

# 循环流化床锅炉超低氮氧化物排放理论与实践

李 军<sup>1</sup>, 张 缙<sup>2</sup>, 刘 青<sup>2</sup>, 郭学茂<sup>1</sup>, 张迎春<sup>1</sup>

(1. 太原锅炉集团公司, 山西 太原 030021; 2. 清华大学 能源与动力工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 循环流化床(CFB)能够燃用低热值燃料,在我国广泛应用。其重要优势是无成本的低氮氧化物( $\text{NO}_x$ )原始排放,这是缘于 CFB 较低且均匀的燃烧温度及其固有的燃烧还原性气氛。随着中国燃煤电站污染排放要求日益严格,CFB 燃烧原始  $\text{NO}_x$  排放浓度超过了排放限制的最新要求。笔者理论分析了 CFB 燃烧过程,根据 CFB 燃烧条件下  $\text{NO}_x$  生成与还原的途径,认为可以通过气固流态的优化调控  $\text{NO}_x$  生成与还原反应,进一步降低  $\text{NO}_x$  的原始排放。进而提出流态优化的工程实现途径:提高床质量、减少粗颗粒床存量、增加循环量。详细讨论了该技术路线的基本原理:床质量提高、粗颗粒床存量减少以及循环量增加,可显著强化燃烧过程中的密相区和稀相区的还原性气氛、减少  $\text{NO}_x$  生成,并在稀相区乃至分离器中加强对生成的  $\text{NO}_x$  的还原,配合合理的床温和风配比,使 CFB 锅炉在不采用烟气脱硝条件下,实现  $\text{NO}_x$  低于  $50 \text{ mg/m}^3$ 。该技术设想的关键点经实验室验证后,在 150、260 和 560 t/h CFB 锅炉上进行了工程实践。运行效果表明,通过流态优化后, $\text{NO}_x$  排放显著下降,可达到  $\text{NO}_x$  原始超低排放;同时,未见由此导致的燃烧效率显著降低;这些原始超低排放工程案例涵盖了烟煤、贫煤和无烟煤。通过流态设计优化降低  $\text{NO}_x$  排放浓度的技术路线为 CFB 锅炉  $\text{NO}_x$  控制提供了一条新途径。

**关键词:** 循环流化床; $\text{NO}_x$ ;超低排放;还原性气氛

**中图分类号:** X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2020)03-0139-07

## Theory and practice of ultra-low $\text{NO}_x$ emission in circulating fluidized bed boilers

LI Jun<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>2</sup>, LIU Qing<sup>2</sup>, GUO Xuemao<sup>1</sup>, ZHANG Jianchun<sup>1</sup>

(1. Taiyuan Boiler Group Co., Ltd., Taiyuan 030021, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler, featured by the low quality coal as the fuel, is widely used in China. One of the CFB combustion advantage is its lower  $\text{NO}_x$  emission without cost due to its lower and uniform combustion temperature of the alone circulating loop as well as its unique characteristics that the combustion atmosphere is reduced. With the increasingly strict emission requirements for coal fired power plant in China, the original  $\text{NO}_x$  emission of CFB combustion exceeds the emission limit of the updated National Emission Regulation. Therefore, the CFB combustion processing was theoretically analyzed, according to the  $\text{NO}_x$  generation and reduction paths under the condition of CFB combustion. It is believed that it is possible to decrease the  $\text{NO}_x$  original emission in advance by controlling  $\text{NO}_x$  generation and reduction and using the optimized gas-solid two-phase flow pattern. Furthermore, the engineering method to optimize the gas-solid two-phase flow pattern was suggested, which was to improve the bed quality, decrease the course bed inventory and increase the circulating flow rate. The principle of this technology was discussed, including the improvement of bed quality, the decreasing of the course bed inventory and the increasing of the circulating flow rate. It can significantly enhance the reduced atmosphere to decrease  $\text{NO}_x$  generation in both dense zone and dilute phase area and promote the reduction of  $\text{NO}_x$  in freeboard even in cyclone. Besides, the reasonable bed temperature and air supply should be considered. The  $\text{NO}_x$  emission of this technology was expected less than  $50 \text{ mg/m}^3$  with-

收稿日期: 2019-08-20; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19082001

基金项目: 山西省科技重大专项资助项目(20181102001)

作者简介: 李 军(1968—), 女, 山西太原人, 高级工程师, 从事循环流化床燃烧技术研究开发。E-mail: 13513607018@163.com

引用格式: 李军, 张缙, 刘青, 等. 循环流化床锅炉超低氮氧化物排放理论与实践[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 139-145.

LI Jun, ZHANG Man, LIU Qing, et al. Theory and practice of ultra-low  $\text{NO}_x$  emission in circulating fluidized bed boilers [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 139-145.



移动阅读

out flue gas denitrification. After the key points were confirmed in laboratory one by one, this technique was proved to be effective in CFB boilers with capacity of 150, 260 and 560 t/h. The operation results show that the gas-solid two-phase flow pattern optimization decreases the  $\text{NO}_x$  emission obviously and achieves ultra lower  $\text{NO}_x$  emission. In the same time, no obvious decrease of combustion efficiency is found. These engineering cases of original ultra-low emission include bituminous coal, lean coal and anthracite coal. This technical method of reducing  $\text{NO}_x$  emission concentration through flow design optimization provides a new approach to control the  $\text{NO}_x$  emission in CFB boilers.

**Key words:** circulating fluidized bed;  $\text{NO}_x$ ; super-low emission; reducing atmosphere

## 0 引言

最新颁布实施的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)对氮氧化物( $\text{NO}_x$ )的控制提出了更高要求。循环流化床(CFB)锅炉主流技术均为 850~890 °C 中温燃烧,因此燃烧中不会出现由于高温将空气中的  $\text{N}_2$  氧化成  $\text{NO}$  的热力型  $\text{NO}_x$  的可能性,燃料型  $\text{NO}_x$  也因温度较低而产量很低,且锅炉内含有大量还原性物质,具有天然的  $\text{NO}_x$  低排放优势<sup>[1]</sup>。目前我国已有很多 CFB 燃烧实践,燃料种类几乎涵盖了所有煤种。运行实践表明,对于 CFB 锅炉本身没有原则性缺陷,若床温、一二次风配比、过量空气系数等运行参数控制得当,几乎所有燃料的 CFB 燃烧原始  $\text{NO}_x$  排放可达 200  $\text{mg}/\text{m}^3$  以下(折算为干基,6%  $\text{O}_2$ ,下同),满足目前世界绝大多数国家地区的要求。但根据 GB 13223—2011 中的 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  新标准,需精心设计、合理运行,才能达到。由于环境总容量的限制,我国进一步要求  $\text{NO}_x$  限值严格到 50  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,这对 CFB 锅炉提出了极大挑战<sup>[2]</sup>。我国早期设计建设的 CFB 锅炉普遍床温偏高、 $\text{NO}_x$  排放不容乐观;同时发现,挥发分与  $\text{NO}_x$  原始排放呈正相关,与煤粉(PC)燃烧的变化趋势正相反<sup>[3]</sup>。为此,大部分 CFB 锅炉建设选择性非催化还原(SNCR),可低成本满足  $\text{NO}_x$  排放;但出于保守和裕量考虑,某些 CFB 锅炉设置了选择性催化还原(SCR),使 CFB 燃烧失去了低成本  $\text{NO}_x$  控制的优势<sup>[4]</sup>。

为此,很多学者开展了系列的研究<sup>[4-5]</sup>,主要集中在燃料组成和宏观配风<sup>[6-7]</sup>,几乎没有从气固流态的角度分析认识这一问题。为了维持和提高 CFB 燃烧的竞争力,需要充分挖掘 CFB 燃烧的低  $\text{NO}_x$  排放潜力。

本文基于 CFB 燃烧理论与现有  $\text{NO}_x$  生成机理研究成果,提出以提高床质量、减少床存量、增加循环量为核心的改善炉内气氛降低  $\text{NO}_x$  原始排放的技术路线,配以合理的床温、配风等,实现 CFB 锅炉  $\text{NO}_x$  原始超低排放,并进行理论分析及工程验证。

## 1 CFB 燃烧 $\text{NO}_x$ 生成机理

### 1.1 燃烧过程中 $\text{NO}_x$ 生成途径

燃烧过程中产生的  $\text{NO}_x$  以  $\text{NO}$  为主,可分为高温型、快速型和燃料型 3 类。快速型  $\text{NO}_x$  的生成需在富氧条件下且有  $\text{CH}_i$  自由基参与,天然气、油等高 H/C 燃料燃烧时可产生较多的快速型  $\text{NO}_x$ 。CFB 燃烧温度在 850~890 °C,此温度下,氮气的 N—N 键很难打开,因此几乎无热力型  $\text{NO}_x$  生成。CFB 锅炉中生成的  $\text{NO}_x$  几乎是燃料型  $\text{NO}_x$ <sup>[5]</sup>。

煤中氮主要存在于芳香型的吡咯、吡啶和季氮等结构中<sup>[6]</sup>,与碳原子形成共价键。煤颗粒进入炉膛后首先热解,由于 C—N 键能显著低于  $\text{N} \equiv \text{N}$ ,部分含氮基团与母体断裂,成为挥发分的一部分(称为挥发分氮),残存在焦炭中的氮称为焦炭氮。随挥发分一起析出的含氮自由基的化学活性高,与其他自由基结合形成  $\text{HCN}$ 、 $\text{NH}_3$  等,进而在氧化性气氛中被氧化为  $\text{N}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等。同时,生成的  $\text{NO}$  会被  $\text{NH}_3$  等均相还原为  $\text{N}_2$ 。焦炭氮在焦炭燃烧过程中,部分被氧化为  $\text{NO}_x$ ,该氧化在焦炭表面发生,焦炭对发生在其表面的  $\text{NO}_x$  有显著的还原作用,因此焦炭氮向  $\text{NO}_x$  的转化率低于挥发分氮。图 1 为燃烧过程中燃料型  $\text{NO}_x$  生成路径<sup>[7]</sup>。

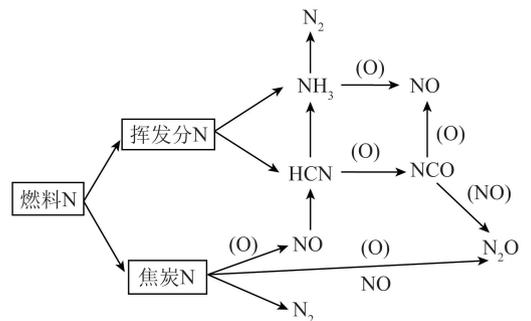


图 1 燃烧过程中燃料型  $\text{NO}_x$  生成路径示意<sup>[7]</sup>

Fig.1 Schematic of the generation path of fuel- $\text{NO}_x$  in combustion<sup>[7]</sup>

### 1.2 CFB 燃烧过程中 $\text{NO}_x$ 生成过程

由  $\text{NO}_x$  生成反应路径可知,燃烧过程中,  $\text{NO}_x$  生成量依赖于反应气氛。在 CFB 燃烧过程中,炉膛中

的气固两相流在宏观上可分为下部鼓泡流态化的密相区和上部快速床的稀相区。由流态化理论可知,密相区由气泡相和乳化相构成(图2(a)),其中气泡相是不连续的分散相,分散在乳化相中,是固体颗粒形成边界包围的单相气体;乳化相是连续相,其中的床料颗粒可近似认为处于最小流化状态。流过乳化相的气体即乳化相伴流气体,速度即为最小流化风速  $u_{mf}$ ,其仅与床料的颗粒性质(如粒径、密度、形状等)有关;超过维持最小流态化状态的气体流量外的多余气体,形成气泡相。入炉燃料可分为:① 终端速度大于流化速度的大颗粒,进入炉膛后下沉进入密相区,在下沉过程中以及下沉后在乳化相中热解、燃烧;② 终端速度小于流化速度的小颗粒,进入炉膛后与循环物料混合随气流上升,上升过程中发生团聚(图2(b)),颗粒团逐渐长大,当颗粒团长大到其对应的终端速度大于流化速度时开始下降,下降过程中,颗粒团被上升气流撕裂、吹散,并携带重新上升,进入下一个周期。该上升、团聚、颗粒

团长大、下降、吹散、上升、再团聚的循环过程,有效延长了包括燃料颗粒在内的固体物料在炉膛中的停留时间,完成燃尽和脱硫反应<sup>[4]</sup>。在颗粒团中,燃料颗粒的比例很小。

CFB 锅炉中的燃烧是在大量惰性床料参与的气固两相流动过程中实现的,具有先天的空气分级燃烧特点。终端速度大于流化速度的大粒径燃料颗粒落入炉膛后,落入密相区,必然存在于乳化相中。乳化相以惰性床料为主,燃料颗粒只占比很小,一般在2%左右。由于床料粒度较细,颗粒对应的最小流化速度  $u_{mf}$  较小,即乳化相伴流气体很少,位于乳化相中间的燃料颗粒从这些气体中获得的  $O_2$  有限。气泡相中有丰富的  $O_2$ ,气泡中的  $O_2$  通过乳化相中的颗粒扩散到燃料颗粒表面的扩散系数与床料直径有关,由于床料细,  $O_2$  的传质阻力很大<sup>[8]</sup>。这2个方面均导致落入乳化相中的大粒径燃料颗粒的热解和燃烧处于严重缺氧状态<sup>[9]</sup>。挥发分析出后包括 HCN、 $NH_3$  均在燃料颗粒附近的乳化相中,其中的  $O_2$  已完全消耗,因此在密相区,热解产生的挥发分 N 很难被进一步氧化成  $NO_x$ 。CFB 燃烧中,密相区宏观上富氧,但对位于乳化相中的燃料颗粒处于贫氧气氛中<sup>[10]</sup>,因此燃料 N 转化为  $NO_x$  的比例非常低<sup>[4]</sup>。气泡流至密相区表面,压力迅速降低,气泡破裂,气泡边界的颗粒被抛向空中,增强了气泡中气体与乳化相伴流气体的混合,改善了乳化相伴流气体中 HCN、 $NH_3$  等获得  $O_2$  的条件,其中一部分转化为  $NO_x$ 。挥发分越高,乳化相伴流气体中的 HCN、 $NH_3$  越多,产生的  $NO_x$  越多,这是燃用高挥发分燃料时 CFB 锅炉  $NO_x$  排放量较高的主要原因<sup>[11]</sup>。乳化相中流过的气体与床料颗粒的最小流化风速相对应,若床料颗粒的粒度不变,则最小流化速度不变,即使增加一次风份额,也无法增加乳化相中的气体流量,增加的一次风量均在气泡中流过床层,增加了气泡的数量和大小,因此一次风份额的调整对密相区的燃烧份额影响很小<sup>[12]</sup>,但对于密相区出口的气泡破裂、气固混合有积极意义,可强化过渡区的挥发分燃烧<sup>[4]</sup>。

CFB 锅炉炉膛上部是快速床状态,从 CFB 中翼形墙受热面随意设置但温度分布仍均匀中可得到验证,快速床的重要特征是颗粒团聚。终端速度小于流化速度的小燃料颗粒进入炉膛后,直接混入上升气流中,颗粒发生团聚后,存在于颗粒团中的燃料颗粒的热解、燃烧条件与乳化相中相似(图2(b))。如果认为颗粒团中的气体即颗粒团伴随气体的性质与密相区乳化相伴随气体具有一致性,则与下部的

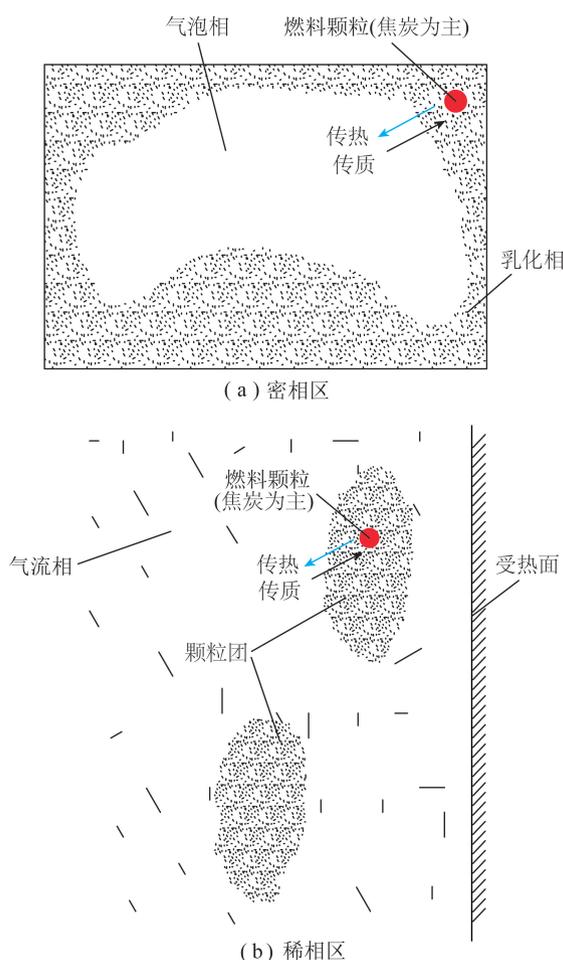


图2 CFB 锅炉密相区气固两相流动结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of gas-solid two-phase flow structure in the dense zone of CFB boiler

鼓泡流态化相比,上部稀相区与之“物相倒置”<sup>[13]</sup>:密相区中的气泡相对应稀相区的颗粒团,非连续相由密相区的单相(气泡)变成稀相区的气固两相(颗粒团);密相区中的乳化相对应稀相区的气相,连续相由密相区的两相(乳化相)变成稀相区的单相(气相)<sup>[14]</sup>。因此,颗粒团中燃料颗粒的传质、传热行为与密相区乳化相中近似。循环物料粒径和循环流量大小对于稀相区的团聚有重要影响。颗粒越细,团聚倾向越强;循环流量越大,团聚程度越高,因此床料变细、循环流量变大使颗粒团密度更大,颗粒团中的燃料颗粒获得 O<sub>2</sub> 的能力变差<sup>[15]</sup>。由此可见,炉膛上部稀相区,燃料颗粒处于还原性气氛中<sup>[16]</sup>,从而抑制燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成<sup>[4]</sup>。

### 1.3 CFB 锅炉中 NO<sub>x</sub> 还原过程

为保证燃烧,需为燃料提供适当的 O<sub>2</sub>,因此燃料型 NO<sub>x</sub> 是燃烧的必然副产物。CFB 燃烧不但具有 NO<sub>x</sub> 生成低的优势,且具有将副产的 NO<sub>x</sub> 还原的天然条件。CFB 燃烧中,燃料颗粒处于特殊的还原性气氛下,在抑制燃料型 NO<sub>x</sub> 生成的同时,必然产生大量 CO、CH<sub>4</sub> 等还原性气体,这些还原性气体在进一步氧化燃烧前,可有效还原已生成的 NO<sub>x</sub>。由于 CFB 锅炉燃烧是低温燃烧,燃料灰分未经高温烧结,具有丰富的比表面积,为 CO 等与 NO<sub>x</sub> 发生还原反应提供了吸附表面;燃料燃烧形成的循环灰富含多种金属化合物,可催化反应过程,如图 3 所示。

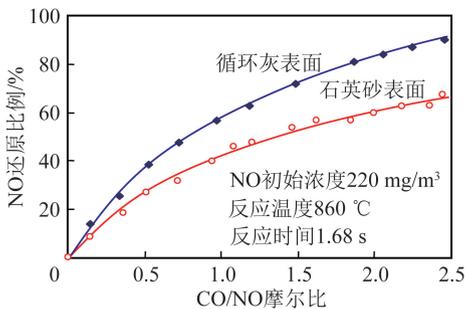


图3 不同床料条件下 CO 对 NO 的还原

Fig.3 Reduction of NO by CO under different bed materials

CFB 燃烧的典型温度为 850~890 °C,因此燃烧反应速度较低。为保证负荷亦即释热速率,需更多焦炭燃烧反应表面积,这些燃烧反应表面也是 NO 还原反应的表面<sup>[17]</sup>。燃料灰分对于焦炭还原 NO 反应具有促进作用,如图 4 所示。高挥发分煤种,其成煤年龄较短,热解形成的焦炭反应活性较高,对于相同的释热速率,所需的焦炭反应表面积较少,对 NO<sub>x</sub> 的还原减弱,这是 CFB 锅炉燃用高挥发分煤种时 NO<sub>x</sub> 排放水平较高的另一个主要原因<sup>[11]</sup>。

炉膛内高浓度 CO 进入旋风分离器内,旋转流

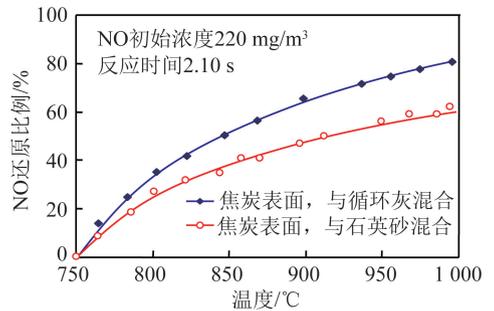


图4 不同床料条件下焦炭对 NO 的还原

Fig.4 Reduction of NO by char in different bed materials

动改善了与 O<sub>2</sub> 的混合,可充分燃尽,不会使锅炉燃烧效率发生显著下降。

二次风的布置和比例对于稀相区的还原性气氛有影响,但实践证明,考虑到还原性腐蚀、燃烧效率等,其变化范围受到限制。对于大量存在的无换热床的 CFB 锅炉,一次风率几乎是床温调节的唯一手段,通过调节一、二次风率以降低 NO<sub>x</sub> 排放,而 NO<sub>x</sub> 变化幅度有限<sup>[4]</sup>。

## 2 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 超低排放理论

从 CFB 燃烧条件下 NO<sub>x</sub> 生成机理分析可知,CFB 锅炉的 NO<sub>x</sub> 原始排放与其燃烧气氛有关,通过提高整个炉膛中的还原性气氛,以期进一步降低 NO<sub>x</sub> 原始排放。还原性气氛与床质量即床料平均粒径有关,提高床质量即降低床料平均粒径的途径有:减小粗颗粒比例、减小细颗粒粒径。CFB 锅炉给煤是宽筛分,因此燃烧形成的床料也具有宽筛分分布<sup>[18]</sup>。这些颗粒中包含可参与有效外循环的细颗粒和无法参与外循环停留在密相区的粗颗粒<sup>[11]</sup>。适当减小床料中的粗颗粒量,可提高床质量,同时有效降低风机功耗,减轻下部受热面的磨损。

床料主颗粒是有效颗粒,其粒径降低对传质产生显著影响。气泡中的 O<sub>2</sub> 通过乳化相向燃料颗粒的传质系数  $k_g$  为

$$k_g = \frac{D_g Sh}{d_{char}} \quad (1)$$

式中, $k_g$  为传质系数, m/s;  $D_g$  为 O<sub>2</sub> 的扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $d_{char}$  为焦炭粒径, m;  $Sh$  为传质 Sherwood 数,其通用关联式<sup>[19]</sup>为

$$Sh = 2\varepsilon_{mf} + 0.69 \left( \frac{Re_{mf}}{\varepsilon_{mf}} \right)^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_{mf}$  为最小流化状态下空隙率;  $Sc$  为 Schmidt 数;  $Re_{mf}$  为最小流化状态下的颗粒 Reynolds 数,其公式为

$$Re_{mf} = \frac{u_{mf} \rho_g d_p}{\mu_g} \quad (3)$$

式中,  $u_{mf}$  为最小流化速度, m/s;  $\rho_g$  为气体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $d_p$  为床料粒径, m;  $\mu_g$  为气体黏度, kg/(m·s)。

床料变细,  $u_{mf}$  减小<sup>[15]</sup>, 传质系数  $k_g$  降低, 燃料颗粒获得 O<sub>2</sub> 更加困难, 从而强化密相区的还原性气氛, 使 NO<sub>x</sub> 原始生成量减少。同时, 在给定风速范围内, 床料变细减少了颗粒对流换热的热阻, 燃料颗粒表面的传热系数随床料粒度减小而增加<sup>[20]</sup>, 颗粒温度也接近床温, 有助于降低 NO<sub>x</sub> 的原始生成。

快速床中, 颗粒的团聚行为与颗粒直径相关。图 5 为不同粒径球形颗粒的作用力量级分析, 可知, 床料粒径小于 200 μm 时, 颗粒间的相互吸引力大于其他作用力<sup>[21]</sup>, 上部快速床中的颗粒趋于团聚(图 2(b)), 直径越小, 团聚越易发生。提高床质量, 可显著增强上部快速床的团聚。

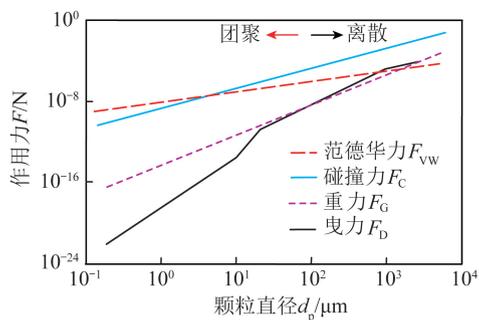


图 5 不同粒径球形颗粒的作用力量级分析<sup>[21]</sup>

Fig.5 Force analysis of spherical particles of different sizes<sup>[21]</sup>

研究表明<sup>[15]</sup>, 提高循环量可强化上部稀相区的颗粒团聚。循环量提高, 稀相区的固体颗粒悬浮浓度增加, 该平均浓度决定了颗粒团中的固含率<sup>[22]</sup>, 如图 6 所示<sup>[23]</sup>。颗粒团聚越强, 上部快速床中燃料颗粒燃烧的还原性气氛越强。因此, 降低 NO<sub>x</sub> 原始排放的另一个手段是提高循环量<sup>[11]</sup>。

床料粒度和循环流量的变化可能对 CFB 锅炉的

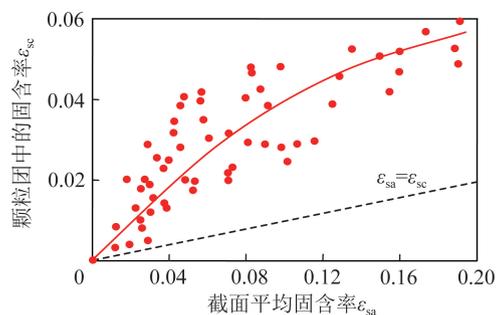


图 6 截面固含率与颗粒团固含率的关系<sup>[23]</sup>

Fig.6 Relation of the cross sectional solid concentration and the solid concentration in clusters<sup>[23]</sup>

传热乃至整体性能产生影响。床料的颗粒度对 CFB 炉膛中烟气侧向受热面的传热影响较大, 尤其是颗粒粒度小于 100 μm 时, 床料粒度变细显著强化传热<sup>[24]</sup>。研究表明<sup>[25]</sup>, 颗粒辐射和对流换热是 CFB 炉内传热的主导机制, 物料浓度与传热系数呈正相关。通过改善循环系统性能使床料粒度变细, 必然伴随炉膛床料悬浮浓度增加, 使传热系数增大, 有效降低床温<sup>[7]</sup>。同时, 上部颗粒团聚得到强化, 炉膛上下温度更加趋于均匀<sup>[4]</sup>。

给煤、过量空气系数、配风等参数也对 NO<sub>x</sub> 排放产生影响<sup>[26-27]</sup>。在床温不高于 890 °C、炉膛过量空气系数不大于 1.15、一次风率低于 45%、二次风喷口合理的条件下, 提高床质量、增加循环量可增强燃烧反应的还原性气氛, 是 CFB 燃烧超低 NO<sub>x</sub> 排放的可行技术手段<sup>[11]</sup>。

### 3 NO<sub>x</sub> 超低排放 CFB 的工程实践

CFB 燃烧中降低 NO<sub>x</sub> 排放需降低床料颗粒度、提高物料循环量, 工程实践中对锅炉物料循环系统关键部件进行优化, 以改善循环系统性能。分别在 30、60 和 125 MW 三个不同容量、不同煤种的 CFB 锅炉上进行工程实践, 3 台锅炉的燃料分别为贫煤、低挥发分烟煤、高挥发分烟煤, 煤种性质见表 1。

表 1 3 个煤种煤质分析

Table 1 Quality analysis of three coal samples

锅炉容量/ MW	煤种	元素分析/%					工业分析/%			$Q_{ar,net}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
		C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	M <sub>ar</sub>	V <sub>daf</sub>	
30	烟煤+石油焦	66.54	3.53	18.65	1.70	2.80	5.01	7.20	26.8	23.1
60	贫煤	62.40	3.77	2.45	1.51	0.71	22.15	5.74	16.6	25.5
125	烟煤	46.36	3.84	8.87	1.71	0.29	27.46	12.46	38.0	18.0

床料悬浮浓度与其压降  $\Delta p$  呈正相关<sup>[14]</sup>, 即

$$\Delta p = \rho_p g \Delta h \quad (4)$$

式中,  $\rho_p$  为悬浮浓度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta h$  为测量高度, m。

可利用压降  $\Delta p$  表征床料悬浮浓度。传统 CFB

锅炉的风室静压在 8~12 kPa, 稀相区压差在 1~2 kPa<sup>[18]</sup>, 3 台 CFB 锅炉的风室静压低, 但稀相区压差大, 在 2.5 kPa 左右(表 2)。NO<sub>x</sub> 原始排放较低, 除 30 MW 锅炉略高外, 其他 2 台锅炉可直接实现 NO<sub>x</sub> 超低排放, 同时飞灰含碳量也在可接受范围内。运行中, 燃料实际粒度均为 0~6 mm。测试数据表明, 当飞灰颗粒中超过 50% 的颗粒小于 12 μm 时, NO<sub>x</sub> 原始排放可以直接达到超低。

表 2 实际运行 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 原始排放及主要运行参数

Table 2 Initial NO<sub>x</sub> emission and main operation parameter of the CFB boilers through actual operation

项 目	锅炉容量/MW		
	30	60	125
平均床温 $T_b/^\circ\text{C}$	880	870	850
风室静压 $p/\text{kPa}$	6.6	7.0	6.6
稀相区压降 $\Delta p/\text{kPa}$	2.6	2.7	2.7
排烟 NO <sub>x</sub> 浓度(6%O <sub>2</sub> ) $C(\text{NO}_x)/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	113.0	27.2	18.5
排烟 CO 浓度(6%O <sub>2</sub> ) $C(\text{CO})/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	37	94	124
包墙出口烟气中 O <sub>2</sub> 含量 $C(\text{O}_2)/\%$	3.8	2.6	2.4
飞灰含碳量 $C_{fa}/\%$	3.89	2.50	1.82
排渣平均粒径 $d_{ba}/\mu\text{m}$	284	232	228
飞灰切割粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	15	12	11
飞灰 90% 粒径 $d_{90}/\mu\text{m}$	64	58	52

将实际运行数据与部分典型的 PC 燃烧、其他 CFB 燃烧的实际运行数据进行比较, 如图 7 所示。可见, 对于相近煤种, 降低床料粒度、提高物料循环量可使 NO<sub>x</sub> 原始排放显著降低, 且削弱了 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放对煤种挥发分的依赖。

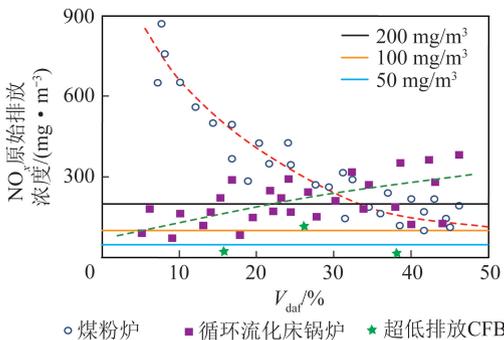


图 7 煤中挥发分对 CFB 和 PC 燃烧 NO<sub>x</sub> 原始排放的影响

Fig.7 Effect of volatile matter coal on NO<sub>x</sub> original emission in CFB or PC combustion

## 4 结 论

1) 理论分析了 CFB 燃烧过程, 根据 CFB 燃烧条件下 NO<sub>x</sub> 生成与还原的途径, 认为可通过气固流态的优化调控 NO<sub>x</sub> 生成与还原反应, 进一步降低

NO<sub>x</sub> 的原始排放。

2) 提出了流态优化的工程实现途径: 提高床质量、减少粗颗粒床存量、增加循环量。

3) 该技术路线的基本原理为: 床质量提高、粗颗粒床存量减少以及循环量增加, 可显著强化燃烧过程中的密相区和稀相区的还原性气氛, 减少 NO<sub>x</sub> 生成, 并在稀相区乃至分离器中加强对生成 NO<sub>x</sub> 的还原, 配合合理的床温和风配比, 使 CFB 锅炉在不采用烟气脱硝条件下, 实现 NO<sub>x</sub> 排放量低于 50 mg/m<sup>3</sup>。

4) 该技术设想的关键点经实验室验证后, 在 150、260 和 560 t/h 等多台实际 CFB 锅炉上进行了工程实践。运行效果表明, 通过流态优化后, NO<sub>x</sub> 排放显著下降, 可达到 NO<sub>x</sub> 原始超低排放; 同时, 未见由此导致的燃烧效率显著降低; 这些原始超低排放工程案例涵盖了烟煤、贫煤和无烟煤。这一通过流态设计优化降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度的技术路线为 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 控制提供了一条新途径。

## 参考文献 (References):

- [1] 吕俊复, 岳光溪, 张建胜, 等. 循环流化床锅炉运行与检修 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
LYU Junfu, YUE Guangxi, ZHANG Jiansheng. Operation and maintenance of circulating fluidized bed boiler [M]. Beijing: China water conservancy and hydropower press, 2005.
- [2] LI J J, YANG H R, WU Y X, et al. Effects of the updated national emission Regulation in China on circulating fluidized bed boilers and the solutions to meet them [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47: 6681-6687.
- [3] 于龙, 吕俊复, 王智微, 等. 循环流化床燃烧技术的研究展望 [J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 336-341.  
YU Long, LYU Junfu, WANG Zhiwei, et al. The future investigation of circulating fluidized bed combustion technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(4): 336-341.
- [4] 岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析 [J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1-13.  
YUE Guangxi, LYU Junfu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology [J]. Electric Power, 2016, 49(1): 1-13.
- [5] 侯祥松, 李金平, 张海, 等. 石灰石脱硫对循环流化床中 NO<sub>x</sub> 生成和排放的影响 [J]. 电站系统工程, 2005, 21(1): 5-7.  
HOU Xiangsong, LI Jingping, ZHANG Hai, et al. Limestone effects on NO<sub>x</sub> formation & emission in CFB combustors [J]. Power System Engineering, 2005, 21(1): 5-7.
- [6] LARBORG G 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.
- [7] 李竞岌, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 节能型循环流化床锅炉低氮氧化物排放的分析 [J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(4): 293-298.

- LI Jingji, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. Low  $\text{NO}_x$  emission characteristic of low energy consumption CFB boilers [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(4): 293-298.
- [8] JIN X Z, LYU J F, YANG H R, et al. Comprehensive mathematical model for coal combustion in the circulating fluidized bed combustor [J]. Tsinghua Science and Technology, 2010, 6(4): 319-325.
- [9] 李竞岌, 杨欣华, 杨海瑞, 等. 鼓泡床焦炭型氮氧化物生成的试验与模型研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1546-1553.
- LI Jingji, YANG Xinhua, YANG Hairui, et al. Experimental study and modeling of  $\text{NO}_x$  generation from char nitrogen in the bubbling bed[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1546-1553.
- [10] YUE G X, LYU J F, ZHANG H, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers [C]//Proceeding of the 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Toronto: ASME, 2005: 135-146.
- [11] 李竞岌. 循环流化床锅炉氮氧化物生成机理的实验与模型研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
- LI Jingji. Experimental and model studies on the formation mechanism of nitrogen oxides in circulating fluidized bed boiler [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [12] 金晓钟, 吕俊复, 乔锐, 等. 循环床锅炉燃烧份额分布的实验研究和理论分析[J]. 洁净煤技术, 1999, 5(1): 26-29.
- JIN Xiaozhong, LYU Junfu, QIAO Rui, et al. Research on coal combustion fraction distribution in circulating fluidized bed combustor [J]. Clean Coal Technology, 1999, 5(1): 20-23.
- [13] 张楚, 林郁郁, 章明川. 快速床动力学统一模型 II: 上部稀相与下部浓相固含率的预报[J]. 工程热物理论, 2019, 40(1): 229-232.
- ZHANG Chu, LIN Yuyu, ZHANG Mingchun. A unified model for fast fluidization dynamics Part II: Prediction of upside dilute phase holdup and lower dense phase holdup [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(1): 229-232.
- [14] 李佑楚. 流态化过程工程导论[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- LI Youchu. Introduction to fluidization process engineering [M]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [15] 刘向军, 赵燕, 徐旭常. 循环流化床内煤粉颗粒团燃烧行为理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 30-34.
- LIU Xiangjun, ZHAO Yan, XU Xuchang. Theoretically studies of the coal particle cluster combustion behavior in a circulating fluidized bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 30-34.
- [16] 柯希玮, 蔡润夏, 杨海瑞, 等. 循环流化床燃烧的  $\text{NO}_x$  生成与超低排放[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 390-396.
- KE Xiwei, CAI Runxia, YANG Hairui, et al. Formation and ultra-low emission of  $\text{NO}_x$  for circulating fluidized bed combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 390-396.
- [17] ÅMAND L E, LECKNER B. Oxidation of volatile nitrogen compounds during combustion in circulating fluidized bed boilers [J]. Energy & Fuels, 1991, 5: 809-815.
- [18] SU J M, ZHAO X X, ZHANG J C, et al. Design and operation of CFB boilers with low bed inventory [C]// Proceeding of the 20th International Conference on FBC. Beijing: Springer Press, 2009: 212-218.
- [19] LA Nauze R D, JUNG K. Mass transfer of oxygen to a burning particle in a fluidized bed [C]//Proceedings of the 8th Australasian Fluid Mechanics Conference. 1983.
- [20] CHAO J N, LYU J F, YANG H R, et al. Experimental study on the heat transfer coefficient between a freely moving sphere and a fluidized bed of small particles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 115-125.
- [21] 张文斌. 流态化颗粒的碰撞规律及团聚机理的研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
- ZHANG Wenbin. Study of the collision law and agglomeration mechanism of fluidized particles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [22] HARRIS A T, DAVIDSON J F, THORPE R B. The prediction of particle cluster properties in the near wall region of a vertical riser [J]. Powder Technology, 2002, 127(2): 128-143.
- [23] 陈程, 祁海鹰. EMMS 曳力模型及其颗粒团模型的构建和检验[J]. 化工学报, 2014, 65(6): 2003-2012.
- CHEN Cheng, QI Haiying. Development and validation of cluster and EMMS drag model [J]. CIESC Journal, 2014, 65(6): 2003-2012.
- [24] ANDERSSON B A. Effects of bed particle size on heat transfer in CFB-boilers [J]. Powder Technol., 1996, 87: 239-248.
- [25] 张瑞卿. 涵盖不同流型的气固床层与壁面换热研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
- ZHANG Ruiqing. Research on bed-to-wall heat transfer in gas-solid flow with various flow patterns [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [26] ZHAO J S, BRERETON C, GRACE J R, et al. Gas concentration profiles and  $\text{NO}_x$  formation in circulating fluidized bed combustion [J]. Fuel, 1997, 76(9): 853-860.
- [27] WANG X S, GIBBS B M. Impact of air staging on the fate of  $\text{NO}$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in a circulating fluidized bed combustor [J]. Combustion and Flame, 1994, 94: 508-515.