

中国循环流化床燃烧技术的发展与展望

姚禹歌^{1,2}, 黄中^{1,2}, 张缙^{1,2}, 杨海瑞^{1,2}, 吕俊复^{1,2}, 岳光溪^{1,2}

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

2.清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 我国循环流化床 (CFB) 燃烧技术经过 40 年的发展, 实现了从学习跟踪、创新并跑到全面引领的跨越, 形成了以定态设计理论为核心的设计体系, 基于流态重构技术开发了能效指标可以与煤粉锅炉相媲美的节能型 CFB 锅炉。目前我国的 CFB 锅炉在应用数量、装机容量、污染控制等许多方面达到国际领先水平。本文回顾了 CFB 燃烧技术在我国的发展历程, 总结了 CFB 燃烧技术的中国创新与中国贡献, 并对后续的发展进行了展望, 未来应充分发挥 CFB 燃烧技术燃料适应性广的优势, 做好低热值燃料的清洁高效消纳, 同时进一步提升 CFB 锅炉负荷调节速度, 并实现 0~100% 的全负荷运行, 推动 CFB 机组由电量型向功能型转变, 助力可再生能源消纳利用和电网安全稳定运行。

[关键词] CFB 锅炉; 清洁煤燃烧; 超临界; 定态设计; 流态重构; 排放控制; 发展历程

[中图分类号] TK01 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202105063

[引用本文格式] 姚禹歌, 黄中, 张缙, 等. 中国循环流化床燃烧技术的发展与展望[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 13-19.
YAO Yuge, HUANG Zhong, ZHANG Man, et al. Development and prospect of circulating fluidized bed combustion technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 13-19.

Development and prospect of circulating fluidized bed combustion technology in China

YAO Yuge^{1,2}, HUANG Zhong^{1,2}, ZHANG Man^{1,2}, YANG Hairui^{1,2}, LYU Junfu^{1,2}, YUE Guangxi^{1,2}

(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: The circulating fluidized bed (CFB) combustion technology in China has become the world leader after 40-year research and development, and a design system with state specification design theory as the core has been established. The fluidization state reconstruction has also been applied in CFB boilers, which increases the energy efficiency on a par with the pulverized coal boiler. Nowadays, China's CFB boiler ranks first in the world in many aspects, such as number, unit capacity and emission control. This article reviews the development of CFB combustion technology in China, summarizes the Chinese innovation and contribution, and looks forward to the future development of this technology. In the future, it is suggested to make full use of the wide fuel adaptability of the CFB combustion technology, and use low-heat-value fuel with lower emission and higher efficiency. Moreover, the load regulation speed of the CFB boiler should also be improved and 0~100% load operation should be achieved. The CFB units should transfer from electricity type to function type, so as to promote the utilization of renewable energy and safe and stable operation of the power grid.

Key words: CFB boiler; clean coal combustion; supercritical; state specification design; fluidization state reconstruction; emission control; development history

燃煤发电在我国电力工业中占据着主导地位, 也是我国煤炭利用的主要途径^[1-2]。虽然我国煤炭资

源丰富, 种类繁多, 但是其中含灰量较高的高硫劣质煤比重较大。此外, 在煤炭开采和加工过程中会

收稿日期: 2021-05-06

基金项目: 中国工程院咨询项目(2020-XY-10)

Supported by: Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (2020-XY-10)

第一作者简介: 姚禹歌(1996), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 CFB 燃烧技术, yyg18@mails.tsinghua.edu.cn。

通信作者简介: 吕俊复(1967), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为 CFB 及气液两相流技术, lvjf@mail.tsinghua.edu.cn。

产生大量的洗中煤、煤矸石、煤泥等低热值副产物。这些劣质煤和低热值难燃燃料难以在传统的煤粉燃烧技术中得到有效应用。而循环流化床(CFB)燃烧技术的燃料适用性广,在燃用劣质煤和低热值燃料的过程中仍能保证燃烧稳定^[3-4]。因此,CFB燃烧技术对于我国高效清洁利用煤炭资源有着重要意义。

CFB燃烧技术在我国已有40年的发展,取得了长足进步,目前在世界上处于领先地位。近年来,我国在超临界CFB锅炉技术、炉内燃烧控制原始超低排放CFB燃烧技术、高蒸汽参数生物质CFB锅炉技术等方面取得了丰硕的成就^[5-6]。与常规煤粉炉相比,CFB锅炉在我国资源综合利用方面发挥了重要作用,起到了对煤粉锅炉“填平补齐”的作用。国内主要的电力集团、煤矿企业均有CFB发电机组,应用涵盖电力生产、矸石消纳、石油石化、氯碱化工、有色冶金和造纸等领域^[7]。作为重要的清洁煤燃烧技术,CFB燃烧技术将持续在我国逐步实现能源转型和碳中和的过渡阶段发挥重要的作用,具有良好的发展前景^[8-10]。

1 CFB燃烧技术在我国的发展历程

1.1 研发初期的学习阶段

我国对于流化床燃烧技术的研究开始于20世纪60年代。在这一时期我国构建了一套鼓泡流化床锅炉设计理论,并建造了一系列小容量的鼓泡流化床锅炉,最大容量可达130 t/h。20世纪70年代中期,世界上许多国家都大幅提高了煤燃烧研究的投入,促进了流化床燃烧技术从鼓泡流化床到CFB的转变。我国也从20世纪80年代初期与世界同步开始进行CFB燃烧技术的研究和CFB锅炉的研发。在研发初期,我国科研工作者误认为鼓泡流化床和CFB锅炉在炉膛内具有相似的流化状态。这一错误的认知使得我国早期的CFB锅炉产品实质上是带有飞灰循环系统的鼓泡床锅炉,而并非真正意义上的CFB锅炉。这种锅炉运行中经常出现负荷偏低、物料循环不足、尾部受热面磨损严重等诸多问题,燃烧劣质煤的效果不佳,可靠性与经济性均较差。理论体系方面的不足使得我国早期开发CFB燃烧技术的进展缓慢,在世界上处于相对落后的水平。

1.2 理论与实践结合后的快速发展阶段

随着我国工业化的迅速发展,我国对于能源的需求也不断增大,CFB燃烧技术研究也日趋深入。虽然我国陆续从国外CFB锅炉厂商购买了一系列

CFB锅炉产品,但由于国外开发商对我国实行技术封锁,拒绝转让核心技术,因此我国亟需探究CFB燃烧的基本理论,实现技术方面的突破。

从20世纪90年代初起,在科技部和发改委的大力支持下,我国科研工作者开展了大量CFB燃烧的基础研究工作。从气固两相流理论入手,提出了“一进二出”物料平衡的概念,确立了CFB锅炉炉膛上部快速床的流化状态,预测了炉膛内物料浓度的分布,提出了燃烧份额和炉内传热系数的预测方法。这一系列对CFB气固两相流、炉内燃烧和传热理论的新认识大大促进了CFB燃烧技术的发展。

基于CFB燃烧理论方面的重大突破,逐步建立了一套我国独立知识产权的CFB锅炉设计体系。这套体系的核心是定态设计的理念,即基于CFB锅炉炉膛内部的流态进行锅炉的设计。在定态设计的基础上,清华大学给出了CFB锅炉设计图谱,该图谱为锅炉的定态设计参数的选取和锅炉设计的评价提供了依据。从此,CFB锅炉的设计可以依据燃料种类灵活地确定合适的流化状态。图1为一种典型的CFB燃烧系统示意。

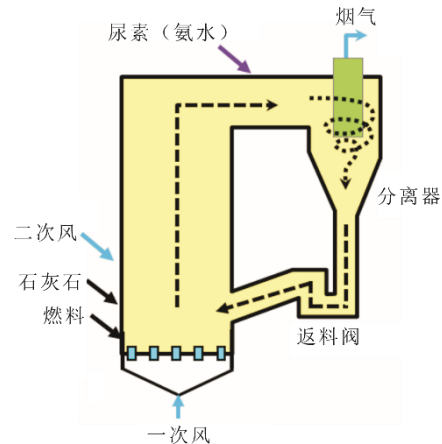


图1 一种典型的CFB燃烧系统示意

Fig.1 Schematic diagram of a typical circulating fluidized bed combustion system

在这一阶段,我国向国际厂商引进了CFB锅炉产品和技术,在锅炉运行中积累的运行数据和经验以及锅炉改造中的一系列自主创新也为我国自主的CFB锅炉技术发展与应用发挥了重要作用。基于设计理论的突破与工程实践的经验积累,我国于2000—2010年间逐步自主研发了适合中国煤种的135~300 MW CFB锅炉并广泛应用。以300 MW等级的亚临界CFB锅炉为例,相比于同期从法国Alstom公司引进的产品,通过我国自主技术设计的

CFB 锅炉结构更加简单,省去了外置式换热床,使得制造与维护成本更低、操作流程更简单、运行更可靠。自从 2008 年 6 月我国首台自主设计制造的 300 MW CFB 锅炉在广东宝丽华电厂投产后,便迅速取代了国外引进技术,成为技术主流。

1.3 进入“超临界”时代后的世界引领阶段

在众多大容量 CFB 锅炉成功投运后,超临界 CFB 锅炉的诞生已经是必然趋势。我国紧跟国际脚步,开始了超临界 CFB 锅炉的研发。在这个过程中,逐渐形成了以流态设计为核心具有中国独立知识产权的 CFB 锅炉设计体系。2013 年 4 月 14 日,我国自主研发的超临界 600 MW 机组 CFB 锅炉在四川白马电厂通过 168 h 满负荷运行测试(图 2)。性能测试结果表明该锅炉运行效果优于同期国外超临界 460 MW 机组 CFB 锅炉。这表明我国 CFB 锅炉的研发、制造和运行已经达到世界领先水平。我国 600 MW 机组 CFB 锅炉的成功应用,被国际能源署认定为 CFB 燃烧技术发展的重大突破,是整个行业的里程碑事件。



图 2 超临界 600 MW 机组 CFB 锅炉
Fig.2 Picture of a supercritical 660 MW circulating fluidized bed boiler

2015 年 9 月 18 日,中国自主知识产权的世界首台超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉在山西国金电厂投运,这是我国 CFB 锅炉研发的又一大技术成果和应用突破。此后,40 余台超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉陆续投产,超临界机组的占比不断提升。至此,我国已经完全掌握了 CFB 锅炉的核心技术,主要锅炉制造企业均已形成设计制造能力,自主技术几乎占据了全部的国内市场并积极向海外拓展^[11]。2020 年 9 月,世界首台超临界 660 MW 机组 CFB 锅炉在山西平朔正式投运,这也是目前世界上容量最大的 CFB 锅炉机组。截至 2020 年底,我国共有 48 台在役超临界 CFB 锅炉机组,其中包括 3 台

600~660 MW 等级和 45 台 350 MW 等级机组,远超过世界上其他国家。

高参数、大容量的燃煤发电已经成为国内外的主流发展方向^[12-14],我国最大 CFB 机组单机容量也在这一阶段完成了对世界其他国家的超越(图 3)。在成功研发了一系列超临界 CFB 锅炉后,我国计划进一步提升锅炉参数和容量,开展了超超临界 CFB 锅炉的研发^[15-16]。科技部会同有关部门启动了煤炭清洁高效利用和新型节能技术专项“超超临界循环流化床锅炉技术研发与示范”。按照计划,“十三五”期间已完成超超临界 CFB 锅炉本体设计及研制,在陕西彬长和贵州威赫建成了 660 MW 等级超超临界 CFB 锅炉机组示范工程,即将正式投产。此外,700 MW 及 1 000 MW 超超临界 CFB 的研发也在紧锣密鼓地开展,预计相关工作将进一步巩固我国在世界上的领先地位。

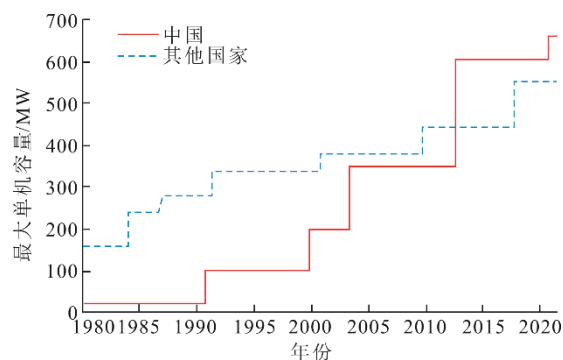


图 3 中国和世界其他国家的最大 CFB 机组单机容量对比
Fig.3 The largest capacities of the circulating fluidized bed units in China and the other countries in the world

2 CFB 燃烧技术和理论的中国创新和中国贡献

2.1 CFB 锅炉的定态设计

大量的运行实践经验表明,CFB 安全、经济和环保运行的先决条件是炉膛内合理的物料浓度分布^[17]。CFB 燃烧过程中,燃烧行为受气固两相流动的影响非常明显,根据气固两相流及燃烧理论,设计 CFB 的过程实际上是首先选择流态的过程,即在满负荷条件下,燃烧室内应当有一个确定的流态,该流态对应的物料平均粒度和沿炉膛高度的物料悬浮浓度分布。物料悬浮浓度分布决定了受热面的传热情况,物料平均粒度决定了循环物流率,即固体物料悬浮浓度分布,而且决定了燃料的燃烧行为。气固两相流动状态的选择即所谓定态,构成了 CFB 燃烧设备设计的基础^[18]。

根据 CFB 锅炉的定态设计理论,在一定的负荷条件下,物料浓度分布存在一个固定的状态,此时循环流率为一定值。因此在设计阶段,设计人员可以根据负荷和运行条件选定一个气固两相流动状态,然后再根据选定的状态对锅炉进行设计,通过调整锅炉炉膛尺寸、受热面布置等结构参数和二次风比例、床压降等运行参数,使 CFB 锅炉在目标定态下运行,进而保证锅炉达到设计的循环流率及蒸发量等参数^[19]。

图 4 为 CFB 锅炉流态设计图谱^[18],并标注了 9 种具有代表性的 CFB 锅炉技术。实际设计中,可以根据该设计图谱并结合对其他因素的综合考虑进行选择,国际上几乎所有的 CFB 锅炉技术在此图谱中均能找到其状态位置。

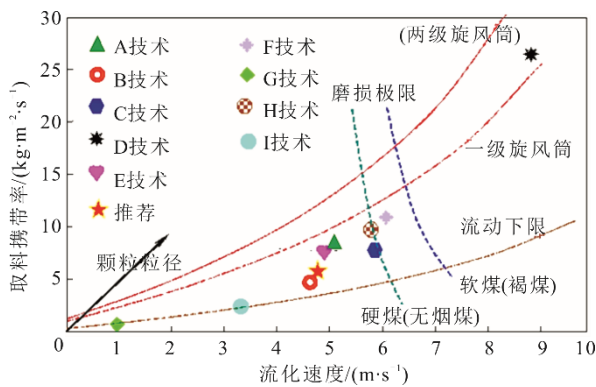


图 4 CFB 锅炉流态设计图谱

Fig.4 Status specification for a circulating fluidized bed boiler design

CFB 锅炉定态的实现需要考虑多方面因素的综合作用,包括一定的分离效率、良好的返料性能以及所用燃料具有的较好成灰特性。通过合理的结构参数设计,并匹配相应的运行条件,可以在 CFB 锅炉炉膛内形成合理的物料浓度分布,从而保证合理的燃烧份额分布、良好的传热特性和环保特性。

定态设计理论是我国科研人员对 CFB 技术发展做出的重要贡献,突破了国外 CFB 流态设计完全经验性方式,形成了对 CFB 气固两相流理论的新认识。定态设计理论的提出,对于 CFB 燃烧技术及 CFB 锅炉的设计具有划时代的意义^[20]。

2.2 流态重构与节能型 CFB 锅炉的开发

流态重构是定态设计理论的更高层次实践。CFB 锅炉的床料具有宽筛分的特点,不同粒径床料所处的流化状态不同。对于细颗粒,流化风速高于终端沉降速度,可以被携带至炉膛上部并参与外部

循环,形成快速床;对于粗颗粒,流化风速低于其终端沉降速度,因此这部分颗粒无法被携带至炉膛上部,仅能在炉膛底部往复运动,形成鼓泡床或湍动床。然而大量的工程经验表明,粗颗粒的存在几乎不影响炉膛内的传热特性,因此这部分颗粒也被称为无效床料^[21]。

CFB 锅炉流态重构的核心理念是减少总床存量、优化床质量,即适当减少上述无效床料。CFB 锅炉流态重构前后床存量对比如图 5 所示^[22]。此时密相区高度和相应床存量大幅度下降,而细颗粒存量并不改变,因此上部快速床流动状态可维持不变,从而保证稀相段换热系数基本保持不变。此时,密相区高度下降,过渡区物料浓度下降,在节约风机电耗的同时也可以有效改善磨损问题,CFB 锅炉整体性能也得到优化^[22]。

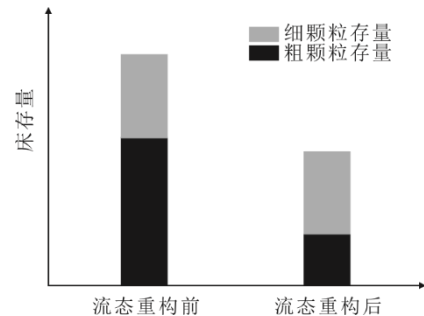


图 5 CFB 锅炉流态重构前后床存量对比

Fig.5 The bed material quantities of circulating fluidized bed boiler before and after flow regime reconstruction

突破传统流态范围的流态重构技术从 2007 年开始进行工业实践,目前已经广泛应用于我国 CFB 锅炉的开发。以 300 MW 等级的 CFB 锅炉为例,我国自主研发的基于流态重构技术的节能型产品一次风机和二次风机的耗电率更低,其平均厂用电率相比于引进技术减少 4.8%。

2.3 CFB 锅炉的超低排放

我国于 2013 年提出燃煤超低排放的标准,限制新建燃煤锅炉 SO_2 排放不高于 35 mg/m^3 , NO_x 排放不高于 50 mg/m^3 ^[23]。该标准也是世界范围内最为严格的燃煤排放标准,这对我国燃煤发电领域带来了新的挑战。在这样的背景下,我国引领世界进行了 CFB 燃烧技术超低排放的探究与实践。

CFB 燃烧技术可以借助石灰石实现炉内脱硫,相比于传统的煤粉锅炉省去了复杂的脱硫系统。大量的实践经验表明,CFB 锅炉的脱硫效果在钙硫比达到 2 时即可保持在较高的水准。因此从运行成本、

可靠性等方面综合考虑,利用 CFB 燃烧技术进行脱硫是一种很好的选择。为了进一步降低 SO_2 的排放,我国科研工作者对入炉石灰石的粒径进行了改良,提出超细石灰石炉内脱硫的方案。实践表明,采用超细石灰石炉内脱硫可以在较低钙硫比的条件下实现 SO_2 排放低于 35 mg/m^3 , 并且降低 NO_x 的生成^[24]。

相比于煤粉燃烧技术,CFB 燃烧技术具有燃烧温度低、床层内具有一定的还原性等先天优势。因此,相比于煤粉锅炉,CFB 锅炉具有更高的 NO_x 超低排放的潜能。CFB 锅炉的燃烧特性由气固流动特性决定,与气固流动特性直接相关的固体颗粒粒径和流化风速,也会影响 NO_x 的生成和还原^[25]。实现 CFB 燃烧原始 NO_x 的超低排放,需要对 CFB 系统性能进行提升,主要实现方法如图 6 所示。

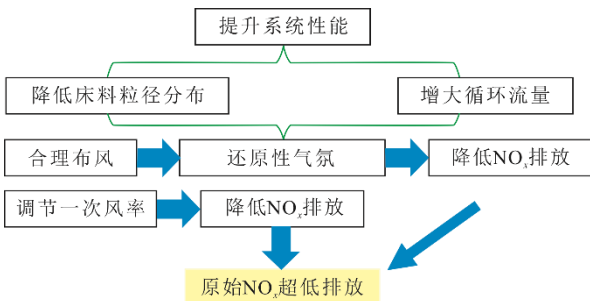


图 6 CFB NO_x 超低排放实现方法
Fig.6 The methods to realize ultra-low NO_x emission in circulating fluidized bed boiler

由图 6 可以看出,性能的提升体现在主循环回路内物料粒径的降低和循环流率的增大两方面^[26]。这样的调整会降低一次风量,抑制燃烧过程中燃料氮向 NO_x 的原始转化。通过合理布风,可以进一步增强炉内密相区的还原性气氛,抑制 NO_x 的生成。目前,CFB 燃烧原始 NO_x 超低排放技术已经广泛应用于工业实践中,部分机组依托该技术无需借助 SCR 和 SNCR 即可控制 NO_x 原始排放低于 50 mg/m^3 。

3 CFB 燃烧技术在我国的发展展望

CFB 燃烧技术作为重要的清洁煤燃烧技术,在我国逐步实现碳中和的目标中将持续发挥重要的作用,具有良好的发展前景^[27-28]。开发更加高效、更加环保、更加灵活、更加可靠的电源调节型 CFB 锅炉,科研助力我国的低碳发展战略,为碳中和的稳定过渡提供技术装备,是 CFB 燃烧技术在我国的发展方向。

3.1 提升燃料适应性和灵活性

针对低热值煤、难燃无烟煤、高水分褐煤和高

钠煤等不适合利用传统燃烧技术的煤种,需要开发大比例掺烧低热值煤、蒙东褐煤和准东高钠煤的 CFB 锅炉。除了对于劣质煤的消纳,CFB 锅炉在消纳煤炭加工中产生的洗中煤、煤矸石、煤泥等低热值副产物方面同样具有巨大的技术潜力。

根据工程院的测算,未来的煤炭年消耗量将稳定在 35 亿 t 左右,每年煤炭开采洗选产生的低热值燃料达 12 亿 t,目前这些低热值燃料的消耗仅仅在 4 亿 t 左右,需要 CFB 发电机组与大型煤炭洗选、加工以及煤化工企业相结合,对煤炭资源进行更为合理的梯级利用^[29]。因此应适时建设大容量高参数超超临界 CFB 锅炉坑口电站,实现高效清洁规模化消纳煤炭洗选加工产生的低热值燃料,探索 CFB 发电机组与新能源发电紧密结合的电网友好型电源基地的建设。

传统的 CFB 定态设计根据固定煤种进行校核,未来应在流态重构技术的基础上,提升 CFB 锅炉的燃料灵活性,丰富不同燃料在不同 CFB 锅炉的运行实践,实现对入炉燃料的宽范围适应^[30]。若能确保 CFB 锅炉机组在燃料水分、灰分、含硫量、热值等重要参数剧烈波动的情况下维持锅炉安全、环保和经济运行,这对于 CFB 机组进一步大规模高效清洁利用低热值燃料有重要意义。

3.2 提升 CFB 锅炉的快速变负荷能力

CFB 炉内有大量的床料,蓄热量大,负荷调节范围宽,能够压火热备用,温态启动基本无需燃油。因此具有天然的深度低负荷运行能力,能够满足我国不断增长的电网调峰需求,是燃煤调峰机组的选择之一。然而,炉内大量的床料会在一定程度上限制目前 CFB 锅炉的负荷调节速度^[31]。因此,今后应积极开发高运行灵活性的新型 CFB 锅炉;探索新型 CFB 燃烧技术的发展,形成新理论、新技术、新工艺,使得 CFB 机组具有高变负荷速度和 0~100% 的变负荷调节能力,满足我国不断增长的电网调峰需求;同时,推动 CFB 机组逐步由电量型向功能型转变,为新能源的消纳提供装备,以最大限度增加新能源消纳量。

3.3 提升 CFB 锅炉灰渣的资源化利用

CFB 锅炉具有燃料适用性广的特点,可燃用不同种类的燃料,因此相比于煤粉锅炉其灰渣成分的差异性较大,不能照搬煤粉锅炉灰渣的利用模式。此外,CFB 锅炉以石灰石作为脱硫剂实现炉膛内部的高效脱硫。但是石灰石经过脱硫反应后将转化为

CaO 和 CaSO₃ 等不稳定产物,这也为灰渣的利用带来困难。目前 CFB 锅炉的灰渣利用技术仍然不成熟,灰渣有效利用率较低。因此应对 CFB 锅炉的灰渣特性进行全面的,对 CFB 燃烧和脱硫的过程进行干预,减少灰渣中不稳定的含钙化合物,并优化灰渣后处理技术,提高灰渣质量,使其能更多地应用于水泥、混凝土、烧结砖等建材制造中,增加 CFB 锅炉灰渣的经济附加值。

4 结 语

CFB 燃烧技术对于我国劣质煤及煤炭加工中的低热值难燃副产物的高效清洁利用起到了至关重要的作用,在未来能源转型和实现碳中和的过渡过程中将扮演重要角色。在未来的发展中,应将 CFB 燃料适用性广的优势不断深化,提升燃料灵活性,与大型煤炭洗选、加工以及煤化工企业相结合,对煤炭资源进行更为合理的梯级利用。此外,还应进一步解决 CFB 变负荷速率慢的问题,推动 CFB 机组由电量型向功能型转变,开发更加高效、更加环保、更加灵活、更加可靠的电源调节型 CFB 锅炉,为我国碳中和的稳定过渡提供技术装备。

[参 考 文 献]

- [1] WANG W, LI Z, LYU J, et al. Eliminating outdated capacity to promote energy conservation in China's coal-fired power industry[J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 194-196.
- [2] 王昊昊, 徐泰山, 马彦宏, 等. 计及多类型电源协调的有功控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 167-175.
WANG Haohao, XU Taishan, MA Yanhong, et al. A novel active power control strategy considering multi-resource coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 167-175.
- [3] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2012: 385-389.
XU Xuchang, LYU Junfu, ZHANG Hai. *Combustion theory and combustion equipment*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012: 385-389.
- [4] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 139-146.
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 139-146.
- [5] YUE G, CAI R, LU J, et al. From a CFB reactor to a CFB boiler: the review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China[J]. *Powder Technology*, 2016, 316: 18-28.
- [6] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipment for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 8-18.
- [7] 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.
- [8] 袁晓冬, 费骏韬, 胡波, 等. 资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(22): 17-26.
YUAN Xiaodong, FEI Juntao, HU Bo, et al. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(22): 17-26.
- [9] 岳光溪, 周大力, 田文龙, 等. 中国煤炭清洁燃烧技术路线图的初步探讨[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3): 74-79.
YUE Guangxi, ZHOU Dali, TIAN Wenlong, et al. Preliminary discussion on the technology roadmap of clean coal combustion in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(3): 74-79.
- [10] 郑中原, 赵鹏, 姜玲, 等. 基于云平台的发电机组节能减排实时监控[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 148-154.
ZHENG Zhongyuan, ZHAO Peng, JIANG Ling, et al. A real-time monitoring and control system for energy saving and emission reduction of generator set based on cloud platform[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 148-154.
- [11] LYU J, YANG H, LING W, et al. Development of a supercritical and an ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13(1): 114-119.
- [12] 王倩, 王卫良, 刘敏, 等. 超(超)临界燃煤发电技术发展及展望[J]. *热力发电*, 2021, 50(2): 1-9.
WANG Qian, WANG Weiliang, LIU Min, et al. Development and prospect of (ultra) supercritical coal-fired power generation technology[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(2): 1-9.
- [13] 杨凯淇, 许丹, 谢华宝, 等. 计及燃气-蒸汽联合循环机组的热电联合调度模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 137-144.
YANG Kaiqi, XU Dan, XIE Huabao, et al. Combined heat and power dispatching model based on gas-steam combined cycle unit[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 137-144.
- [14] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进S变换的复合电能质量扰动识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 64-71.
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 64-71.
- [15] 吕俊复, 张纆, 杨海瑞, 等. 简约型 660 MW 超超临界循环流化床锅炉设计开发[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(5): 741-747.
LYU Junfu, ZHANG Man, YANG Hairui, et al. Conceptual design of a simplified 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(5): 741-747.
- [16] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电联

- 供微网多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 43-51.
- LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi-objective planning for combined heat and power microgrid considering demand side cooperative response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 43-51.
- [17] YANG H, YUE G, XIAO X, et al. 1D modeling on the material balance in CFB boiler[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(20): 5603-5611.
- [18] YUE G, LU J, 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.
- [19] 杨海瑞, 吕俊复, 岳光溪. 循环流化床锅炉的设计理论与设计参数的确定[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 42-48.
- YANG Hairui, LYU Junfu, YUE Guangxi, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers and determination of the design parameters[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(1): 42-48.
- [20] 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.
- [21] YANG H, YUE G, ZHANG H, et al. Updated design and operation experience of CFB boilers with energy saving process in China[J]. VGB Power Technology, 2011, 91: 49-53.
- [22] 杨石, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 基于流态重构的低能耗循环流化床锅炉技术[J]. 电力技术, 2010, 19(2): 9-16.
- YANG Shi, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. The lower energy consumption (LES) CFB technology based on state specification design theory[J]. Electric Power Technology, 2010, 19(2): 9-16.
- [23] 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.
- 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.
- [24] 宋畅, 吕俊复, 杨海瑞, 等. 超临界及超超临界循环流化床锅炉技术研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 338-347.
- SONG Chang, LYU Junfu, YANG Hairui, et al. Research and application of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 338-347.
- [25] 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 NO_x emission characteristic of low energy consumption CFB boilers[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(4): 293-298.
- [26] KE X, CAI R, YANG H, et al. Application of ultra-low NO_x emission control for CFB boilers based on theoretical analysis and industrial practices[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 181: 252-258.
- [27] 中国政府网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22) [2021-04-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
- Chinese Government Network. Xi Jinping delivers an important speech at the general debate of the 75th UN General Assembly[EB/OL]. (2020-09-22) [2021-04-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
- [28] 黄畅, 张攀, 王卫良, 等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 1-6.
- HUANG Chang, ZHANG Pan, WANG Weiliang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 1-6.
- [29] 吕俊复, 杨海瑞, 杨方亮, 等. 低热值煤资源现状与循环流化床发电应用分析[J]. 中国煤炭, 2021, 47(3): 101-108.
- LYU Junfu, YANG Hairui, YANG Fangliang, et al. Analysis on current situation of low calorific value coal resources and application of circulating and fluidized bed power generation[J]. China Coal, 2021, 47(3): 101-108.
- [30] 王鹏程, 蔡晋, 王珂, 等. 超临界 350 MW 循环流化床锅炉煤种变化对运行的影响[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 145-151.
- WANG Pengcheng, CAI Jin, WANG Ke, et al. Influence of coal variation on operation performance of supercritical 350 MW CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 145-151.
- [31] 刘吉臻, 洪烽, 高明明, 等. 循环流化床机组快速变负荷运行控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4130-4137.
- LIU Jizhen, HONG Feng, GAO Mingming, et al. Research on the control strategy for quick load change of circulating fluidized bed boiler units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4130-4137.

(责任编辑 马昕红)