.
- [11] 刘海明. 煤热解过程中 NO_x 前驱物生成机理的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
Liu Haiming. Study on mechanism of NO_x precursors formation during coal pyrolysis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004(in Chinese).
- [12] 魏砾宏, 姜秀民, 张超群, 等. 超细化煤粉在热解条件下氮的迁移特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 62-66.
Wei Lihong, Jiang Xiumin, Zhang Chaoqun, et al. A experimental investigation on nitrogen emission properties of micro-pulverized during pyrolysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 62-66(in Chinese).
- [13] 李军, 袁帅, 梁钦锋, 等. 煤及其模型化合物快速热解

- 过程中 HCN 和 NH₃ 逸出规律的研究[J]. 高校化学工程学报, 2011, 25(1): 55-60.
- Li Jun, Yuan Shuai, Liang Qinfeng, et al. Formation of HCN and NH₃ during the rapid pyrolysis of coal and model compounds[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2011, 25(1): 55-60(in Chinese).
- [14] 林俊光, 翁青松, 武田直辉, 等. 煤气化中 NO_x 及其前驱物释放规律研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1593-1596.
- Lin Junguang, Weng Qingsong, Taketa Naoki, et al. Release of NO_x and its precursors during coal gasification[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(9): 1593-1596(in Chinese).
- [15] 谭厚章, 廖晓伟, 徐通模, 等. 煤燃烧过程中吡啶型氮迁徙规律的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 251-257.
- Tan Houzhang, Liao Xiaowei, Xu Tongmo, et al. Experimental investigation of the transformation of pyridinic-nitrogen in coal combustion[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 251-257(in Chinese).
- [16] 降文萍. 煤热解动力学及其挥发分析出规律的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- Jiang Wenping. Study on the Kinetics and devolatilization of coal pyrolysis[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [17] 付志新, 郭占成, 王申祥. 梯度温度分布下半焦/焦炭收缩规律的研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(2): 136-141.
- Fu Zhixin, Guo Zhancheng, Wang Shenxiang. Experimental study on shrinkage characteristics of semi-coke/coke under gradient temperature during coking process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(2): 136-141(in Chinese).
- [18] 樊俊杰, 金晶, 钟海卿, 等. 煤粉燃烧时 NO_x 析出规律的试验研究[J]. 锅炉技术, 2005, 36(3): 38-41.
- Fan Junjie, Jin Jing, Zhong Haiqing, et al. Experimental study on the NO_x releasing from pulverized coal combustion[J]. Boiler Technology, 2005, 36(3): 38-41(in Chinese).
- [19] 程新华, 张庆国. 440 t/h 循环流化床锅炉 NO_x 排放试验研究[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2009, 12(2): 53-70.
- Cheng Xinhua, Zhang Qingguo. Study on NO_x emission of 440t/h circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2009, 12(2): 53-70(in Chinese).
- [20] 卿山, 王华, 马林转. 循环流化床锅炉氮氧化物的生成与脱除[J]. 冶金能源, 2005, 24(3): 60-62.
- Qing Shan, Wang Hua, Ma Linzhan. Formation and control of NO_x in CFB boiler[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2005, 24(3): 60-62(in Chinese).
- [21] 杨冬, 徐鸿, 路春美, 等. 不同煤种在热解过程中氮的释放特性试验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 77-80.
- Yang Dong, Xu Hong, Lu Chunmei, et al. Experimental of the nitrogen releasing characteristics during pyrogenation of different coal[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 77-80(in Chinese).
- [22] 王蓉, 斯东波, 池作和, 等. 煤热解过程中氮分配规律的试验研究[J]. 热力发电, 2005, 34(11): 48-53.
- Wang Rong, Si Dongbo, Chi Zuohe, et al. Test study on nitrogen distribution pattern during coal pyrolysis process[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(11): 48-53(in Chinese).
- [23] 刘汉涛, 李慧, 李英杰, 等. 煤粉燃烧燃料氮析出研究进展[J]. 山东建筑工程学院学报, 2004, 19(4): 69-80.
- Liu Hantao, Li Hui, Li Yingjie, et al. Advance in the research on the nitrogen releasing from the pulverized coal combustion[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2004, 19(4): 69-80(in Chinese).
- [24] 应凌俏. 煤热解和燃烧过程中 NO_x 的生成规律和控制的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- Ying Lingqiao. Basic study of NO_x formation mechanism and control during coal pyrolysis and burning processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004(in Chinese).
- [25] 周永刚, 邹平国, 赵虹. 燃煤特性影响燃料 N 转化率试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 63-67.
- Zhou Yonggang, Zou Pingguo, Zhao Hong. Experimental study of effects of pulverized coal characteristics on the conversion of fuel nitrogen to NO_x[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 63-67(in Chinese).



曾光

收稿日期: 2011-08-04.

作者简介:

曾光(1982), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事锅炉系统调整及试验的研究工作, zengguang0630@163.com;

孙绍增(1963), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为清洁燃烧和污染控制技术, 生物质的能量化利用, sunsz@hit.edu.cn;

赵志强(1966), 男, 高级工程师, 研究方向为电站系统及热工控制自动化, zzqzz4001@sina.com;

赵义军(1981), 男, 博士, 讲师, 研究方向为生物能的利用和煤燃烧方向, zhaoyijun@hit.edu.cn.

(责任编辑 张媛媛)