

# 循环流化床燃烧低污染排放技术研究展望

柯希玮<sup>1,2</sup>, 蒋苓<sup>1,2</sup>, 吕俊复<sup>1,2</sup>, 岳光溪<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 在污染物排放标准日趋严格、2060年前实现碳中和的背景下, 深度挖掘循环流化床(CFB)燃烧技术的低污染排放潜力, 进一步提高CFB锅炉的市场竞争力, 对于煤炭清洁高效利用、能源转型升级具有重要意义。本文在阐述CFB燃烧污染物排放特性的基础上, 分析了主流CFB锅炉低污染排放技术及应用, 结合我国能源发展战略和相关政策, 提出了CFB燃烧在污染物排放控制技术方面的发展建议。研究认为, 需大力开发炉内原始低排放CFB燃烧技术, 在保证锅炉效率的前提下, 通过流态重构、燃烧组织来突破CFB锅炉污染物排放极限。着眼于煤炭能源长远发展, 支持与超临界/超超临界, 智能运行, 碳捕集、利用与封存, 储能等技术高度结合的新一代超低排放CFB燃烧技术研发; 加快对现存中小容量CFB锅炉的优化升级; 发挥CFB燃烧燃料适应性广的优势, 推广生物质燃烧发电, 促进对低热值燃料、城市垃圾、各工业废弃物的低成本高效清洁消纳; 挖掘CFB锅炉的深度调峰能力并保持低污染排放性能, 提高运行灵活性及对新能源的消纳能力; 加强CFB燃烧脱硫灰渣的综合利用, 关注N<sub>2</sub>O排放问题。还需从全局角度合理制定污染物排放标准和相关政策, 引导包括CFB燃烧在内的能源行业健康发展。

**关键词:** 煤炭清洁利用; 循环流化床; 污染控制; 碳中和; 燃料适应性; 新能源消纳

**中图分类号:** TK229 **文献标识码:** A

## Prospects for the Low Pollutant Emission Control of Circulating Fluidized Bed Combustion Technology

Ke Xiwei<sup>1,2</sup>, Jiang Ling<sup>1,2</sup>, Lyu Junfu<sup>1,2</sup>, Yue Guangxi<sup>1,2</sup>

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the pollutant emission standards becoming increasingly stringent and considering the pressure of carbon neutral by 2060, the low pollutant emission potential of circulating fluidized bed (CFB) combustion technology needs to be further exploited, thus to promote the market competitiveness of CFB boilers; this is critical for the clean and efficient utilization of coal as well as for the energy transformation in China. In this article, we summarize the pollutant emission characteristics of CFB combustion, and review the development of major technologies for CFB boiler emission control. Based on the energy development strategies and corresponding policies in China, development suggestions are proposed for reducing pollutant emission of the CFB combustion technology. The most significant approach is to push the limits of original pollutant emission for CFB combustion by re-specifying the fluidization state and through in-furnace combustion adjustment, while the boiler thermal efficiency should be ensured. For the long-term development

**收稿日期:** 2021-01-11; **修回日期:** 2021-03-21

**通讯作者:** 吕俊复, 清华大学能源与动力工程系教授, 研究方向为循环流化床燃烧理论与技术; E-mail: lvjyf@mail.tsinghua.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“循环流化床燃烧技术的发展前景”(2020-XY-10)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

of coal energy, the new-generation CFB combustion technology with ultra-low emission should be researched and developed while combining with technologies such as supercritical/ultra-supercritical, intelligent operation, carbon capture, utilization, and storage, and energy storage technologies. The existing CFB boilers with small or medium capacity should also be upgraded. Considering the fuel flexibility of CFB combustion, biomass power generation should be promoted to realize low-cost and high-efficiency consumption of low-heat value fuels, urban refuse, industrial wastes, etc. The peak load regulation capacity and low pollutant emission property of the CFB boilers should be promoted to improve operation flexibility and renewable energy consumption. Moreover, the desulphurization ash produced in CFB combustion should be comprehensively utilized, and the  $N_2O$  emission problem is also significant. The pollutant emission standards and related policies need to be formulated from an overall perspective to guide the healthy development of the energy industry.

**Keywords:** clean coal utilization; circulating fluidized bed (CFB); pollution control; carbon neutral; fuel flexibility; renewable energy consumption

## 一、前言

2019 年,我国一次能源消费总量约为  $3.97 \times 10^9$  tce,煤炭消费占比达 68.6%,远超同期全球煤炭消费比重(27%) [1,2]。尽管在“双碳”目标压力下必须控制煤炭等化石能源消耗,但出于能源安全、调峰等角度考虑,仍需保有一定的火力发电机组及供热机组。因此,煤炭资源的清洁开发利用是我国能源行业的必然发展趋势与长期研究热点 [3]。在各类洁净煤技术中,循环流化床(CFB)燃烧技术因其燃烧效率高、负荷调节性能好、燃料适应性广等特点,逐步发展成为主流的燃煤发电技术。我国自 20 世纪 80 年代从国外引进小型中压 CFB 锅炉技术开始,经过持续努力,在 CFB 燃烧技术方面取得长足进步。2009 年,世界首台 600 MW 超临界 CFB 锅炉在国电四川电力股份有限公司白马电厂成功投运;近年来百兆瓦级 CFB 锅炉机组投产容量增长约为 6 GW/a,未来仍有广阔的市场空间 [4,5]。

CFB 锅炉的突出优势在于以较低成本实现污染物排放控制 [6,7]。在燃烧过程中,向炉内添加合适粒度的石灰石颗粒来引发固硫反应,可脱出烟气中的绝大部分  $SO_2$ 。对于  $NO_x$  排放,CFB 锅炉与煤粉炉相比,因燃烧温度适中且炉内温度分布均匀、燃烧区还原性气氛明显、存有大量还原性物料,具有低  $NO_x$  排放的天然优势。大量运行实践表明,在床温设计合理、氧量调节得当、钙硫比适中的条件下,CFB 锅炉的炉内脱硫效率通常为 85%~95%, $NO_x$  原始排放可控制在  $200 \text{ mg/m}^3$  以内,能够满足大多数国家和地区的污染物排放要求。

也要注意,随着生态文明建设得到更多重视,特别是  $CO_2$  减排形势严峻,近年来对传统化石能源的利用收紧且逐步朝着精细化方向发展。在我国,淘汰落后产能、推进煤电机组综合节能改造的步伐不断加快,燃煤大气污染物排放标准更为严格;2013 年兴起的超低排放标准( $NO_x < 50 \text{ mg/Nm}^3$ 、 $SO_2 < 35 \text{ mg/Nm}^3$ 、烟尘  $< 10 \text{ mg/Nm}^3$ )已成为新增发电项目核准、现有火电厂继续运行的“通行证”。以尽可能低的成本来降低各种污染物的排放水平,成为驱动 CFB 燃烧技术未来发展的主要动力。

本文对主流 CFB 锅炉污染物排放控制技术进行梳理,重点分析新形势下 CFB 燃烧技术需求及相应的污染物排放问题,就 CFB 技术应用方向进行探讨,提出相关发展建议。

## 二、CFB 燃烧低污染排放技术的发展现状

### (一) 低氮燃烧和炉内脱硫

面对极为严格的超低排放要求,传统的低氮燃烧、炉内脱硫技术面临挑战。燃用高硫煤时仅靠炉内脱硫难以保证  $SO_2$  达标排放;当设计偏差导致床温过高、一次风比例过大或燃用高挥发分褐煤时, $NO_x$  原始排放可能远超限值。此外,低氮燃烧和炉内脱硫之间存在一定矛盾,前者重在降低燃烧中氧量并尽量强化还原性气氛,后者则需要尽可能在氧化性条件下进行。在实际运行中发现,向 CFB 锅炉内投放石灰石会造成  $NO_x$  排放升高,特别是燃用高挥发分煤种 [8,9]。

强化低氮燃烧,优化炉内喷钙脱硫工艺,从源头上同步降低炉膛出口处  $NO_x$ 、 $SO_2$  排放浓度,仍

是当前研究和工程实践中的首选减排方案。例如，某超超临界 CFB 锅炉完全依靠炉内石灰石脱硫实现了  $\text{SO}_2$  达标排放，无任何尾部烟气脱硫措施 [10]，这对炉内脱硫效率提出高要求。已有研究 [11~13] 表明，通过流态重构、燃烧组织并配合采用超细石灰石，有可能实现  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  原始双超低排放。这将明显提高 CFB 锅炉在低成本污染控制方面的竞争力。

### (二) 烟气再循环

引入烟气再循环 (FGR) 系统后，利用尾部烟气低温低氧的特点，可在一定程度上降低炉膛底部燃烧区的温度、强化还原性气氛，从而有效抑制  $\text{NO}_x$  的原始生成。更重要的是，这种做法改善了 CFB 锅炉在低负荷工况下的运行性能，拓宽了深度调峰能力 [14,15]。FGR 系统已在一批工业 CFB 锅炉上得到成功应用。

需要注意的是，随着再循环烟气量的增加，流化风速增大，炉内设备的磨损有所加重；由于床温和密相区氧浓度的降低，可能导致未完全燃烧热损失增加，从而降低锅炉效率；再循环烟道、一次风室等处的腐蚀问题也需关注，避免风烟混合后温度低于酸露点；循环风机运行带来的额外电耗也是影响因素。为此，应综合考虑低负荷运行性能、低氮

燃烧和运行经济性等因素，合理设计再循环烟气量范围。

### (三) 尾部烟气污染治理技术

为确保电厂在所有工况下都能稳定维持污染物的超低排放水平，大多数 CFB 锅炉机组，尤其是大型超临界 / 超超临界锅炉都配有尾部烟气脱硫脱硝和除尘装置。常见的 CFB 锅炉脱硫脱硝技术路线如图 1 所示。

获得推广应用的烟气脱硝技术主要有：选择性非催化还原 (SNCR)、选择性催化还原 (SCR)、循环氧化吸收协同脱硝 (COA)。SNCR 技术因其投资和运行成本较低、系统简单，配合炉内低氮燃烧后基本能够实现  $\text{NO}_x$  达标排放，特别适合于存量锅炉的技术改造。相较而言，SCR 技术虽然投资成本偏高、系统布置比较复杂、存在催化剂中毒失效等问题，但脱硝效率高、效果稳定，对温度要求较低，工况适应性更好，尤其在低负荷下也能实现对  $\text{NO}_x$  的有效脱除。COA 工艺通常作为二级脱硝系统，搭配半干法脱硫塔等来进行组合使用，在中小型 CFB 锅炉上已有不少应用，但关于大型燃煤电站锅炉的报道尚不常见。

烟气脱硫技术中，石灰石 - 石膏湿法脱硫工艺因其技术成熟、脱硫效率很高、脱硫效果稳定、副

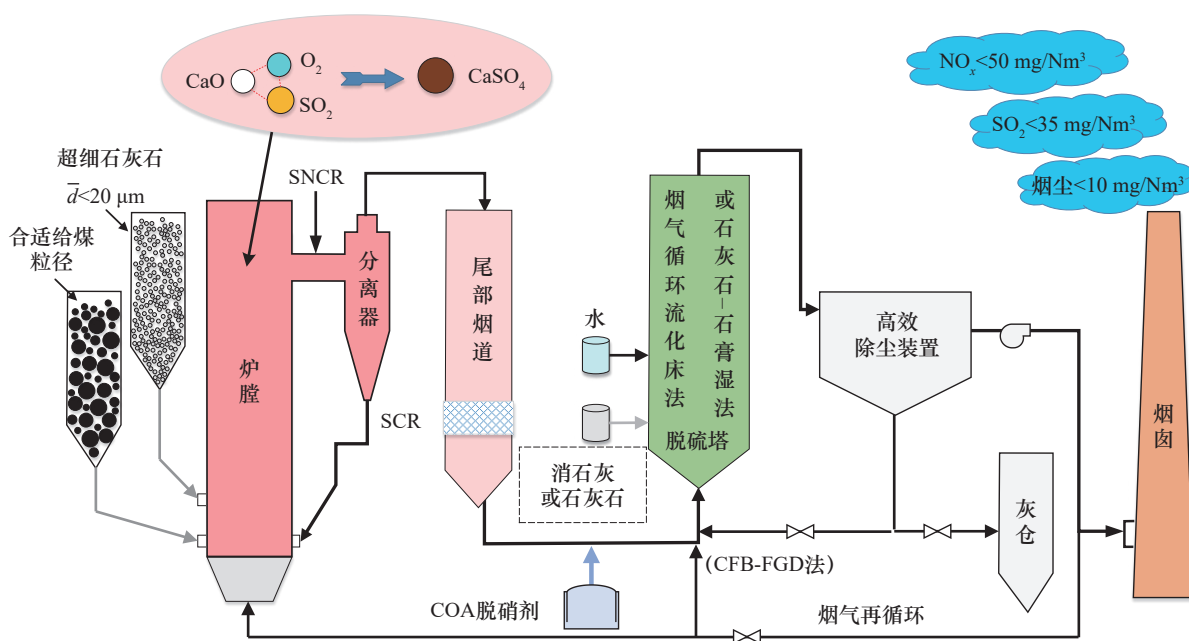


图 1 常见的循环流化床锅炉整体脱硫脱硝和除尘技术路线

产物石膏可以二次利用,在燃煤锅炉烟气脱硫市场中占有最高 [16]。烟气循环流化床半干法 (CFB-FGD) 脱硫工艺虽然相较湿法脱硫效率略低,但占地面积小、耗水量低,无脱硫废水和烟羽问题;可同时脱除  $\text{SO}_3$ 、重金属等,可直接利用炉内脱硫未反应完全的  $\text{CaO}$  颗粒,适合于 CFB 锅炉的超低排放技术路线 [17]。其他一些烟气脱硫技术,如海水法、喷雾干燥法、电子束法、氨法等,虽已有部分煤粉炉、工业窑炉采用,但很少有 CFB 锅炉应用的工程案例报道。

此外,解耦燃烧、高温低氧空气燃烧、双床-多床组合、多流程循环流化床等非常规 CFB 燃烧技术,虽然未达到工程成熟应用的程度,但也吸引了大批学者的关注 [18,19];已有一些实验室研究和小规模中试实验表明,这些新兴技术具有原始低污染排放的潜力。

### 三、CFB 燃烧低污染排放技术的应用方向探讨

#### (一) 降低污染物排放治理成本

随着超低排放要求的推行,加之未来可能面临更加严格的污染物排放标准,大批存量 CFB 锅炉,特别是中小型锅炉需要进行低污染排放技术改造。尾部烟气高效脱硫脱硝和除尘技术尽管能够保证绝大多数锅炉稳定达标排放,但明显增加了电厂投资规模和运行成本。如某燃用褐煤的大型 CFB 锅炉电厂,  $\text{NO}_x$  原始排放高达  $350\sim 450 \text{ mg/Nm}^3$ ,需要增设尾部 SCR 系统脱硝,运行费用约 1000 万元/年。这与 CFB 锅炉低污染排放控制的优势相悖,不利于电厂的可持续发展。因此,有必要探索适应性良好的 CFB 锅炉工程减排技术,尽可能以低的成本进行存量锅炉超低排放改造;同时寻求 CFB 燃烧技术的原理突破,开发新型低成本污染物控制技术。

#### (二) 脱硫灰渣利用

长期以来,燃煤电厂灰渣采用简单的堆放或填埋处理,占用了大量土地资源,增加了电厂运行费用和发电成本(土地征用费、填埋费等)。废渣含有的碱土金属、少量重金属物质等,对土壤、水体

也有不同程度的污染,可能带来一系列环境和社会问题。灰渣含有大量有效成分而未得到充分回收利用,造成资源的潜在浪费。随着能源消费量、燃煤发电机组数量的增加,处理持续增多的固体废弃物已成为电力行业必须考虑的迫切问题。

随着  $\text{SO}_2$  气体排放受控力度的不断加大,越来越多的 CFB 锅炉通过向炉内喷入石灰石等钙基脱硫剂来脱除部分  $\text{SO}_2$ ,同时大量投运 CFB 半干法、石灰石-石膏湿法等尾部烟气脱硫系统。炉内脱硫、尾部干法或湿法脱硫,都会产生大量的脱硫灰副产物。钙基脱硫剂的使用不仅使灰渣量增加,在理化性质上也与普通煤粉炉灰渣表现出明显不同,这就导致很多适用于煤粉炉粉煤灰的技术路线可能不再适用于脱硫灰渣处理。例如,受限于烧失量、粒度、化学组成,CFB 锅炉脱硫灰渣直接用于生产水泥制品、回填材料、混凝土等均受到限制 [20]。

#### (三) $\text{N}_2\text{O}$ 排放问题

CFB 燃烧具有低  $\text{NO}_x$  排放优势,然而在很多工况下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放浓度较高,有时甚至高达数百毫克/立方米,超过了  $\text{NO}$  排放浓度 [21]。尽管  $\text{N}_2\text{O}$  对人体健康和环境的危害尚不及  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ ,《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)、《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》等也未将之列入大气污染源予以控制,但作为主要的温室气体之一,相关排放问题在全球气候变化的大背景下日益受到关注。

CFB 燃烧条件下的  $\text{N}_2\text{O}$  排放特性在很多方面的表现与  $\text{NO}_x$  相反。例如,在高温条件下  $\text{N}_2\text{O}$  分解速率显著加快,通常  $\text{N}_2\text{O}$  排放随着温度升高而降低,这是高温煤粉炉  $\text{N}_2\text{O}$  排放浓度低于 CFB 锅炉的重要原因。将  $\text{N}_2\text{O}$  纳入减排指标,实现与  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  等的同步脱除,成为 CFB 研究与应用方面越来越重要的问题。

#### (四) 新能源发展背景下的 CFB 深度调峰问题

尽可能地降低煤炭等化石能源在一次能源消费中的占比,提高太阳能、风能、生物质能等可再生能源的比例,已经成为世界性共识。根据国际可再生能源署发布的《2020 可再生能源统计》报告 [22],

2019年世界风能、太阳能的新增装机容量分别为622 GW、579 GW，同比增加10.5%、20.3%。

在我国，尽管“多煤少油缺气”的能源禀赋决定了煤炭在能源结构中的基础性地位，但对各种新能源的支持力度从未放松。2019年我国风能、太阳能的新增装机容量分别为210 GW、205 GW，均位居世界第一；2008—2018年，我国生物质产能年均增长率约为5.3% [2]。在大力发展新能源的背景下，以煤炭为基础的CFB燃烧及其低污染排放控制技术的发展面临更高要求；在追求煤炭更加清洁高效利用的同时，亟需开发新的技术增长点，保持CFB技术的转型升级态势。

发展新能源的关键举措之一是提升对新能源的消纳和存储能力，为此需要一定数量的燃煤发电机组来承担深度调峰任务，提升能源系统的弹性运行能力并确保电网安全性。CFB锅炉由于采用大量固体床料，蓄热量大、炉膛温度分布均匀、稳燃性能好，具有低负荷运行的天然优势；但因其热惯性大、燃烧滞后、主汽压力响应慢，变负荷能力略不及煤粉锅炉 [23]。NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>等排放的污染物也会随着CFB锅炉负荷的升降而发生变化。以NO<sub>x</sub>为例，低负荷可能使喷氨处的烟温偏离SNCR最佳温度窗口，降低脱硝效率；循环物料量的减少也会使床质量下降，炉底存在超温的风险，使得NO<sub>x</sub>原始生成量增加。在CFB锅炉启停或快速变负荷的过程中，NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>排放浓度往往出现明显波动，严重时可能瞬时超限 [24,25]。

### （五）其他污染物治理

工业生产、日常生活会产生大量废水、废气、固体废弃物（“三废”）。随着经济发展、城市人口快速增长，“三废”和城市垃圾制造与日俱增，如不妥善处置，将严重影响生态环境和居民健康。据统计，2017年我国废水排放总量接近7×10<sup>10</sup> t，城市生活垃圾清运量超过2×10<sup>8</sup> t；用于环境污染治理的投资总额约为9500亿元，其中工业污染源治理投资约为680亿元。

CFB燃烧具有燃料适应性广、燃烧稳定、低NO<sub>x</sub>和低SO<sub>2</sub>原始排放等优势，在工作原理上特别适合“三废”和城市垃圾的无害化处理。在此状态下，发电或供热不再是锅炉的主要任务，垃圾处理量成为衡量运行效率的主要指标。

## 四、碳达峰和碳中和背景下的新一代CFB燃烧技术

当前，全球变暖、环境问题越发受到重视，减少CO<sub>2</sub>排放成为世界性的焦点问题。中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。新的宏观形势，要求能源系统及时开展颠覆性变革，也要求我国煤炭需求提前达峰。CFB燃烧技术可在节能、替代、捕集三方面同时发力，更好支持国家重大战略目标的实现。

### （一）开发超临界 / 超超临界CFB锅炉机组，推进中小型机组的节能减排改造

尽可能提高发电效率、减少煤耗，这是节能的主要方面之一。将低成本污染控制的CFB燃烧与高效发电的超临界蒸汽循环结合，开发大容量、高参数的超临界 / 超超临界CFB锅炉技术；对标已有的百万兆瓦等级超超临界煤粉锅炉（如外高桥三期1000 MW超超临界燃煤发电机组），开展相应示范工程特别是坑口电站建设仍显必要。

由于蒸汽参数提高，炉膛尺寸放大，分离器、外置床等结构调整，超临界 / 超超临界CFB锅炉的物料平衡、炉内燃烧、污染物排放特性，与小容量CFB锅炉相比有着明显区别；特别是大容量CFB锅炉普遍面临的炉膛均匀性问题，可能会成为限制SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等污染物原始低排放的主要因素。

以新技术对现有的CFB锅炉机组进行全面节能减排和灵活性改造以实现存量优化，必要时做到有序退出，也是节能的重要方面。值得注意的是，小容量锅炉在灵活性方面可能优于大锅炉机组，加之我国大多数大型燃煤电站常处于低负荷运行状态，因此在同等输出功率下高负荷运行的小型亚临界CFB锅炉的经济性往往更优。从能源安全角度考虑，保留一定数量的分布式小机组也是必要的。

### （二）发展生物质CFB燃烧技术，合理分配煤炭资源

从宏观上看，生物质燃料可视为CO<sub>2</sub>零排放，属于环境友好型的可再生能源，将是化石能源退出后的主要替代燃料之一。与之相应的生物质CFB燃烧或气化技术具有广阔的市场前景。然而，“替代”

对煤炭而言不是完全取代,短期内在我国尚不现实;另一层含义是对煤炭资源合理分配,做到物尽其用。如图 2 所示,对于低灰低硫的优质煤种,可用作炼焦、煤化工等,或用于高效煤粉锅炉;对其他劣质燃料(如高硫无烟煤),煤炭开采和加工过程中产生的大量煤矸石、煤泥、洗中煤等低热值副产物,CFB 燃烧技术是规模化利用的优选方式。这种处理方式,既可满足能源需求,又将避免劣质燃料资源的浪费,还可支持保护环境,实现广义上的节能与碳排放降低。

需要指出的是,这些劣质燃料的燃烧、成灰、污染物生成特性,与煤相比又有很大区别。若不进行针对性的设计调整,有些燃料投入 CFB 锅炉燃烧后的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  原始排放浓度甚至高于常规煤种,达不到超低排放要求。为此,需要单独研究各种劣质燃料与 CFB 燃烧技术的结合特性。

### (三) 与碳捕集、利用与封存技术相结合

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是煤电实现碳中和的潜在有效方式。将高效低污染的 CFB 燃烧与 CCUS 技术相结合,将是我国以化石能源为主的高碳经济向低碳能源体系转型的重要支撑技术,相关研究包括以下三方面。①推动开发高效低能耗的 CFB 富氧燃烧技术、化学链燃烧技术等 CCUS 前端技术,实现烟气中  $\text{CO}_2$  富集,有利于后续  $\text{CO}_2$  捕集封存和再利用。②通过炉内流态重构和燃烧调整,强化污染物原始低排放,辅以尾部高

效脱硫脱硝和除尘系统,减少烟气中的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、粉尘、重金属等污染物杂质,利于富  $\text{CO}_2$  烟气的后续利用。③基于 CFB 燃烧燃料适应性广的优势,在燃用生物质、城市垃圾等的 CFB 锅炉上加装碳捕集与封存装置,实现  $\text{CO}_2$  零排放甚至负排放。

特别的是,对于兼具工业废弃物处理需求、 $\text{CO}_2$  利用前景的场合,CFB 燃烧是支持绿色碳循环产业园建设和运行的优选方式。例如,在石油生产及加工过程中产生的大量石油焦等副产物,可利用 CFB 锅炉燃烧来消化;在提供热能或电力的同时,锅炉尾气  $\text{CO}_2$  富集后直接打入地下,利用  $\text{CO}_2$  驱油来提高采收率,实现双赢。

### (四) 提高电厂运行灵活性,与新能源电力协调发展

需充分考虑风能、太阳能、水能、核能、燃气机组、煤粉锅炉、CFB 锅炉等各发电系统及用电侧电力需求特点,在全网范围内合理安排各发电单元负荷,尽量保证机组在最高效率点运行,减少负荷快速变动。可考虑引入大数据、人工智能等新理念、新技术手段,实现智慧调度。对 CFB 锅炉机组而言,了解并掌握其在低负荷、变负荷工况下的燃烧、污染物排放、水动力等特性,为实施智能优化控制提供良好基础。

另外,可将 CFB 发电技术与储能技术相结合,开发高效、安全、便捷的大规模或分布式储能技术,以弥补 CFB 锅炉在变负荷能力方面的不足,提高

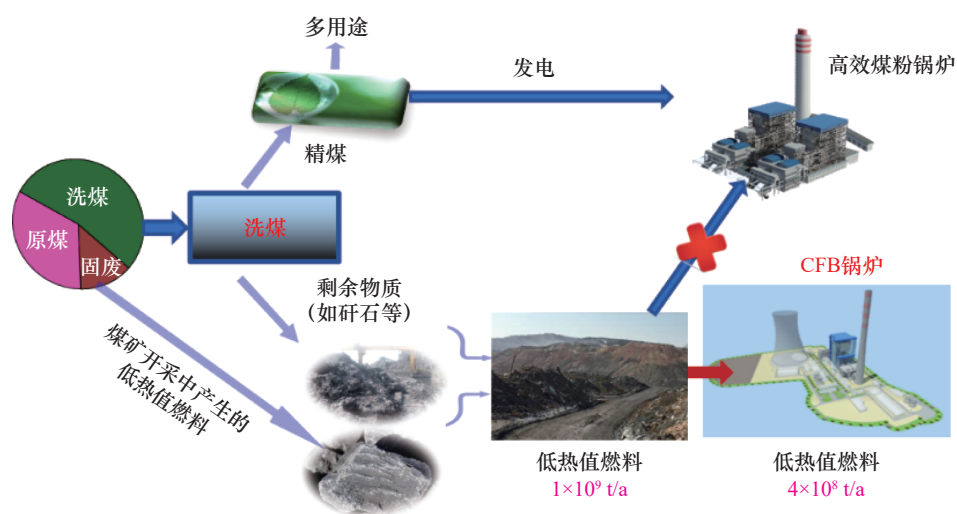


图 2 CFB 燃烧技术处理劣质燃料

机组运行灵活性、深度调峰能力，支持对新能源电力的消纳，促进“新旧”能源协调发展。

### 五、CFB 燃烧技术发展与应用建议

#### (一) 重点发展炉内原始低排放技术

以分离器效率为代表的循环系统性能，与过量空气系数、分级配风等密切相关的炉内氧量控制，与受热面布置、排渣等运行条件有关的炉膛温度调节，入炉煤与石灰石粒径，燃料与石灰石给入位置等因素，均对  $\text{NO}_x$  原始生成量、炉内脱硫效率构成不同程度的影响。相关设计或运行参数的变化，都可能影响到炉膛出口处的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  排放水平，自然存在污染物源头排放较低的优化参数组合 [26]。

建议继续重点发展炉内原始低排放 CFB 燃烧技术，通过流态重构、燃烧组织来突破传统 CFB 锅炉的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  排放极限，实现 CFB 燃烧自身低污染排放的深度挖潜。探索燃料再燃、混燃、分级燃烧、添加催化剂等多种方式，在弱化对  $\text{NO}_x$  排放影响的前提下降低  $\text{N}_2\text{O}$  原始排放浓度，进一步提高 CFB 锅炉的应用可靠性、技术先进性、市场竞争力。

需要强调的是，在追求低污染排放的同时，不宜以明显降低 CFB 锅炉热效率为代价，否则增加能源消耗，从全局来看存在污染物排放总量无法降低的可能。因此，在发展新型污染排放控制技术的同时，仍需全面、客观地评估新技术对锅炉及电厂效率的影响，尽量追求节能与减排的“双赢”。

CFB 锅炉污染物排放除了受炉内氧量、温度的影响之外，还与循环系统性能、床料流化状态、给料粒度、风煤混合均匀性等多种因素有关。这些因素与锅炉效率之间也并非简单的“此消彼长”式关系；在一些情况下，采用低氮燃烧、炉内脱硫技术，可以同时满足原始超低排放与高效燃烧的需求。因此，针对不同容量的 CFB 锅炉、复杂的燃料来源，首先应探索合适的设计及运行参数组合，在不明显影响锅炉效率的前提下尽可能降低污染物原始排放水平（不一定需要直接超低排放），由此降低整体治理成本；然后根据各电厂的锅炉状态及现场情况，考虑各种脱硫脱硝工艺的特点，按照经济性原则来优选下游污染物处理技术，由此满足当地环保要求。

#### (二) 高效利用脱硫灰渣，拓展 CFB 燃烧技术在污染治理方向的应用

推动 CFB 锅炉脱硫灰渣在碱性土壤改良、复合肥料、路基材料、石膏和烧结砖生产、废水治理等方向的高效利用，兼顾资源节约、环境保护、电厂运行经济性。例如，对焙烧工艺和配方做适当调整后，脱硫灰可作为骨料来生产烧结砖、陶粒等烧制品，从而替代粘土砖；利用脱硫石膏替代天然石膏，进一步制备硫酸钙晶须等高附加值材料；还有尝试将脱硫灰改性后作混凝剂用于磷化废水的治理等。

发挥 CFB 燃烧的燃料适应性优势，推广应用到污染物治理，如钢厂烧结烟气、城市污泥、含盐废水等，实现“三废”、城市垃圾的低成本高效清洁利用。流化床料可以是惰性石英砂、煤颗粒，也可添加各类催化剂、氧化/还原剂、吸收剂、助燃剂等，从而变 CFB 燃煤锅炉“污染源”为 CFB 反应器“污染治理点”。高效、安全、环保的流化床反应装置，尤其是小型化、分布式设备具有迫切的现实需求和广阔的市场前景。在开展 CFB 燃烧处理的同时，也需关注各类垃圾自身的燃烧和污染物排放特性，避免造成新的大气污染，如二噁英、氯化氢、重金属污染物等。

#### (三) 合理制定污染物排放标准

我国现行《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011) 已是世界上最严格的环保标准，更不必说其后推行的燃煤超低排放要求；近年来又陆续提出了“超超低排放”“近零排放”等概念，各类污染物排放空间被进一步压缩。严格的污染物排放标准有效推动了煤电行业节能减排改造，促进低污染排放技术进步，为生态环境改善作出了显著贡献，如 2016 年全国煤电行业  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘排放量分别降至  $1.7 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $1.55 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $3.5 \times 10^5 \text{ t}$  [27]。

需要指出的是，在没有出现技术重大突破的条件下，相关治理成本随污染物排放限值的降低几乎呈指数增加。从全局来看，燃煤电厂在有限的发电负荷下为了降低数毫克的排放，可能造成更大的资源浪费和环境污染，如尿素、石灰石等脱硫脱硝剂的生产、运输、存储所伴生的问题。这种局面可能不是真正意义上的节能减排。已有研究 [27] 也表明，2015 年煤电行业的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘排放量分

别仅占全国排放总量的 12%、9.8%、3%，已不再是大气污染物排放“大户”。相比之下，热力、钢铁、水泥等高耗能行业以及生活排放逐渐成为排放源头的主要方面，而这些行业的排放标准还比较低。

因此，建议根据经济性原则，从产业发展和技术进展的实际情况出发，站位于全局角度，制定相关行业的排放标准，综合解决环境污染和资源消耗问题，积极引导包括 CFB 燃烧技术在内的能源行业健康发展。

#### 参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.  
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook—2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [2] BP Group. BP statistical review of world energy 2020 [R]. London: BP Group, 2020.
- [3] 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 我国洁净煤技术2035发展趋势与战略对策研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 132–140.  
Sun X D, Zhang B, Peng S P. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132–140.
- [4] Lyu J F, Yang H R, Ling W, et al. Development of a supercritical and an ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Frontiers in Energy, 2017, 13(1): 114–119.
- [5] Huang Z, Deng L, Che D F. Development and technical progress in large-scale circulating fluidized bed boiler in China [J]. Frontiers in Energy, 2020, 14(4): 699–714.
- [6] Leckner B. Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(1): 31–61.
- [7] Johnsson J E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion [J]. Fuel, 1994, 73(9): 1398–1415.
- [8] 柯希玮, 蔡润夏, 吕俊复, 等. 钙基脱硫剂对循环流化床NO<sub>x</sub>排放影响研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 1–11.  
Ke X W, Cai R X, Lyu J F, et al. Research progress of the effects of Ca-based sorbents on the NO<sub>x</sub> reaction in circulating fluidized bed boilers [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 1–11.
- [9] 周浩生, 陆继东, 周琥. 燃煤流化床加入氧化钙的氮转化机理 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21(5): 647–651.  
Zhou H S, Lu J D, Zhou H. Nitrogen conversion in fluidized bed combustion of coal with limestone addition [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(5): 647–651.
- [10] Ke X W, Li D F, Li Y R, et al. 1-dimensional modelling of in-situ desulphurization performance of a 550 MWe ultra-supercritical CFB boiler [J]. Fuel, 2021, 290(1): 1–12.
- [11] Ke X W, Cai R X, 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(1): 252–258.
- [12] Cai R, Ke X W, Huang Y, et al. Applications of ultrafine limestone sorbents for the desulfurization process in CFB boilers [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(22): 13514–13523.
- [13] 张缦, 张素花, 郭学茂, 等. 流态对CFB燃烧气体污染物排放的影响及其应用 [J]. 工业锅炉, 2020 (3): 11–17.  
Zhang M, Zhang S H, Guo X M, et al. The effect and application of solid-gas two-phase flow pattern on the emission in the circulating fluidized bed combustion [J]. Industrial Boilers, 2020 (3): 11–17.
- [14] 程晓磊. 低氮燃烧及炉内脱硫技术在75 t/h循环流化床锅炉上的应用 [J]. 工业锅炉, 2018 (5): 28–31.  
Cheng X L. Application of low-NO<sub>x</sub> combustion technology and desulphurization technology on 75 t/h circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Boilers, 2018 (5): 28–31.
- [15] 张思海, 张双铭, 张俊杰, 等. 330 MW亚临界CFB锅炉烟气再循环深度调峰运行性能研究 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 291–298.  
Zhang S H, Zhang S M, Zhang J J, et al. Performance research on deep peak regulation with flue gas recirculation in a 330 MW CFB boiler [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 291–298.
- [16] 李博, 赵锦洋, 吕俊复. 燃煤烟气超低排放技术路线选择建议 [J]. 电力科技与环保, 2016, 32(5): 13–15.  
Li B, Zhao J Y, Lyu J F. Suggestions on the ultra-low emission technical routes of coal-fired flue gas [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2016, 32(5): 13–15.
- [17] 杜玉颖, 孙永斌, 詹扬, 等. 燃煤电站超低排放控制技术设计方法与图谱 [J]. 环境工程, 2018, 36(3): 92–97.  
Du Y Y, Sun Y B, Zhan Y, et al. Design method and map of ultra-low emission control technology for coal-fired power plants [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 92–97.
- [18] Shimizu T, Satoh M, Fujikawa T, et al. Simultaneous reduction of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a two-stage bubbling fluidized bed combustor [J]. Energy Fuels, 2000, 14(4): 862–868.
- [19] Zhang Y, Zhu J G, Lyu Q G, et al. The ultra-low NO<sub>x</sub> emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating [J]. Fuel, 2020, 277(1): 1–12.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 用于水泥和混凝土中的粉煤灰 (GB/T 1596—2017) [S]. 北京: 中国质量标准出版传媒有限公司, 2018.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Fly ash used for cement and concrete (GB/T 1596—2017) [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd., 2018.
- [21] Kramlich J C, Linak W P. Nitrous oxide behavior in the atmosphere, and in combustion and industrial systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1994, 20(2): 149–202.
- [22] The International Renewable Energy Agency. Renewable energy statistics 2020 [R]. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency, 2020.
- [23] 于浩洋, 高明明, 张缦, 等. 循环流化床机组深度调峰性能分析与评价 [J]. 热力发电, 2020, 49(5): 65–72.  
Yu H Y, Gao M M, Zhang M, et al. Performance analysis and evaluation of deep peak-regulating for circulating fluidized bed units [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 65–72.



- [24] 蔡晋, 单露, 王志宁, 等. 超临界350 MW循环流化床锅炉变负荷特性 [J]. 热力发电, 2020, 49(9): 98–103.  
Cai J, Shan L, Wang Z N, et al. Variable load characteristics of a supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 98–103.
- [25] 杜佳军, 张鹏, 韩新建. 循环流化床机组环保参数异常原因分析与对策 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 237–242.  
Du J J, Zhang P, Han X J. Cause analysis and countermeasure research on environmental protection parameter abnormality of CFB unit [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 237–242.
- [26] 柯希玮, 张纆, 杨海瑞, 等. 循环流化床锅炉NO<sub>x</sub>生成和排放特性研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2757–2771.  
Ke X W, Zhang M, Yang H R, et al. Research progress on the characteristics of NO<sub>x</sub> emission in circulating fluidized bed boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2757–2771.
- [27] 李博, 王卫良, 姚宣, 等. 煤电减排对中国大气污染物排放控制的影响研究 [J]. 中国电力, 2019, 52(1): 110–117.  
Li B, Wang W L, Yao X, et al. Study on the effects of emission reduction in coal-fired power industry on china's air pollutant emission control [J]. Electric Power, 2019, 52(1): 110–117.