

# 循环流化床超低 $\text{NO}_x$ 与 $\text{SO}_2$ 排放技术研究进展

王超<sup>1,2</sup>, 宋国良<sup>1,3,4</sup>, 吕清刚<sup>1,3,4</sup>

(1.中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;2.中国科学技术大学,安徽合肥 230026;3.中国科学院大学,北京 100049;

4.中国科学院洁净能源创新研究院,辽宁大连 116023)

**摘要:**因固有的低污染物排放控制成本优势,循环流化床(CFB)锅炉已成为商业化程度最好的洁净煤燃烧技术之一。随着超低排放标准的提出,CFB燃烧技术也面临巨大挑战。为满足超低排放标准,通常要使用烟气净化处理装置,导致 CFB 锅炉污染控制成本显著增加。如何低成本实现 CFB 锅炉  $\text{NO}_x$  与  $\text{SO}_2$  原始超低排放成为关注焦点。系统论述了现有 CFB 超低  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  排放技术、最新开发的 CFB 超低  $\text{NO}_x$  燃烧技术、炉内 CFB 超低  $\text{SO}_2$  排放技术和 CFB 超低  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  协同控制技术等。研究表明:开发高效分离器不仅可提升 CFB 燃烧效率,也是保证超细石灰石高效脱硫的前提,分离器效率越高,CFB 燃烧效率和超细石灰石脱硫效率越高;随着循环流化床锅炉的大型化发展,炉膛截面越来越大,如何实现超细石灰石在大型炉膛内横向的均匀混合成为第 1 个技术难点;控制单一气体使其满足超低排放的技术相对成熟,但如何协同控制  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  使之满足超低排放标准成为第 2 个技术难点;现阶段 CFB 炉内超低排放技术仅针对某些特定的燃料可达到超低排放,针对其他常规燃料, $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  能否达到超低排放仍需要进一步深入研究。

**关键词:** CFB; 超低  $\text{NO}_x$  排放; 超低  $\text{SO}_2$  排放; 超细石灰石; 协同控制

中图分类号: TK229; X511

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)04-0017-09

## Research progress on ultra-low $\text{NO}_x$ and $\text{SO}_2$ emission control technology for CFB boilers

WANG Chao<sup>1,2</sup>, SONG Guoliang<sup>1,3,4</sup>, LYU Qinggang<sup>1,3,4</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. University of Science & Technology of China, Hefei

230026, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. Dalian National Laboratory for Clean Energy,

Chinese Academy of Science, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Circulating fluidized bed (CFB) boilers have become one of the best commercial technologies of clean coal combustion due to the advantage of inherent low cost of controlling pollutant emission. With the introduction of ultra-low emission standards, CFB combustion technology also faces huge challenges. In order to meet the ultra-low emission standards, the devices for treatment of flue gas are usually used, resulting in a significant increase in the cost of pollution treatment for CFB boiler. How to achieve ultra-low  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  emissions of CFB boiler has become the research focus. The existing conventional ultra-low  $\text{NO}_x$  emission technology of CFB, ultra-low  $\text{SO}_2$  emission technology of CFB, newly developed ultra-low  $\text{NO}_x$  combustion technology of CFB, ultra-low  $\text{SO}_2$  emission technology in the furnace of CFB and ultra-low  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  cooperative control technology of CFB were systematically discussed. The results show that high-efficiency separators cannot only improve the combustion efficiency of CFB, but also is the premise of using ultra-fine limestone for highly efficient desulfurization. The higher the separator efficiency is, the higher the CFB combustion efficiency and ultra-fine limestone desulfurization efficiency is. With the large-scale development of circulating fluidized bed boilers, the cross-section of the furnace is getting larger and larger, so how to achieve the horizontal uniform mixing of ultra-fine limestone in the large furnace becomes the first technical chal-

收稿日期: 2020-10-26; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CE20102601

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0605002); 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA21040100)

作者简介: 王超(1990—), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事碳基燃料清洁高效燃烧技术。E-mail: wangchao2020@iet.cn. 通讯作者: 宋国良, 研究员, 博士生导师, 主要从事循环流化床清洁高效燃烧技术。E-mail: songgl@iet.cn

引用格式: 王超, 宋国良, 吕清刚. 循环流化床超低  $\text{NO}_x$  与  $\text{SO}_2$  排放技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 17-25.

WANG Chao, SONG Guoliang, LYU Qinggang. Research progress on ultra-low  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  emission control technology for CFB boilers[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 17-25.



移动阅读

lenge. The technology for controlling a single gas to meet the ultra-low emission is relatively mature, but how to coordinately control  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  to meet the ultra-low emission standard has become the second technical challenge. The current ultra-low emission technology in the furnace of CFB can only achieve ultra-low emissions for certain specific fuels, and however for other conventional fuels, whether  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  can achieve ultra-low emissions still needs further deep research.

**Key words:** CFB; ultra-low  $\text{NO}_x$  emission; ultra-low  $\text{SO}_2$  emission; ultrafine limestone; coordinative control

## 0 引言

循环流化床(CFB)燃烧技术因燃料适应性广、污染排放低、变负荷能力强等优势<sup>[1-5]</sup>,得到迅速推广和发展应用。与煤粉炉相比较,CFB锅炉由于燃烧温度低,具有 $\text{NO}_x$ 排放低等优势。然而面对新提出的超低排放标准,即6%  $\text{O}_2$ (体积分数)条件下,烟尘、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度分别不高于10、35、50  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ,循环流化床技术面临巨大挑战。

为使 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 满足超低排放标准,CFB锅炉通常采用两级脱硝和两级脱硫。两级脱硝是指首先利用低氮燃烧技术通过优化控制CFB锅炉运行参数降低 $\text{NO}_x$ 原始排放,主要包括控制床温<sup>[6-7]</sup>,增加二次风比<sup>[8-12]</sup>、改变二次风喷入位置<sup>[13-15]</sup>和减少空气当量比<sup>[16-18]</sup>,然后利用烟气处理技术进行尾部烟气脱硝。烟气脱硝技术通常有3种:SCR技术<sup>[19-23]</sup>、SNCR技术<sup>[24-28]</sup>和SCR-SNCR结合技术<sup>[29-33]</sup>。两级脱硫是指首先向CFB锅炉炉内喷钙进行炉内脱硫,然后利用烟气处理装置对烟气进一步脱硫。烟气脱硝技术主要有2种:半干法脱硫<sup>[34-40]</sup>和湿法脱硫<sup>[36,41-45]</sup>。由于两级脱硝和两级

脱硫必须使用烟气处理装置,大大增加了CFB锅炉治污成本,因此如何在不使用脱硝和脱硫装置的情况下使CFB锅炉排烟中 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 含量达到超低排放标准成为未来CFB技术发展主流方向。

本文主要论述了现有常规CFB超低 $\text{NO}_x$ 排放技术(二级脱硝技术)、CFB超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术、常规CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术(二级脱硫技术)、CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术和CFB超低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 协同控制技术等,以明晰现有研究的不足,凝练关键科学问题,为实现CFB锅炉炉内超低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 协同控制技术提供理论支撑。

## 1 CFB超低 $\text{NO}_x$ 排放技术

### 1.1 常规CFB超低 $\text{NO}_x$ 排放技术

为达到超低排放标准,CFB锅炉普遍采用“两级脱硝”实现 $\text{NO}_x$ 深度脱除,即采用炉内低氮燃烧技术和炉外烟气脱硝技术。炉外烟气脱硝技术主要有3种:SCR技术、SNCR技术和SNCR-SCR技术,3种技术对比见表1。因此,常规CFB超低 $\text{NO}_x$ 排放技术包括低氮燃烧+SCR技术、低氮燃烧+SNCR技术和低氮燃烧+SCR-SNCR技术。

表1 烟气处理技术对比

Table 1 Comparison of technologies for the treatment of  $\text{NO}_x$  in flue gas

烟气处理技术	脱硝效率/%	优点	缺点
SNCR	40~70	投资成本低,不需要催化剂,占用空间小	高温,效率较低,氨气泄漏风险
SCR	80~90	高效,运行成本低,安装相对简单	催化剂成本高,氨气泄漏,设备腐蚀
SNCR-SCR	70~90	效率较高,成本较低	系统较复杂

#### 1.1.1 低氮燃烧+SCR技术

该技术结合了低氮燃烧技术和SCR技术(图1),首先通过控制和优化CFB锅炉运行参数降低 $\text{NO}_x$ 原始排放量,通常做法是控制床温,增加二次风比、改变二次风喷入位置和减少空气当量比等,然后利用SCR技术进行烟气脱硝。SCR脱硝工艺是指在特定条件下(烟气温度350~420 $^{\circ}\text{C}$ ),向烟气中喷入一定量的氨,并使之与烟气充分混合后,烟气经过一种预置的催化剂,使其在催化剂的辅助下高效率将 $\text{NO}_x$ 还原成 $\text{N}_2$ 。使用该方法脱硝效率最高,运行可靠,但由于需要使用大量催化剂,因此成本高,且占地面积大,适用于高挥发分煤和大型机组。

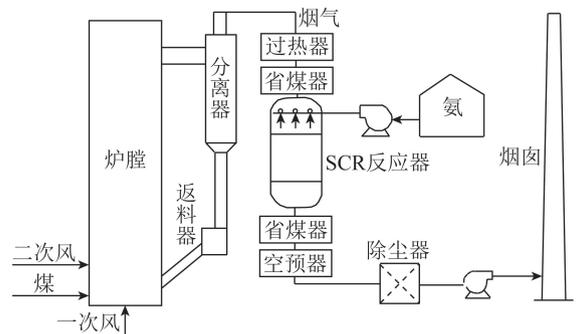


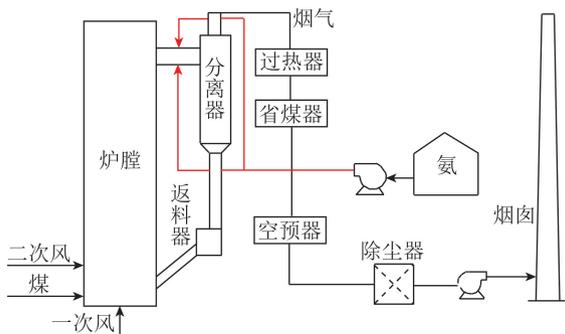
图1 低氮燃烧+SCR超低 $\text{NO}_x$ 排放技术

Fig.1 Low  $\text{NO}_x$  combustion+SCR technology

#### 1.1.2 低氮燃烧+SNCR技术

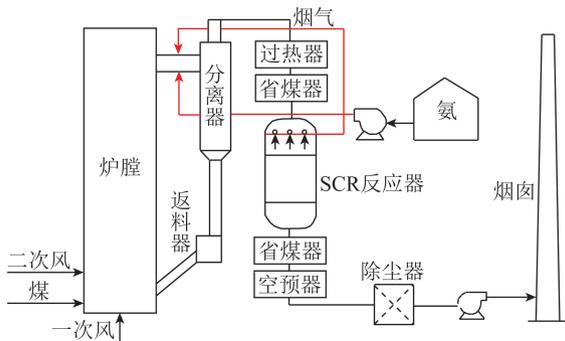
该技术将低氮燃烧技术和SNCR技术结合起来

(图2)。通过控制和优化 CFB 锅炉运行参数降低 $\text{NO}_x$ 原始排放量,同时向旋风分离器入口烟道内注入氨,在高温环境下,氨与生成的 $\text{NO}_x$ 发生反应, $\text{NO}_x$ 被还原成 $\text{N}_2$ 。为满足超低排放,通常采取过量喷氨的方式以提高脱硝效率,造成氨逃逸量超标<sup>[46]</sup>。为解决这一问题,大多数研究致力于改善旋风分离器处 SNCR 脱硝反应环境,包括调整喷氨口位置、优化还原剂粒径以及提高烟气温度等。该技术系统简单、占地空间小、投资少,且不使用催化剂,因此成本相对较低,适用于低挥发分煤和小型机组。

图2 低氮燃烧+SNCR超低 $\text{NO}_x$ 排放技术Fig.2 Low  $\text{NO}_x$  combustion + SNCR technology

### 1.1.3 低氮燃烧+SNCR-SCR技术

该技术将低氮燃烧技术与 SNCR-SCR 技术结合,如图3所示。通过控制炉内参数降低 $\text{NO}_x$ 原始排放量,同时在旋风分离器入口烟道注入还原剂将生成的 $\text{NO}_x$ 还原成 $\text{N}_2$ ,逸出的氨气和一部分 $\text{NO}_x$ 在催化剂作用下再次进行还原反应实现深度脱硝。采用 SNCR-SCR 技术可将 SNCR 技术的低费用优势与 SCR 技术的脱硝高效率优势有机结合,解决 SNCR 技术中的氨泄漏问题,且空间适应性强,运用较灵活。该技术适用于中等挥发分煤和中等机组。

图3 低氮燃烧+SNCR-SCR超低 $\text{NO}_x$ 排放技术Fig.3 Low  $\text{NO}_x$  combustion + SNCR-SCR technology

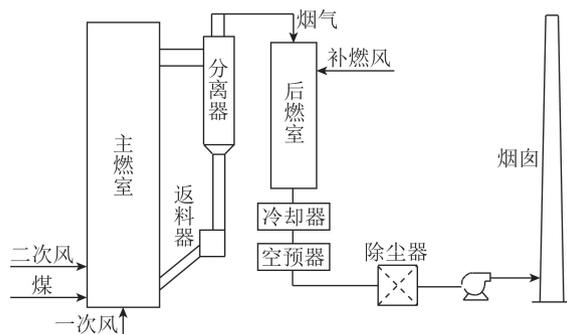
综上,这3种技术针对不同燃料均可满足超低排放,实际应用中,应根据燃烧情况及燃料特性选取最佳超低排放技术。由于这3种技术都采用二级脱硝,增加了烟气处理装置,因此成本较高。

## 1.2 CFB 超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术

CFB 超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术是指在不使用烟气脱硝装置的情况下使锅炉排烟中 $\text{NO}_x$ 含量达到超低排放要求。目前,能够达到超低排放标准的 CFB 超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术主要有:循环流化床高温后燃技术<sup>[47-50]</sup>、基于流态重构的循环流化床燃烧技术<sup>[51-55]</sup>和解耦燃烧技术。

### 1.2.1 循环流化床高温后燃技术

循环流化床高温后燃技术是由中国科学院工程热物理研究所提出,该技术将煤的燃烧分为2部分:CFB 炉内燃烧和后燃室燃烧,技术原理如图4所示。该技术首先通过控制 CFB 炉膛的一、二次风量等参数来实现全炉膛的还原性气氛,使进入炉膛的煤在弱还原性气氛下燃烧,从而抑制 $\text{NO}_x$ 的生成。由于煤的不完全燃烧会产生大量 CO,这些 CO 及细小的焦炭颗粒从旋风分离器逸出进入后燃室。同时,在旋风分离器出口烟道通入后燃风,烟气中未完全燃烧的 CO 和焦炭在后燃室进一步燃烧,从而保证了煤粉的燃烧效率,实现循环流化床的超低 $\text{NO}_x$ 排放。Zhou 等<sup>[47]</sup>详细介绍了该技术,并利用其研究了神木半焦燃烧特性和 $\text{NO}_x$ 排放特性,研究发现使用该技术后, $\text{NO}_x$ 原始排放量只有 $51 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ,燃烧效率高达98.6%。Zhou 等<sup>[49]</sup>研究了内蒙褐煤的燃烧特性和 $\text{NO}_x$ 排放特性,发现通过优化流化床炉内和后燃室运行参数使 $\text{NO}_x$ 原始排放下降到 $48.7 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ,达到超低排放标准。Xiao 等<sup>[50]</sup>研究了给煤位置和后燃风布置对神木半焦燃烧特性和 $\text{NO}_x$ 排放特性的影响,通过增加后燃风级数,使 $\text{NO}_x$ 最终排放量下降到 $49.6 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ,达到超低排放要求。目前该高温后燃技术应用于 $75 \text{ t}/\text{h}$ 煤泥循环流化床锅炉,实现了 $\text{NO}_x$ 原始排放 $38 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

图4 循环流化床高温后燃超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术Fig.4 Technology of ultra-low  $\text{NO}_x$  emission of high temperature post-combustion of CFB

### 1.2.2 基于流态重构的循环流化床燃烧技术

基于流态重构的循环流化床燃烧技术原理如图

5所示,其核心是通过提高旋风分离器分离效率,增加床内有效细颗粒存有量,增大物料循环倍率,提高炉膛上部稀相区颗粒浓度,从而使底部密相区未燃碳和CO等还原性物料上移,增强了炉膛空间的还原性气氛,抑制了炉内 $\text{NO}_x$ 生成。该方法主要是通过调节床料、循环灰粒径、床层压降、床温、炉膛出口氧含量、分离器出口灰颗粒粒度、一次风份额以及流化速度等锅炉运行参数,使床料平均粒度比传统循环流化床大幅减小。李竞岚等<sup>[51-52]</sup>从床层温度控制和氧化还原气氛调整等角度,论证了流态重构技术在强化CFB锅炉 $\text{NO}_x$ 低排放性能上具有一定优势,且该技术使淄博和力文的循环流化床实现了超低排放。Li等<sup>[51]</sup>利用该技术在220 t/h CFB锅炉上进行工程实践,燃烧烟煤和贫煤,使用石灰石脱硫时, $\text{NO}_x$ 排放量分别为49和46 mg/Nm<sup>3</sup>。

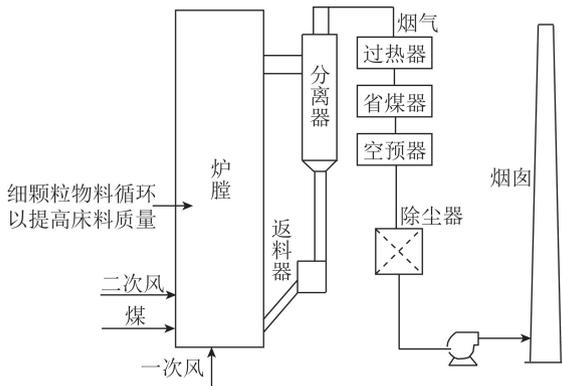


图5 基于流态重构的循环流化床超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术

Fig.5 Technology of ultra-low  $\text{NO}_x$  emission of CFB based on flow state reconstruction

### 1.2.3 解耦低氮燃烧技术

解耦低氮燃烧技术通过将燃烧过程分解为低温还原气氛下的部分热解气化和高温氧化条件下的可燃物燃尽2个过程,同时利用低温还原气氛下产生的还原性气体组分和半焦抑制高温氧化条件下燃烧时的 $\text{NO}_x$ 生成。韩振南等<sup>[56]</sup>研究了一种基于解耦燃烧技术的可实现固体燃料燃烧原始 $\text{NO}_x$ 超低排放

表2 烟气脱硫技术对比

Table 2 Comparison of technologies for the treatment of  $\text{SO}_2$  in flue gas

脱硫工艺	硫分适应性	脱硫效率/%	副产物	系统	投资及运行费用
半干法脱硫	中、低硫	≥95	脱硫灰	简单	低
湿法脱硫	高硫	≥98	石膏、脱硫废水	复杂	高

#### 2.1.1 炉内喷钙脱硫+烟气半干法脱硫技术

该技术结合了炉内喷钙脱硫和半干法脱硫技术(图7)。首先进行炉内喷钙脱硫,即通过向CFB锅炉炉膛内喷入石灰石降低部分 $\text{SO}_2$ 浓度,然后进行

的解耦燃烧方法,技术原理如图6所示。首先将煤热解,热解产物为焦油、半焦和少量热解气。焦油和热解气用于再燃脱硝;而半焦进入主燃区燃烧。由于主燃区的低温、低氧燃烧会产生大量CO,一方面抑制 $\text{NO}_x$ 生成,另一方面对生成的 $\text{NO}_x$ 进行还原,从而降低主燃区 $\text{NO}_x$ 浓度。随后烟气进入再燃区,由于焦油脱硝能力强,对烟气中 $\text{NO}_x$ 进一步还原。最后烟气进入燃尽区,在燃尽风条件下烟气中CO等完全燃烧。该技术通过焦炭还原和焦油再燃脱硝实现超低排放。

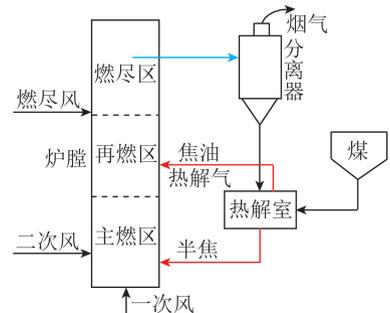


图6 解耦燃烧超低 $\text{NO}_x$ 排放技术原理示意

Fig.6 Technology of ultra-low  $\text{NO}_x$  emission of decoupling combustion

综上所述,循环流化床高温后燃技术和基于流态重构的循环流化床燃烧技术在中试装置与工业装置上已实现超低 $\text{NO}_x$ 原始排放,而解耦低氮燃烧技术在CFB锅炉中的实际应用效果还需工业验证。

## 2 CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术

### 2.1 常规CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术

为达到超低排放标准,现有CFB锅炉普遍采用“两级脱硫”,即采用炉内喷钙脱硫技术和炉外烟气脱硫技术。炉外烟气脱硫技术主要有2种:半干法脱硫和湿法脱硫,2种技术对比见表2。因此,常用的CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术也分为炉内喷钙脱硫+烟气湿法脱硫和炉内喷钙脱硫+烟气半干法脱硫2种。

炉后半干法脱硫。半干法脱硫是以循环流化床原理为基础,以干态消石灰粉作为吸收剂,通过吸收剂的多次再循环,在脱硫塔内延长吸收剂和烟气的接触时间,以到达高效脱硫的目的,同时大大提高了吸收

剂的利用率。通过化学反应,可有效去除烟气中的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 等气体,脱硫产物为干粉混合物,无二次污染,还可以二次利用。该技术脱硫效率高,投资成本较低,适用于中小机组与中低硫煤。

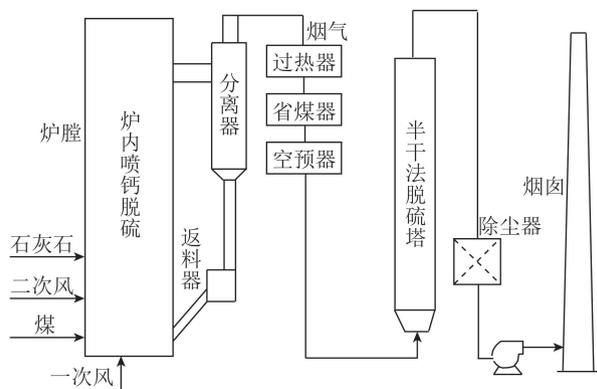


图7 炉内喷钙脱硫+烟气半干法脱硫超低排放技术

Fig.7 Injection calcium in furnace for desulphurization+ultra low emission technology of semi-dry flue gas desulfurization

### 2.1.2 炉内喷钙脱硫+烟气湿法脱硫技术

该技术结合了炉内喷钙脱硫和烟气湿法脱硫技术(图8)。首先向CFB锅炉炉膛内喷入石灰石、优化CFB锅炉运行参数等进行炉内部分脱硫,然后进行烟气湿法脱硫。湿法脱硫技术是将石灰石粉加水制成浆液作为吸收剂泵入吸收塔与烟气充分接触混合,烟气中的 $\text{SO}_2$ 与浆液中的 $\text{CaCO}_3$ 以及从塔下部鼓入的空气进行氧化反应生成 $\text{CaSO}_4$ , $\text{CaSO}_4$ 达到一定饱和度后,结晶形成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。脱硫后的烟气经过除雾器除去雾滴,再经过换热器加热升温后,由烟囱排入大气。该工艺脱硫效率极高,且技术先进可靠,但系统复杂、设备庞大、耗水量大、一次性投资高,一般适用于大型电厂与高硫煤。

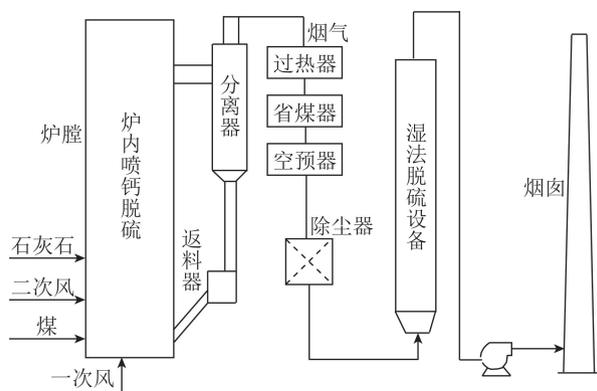


图8 炉内喷钙脱硫+烟气湿法脱硫超低排放技术

Fig.8 Injection calcium in furnace for desulphurization+ultra low emission technology of wet flue gas desulfurization

综上所述,这2种常规技术都可以使CFB锅炉满足超低排放标准,但炉内喷钙脱硫+烟气湿法脱硫技术脱硫效率更高。燃烧高硫煤时,应使用炉内

喷钙脱硫+烟气湿法脱硫技术,燃烧中低硫煤时,可采用炉内喷钙脱硫+烟气半干法脱硫技术。

## 2.2 CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术

常规的CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术需进行二次脱硫,且必须使用尾部烟气脱硫装置,增加了CFB锅炉脱硫成本。如何在不使用尾部烟气脱硫装置的情况下,达到超低 $\text{SO}_2$ 排放受到更多关注。目前,CFB超低 $\text{SO}_2$ 排放技术有2种:超细石灰石和燃烧半焦脱硫技术。

### 2.2.1 超细石灰石脱硫技术

超细石灰石指的是 $d_{50} < 15 \mu\text{m}$ 、 $d_{90} < 45 \mu\text{m}$ 的石灰石粉,明显小于常规CFB炉内脱硫用石灰石粒径<sup>[57]</sup>。其原理是减小石灰石粒径,最大限度地增加石灰石的比表面积,超细石灰石脱硫技术如图9所示。超细石灰石比表面积显著增大,反应速率加快。但由于石灰石粒径减小,炉内停留时间缩短。Fan等<sup>[58]</sup>认为使用高反应活性的超细石灰石,在极短时间内完成固硫反应可以解决停留时间不足的问题。岳光溪等<sup>[59]</sup>研究表明,将飞灰切割粒径降至 $10 \mu\text{m}$ ,循环灰的中位粒径降低到 $100 \mu\text{m}$ ,则在 $\text{Ca}/\text{S} = 1.5$ 时, $\text{SO}_2$ 浓度 $< 50 \text{mg}/\text{m}^3$ 。

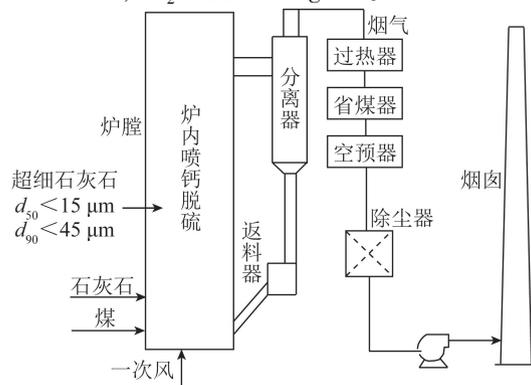


图9 超细石灰石超低排放技术

Fig.9 Technology of ultra-low emission of ultra-fine limestone

### 2.2.2 半焦燃烧脱硫技术

热解作为一种重要的煤洁净技术处理过程,不仅可实现煤的分级利用,提高产品附加值,还减少了原料中污染物向大气的排放<sup>[60]</sup>。燃烧半焦脱硫技术如图10所示,首先将低阶煤通过热解制成低硫洁净半焦。与煤相比,半焦中硫显著减少。然后,将热解制成的低硫半焦用作循环流化床锅炉的燃料。该技术通过将含硫量较高的煤转化为低硫半焦,然后燃烧低硫半焦,在理论上易实现超低 $\text{SO}_2$ 原始排放,但还需进一步工业验证。

## 3 CFB炉内超低 $\text{NO}_x$ / $\text{SO}_2$ 排放技术

在不使用烟气脱硫脱硝装置的情况下,如何使

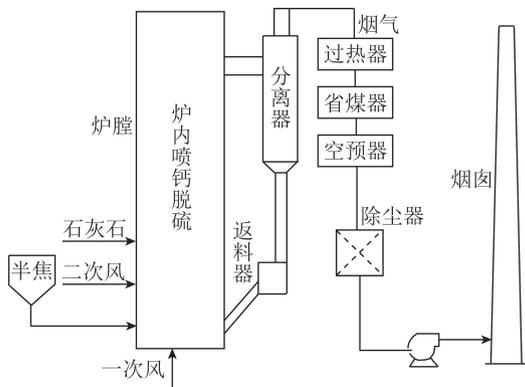


图10 燃烧半焦脱硫超低排放技术

Fig.10 Technology of ultra-low emission of char combustion for desulfurization

$\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 同时满足超低排放是近几年的研究热点与难点,即发展CFB炉内超低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 的协同控制技术。大量研究表明,炉内脱硫和脱氮存在矛盾关系,即氧化氛围可提高炉内脱硫效率,但 $\text{NO}_x$ 原始排放增加,而还原氛围可有效抑制 $\text{NO}_x$ 生成,但炉内脱硫效率明显下降。为实现CFB炉内超低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 排放,将CFB超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术和超细石灰石相结合的技术具有较大潜力,即循环流化床高温后燃技术与超细石灰石脱硫技术;同时将CFB超低

$\text{NO}_x$ 燃烧技术与半焦燃烧脱硫技术结合也可能实现超低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 排放。因此,这2类技术都应进一步开展更深入的系统研究与工业验证。

由于2类技术都需使用超细石灰石,因此需解决以下关键问题:①研发高效率旋风分离器。高效旋风分离器是保证超细石灰石高效脱硫的前提,旋风分离器效率越高,超细石灰石脱硫效率越高。②保证超细石灰石在大截面炉膛内的分布均匀性。循环流化床锅炉正朝着大型化发展,炉膛截面越来越大,如何实现超细石灰石在大型炉膛内横向的均匀混合成为难点。

#### 4 CFB超低 $\text{NO}_x/\text{SO}_2$ 排放技术

根据是否使用烟气处理装置,超低排放技术可以分为2类:一种是使用烟气处理装置的常规CFB超低 $\text{NO}_x/\text{SO}_2$ 排放技术,另一类是不使用烟气处理装置的CFB超低 $\text{NO}_x/\text{SO}_2$ 排放技术。与常规CFB超低 $\text{NO}_x/\text{SO}_2$ 排放技术相比,CFB超低 $\text{NO}_x/\text{SO}_2$ 排放技术有很多优势:由于不使用烟气处理装置,初投资和运行成本明显降低,操作简单,占地面积显著减小等,详细对比见表3和表4。

表3  $\text{NO}_x$ 超低排放技术对比Table 3 Comparison of technologies of ultra-low  $\text{NO}_x$  emission

项目	$\text{NO}_x$ 超低排放技术	基本原理	优点	缺点	投资成本	研究阶段
常规CFB超低 $\text{NO}_x$ 排放技术 (两级脱硝)	低氮燃烧+SCR技术	低氮燃烧、催化还原	脱硝效率高	消耗大量催化剂、占地空间大	高	成熟
	低氮燃烧+SNCR技术	低氮燃烧、非催化还原	不需要使用催化剂、占地空间小	脱硝效率低、氨逃逸	低	成熟
	低氮燃烧+SCR-SNCR技术	低氮燃烧、非催化与催化还原	使用少量催化剂、占地空间较小	投资成本较高	中	成熟
CFB超低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术	循环流化床高温后燃技术	全炉膛还原气氛燃烧	脱硝效率高、脱硝潜力大、投资和运行成本低	未能进一步开发协同脱硝	很低	试验研究 工业应用
	基于流态重结构的循环流化床燃烧技术	扩大炉膛内还原区	脱硝效率高、操作简单、投资和运行成本低	脱硝潜力有限	很低	试验研究 工业应用
	解耦低氮燃烧技术	焦炭还原和焦油再燃脱硝	操作简单、投资和运行成本低	未进行工业验证	很低	试验研究

## 5 结语与展望

本文论述了现有的CFB超低 $\text{NO}_x$ 与 $\text{SO}_2$ 排放技术,发现在不使用烟气净化装置的情况下, $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 相应的超低排放控制技术都不够成熟;而对于CFB超低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 协同控制技术的报道甚少。因此,后期应加强以下研究:

1)开发高效旋风分离器。高效旋风分离器不

仅可以提升CFB燃烧效率,也是保证超细石灰石高效脱硫的前提。分离器效率越高,CFB燃烧效率和超细石灰石脱硫效率越高。

2)如何保证超细石灰石在大截面炉膛内的分布均匀性是关键。超细石灰石可大大减弱炉内脱硝的消极影响,也可维持较高脱硫效率,但随着循环流化床锅炉大型化发展,炉膛截面越来越大,如何实现超细石灰石在大型炉膛内横向的均匀混合是难点。

表4 SO<sub>2</sub>超低排放技术对比Table 4 Comparison of technologies of ultra-low SO<sub>2</sub> emission

项目	SO <sub>2</sub> 超低排放技术	基本原理	优点	缺点	投资成本	研究阶段
常规 CFB 超低 SO <sub>2</sub> 排放技术(两级脱硫)	炉内喷钙脱硫+半干法脱硫	炉内喷钙脱硫、烟气半干法脱硫	脱硫效率较高,无二次污染	易堵塞、脱硫灰利用率低	低	成熟
	炉内喷钙脱硫+湿法脱硫	炉内喷钙脱硫、烟气湿法脱硫	脱硫效率高、煤种适应性强	占地面积大,设备腐蚀	高	成熟
CFB 超低 SO <sub>2</sub> 排放技术	超细石灰石脱硫	增加石灰石比表面积	操作简单、投资和运行成本低	对旋风分离器效率要求高	很低	试验研究
	半焦燃烧脱硫	转化为低硫燃料	操作简单、投资和运行成本低	缺乏工业验证	很低	试验研究

3) 发展 CFB 炉内超低 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 原始排放协同控制技术。目前控制单一气体使其满足超低排放的技术相对成熟,但如何同时控制 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 使之满足超低排放标准是技术难点。

4) 超低排放条件下的燃料适应性。目前 CFB 炉内超低排放技术局限于某些特定燃料可以达到超低排放,针对其他特殊燃料,NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 能否达到超低排放仍需进一步深入研究。

5) 低负荷下 CFB 炉内超低排放技术。锅炉在低负荷下如何实现超低排放还需进一步深入研究。

#### 参考文献 (References):

- [1] 黄中,杨娟,车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状[J]. 热力发电,2019,48(6):1-8.  
HUANG Zhong, YANG Juan, CHE Defu. Application and development status of large-scale CFB boilers [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 1-8.
- [2] 董清梅,颜河恒. 循环流化床锅炉的发展现状及前景[J]. 锅炉制造,2005(4):72-74.  
DONG Qingmei, YAN Heheng. Status and prospect of circulating fluidized bed boiler [J]. Boiler Manufacturing, 2005(4): 72-74.
- [3] 骆仲泐,何宏舟,王勤辉,等. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 动力工程,2004,24(6):761-767.  
LUO Zhongyong, HE Hongzhou, WANG Qinhuai, et al. Status quo-technology of circulating fluidized bed boiler and its prospects of development [J]. Power Engineering, 2004, 24(6): 761-767.
- [4] 张文忠. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 科技创新导报,2019,16(5):72-73.  
ZHANG Wenzhong. Current status and development prospects of circulating fluidized bed boiler technology [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(5): 72-73.
- [5] KOORNNEEF J, JUNGINGER M, FAAIJ A. Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(1): 19-55.
- [6] SVOBODA K, POHORELY M. Influence of operating conditions and coal properties on NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in pressurized fluidized bed combustion of subbituminous coals [J]. Fuel, 2004, 83(7/8): 1095-1103.
- [7] GUNGOR A. Simulation of NO<sub>x</sub> emission in circulating fluidized beds burning low-grade fuels [J]. Energy and Fuels, 2009, 23(5): 2475-2481.
- [8] GIBBS B M, PEREIRA F J, BEER J M. The influence of air staging on the NO emission from a fluidized bed coal combustor [J]. Symposium (International) on Combustion, 1977, 16(1): 461-474.
- [9] MEREB J B, WENDT J O L. Air staging and reburning mechanisms for NO<sub>x</sub> abatement in a laboratory coal combustor [J]. Fuel, 1994, 73(7): 1020-1026.
- [10] SPLIETHOFF H, GREUL U, RÜDIGER H, et al. Basic effects on NO<sub>x</sub> emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility [J]. Fuel, 1996, 75(5): 560-564.
- [11] LUPUÁÑEZ C, DÍEZ L I, ROMEO L M. Influence of gas-staging on pollutant emissions from fluidized bed oxy-firing [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 256: 380-389.
- [12] YANG X, LIU B, SONG W, et al. Process simulation of emission and control for NO and N<sub>2</sub>O during coal combustion in a circulating fluidized bed combustor based on Aspen Plus [J]. Energy and Fuels, 2011, 25(8): 3718-3730.
- [13] WANG X S, GIBBS B M, RHODES M J. Impact of air staging on the fate of NO and N<sub>2</sub>O in a circulating fluidized-bed combustor [J]. Combustion and Flame, 1994, 99(3/4): 508-515.
- [14] ERSOY L E, GOLRIZ M R, KOKSAL M, et al. Circulating fluidized bed hydrodynamics with air staging: An experimental study [J]. Powder Technology, 2004, 145(1): 25-33.
- [15] KOKSAL M, GOLRIZ M R, HAMDULLAHPUR F. Thermal aspects of a circulating fluidized bed with air staging [J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(10): 923-935.
- [16] DE DIEGO L F, LONDONO C A, WANG X S, et al. Influence of operating parameters on NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O axial profiles in a circulating fluidized bed combustor [J]. Fuel, 1996, 75(8): 971-978.
- [17] LYNKFELT A, ÅMAND L E, GUSTAVSSON L, et al. Methods for reducing the emission of nitrous oxide from fluidized bed combustion [J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(6/7/8): 1297-1302.
- [18] TOURUNEN A, SAASTAMOINEN J, NEVALAINEN H. Experimental trends of NO in circulating fluidized bed combustion [J]. Fuel, 2009, 88(7): 1333-1341.
- [19] 贾海娟. SCR 烟气脱硝技术及其在燃煤电厂的应用[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(6): 10-11.

- JIA Haijuan. Application of SCR flue gas denitrification technology in coal-fired power plants [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2012, 28(6): 10-11.
- [20] 刘清雅, 刘振宇, 李成岳.  $\text{NH}_3$  在选择性催化还原 NO 过程中的吸附与活化 [J]. *催化学报*, 2006, 27(7): 636-646.
- LIU Qingya, LIU Zhenyu, LI Chengyue. Adsorption and activation of  $\text{NH}_3$  during selective catalytic reduction of NO by  $\text{NH}_3$  [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2006, 27(7): 636-646.
- [21] 马双忱, 金鑫, 孙云雪, 等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制 [J]. *热力发电*, 2010, 39(8): 12-17.
- MA Shuangchen, JIN Xin, SUN Yunxue, et al. The formation mechanism of ammonium bisulfate in scr flue gas denitrification process and control thereof [J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(8): 12-17.
- [22] 宣小平, 姚强, 岳长涛, 等. 选择性催化还原法脱硝研究进展 [J]. *煤炭转化*, 2002, 25(3): 26-31.
- XUAN Xiaoping, YAO Qiang, YUE Changtao, et al. Progress in study of the selective catalytic reduction of  $\text{NO}_x$  [J]. *Coal Conversion*, 2002, 25(3): 26-31.
- [23] 胡永锋, 白永锋. SCR 法烟气脱硝技术在火电厂的应用 [J]. *节能技术*, 2007(2): 152-156, 181.
- HU Yongfeng, BAI Yongfeng. SCR flue gas denitrification technology and its application [J]. *Energy Conservation Technology*, 2007(2): 152-156, 181.
- [24] 路涛, 贾双燕, 李晓芸. 关于烟气脱硝的 SNCR 工艺及其技术经济分析 [J]. *现代电力*, 2004, 21(1): 17-22.
- LU Tao, JIA Shuangyan, LI Xiaoyun. Techno-economic analysis for process and application of SNCR [J]. *Modern Electric Power*, 2004, 21(1): 17-22.
- [25] 王文选, 肖志均, 夏怀祥. 火电厂脱硝技术综述 [J]. *电力设备*, 2006, 7(8): 1-5.
- WANG Wenxuan, XIAO Zhijun, XIA Huaixiang. A summary of denitrification technology of thermal power plants [J]. *Electrical Equipment*, 2006, 7(8): 1-5.
- [26] 顾卫荣, 周明吉, 马薇. 燃煤烟气脱硝技术的研究进展 [J]. *化工进展*, 2012, 31(9): 2084-2092.
- GU Weirong, ZHOU Mingji, MA Wei. Technology status and analysis on coal-fired flue gas denitrification [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(9): 2084-2092.
- [27] 姜鹏志. 循环流化床锅炉低  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  emission [J]. *Electric Power Technology*, 2010, 19(6): 6-10.
- [28] 李辉. 循环流化床锅炉低  $\text{NO}_x$  排放特性及利用 SNCR 脱氮技术分析 [J]. *化工设计通讯*, 2017, 43(9): 18, 52.
- LI Hui. Low  $\text{NO}_x$  emission characteristics of circulating fluidized bed boilers and analysis by SNCR denitrification [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2017, 43(9): 18, 52.
- [29] 蔡小峰, 李晓芸. SNCR-SCR 烟气脱硝技术及其应用 [J]. *电力环境保护*, 2008, 24(3): 26-29.
- CAI Xiaofeng, LI Xiaoyun. Hybrid SNCR-SCR denitrification technique and its application [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2008, 24(3): 26-29.
- [30] 刘钦成. SNCR-SCR 烟气脱硝技术及其应用研究 [J]. *资源节约与环保*, 2018(3): 3, 7.
- LIU Qincheng. SNCR-SCR flue gas denitrification technology and its application research [J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2018(3): 3, 7.
- [31] 蔡昕, 唐建成, 曹红加. 联合脱硝技术在燃煤锅炉脱硝改造中的应用 [J]. *华北电力技术*, 2010(12): 53-56.
- CAI Xin, TANG Jiancheng, CAO Hongjia. Application of denitrification technique combined SNCR & SCR in coal-fired boiler [J]. *North China Electric Power*, 2010(12): 53-56.
- [32] 蔡辉, 冯金洋, 杨义. 联合脱硝技术在燃煤锅炉脱硝改造中的应用 [J]. *甘肃科技*, 2016, 32(3): 32-33.
- CAI Hui, FENG Jinyang, YANG Yi. Application of combined denitrification technology in denitrification reformation of coal-fired boiler [J]. *Gansu Science and Technology*, 2016, 32(3): 32-33.
- [33] 吕佳威. 联合脱硝技术在燃煤锅炉脱硝技术改造中的应用 [J]. *环境与发展*, 2018, 30(6): 85, 7.
- LYU Jiawei. Application of combined denitrification technology in denitrification of coal-fired boilers [J]. *Environment and Development*, 2018, 30(6): 85, 7.
- [34] 葛介龙, 张佩芳, 周钧忠, 等. 几种半干法脱硫工艺机理的探讨 [J]. *环境工程*, 2005, 23(4): 49-52.
- GE Jielong, ZHANG Peifang, ZHOU Diaozhong, et al. Research on mechanism of several semi-dry desulphurization processes [J]. *Environmental Engineering*, 2005, 23(4): 49-52.
- [35] 王文龙, 董勇, 任丽, 等. 干法/半干法脱硫中脱硫剂利用率及脱硫灰利用研究 [J]. *热能动力工程*, 2009, 24(4): 490-493.
- WANG Wenlong, DONG Yong, REN Li, et al. Study of the utilization rate of desulfurization agents and utilization of desulfurized ash during desulfurization by dry-method/semi-dry-method [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2009, 24(4): 490-493.
- [36] 郭斌洲. 半干法脱硫与湿法脱硫工艺选择比较 [J]. *山西焦煤科技*, 2010(S1): 65-67.
- GUO Binzhou. Selection comparison for semi-dry FGD and wet FGD process [J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2010(S1): 65-67.
- [37] 赵卷, 张少峰, 张占锋. 半干法烟气脱硫技术研究新进展 [J]. *河北工业大学学报*, 2003, 32(5): 81-86.
- ZHAO Juan, ZHANG Shaofeng, ZHANG Zhanfeng. The new development of semi-dry flue gas desulfurization technology [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2003, 32(5): 81-86.
- [38] 赵旭东, 高慧慧, 吴少华, 等. 干法、半干法(钙基)烟气脱硫技术研究进展及趋势 [J]. *化学工程*, 2003, 31(4): 64-67.
- ZHAO Xudong, GAO Jihui, WU Shaohua, et al. Development of dry and semi-dry (calcium base) flue gas desulfurization technology [J]. *Chemical Engineering*, 2003, 31(4): 64-67.
- [39] 袁莉莉. 半干法烟气脱硫技术研究进展 [J]. *山东化工*, 2009, 38(8): 19-22, 5.
- YUAN Lili. Research progress of semi-dry flue gas desulfurization technology [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2009, 38(8): 19-22, 5.
- [40] 张黎明, 李哲. 半干法烟气脱硫的研究进展 [J]. *科技创新与*

- 应用,2015(24):59-60.  
ZHANG Liming, LI Zhe. Research progress of semi-dry flue gas desulfurization [J]. Science & Technology Innovation and Application, 2015(24):59-60.
- [41] 任如山, 黄学敏, 石发恩, 等. 湿法烟气脱硫技术研究进展 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36(6):14-15.  
REN Rushan, HUANG Xuemin, SHI Faen, et al. Research development on the wet flue gas desulfurization [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(6):14-15.
- [42] 杜家芝, 曹顺安. 湿法烟气脱硫技术的现状与进展 [J]. 应用化工, 2019, 48(6):1495-1500.  
DU Jiazi, CAO Shun'an. Research status and progress of wet flue gas desulfurization technology [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(6):1495-1500.
- [43] 唐家彬, 李茹, 王欢, 等. 湿法烟气脱硫技术现状分析 [J]. 广东化工, 2015, 42(2):93-94.  
TANG Jiabin, LI Ru, WANG Huan, et al. Analysis of present status of wet flue gas desulfurization [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(2):93-94.
- [44] 宋华, 王雪芹, 赵贤俊, 等. 湿法烟气脱硫技术研究现状及进展 [J]. 化学工业与工程, 2009, 26(5):455-459.  
SONG Hua, WANG Xueqin, ZHAO Xianjun, et al. Progress in wet flue gas desulfurization technology [J]. Chemical Industry and Engineering, 2009, 26(5):455-459.
- [45] 陈永萧. 分析湿法烟气脱硫技术的研究现状及进展 [J]. 建材与装饰, 2017(18):170-171.  
CHEN Yongxiao. Research status and progress of wet flue gas desulfurization technology [J]. Building Material & Decoration, 2017(18):170-171.
- [46] 杨旭. 循环流化床锅炉低氮燃烧与 SNCR 脱硝耦合技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.  
YANG XU. Coupling research of low nitrogen oxides combustion and SNCR denitrification in a circulating fluidized bed boiler [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [47] ZHOU T, GONG Z, LU Q, et al. Experimental study on enhanced control of NO<sub>x</sub> emission from circulating fluidized bed combustion [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(6):3634-3639.
- [48] GONG Z, ZHOU T, LU Q, et al. Combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics of Shenmu char in a circulating fluidized bed with post-combustion [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(1):31-38.
- [49] ZHOU T, LU Q, CAO Y, et al. Study on the combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics of low rank coal in a circulating fluidized bed with post-combustion [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, 95(12):2333-2340.
- [50] XIAO Y, SONG G L, SONG W J, et al. Influence of feeding position and post-combustion air arrangement on NO<sub>x</sub> emission from circulating fluidized bed combustion with post-combustion [J]. Fuel, 2020, 269:117394.
- [51] LI J J, ZHANG M, YANG H R, et al. The theory and practice of NO<sub>x</sub> emission control for circulating fluidized bed boilers based on the re-specification of the fluidization state [J]. Fuel Processing Technology, 2016, 150:88-93.
- [52] 李竞发, 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 NO<sub>x</sub> emission characteristic of low energy consumption CFB boilers [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(4):293-298.
- [53] 黄淮, 赵磊, 刘明飞, 等. 节能型循环流化床锅炉低氮氧化物排放的分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(23):5024.  
HUANG Huai, ZHAO Lei, LIU Mingfei, et al. Low NO<sub>x</sub> emission characteristic of low energy consumption CFB boilers [J]. Civil Engineering Technology and Design, 2017(23):5024.
- [54] KE X, CAI R, ZHANG M, et al. Application of ultra-low NO<sub>x</sub> emission control for CFB boilers based on theoretical analysis and industrial practices [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 181:252-258.
- [55] 葛星垣. 基于流态重构的节能超低排放循环流化床锅炉技术 [J]. 机械管理开发, 2018, 33(5):36-37, 61.  
GE Xingyuan. Technology of Energy-saving ultra-low emission circulating fluidized bed boiler based on flow state reconstruction [J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33(5):36-37, 61.
- [56] 韩振南, 王超, 许光文, 等. 实现固体燃料燃烧原始氮氧化物超低排放的解耦燃烧方法; CN110925749A [P]. 2020-03-27.  
HAN Zhennan, WANG Chao, XU Guangwen, et al. Decoupling combustion method capable of achieving ultra-low emissions of primary nitrogen oxide generated by combustion of solid fuel; CN110925749A [P]. 2020-03-27.
- [57] 蔡润夏, 柯希玮, 葛荣存, 等. 循环流化床超细石灰石炉内脱硫研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10):3042-3048, 3155.  
CAI Runxia, KE Xiwei, GE Rongcun, et al. The in-situ desulfurization with ultra-fine limestone for circulating fluidized bed boilers [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10):3042-3048, 3155.
- [58] FAN L S, JIANG P, AGNIHOTRI R, et al. Dispersion and ultra-fast reaction of calcium-based sorbent powders for SO<sub>2</sub> and air toxics removal in coal combustion [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(22):5585-97.
- [59] 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, LU 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.
- [60] 雷佳莉, 严东. 煤热解过程中硫的析出规律研究进展 [J]. 河北化工, 2012, 35(2):10-12, 36.  
LEI Jiali, YAN Dong. Research development of sulfur release from coal in pyrolysis process [J]. Hebei Huagong, 2012, 35(2):10-12, 36.