

半焦空气分级燃烧 NO_x 排放试验研究

李 慧^{1,2,3}, 杨 石^{1,2,3}, 周建明^{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:半焦是低阶煤经低温热解后的产物, 其中半焦粉与煤粉工业锅炉常用煤种烟煤相比价格低廉。若能将半焦粉用作煤粉工业锅炉的燃料, 既可拓宽煤粉工业锅炉的适用燃料范围, 又可增强煤粉工业锅炉的市场竞争力。由于半焦挥发分低、固定碳高, 实现其着火和稳定燃烧需要更高的温度, 同时, 降低 NO_x 初始排放也是一个技术难题。为了实现半焦在煤粉工业锅炉中的稳定燃烧及 NO_x 排放的降低, 采用两段式滴管炉开展半焦空气分级燃烧 NO_x 排放规律研究。笔者对半焦空气不分级燃烧 NO_x 排放规律进行了研究, 主要探究了主燃区温度(1 000~1 400 °C)及过量空气系数的影响, 为后续空气分级燃烧降低 NO_x 的效果提供对比依据。半焦空气分级燃烧试验主要研究了主燃区温度(1 000~1 400 °C)及二次风比例(0.4~0.8)的影响, 并从燃尽率、 NO_x 减少比例、灰样微观孔隙和形貌等方面进行论证, 试验结果表明, 在空气不分级燃烧条件下, 即燃尽风配风比例为 0 时, 随着主燃区温度升高, NO_x 排放浓度随之迅速升高; 随着过量空气系数增加, NO_x 浓度先迅速增加, 过量空气系数大于 1.15 时, NO_x 浓度增速变缓; 在空气分级燃烧中, 相同主燃区温度条件下, 二次风比例由高到低变化时, NO_x 排放呈先迅速下降后缓慢回升的变化趋势, 燃尽率先快速升高而后趋于平缓。二次风比例为 0.56 时(即燃尽风率为 0.39), 燃尽率达 90%, NO_x 排放浓度降至最低, 为 120 mg/m³ 以下, 此时是试验条件下的最佳二次风比例。

关键词:半焦; 空气分级燃烧; NO_x ; 两段式滴管炉; 配风比例

中图分类号: TK229 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2020)02-0109-06

Experimental study on NO_x emission of semi-coke air-staged combustion

LI Hui^{1,2,3}, YANG Shi^{1,2,3}, ZHOU Jianming^{1,2,3}

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. National Coal Resource High Efficient Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Key Lab of Energy and Coal High Utilization, Energy Saving and Emission Reduction Technology and Equipment, Beijing 100013, China)

Abstract: Semi-coke is the product of low-rank coal pyrolysis at low temperature. The price of pulverized semi-coke is lower than that of bituminous coal which is the commonly used in industrial pulverized coal boiler. If semi-coke can be used as the fuel of industrial pulverized coal boiler, the applicable fuel range of the coal-fired industrial boiler will be widened. Besides, the market competitiveness of coal-fired industrial boiler can be enhanced. Because of the low volatile content and a high fixed carbon content, semi-coke needs a higher temperature for ignition and steady combustion. What's more, the decrease of NO_x emission is also a technical problem. The NO_x emission properties of semi-coke air-staged combustion was studied in two-stage drop-tube furnace to realize steady combustion in pulverized coal industrial boiler and low NO_x emission of semi-coke. In this paper, the NO_x emission law of semi-coke air non-staged combustion was studied. The influence of fuel-rich zone temperature (1 000~1 400 °C) and excess air coefficient (1.0~1.3) were explored to give a comparison with the following air-staged combustion experiment. In semi-coke air-staged combustion experiment, the influence of the

收稿日期: 2019-09-24; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19092401

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目重点项目(2018-TD-ZD001)

作者简介: 李 慧(1989—), 女, 吉林吉林人, 研究实习员, 从事煤粉燃烧及污染物控制技术研究。E-mail: 447110302@qq.com

引用格式: 李慧, 杨石, 周建明. 半焦空气分级燃烧 NO_x 排放试验研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2): 109-114.

LI Hui, YANG Shi, ZHOU Jianming. Experimental study on NO_x emission of semi-coke air-staged combustion[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 109-114.



移动阅读

fuel-rich zone temperature (1 000–1 400 °C) and the ratio of secondary air (0.4–0.8) were explored. Besides, the burn-out rate, NO_x decrement rate and microscopic pore structure and morphology of air-graded combustion ash were analyzed to reach a comprehensive conclusion. It can be concluded from the non-staged combustion experiment that under the condition of air non staged combustion, and when the ratio of exhaust air to air distribution is 0, the NO_x emission increases rapidly with the fuel-rich zone temperature increasing. When the excess air coefficient increases, the NO_x emission increases rapidly first, and then the increase becomes slowly when excess air coefficient is over 1.15. It can be concluded from the air-staged combustion experiment that when the ratio of secondary air changes from high to low under the same temperature of the main combustion zone, the NO_x emission shows a trend of rapid decline and slow recovery, and the burnout first increases rapidly and then tends to be gentle. The optimal ratio of secondary air is 0.56, when the NO_x emission concentration is under 120 mg/m^3 , and the burn-out rate and the decrease rate of NO_x are all at a high value.

Key words: semi-coke; air-staged combustion; NO_x ; two-stage drop-tube furnace; ratio of combustion air

0 引言

低阶煤经低温热解后的油气产品是具有高附加值的化工原料,加工过程产生的大量半焦粉主要作为燃料进行利用^[1-3],若作为煤粉工业锅炉燃料^[4-6],既可增加锅炉燃料来源,又有利于促进煤炭分质利用。由于半焦挥发分较低,着火和实现稳定燃烧较原煤需要更高的温度;此外,由于半焦的低挥发分,初期挥发分析出困难,且挥发分中还还原性小分子物质含量较低,不利于煤粉工业锅炉燃用半焦 NO_x 的控制。因此,需要通过多种技术措施,合理组织燃烧,从而降低 NO_x 的生成。空气分级燃烧技术是将半焦粉燃烧空气分阶段送入炉体,一般分为一次风、二次风及燃尽风,形成具有还原性气氛的主燃区和氧化性气氛的燃尽区,燃烧生成的 NO_x 在主燃区进行还原,半焦颗粒在燃尽区燃尽^[7-9]。对于燃用半焦的 NO_x 控制技术前人已进行了一定的研究,么瑶等^[10-12]在循环流化床锅炉简化系统上研究了细粉半焦预热燃烧 NO_x 生成特性,对一次风当量比、二次风量及位置、还原区长度等因素进行了考察,得出适用于循环流化床的半焦预热燃烧 NO_x 排放特性。目前尚未有针对应用室燃技术的煤粉工业锅炉的半焦空气分级燃烧研究,包括结合应用逆喷式燃烧器的煤粉工业锅炉燃烧温度以及系统研究不同配风工况对 NO_x 生成的影响,故采用两段式滴管炉将半焦粉在煤粉工业锅炉中的燃烧过程进行简化,以探究主燃区燃烧温度的影响以及合理的配风比例。研究表明,半焦在较高升温速率条件下,挥发分析出速率较快,挥发分中小分子物质较多,有利于快速着火^[13-16]。针对煤粉工业锅炉燃烧器内具有高温回流区的特点,通过提高主燃区温度,加快半焦粉进入炉体后的升温速率,使其挥发分快速析出,增加挥发分中还还原性小分子物质含量,空气分级燃烧技术的应用可实现半焦稳定燃烧同时控制 NO_x 的生

成^[17-18]。因此,结合煤粉工业锅炉燃烧特点,探究较高主燃区温度下半焦空气分级燃烧 NO_x 排放规律,选取合适的燃烧温度、合理的分级配风比例,是实现半焦在煤粉工业锅炉中稳定燃烧及降低 NO_x 排放的关键。本文在自主搭建的滴管炉燃烧试验台架对半焦空气分级燃烧过程中 NO_x 的排放规律进行研究,并从燃尽率、灰样微观结构等方面进行分析,为半焦应用于煤粉工业锅炉提供理论基础。

1 试验方法与设备

半焦的空气不分级及空气分级燃烧试验均在自主搭建的两段式滴管炉实验台架上进行。滴管炉系统如图1所示,炉体上段相当于煤粉工业锅炉的主燃区,最高温度1 600 °C,炉体下段相当于煤粉工业锅炉的燃尽区,最高温度1 000 °C;试验过程中由微粉给料器给料,给料精度 $\pm 5\%$ 。实验台架配有配气系统、水冷系统及烟气测试系统以满足试验需要。

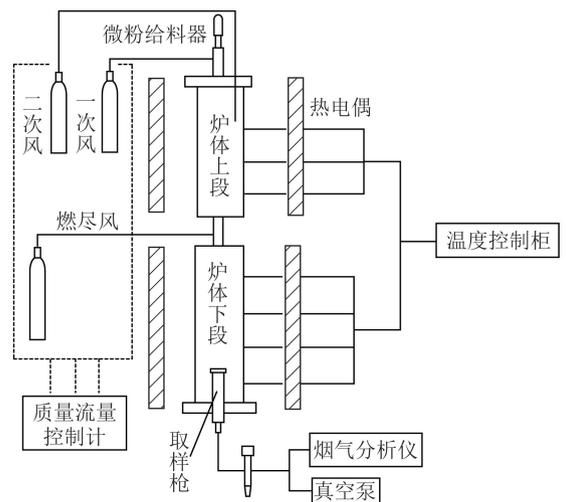


图1 滴管炉系统示意

Fig.1 Schematic diagram of drop-tube furnace system

试验过程中滴管炉主燃区温度设置在1 000~1 400 °C,燃尽区温度保持1 000 °C。空气不分级燃烧试验过量空气系数为1.00~1.30;空气分级燃烧

试验二次风比例在 0.4~0.8, 一次风保持 5% (煤粉工业锅炉一次风比例为 5% 左右), 通过改变二次风和燃尽风量来调节主燃区过量空气系数及配风比例, 总过量空气系数为 1.2; 试验前对微粉给料器进行标定, 结果如图 2 所示, 给料速率为 3.5 g/min。烟气数据在炉膛出口处测得, 并按照 O₂ 含量 6% 标准进行折算。燃尽率采用耐驰 STA449F3 型热重分析仪测定, 其计算方法为灰样中残留的可燃质含量占半焦总可燃质含量的百分数。

试验用半焦均制成 200 目 (0.074 mm) 的半焦粉。微量给料器要求物料为干燥粉末状, 为了保证半焦粉给料连续均匀, 将半焦粉于烘箱中烘干 5 h。试验用半焦粉的工业分析和元素分析见表 1。可以

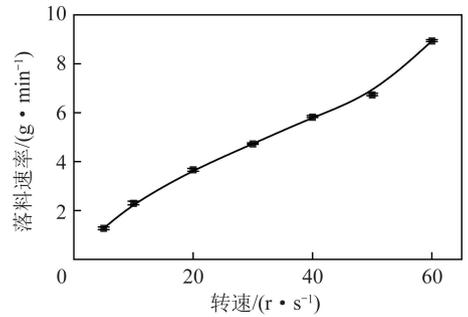


图 2 微量给料器标定曲线

Fig.2 Curve of rating test of the micro feeder

看出, 半焦固定碳为 78.18%, 挥发分为 12.19%, 灰分为 10.96%, 挥发分较低, 固定碳含量较高。

表 1 半焦样品的工业分析及元素分析

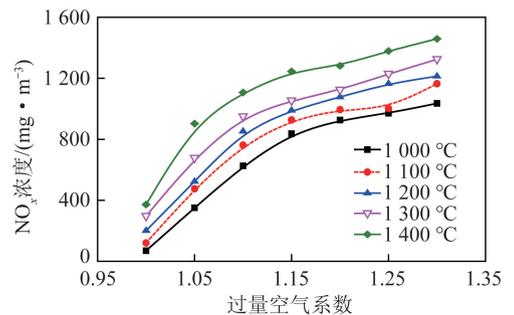
Table 1 Proximate and ultimate analyses of semi-coke samples

| 工业分析/% | | | | 元素分析/% | | | | | | $Q_{\text{net,ar}}/(MJ \cdot kg^{-1})$ |
|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-------|--|
| M_{ad} | A_{d} | V_{daf} | FC_{d} | C_{d} | H_{d} | N_{d} | O_{d} | $S_{\text{t,d}}$ | | |
| 1.45 | 10.96 | 12.19 | 78.18 | 80.24 | 1.53 | 0.88 | 6.07 | 0.31 | 28.18 | |

2 试验结果与分析

2.1 空气不分级燃烧 NO_x 生成规律

半焦的燃烧反应和燃烧过程中的 NO_x 生成与还原反应均受化学反应速率及扩散速率控制, 即受反应温度和过量空气系数控制。图 3 为半焦空气不分级燃烧炉膛出口处 NO_x 浓度随温度和过量空气系数的变化。可以看出, 在相同过量空气系数时, NO_x 浓度随主燃区温度的升高而增加。相同温度下, 过量空气系数由 1.0 增到 1.3 时, NO_x 生成量逐渐增大。其中, 过量空气系数由 1.0 增到 1.15 时, 在主燃区温度 1 000~1 400 °C 的 5 个试验温度下, 出口 NO_x 浓度分别增加了 1 100%、673%、395%、256%、235%, 说明在此过量空气系数范围内 NO_x 生成量增加明显; 空气过剩系数由 1.15 增加到 1.30 时, 5 个试验温度下出口 NO_x 浓度分别增加了 23.71%、25.60%、22.58%、25.75%、17.16%, 可见在此过量空气系数范围内, NO_x 生成量增加较慢。其主要原因是由于空气一次性送入燃烧系统, 在试验温度下, 生成的 NO_x 基本为燃料型 NO_x, 主要由挥发分和焦炭 N 氧化而来^[19-20]。随着温度升高, 半焦升温速率加快, 挥发分析出加快, 燃烧过程加剧, 挥发分中原子 N 和焦炭中 N 原子氧化生成 NO_x 速率加快^[9,13,19], 但当过量空气系数增加到一定值后, 半焦的燃烧速度以及燃料 N 与 O₂ 的反应达到限度, 因而, 继续增大空气过剩系数, NO_x 生成速率未明显增加。

图 3 空气不分级燃烧 NO_x 生成规律Fig.3 NO_x generation law in non-staged condition

空气不分级燃烧条件下 CO 生成规律如图 4 所示。可见, 随着主燃区温度升高和过量空气系数增加, 出口烟气中 CO 浓度下降, 说明燃烧速率加快, 燃烧更充分。空气过剩系数在 1.00~1.15 时, CO 浓度升高明显; 空气过剩系数在 1.15~1.30 时, CO 浓度变化不明显, 说明燃烧过程已达一定限度。该规

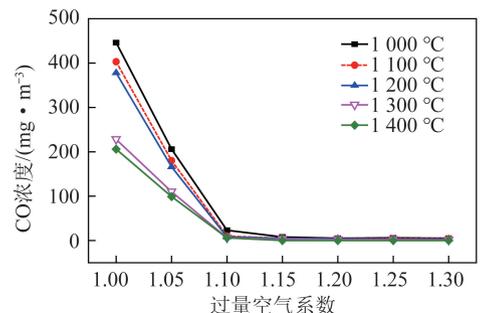


图 4 空气不分级燃烧燃烧 CO 生成规律

Fig.4 CO generation law in non-staged condition

律与 NO_x 生成规律基本相同。由此可见,过量空气系数的增加不会使半焦的燃烧速率持续增加,在实际工业锅炉运行中,过大的过量空气系数会增加烟气带走的热量,降低锅炉热效率,在本文试验条件下,过量空气系数在 1.2 内为宜。

2.2 空气分级燃烧 NO_x 生成规律

半焦空气分级燃烧过程中 NO_x 生成规律如图 5 所示,可见,随主燃区温度升高,不同二次风比例范围内 NO_x 生成量变化趋势不同,当二次风比例大于 0.56 时, NO_x 生成量随温度升高而增加;当二次风比例小于 0.56 时, NO_x 生成量随温度的升高而降低。主要原因为:① 随着主燃区温度升高,燃料 N 氧化生成 NO_x 速率,以及已生成的 NO_x 被还原的速率均增大,此时燃料 N 的转化途径取决于反应气氛;② 二次风比例大于 0.56 时,由于主燃区内氧含量较高,随温度升高燃料 N 氧化生成 NO_x 的速率比 NO_x 还原反应速率增加的幅度大,故此时随着主燃区温度升高, NO_x 排放浓度升高;③ 二次风比例小于 0.56 时,主燃区内还原性气氛较强,随主燃区温度升高, NO_x 还原反应速率增幅较大,大于因温度升高增加的量,故生成的 NO_x 总量降低。

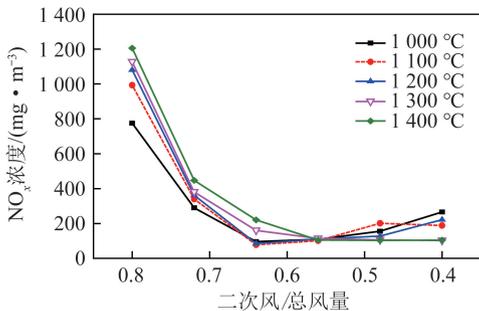


图5 半焦空气分级燃烧 NO_x 生成规律

Fig.5 NO_x generation law in semi-coke air-staged combustion

半焦空气分级燃烧燃尽率变化如图 6 所示。随主燃区温度升高,燃尽率整体上呈增加趋势。图 7 为二次风比例对 NO_x 的影响,与 NO_x 生成的变化规律相似,随着主燃区温度升高,二次风比例大于 0.56 时, NO_x 浓度减少比例降低;二次风比例小于 0.56 时, NO_x 浓度降低幅度增大。结合 NO_x 浓度、燃尽率及 NO_x 生产量降低可以看出,提高主燃区温度可在保证燃尽率的前提下降低的 NO_x 生成量。在各主燃区温度下, NO_x 浓度随二次风比例的减小,先减后增或后趋于平稳。主燃区温度为 1 000~1 200 °C 时, NO_x 排放浓度的二次风比例转折点为 0.64。二次风比例大于 0.64 时,随二次风比例减小, NO_x 排放浓度降低;二次风比例小于 0.64 时,随二次风比例降低, NO_x 浓度稍有回升。主燃区温度为 1 300~1 400 °C

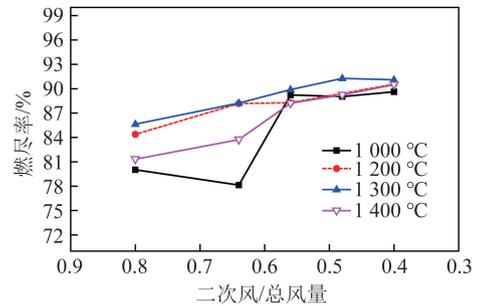


图6 半焦空气分级燃烧燃尽率变化规律

Fig.6 Burn-out rate in semi-coke air-staged combustion

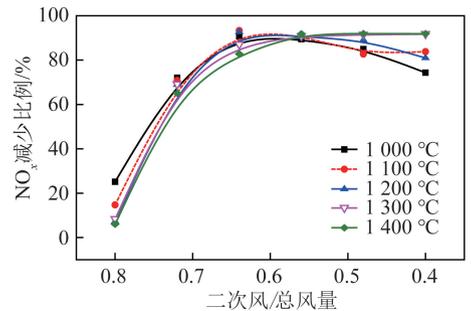


图7 二次风比例对 NO_x 的影响

Fig.7 Influence of secondary air ratio on NO_x

时,二次风比例转折点为 0.56。二次风比例大于 0.56 时,随二次风比例的降低, NO_x 浓度降低;二次风比例小于 0.56 时, NO_x 浓度趋于平稳。二次风比例较大时,半焦颗粒附近的氧含量较高,CO 等还原性气体浓度较低, NO_x 生成量比还原量大, NO_x 排放浓度较高;二次风比例过低时,由于燃烧进程的推迟,燃料 N 的释放被推迟到燃尽区, NO_x 排放浓度增大。由图 6 可知,随二次风比例减小,半焦燃尽率先增后减或后趋于平稳,说明合理的配风有利于提高半焦的燃烧效率;图 7 中二次风比例对 NO_x 的影响与 NO_x 排放规律一致,说明对于空气分级燃烧,合理的二次风配比对其低氮燃烧效果的影响巨大,选择合理的二次风配比会带来良好的低氮效果。

主燃区温度为 1 000~1 200 °C 时,二次风比例 0.64 时的 NO_x 排放浓度比 0.56 时稍低,但后者燃尽率较高,结合图 8 的 CO 排放浓度,二次风比例为 0.56 时的 CO 排放浓度均较低,因此选取 0.56 为本文试验条件下的最佳二次风比例,且在各主燃区温度的最佳二次风比例下, NO_x 排放浓度均在 120 mg/m^3 以下,燃尽率和 NO_x 减少比例均较高。

2.3 空气分级燃烧灰样微观孔隙结构及形貌

选取主燃区温度为 1 300 °C 时,3 个二次风比例 (0.4、0.56、0.8) 燃烧所得灰样进行孔径分布及比表面积测定。图 9 为半焦粉空气分级燃烧所得灰样的

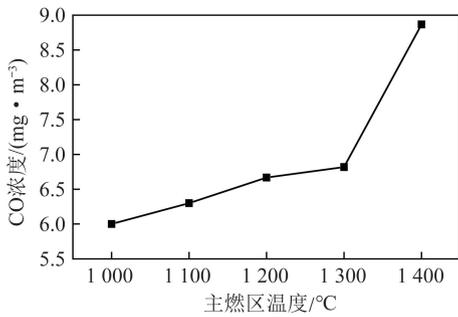


图8 二次风比例为0.56时CO浓度随主燃区温度变化规律

Fig.8 CO emission in different fuel-rich zone temperature when the ratio of secondary air is 0.56

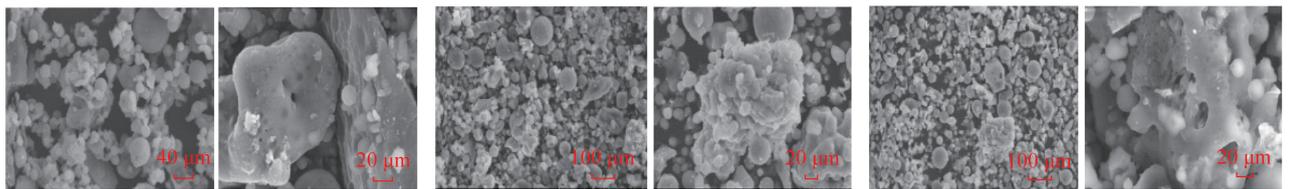
孔径分布,可以看出,二次风比例为0.56时,其孔隙在较小孔径处出现的几率远大于二次风比例为0.4和0.8时,二次风比例为0.4和0.8时的孔径分布差别不大。表2为1300℃时,不同二次风比例下半焦燃烧灰样孔隙特征参数,二次风比例为0.56时,燃烧所得灰样的比表面积最大,有利于挥发分析出和孔隙的形成,有利于半焦燃烧和NO_x的还原

表2 不同二次风比例下半焦燃烧灰样孔隙特征参数

Table 2 Characteristic parameters of semi-coke and ash at ratio of different secondary air

| 二次风比例 | 比表面积/ (m ² ·g ⁻¹) | 总孔隙/ (cm ³ ·g ⁻¹) | 孔隙比例和比表面积比例/% | | |
|-------|---|---|---------------|-------------|-------------|
| | | | <2 nm | 2~50 nm | >50 nm |
| 0.4 | 2.280 | 0.012 816 | 1.50/19.04 | 17.28/70.04 | 81.22/10.92 |
| 0.56 | 3.221 | 0.012 713 | 2.17/16.52 | 21.27/76.53 | 76.56/6.95 |
| 0.8 | 1.908 | 0.005 914 | 2.71/18.29 | 33.21/74.42 | 64.08/7.09 |

图10为主燃区温度为1300℃,二次风比例分别为0.4、0.56和0.8时的半焦空气分级燃烧所得灰样的微观形貌。由图10可以看出,二次风比例为0.56时,灰样颗粒较小,颗粒间黏连较多,说明该二



(a) 二次风比例0.56

(b) 二次风比例0.4

(c) 二次风比例0.8

图10 1300℃时不同二次风比例半焦燃烧灰样微观形貌

Fig.10 Microstructure of semi-coke ash at different secondary air at 1300 °C

3 结 论

1)半焦空气不分级燃烧时,随主燃区温度升高,NO_x排放浓度增大;随过量空气系数增加,NO_x排放浓度增大;当过量空气系数大于1.15时,NO_x排放浓度增幅变小,燃烧反应和NO_x生成反应达一定极

反应^[21-22];二次风比例为0.8时,其总孔隙最小,为0.005 914 cm³/g,灰样比表面积也最小;二次风比例为0.4时,其总孔隙最大,为0.012 816 cm³/g,比表面积较小,为2.28 m²/g,说明在这2个二次风比例下的挥发分析出比0.56时少,不利于孔隙的形成和发展,燃烧反应不及0.56时充分。综上,3个二次风比例中,0.56为最佳二次风比例,既可保证半焦充分燃烧,也可保证低NO_x排放。

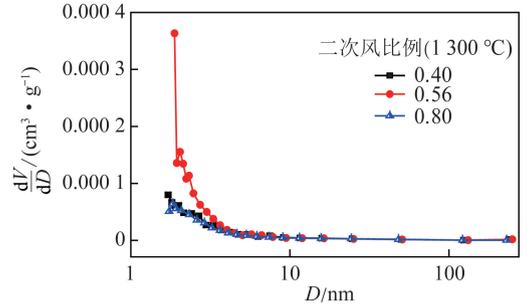


图9 不同二次风比例下半焦灰样孔径分布

Fig.9 Pore distribution of semi-coke ash at different ratio of secondary air

次风比例下的燃烧反应进行较充分;此时,灰样表面孔隙最丰富,说明在试验条件下,二次风比例为0.56时有利于半焦燃烧和挥发分析出及孔隙的形成与发展。

限;本文试验条件下,过量空气系数在1.2以内为宜。

2)半焦空气分级燃烧时,综合NO_x排放浓度、燃尽率及NO_x减排效率的变化规律,在合理配风条件下,提高主燃区温度有利于半焦燃烧及NO_x减排。

3)在本文试验条件下,最佳二次风比例为0.56,

此时 NO_x 排放浓度均在 120 mg/m^3 以下,且燃尽率和 NO_x 降低比例均较高,从微观孔隙结构及形貌也得到证明,说明该二次风比例下,有利于燃烧和挥发分析出、孔隙的形成和发展,有利于 NO_x 减排。

参考文献 (References):

- [1] 张秦龙,杨佳. 发展中的榆林市兰炭产业[J]. 产业与科技论坛,2013(8):61-62.
ZHANG Qinlong, YANG Jia. Development of Yulin semi-coke industry[J]. Industrial & Science Tribune, 2013(8):61-62.
- [2] 杜刚. 兰炭替代部分高炉喷吹用煤及其性能的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
DU Gang. The research of the properties of blue coke used as a partial substitution for coal in blast furnace injection[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [3] 张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3):103-106.
ZHANG Xin. Feasibility on semicoke substitute for anthracite in energy conservation and emissions reduction[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3):103-106.
- [4] 牛芳. 煤粉工业锅炉燃烧兰炭试验研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2):106-108.
NIU Fang. Feasibility of semi coke combustion in industrial pulverized coal boiler [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):106-108.
- [5] 王永英,杨石,梁兴. 双锥燃烧室燃用半焦的试验研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(3):93-97.
WANG Yongying, YANG Shi, LIANG Xing. Experiment study of double-cone pulverized coal combustion chamber burning char [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3):93-97.
- [6] 巩志强,刘志成,朱治平,等. 半焦燃烧及煤热解燃烧耦合试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2):519-525.
GONG Zhiqiang, LIU Zhicheng, ZHU Yeping, et al. Experimental study on semi-coke combustion and coal pyrolysis and combustion coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2):519-525.
- [7] 韩佳宸,王勇强,周朝阳,等. 山西无烟煤空气分级燃烧 NO_x 排放特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(2):92-97, 134.
HAN Jiachen, WAN Yongqiang, ZHOU Chaoyang, et al. Experimental study on NO_x emission characteristics of Shanxi anthracite under air-staged combustion conditions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(2):92-97, 134.
- [8] 杨协和,蔡润夏,张扬,等. 空气分级技术对焙烧炉内煤气燃烧 NO_x 生成的影响[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(3):75-81.
YANG Xiehe, CAI Runxia, ZHANG Yang, et al. Effect of air grading technology on NO_x formation of coal gas combustion in a calciner [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3):75-81.
- [9] FAN Weidong, LI Zhengchun, YOU Yi, et al. Effect of air-staging on anthracite combustion and NO_x formation[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(2):111-120.
- [10] 么瑶. 细粉半焦预热燃烧 NO_x 生成特性实验研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- YAO Yao. Experiment study on preheated combustion characteristics and NO_x emission of pulverized semi-coke[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of the Science, 2016.
- [11] 刘道烽. 超低挥发分碳基燃料预热燃烧特性及污染物控制试验研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019.
LIU Daofeng. Experiment study on preheating characteristics and pollutant control of ultra-low volatile carbon-based fuel[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of the Science, 2019.
- [12] 刘道烽,李诗媛,刘稳,等. 配风方式对超低挥发分碳基燃料 NO_x 排放特性的影响[J]. 中国粉体技术, 2019, 25(5):8-16.
LIU Daofeng, LI Shiyuan, LIU Wen, et al. Experiment study on NO_x emissions of low volatile carbon-based fuel according to different air distribution modes [J]. China Powder Science and Technology, 2019, 25(5):8-16.
- [13] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, OKAZAKI T, et al. Staged combustion properties for pulverized coals at high temperature [J]. Combustion & Flame, 2011, 56:2261-2271.
- [14] 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.
- [15] SUDA T, TAKAFUJI M, HIRATA T. A study of combustion behavior of pulverized coal in high-temperature air [C]// Proceeding of the Combustion Institute. Japan: [s.n.], 2002.
- [16] 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]. Combustion & Flame, 2010, 157(8):1456-1466.
- [17] TAMURA M, WATANABE S, KOMABA K, et al. Combustion behavior of pulverized coal in high temperature air condition for utility boilers[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:445-450.
- [18] HE R, SUDA T, TAKAFUJI M, et al. Analysis of low NO emission in high temperature air combustion for pulverized coal[J]. Fuel, 2004, 83(9):1133-1141.
- [19] GLARBORG P, JENSEN A D, JOHNSON J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(2):89-113.
- [20] 王春波,冯涛,雷鸣. 煤粉等温燃烧挥发分焦炭耦合作用及同步 NO 释放规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3):665-670.
WANG Chunbo, FENG Tao, LEI Ming. Experimental study on coupling and NO emission of volatiles and coal char during the isothermal combustion of pulverized coal [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3):665-670.
- [21] THOMMES M. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)[J]. Pure & Applied Chemistry, 2015, 87(9/10):1051-1069.
- [22] LORENZ E, CARREAB M, TAMURAC, et al. The role of char surface structure development in pulverized fuel combustion[J]. Fuel, 2000, 79(10):1161-1172.