

王道平,尚庆雨,牛芳. 两段式高温滴管炉内烟煤 NO_x 生成规律[J]. 煤炭学报,2017,42(12):3300-3304. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0200

WANG Daoping, SHANG Qingyu, NIU Fang. NO_x formation of bituminous coal in two-stage high-temperature dropper tube furnace[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12):3300-3304. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0200

两段式高温滴管炉内烟煤 NO_x 生成规律

王道平¹,尚庆雨^{1,2},牛芳²

(1. 北京科技大学 东凌经济管理学院,北京 100083; 2. 中国煤炭科工集团有限公司 煤科院节能技术有限公司,北京 100013)

摘要:为了研究分级低氮燃烧技术主燃区温度及过量空气系数对氮氧化物排放的影响,以烟煤为研究对象,利用两段式高温滴管炉,对主燃区温度 1 000~1 600 °C 的工况下 NO_x 排放规律进行了研究。研究表明:主燃区温度在 1 000~1 600 °C 时,过量空气系数从 1.0 增加到 1.6,浓度随之升高。当过量空气系数大于 1 时,主燃区温度越高, NO_x 随过量空气系数增加的幅度就越小。在保证煤粉燃尽率的前提下,主燃区温度越高,所需过量空气系数越小,可以有效减少锅炉排烟热损失。主燃区温度为 1 000~1 400 °C,主燃区过量空气系数为 0.786 时,氮氧化物排放量最低。主燃区温度为 1 500~1 600 °C,主燃区过量空气系数为 0.69 时,氮氧化物排放量最低。主燃区温度从 1 000 °C 升高到 1 600 °C 时, NO_x 的脱除率从 80% 升高到 96%,主燃区的温度和 NO_x 的脱除率正相关。主燃区的温度为 1 400~1 600 °C 时,随过量空气系数的增加,热力型 NO_x 占总 NO_x 的比例呈下降趋势。

关键词:滴管炉;主燃区;分级燃烧;低氮燃烧

中图分类号:TQ534.9

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)12-3300-05

NO_x formation of bituminous coal in two-stage high-temperature dropper tube furnace

WANG Daoping¹, SHANG Qingyu^{1,2}, NIU Fang²

(1. Donglinks School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, China Coal Technology & Engineering Group, Beijing 100013, China)

Abstract: The NO_x emission of bituminous coal in the temperature range of 1 000–1 600 °C was studied with a two-stage dropper tube furnace at high temperature. The purpose is to study the effects of the temperature of primary combustion zone and excess air coefficient with staged low nitrogen combustion technology. The results show that NO_x emission increases with the excess air ratio when the temperature of primary combustion zone is in the range of 1 000–1 600 °C. However, the increasing extent of NO_x emission was reduced when the excess air ratio exceeds 1. This is of great importance in the engineering practice. The excess air ratio required is becoming smaller with the increase of the temperature of primary combustion zone, and thus the waste heat loss will be reduced. When the temperature of primary combustion zone is in the range of 1 000–1 400 °C, the optimal excess air ratio of primary combustion zone is 0.786, while 0.69 for the range of 1 500–1 600 °C. The removal rate of NO_x increases from 80% to 96% when the temperature of primary combustion zone increases from 1 000 to 1 600 °C. There is a positive correlation between temperature of primary combustion zone and NO_x removal rate. When the temperature of primary combustion zone is in the range of 1 400–1 600 °C,

收稿日期:2017-02-16 修回日期:2017-10-29 责任编辑:许书阁

基金项目:煤炭科学研究总院技术创新面上资助项目(2016ZYMS007)

作者简介:王道平(1964—),男,北京人,教授。Tel:010-62334866, E-mail:dpwang@ustb.edu.cn

the ratio of thermal NO_x to the total NO_x tends to decrease with the increase of excess air ratio.

Key words: dropper tube furnace; primary combustion zone; staged combustion; low nitrogen combustion

对于煤粉燃烧而言,如何在燃烧过程中降低氮氧化物的生成是行业的研究难点和热点。从技术和经济角度出发,在众多控制氮氧化物排放的技术中,空气分级燃烧一直是应用最广泛的控制燃煤锅炉 NO_x 排放措施。但是利用空气分级燃烧控制氮氧化物存在两个问题:① 空气分级燃烧对主燃区和助燃区空气比例要求严苛。若比例分配不当,极易导致炉内风粉混合条件差,造成煤粉不完全燃烧损失;② 主燃区内还原性气氛的存在使灰熔点降低,易引起结渣或受热面腐蚀问题^[1-11]。

目前国内外学者针对空气分级燃烧技术核心因素:温度、总过量空气系数、配风比、煤粉粒径、煤种、配风位置等开展了大量的研究,并得到可靠结论,同时应用在实际生产中^[7-19]。但大部分研究都集中在燃烧温度为 1 100~1 400 ℃ 的工况下,而煤粉锅炉实际的燃烧温度要高于此温度区间,有些锅炉最高燃烧温度高达 1 600 ℃。煤炭科学研究院自主研发的煤粉工业锅炉由双锥燃烧器和炉膛组成,而以浓相燃烧为特点的双锥燃烧器燃烧温度高达 1 500 ℃。为了有效地降低氮氧化物的排放,以煤粉工业锅炉为原型,搭建两段式高温滴管炉,研究主燃区温度 1 400~1 600 ℃ 内烟煤的氮氧化物排放规律。

1 试 验

1.1 试验装置

试验所用的滴管炉结构如图 1 所示。滴管炉装置由两段炉本体、给粉系统、配气系统、取样分析系统、电控系统及水冷系统构成。其中炉体上段(以下统称为主燃区)是由硅碳棒加热管、φ50 mm×2 200 mm 刚玉管和铂金热电偶组成。硅碳棒加热管可使炉膛温度从常温加热至 1 600 ℃,恒温区长度为 1 200 mm;炉本体下段(以下统称为燃尽区)是由电

阻丝加热管、φ100 mm×1 830 mm 耐热不锈钢管和 K 型热电偶组成,整个炉体四段加热,温度可至 1 000 ℃,并有长度不小于 900 mm 的恒温区。试验装置所采用的微量给粉器为性能稳定的日本常压给料器(Sankyo MFEV-1VO),给料器采用无轴螺旋输送方式,给料精度±0.5%,从而实现精准控制给料。

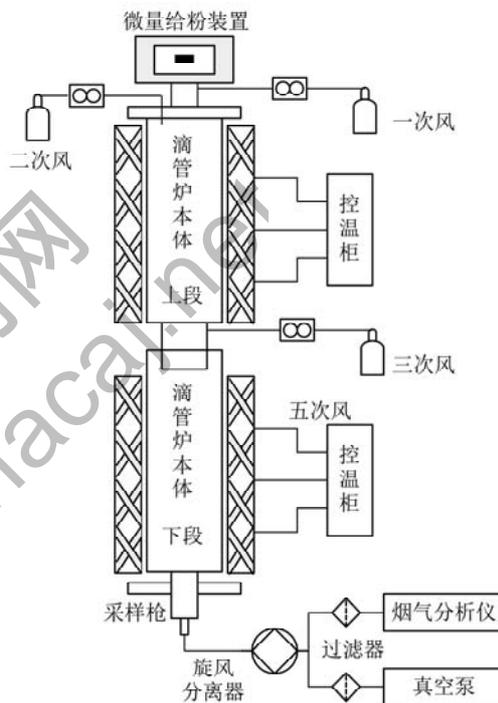


图 1 滴管炉结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of dropper tube furnace

1.2 煤粉的性质

试验用煤为典型烟煤,挥发分为 31.18%,固定碳为 60.5%,低位发热量为 27.27 MJ/kg,含氮为 0.93%。实验用煤粉均在 50 ℃ 烘箱里烘干 6 h。煤质分析结果汇总见表 1。

表 1 煤质分析汇总

Table 1 Summarization of coal quality analysis

工业分析/%										元素分析/%											
M _{ar}	M _{ad}	A _{ad}	A _d	V _{ad}	V _d	V _{daf}	FC _d	C _{ad}	C _d	H _{ad}	H _d	N _{ad}	N _d	O _{ad}	O _d	S _{t,ad}	S _{t,d}	CRC	Q _{gr,ad}	Q _{gr,d}	Q _{net,ar}
5.5	5.71	6.06	6.43	31.18	33.07	35.34	60.5	70.75	75.03	3.99	4.23	0.88	0.93	12.12	12.85	0.49	0.52	2	28.16	29.87	27.27

注:Q_{gr,ad}, Q_{gr,d}, Q_{net,ar} 单位为 MJ·kg⁻¹。

1.3 试验工况设定

试验设定的试验工况如下:① 试验所用煤粉落

粉速率均为 3.5 g/min;一次风量为 1 L/min;总风量为 25 L/min;② 燃尽区的温度保持 1 000 ℃ 不变;③

研究过量空气系数对 NO_x 浓度影响的规律,只采用二次风,未采用分级措施;④关于热力型 NO_x 的生成规律,燃尽风只采用三次风,未采用分级措施。

2 实验数据分析

2.1 过量空气系数的影响

图2为在未分级的条件下,不同过量空气系数对 NO_x 排放浓度影响的趋势。由图2可知,在相同温度下,随过量空气系数的增加, NO_x 的生成量是持续增加的;在相同过量空气系数下,随主燃区温度的升高, NO_x 的生成量持续增长。这主要是因为随主燃区温度的升高,煤粉升温速率增大,煤挥发分析出量以及挥发分中小分子碳氢化合物都在增加,挥发分氮析出的量增加^[20]。当主燃区温度为 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 时,过量空气系数从 1.05 增加到 1.3, NO_x 的浓度升高了 $793\ \text{mg}/\text{m}^3$;主燃区温度为 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 时, NO_x 的浓度增加了 $788\ \text{mg}/\text{m}^3$;主燃区温度为 $1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 时, NO_x 的浓度增加了 $450\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。即当温度区间为 $1\ 000\sim 1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 时,随过量空气系数的增加,主燃区温度越高,过量空气系数对 NO_x 浓度影响越小。在煤粉燃烧初期,高温情况下主要是同相反应,氧气与挥发分迅速混合,挥发分氮被氧化成为 NO_x 。所以随主燃区温度的升高,过量空气系数对 NO_x 浓度的影响越来越小。当主燃区温度为 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 时,过量空气系数从 1.15 增加到 1.3, NO_x 的浓度增加了 $600\ \text{mg}/\text{m}^3$,过量空气系数对 NO_x 浓度影响变大,这是因为温度为 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 时,有热力型 NO_x 出现。

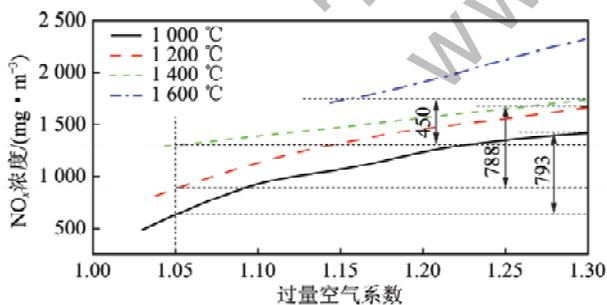


图2 不同过量空气系数下 NO_x 排放浓度

Fig. 2 NO_x emission concentration under different excess air ratio

2.2 主燃区温度的影响

空气分级燃烧技术分为径向空气分级与轴向空气分级燃烧两种,而轴向空气分级燃烧技术是根据燃尽风喷口的布置位置不同而分为多种,但其原理相同:将燃烧区域分为主燃区和燃尽区,主燃区内送入所有燃料和大部分燃烧所需空气,使得燃料燃烧初级为还原性气氛,大部分燃料氮在此区域以 N_2 形式释

放,其余空气在燃尽区域送入,保证燃烧完全。空气分级燃烧实施过程中,以下参数是设计的关键^[21]:主燃区过量空气系数、主燃区停留时间、燃尽风喷口到炉膛出口距离,另外,主燃区的温度等参数也对 NO_x 排放有重要影响。本文将针对主燃区的温度以及二次风占总风量的比例进行分析与讨论。

图3为不同主燃区温度和二次风量/总风量的比值对 NO_x 的影响规律。由图3可知:分级燃烧时,随二次风量/总风量的比值降低, NO_x 排放浓度先降低,然后保持不变或者升高的趋势。 NO_x 浓度先降低是因为减少二次风量/总风量的比值时,烟气中的 HCN 和 NH_i 浓度大幅增加,抑制主燃烧区 NO_x 的生成,使挥发分氮被还原成 N_2 。当主燃区温度为 $1\ 000\sim 1\ 600\ ^\circ\text{C}$,二次风量/总风量的比值为 0.56 时, NO_x 的排放浓度最低。这主要因为当二次风量/总风量的比值过小时,烟气中的 HCN 和 NH_i 浓度大幅增加,过量的 HCN 和 NH_i 在燃尽区会被氧化为 NO_x 。同时,焦炭氮在主燃区中也随过量空气系数的减少而显著增加,从而会在燃尽区中增加焦炭型 NO_x 的生成。这说明当煤粉在富燃区的停留时间较长时, HCN , NH_3 等含氮产物的还原分级存在一个极限值。换言之,主燃区空气过量系数存在一个最佳值。主燃区温度在 $1\ 000\sim 1\ 600\ ^\circ\text{C}$,二次风量/总风量的比值为 0.56 时是最佳的工况。当二次风量/总风量的比值小于 0.56 时,虽然 NO_x 没有增加,但是烟气中的含氧量大幅度增加,这是因为煤粉的燃尽率大幅度降低引起的。综合考虑 NO_x 排放和煤粉燃尽率,二次风量/总风量的比值应该选择 0.56。通过烟气测得的氧含量和粉煤灰中的残炭,可以得出:主燃区的温度为 $1\ 000\sim 1\ 400\ ^\circ\text{C}$,主燃区过量空气系数为 0.786 时,氮氧化物排放量最低;主燃区的温度为 $1\ 500\sim 1\ 600\ ^\circ\text{C}$,主燃区过量空气系数为 0.69 时,氮氧化物排放量最低。

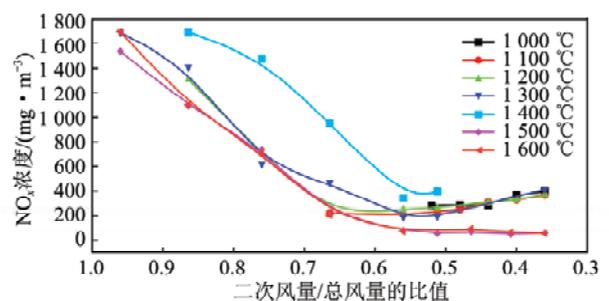


图3 不同二次风量(主燃区的过量空气系数)对 NO_x 的影响
Fig. 3 Effects of secondary air flow(excess air ratio in primary combustion zone) on NO_x

图4给出了两级分级燃烧的工况,不同主燃区温

度下的 NO_x 脱除率。当主燃区的温度从 1 000 °C 升高到 1 600 °C 时, NO_x 的脱除率逐步增大。为了深入分析此现象,针对主燃区温度 1 200 °C 和 1 400 °C、二次风量/总风量的比值为 0.56 的工况的粉煤灰进行了 SEM 分析,其结果如图 5 所示。由图 5 可知,与主燃区温度为 1 200 °C 时相比,主燃区温度为 1 400 °C 时灰中表面有很多微孔,这是因为此时煤粉进入主燃区,主燃区温度越高,煤膨胀越强烈,煤内部反应更激烈造成的^[18]。煤粉进入高温区,升温速率加大,燃料中的氮更多的转化为挥发分氮,这时处于还原气氛下,挥发分氮就被还原成 N₂,从而降低了 NO_x 的排放,即还原性气氛下的高温有利于降低 NO_x 排放。

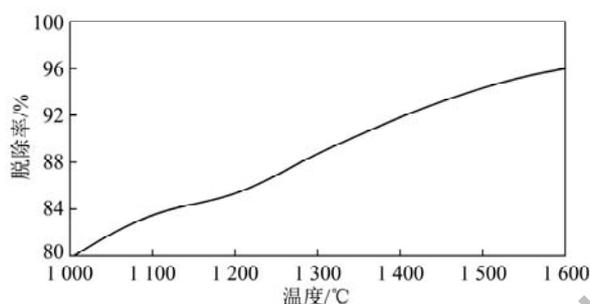


图 4 不同主燃区温度下的 NO_x 脱除率

Fig. 4 NO_x removal rate of at different temperature of primary combustion zone

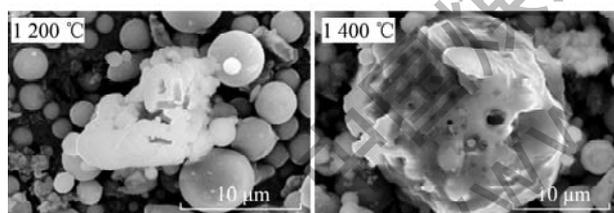


图 5 粉煤灰 SEM 图

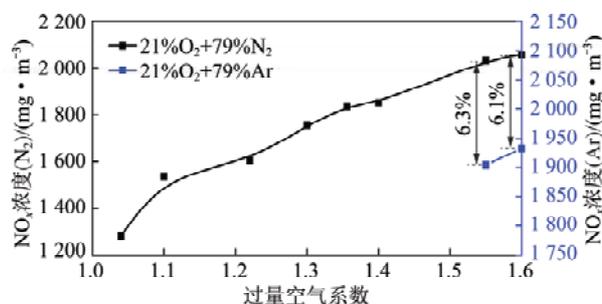
Fig. 5 SEM of fly ash

2.3 热力型 NO_x

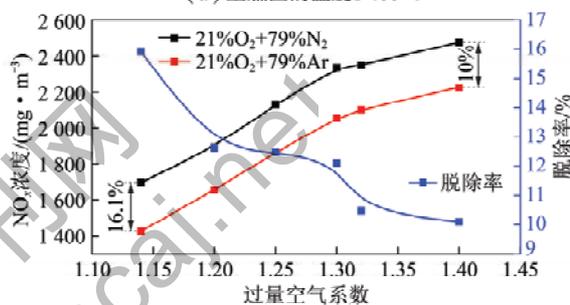
对热力型 NO_x 影响的因素主要有 3 个:主燃区温度、过量空气系数以及在主燃区停留时间。本次试验主要研究主燃区温度和过量空气系数对热力型 NO_x 的影响规律。本次试验采用的反应气有两种,一种是 21% O₂+79% N₂,一种是 21% O₂+79% Ar。21% O₂+79% N₂ 反应气中生成的 NO_x 为热力型 NO_x 和燃料 NO_x 的总和;而 21% O₂+79% Ar 反应气体中的 Ar 为惰性气体,所生成的 NO_x,均为燃料型 NO_x,两种反应气生成的 NO_x 浓度的差值为热力型 NO_x。

温度对热力型 NO_x 的影响非常明显,所以热力型 NO_x 又称为温度型 NO_x,实际上温度低于 1 600 °C 时,热力型 NO_x 的生成量比较少。由图 6(a)可知,当主燃区的温度为 1 400 °C、过量空气系数为 1.55 时,

热力型 NO_x 生成量为 159 mg/m³,占总 NO_x 的比例为 6.3%;由图 6(b)可知,当主燃区的温度为 1 600 °C,过量空气系数为 1.4 时,热力型 NO_x 生成量为 253 mg/m³,占总 NO_x 的比例为 10%。从整体来看,热力型 NO_x 生成量随温度的升高而增加。



(a) 主燃区的温度 1 400 °C



(b) 主燃区的温度 1 600 °C

图 6 温度以及过量空气系数对热力型 NO_x 的影响

Fig. 6 Effects of temperature and excess air ratio on thermal NO_x

过量空气系数对热力型 NO_x 的影响也是非常明显的。由图 6(a)和(b)可知,当主燃区的温度为 1 400 °C 时,当过量空气系数从 1.55 增加到 1.6 时,热力型 NO_x 占总 NO_x 的比例从 6.3% 降低到 6.1%;当主燃区的温度为 1 600 °C,过量空气系数从 1.14 升高到 1.4,热力型 NO_x 占总 NO_x 的比例从 16.1% 降低到 10%,随过量空气系数的增加,热力型 NO_x 所占 NO_x 的比例是呈下降趋势。这是因为当过量空气系数大于 1 时,氧的浓度继续增加,将使 NO_x 稀释且使燃烧温度降低,因而使 NO_x 降低,并且这种因素造成的 NO_x 排放降低要比氧浓度增加造成的 NO_x 增加影响大。所以,此种工况下的总 NO_x 生成量是减少的。

3 结 论

(1) 主燃区温度为 1 000 ~ 1 600 °C 时, NO_x 的浓度随过量空气系数的增加而升高。当过量空气系数大于 1 时,主燃区温度越高, NO_x 随过量空气系数增加的幅度就越小。推广到工程实践中:在保证煤粉燃尽率的前提下,主燃区的温度越高,所需的过量空气

系数越小,从而减少排烟热损失。

(2)主燃区的温度为1 000~1 400℃时,0.786为最佳的主燃区过量空气系数;主燃区的温度为1 500~1 600℃时,0.69为最佳的主燃区过量空气系数。主燃区的温度从1 000℃升高到1 600℃时,NO_x的脱除率从80%升高到96%,主燃区的温度和NO_x的脱除率之间是正相关关系。

(3)热力型NO_x的生成量随温度的升高呈增加趋势;在相同温度下,随过量空气系数的增加,热力型NO_x所占总NO_x的比例呈下降趋势。

参考文献(References):

- [1] 孙保民,王顶辉,段二册,等.空气分级燃烧下NO_x生成特性的研究[J].动力工程学报,2013,33(4):261-266.
SUN Baomin, WANG Dinghui, DUAN Erpeng, et al. Study on NO_x emission characteristics in air-staged conditions[J]. Journal of Power Engineering, 2013, 33(4): 261-266.
- [2] 乔木森,邵欢,王春波.高温管式炉煤粉燃烧NO排放规律研究[J].电力科学与工程,2014,30(10):74-78.
QIAO Musen, SHAO Huan, WANG Chunbo. NO Emission during pulverized coal combustion in tube furnace at high temperature[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(10): 74-78.
- [3] 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.
- [4] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, YAMAMOTO K. Comparison of staged combustion properties between bituminous coals and a low-rank coal; Fiber-shaped crystallized carbon formation, NO_x emission and coal burnout properties at very high temperature[J]. Combustion & Flame, 2013, 160(10): 2221-2230.
- [5] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, OKAZAKI T, et al. Staged combustion properties for pulverized coals at high temperature[J]. Combustion & Flame, 2011, 158(11): 2261-2271.
- [6] BAI Wengang, LI Hao, DENG Lei, et al. Air-staged combustion characteristics of pulverized coal under high temperature and strong reducing atmosphere conditions [J]. Energy and Fuels, 2014, 28: 1820-1828.
- [7] FAN W, LIN Z, LI Y, et al. Effect of temperature on NO release during the combustion of coals with different ranks[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(3): 1573-1583.
- [8] CHOI C R, CHANG N K. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500MWe tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2009, 88(9): 1720-1731.
- [9] TAO Xiuxiang, XU Ning, XIE Maohua, et al. Progress of the technique of coal microwave desulfurization[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(1): 113-128.
- [10] GUNKA Volodymyr, PYSHYEV Serhiy. Lignite oxidative desulfurization. Notice 1: Process condition selection[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(1): 62-69.
- [11] GUNKA Volodymyr, PYSHYEV Serhiy. Lignite oxidative desulfurization. Notice 2: Effects of process parameters [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(3): 196-201.
- [12] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, OKAZAKI T, et al. A role of hydrocarbon reaction for NO_x formation and reduction in fuel-rich pulverized coal combustion [J]. Economics & Policy of Energy & the Environment, 2014, 32(7): 829-842.
- [13] 刘汉涛,李慧,李英杰,等.煤粉燃烧燃料氮析出研究进展[J].山东建筑大学学报,2004,19(4):69-72.
LIU Hantao, LI Hui, LI Yingjie, et al. Development of fuel nitrogen release during pulverized coal combustion[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2004, 19(4): 69-72.
- [14] 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):619-624.
WANG Chunbo, QIAO Musen, LEI Ming. Characteristics of pulverized coal combustion in high temperature and low oxygen condition [J]. Journal of Power Engineering, 2015, 35(8): 619-624.
- [15] 曹欣玉,牛志刚,应凌俏,等.无烟煤燃料氮的热解析出规律[J].燃料化学学报,2003,31(6):538-542.
CAO Xinyu, NIU Zhigang, YING Lingqiao, et al. Releasing of fuel-nitrogen during coal pyrolysis [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(6): 538-542.
- [16] GLARBORG P, JENSEN A D, JOHNSON J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2003, 29(2): 89-113.
- [17] CODA B, KLUGER F, FÖRTSCH D, et al. Coal-Nitrogen release and NO_x evolution in air-staged combustion [J]. Energy Fuels, 1998, 12(6): 1322-1327.
- [18] 游卓,周志军,王智华,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.
- [19] 庄国忠,秦裕琨,步维光,等.管式沉降炉和小型煤粉燃烧试验炉在煤燃烧中氮释放特性试验研究中的应用[J].电站系统工程,2001,17(5):298-300.
ZHUANG Guozhong, QIN Yukun, BU Weiguang, et al. Drop tube furnace and 3.5 kW furnace used on experimental investigation of nitrogen release in combustion process [J]. Power System Engineering, 2001, 17(5): 298-300.
- [20] 张冬冬,齐永峰,徐亮,等.高温沉降炉内烟煤快速裂解特性试验研究[J].化学工程,2013,41(11):64-68.
ZHANG Dongdong, QI Yongfeng, XU Liang, et al. Experimental investigation of fast pyrolysis characteristics of bituminous coal with high-temperature drop furnace [J]. Chemical Engineering (China), 2013, 41(11): 64-68.
- [21] 周军,张海,吕俊复,等.高温下热解温度对煤焦空隙结构的影响[J].燃料化学学报,2007,35(2):155-159.
ZHOU Jun, ZHANG Hai, LÜ Junfu, et al. Effect of pyrolysis temperature on porous structure of anthracite chars produced at high temperatures [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(2): 155-159.