



碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景

吕俊复 蒋苓 柯希玮 张海 刘青 黄中 周托 张缦 王君峰 肖锋 鲁佳易 姜孝国

引用本文:

吕俊复, 蒋苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514–522.
LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514–522.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1609>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题

Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 286–292 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b9feecbb-55a9-4848-ba51-5b6269dfbba7>

干法重介质流化床压力多尺度分析与流化质量表征

Multi-scale pressure analysis and fluidization quality characterization of dry dense medium fluidized bed

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 215–223 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1571>

首套流化床甲醇制丙烯装置工艺优化

Process optimization of the first set of fluidized bed methanol to propylene plant

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 359–367 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1013>

气流床煤气化炉渣特性及综合利用研究进展

Review on characteristics and utilization of entrained-flow coal gasification residue

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 227–236 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.028>

碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用

Resource development and utilization of positive environmental impacts of abandoned mines under carbon neutrality

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 321–328 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8c8fbb7d-4899-45fd-a0ed-92d75004f1e4>

双碳背景下龙王沟煤矿新型绿色矿山建设

The new green mine construction in Longwanggou Coal Mine under the background of carbon peaking and carbon neutrality

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 440–448 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1612>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

吕俊复, 蒋 苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514–522.

LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, *et al.* Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514–522.

碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景

吕俊复¹, 蒋 苓¹, 柯希玮¹, 张 海¹, 刘 青¹, 黄 中¹, 周 托¹, 张 纛¹, 王君峰^{1,2}, 肖 锋³, 鲁佳易⁴, 姜孝国²

(1. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046; 3. 上海锅炉厂有限公司, 上海 200245;

4. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001)

摘 要: 循环流化床(CFB)燃烧技术因其独特的低成本污染控制优势得到了高度重视, 近年来我国在此领域的技术发展取得了长足的进步。回顾了我国 CFB 燃烧技术的发展历程, 从最初的跟踪学习到技术创新, 走出了一条适应中国国情的独立创新发展道路, 先后开发出高性能 CFB 锅炉、节能型 CFB 锅炉和超低排放 CFB 锅炉, 同时提高蒸汽参数和大型化, 引领了 CFB 技术的国际发展。目前我国成为世界上 CFB 锅炉最大的设备供应商和使用者, CFB 发电机组作为我国燃煤发电体系中的重要组成部分, 为可靠廉价电力供应和劣质燃料消纳做出了重要贡献。碳中和条件下, 煤炭作为保底能源在电力系统安全托底中不可或缺。作为低热值煤以及难燃高硫无烟煤的高效清洁发电利用的主要方式, CFB 锅炉应在深度调峰和快速变负荷灵活性方面展现更大优势。结合新能源高比例消纳的调峰需求, 可以开发粉煤 CFB 锅炉技术、探索分布式小容量高参数 CFB 锅炉、挖掘 CFB 机组 0~100% 负荷长周期压火与快速热态启动潜力, 进一步提高 CFB 机组运行灵活性; 在运行灵活性基础上发挥 CFB 锅炉燃料灵活性的优势, 突破高硫无烟煤超超临界高效发电与超低排放同步实现的难题, 消纳煤炭绿色开采洗选副产的劣质燃料, 纯烧或者掺烧城市污泥、生活垃圾、生物质等低碳可燃废弃物, 开发灵活性下的超低排放控制技术, 实现 CFB 机组智能化, 助力我国能源结构转型发展。

关键词: 循环流化床; 燃烧技术; 碳中和; 燃料灵活性; 煤燃烧

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0514-09

Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization

LYU Junfu¹, JIANG Ling¹, KE Xiwei¹, ZHANG Hai¹, LIU Qing¹, HUANG Zhong¹, ZHOU Tuo¹, ZHANG Man¹, WANG Junfeng^{1,2}, XIAO Feng³, LU Jiayi⁴, JIANG Xiaoguo²

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, China;

3. Shanghai Boiler Works Co., Ltd., Shanghai 200245, China; 4. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: More attention is paid on the circulating fluidized bed (CFB) combustion technology because of its advantage in low cost emission control. Recently, great achievements have been realized in China. The development history of CFB combustion technology in China for decades is reviewed in this paper, from learning to independent technological innovation. High-performance CFB boilers, energy-saving CFB boilers and ultra-low emissions CFB boilers have been successively developed, while improving steam parameters and realizing large-scale. At present, China has become the largest equipment supplier and user of CFB boilers in the world. As an important part of China's coal-fired power generation system, important contributions have been made to reliable and cheap power supply and low-quality fuel consumption. For the carbon neutralization, coal will be indispensable in the security of power system as the guaranteed energy. As the main way of efficient and clean utilization of low calorific value coal and high sulfur anthracite, greater advantages of CFB boiler in

收稿日期: 2022-10-15

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1609

基金项目: 中国工程院咨询研究资助项目(2020-XY-10); 华能集团总部科技项目“基础能源科技研究专项”(二)资助项目(HNKJ21-H31)

作者简介: 吕俊复(1967—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士。Tel: 010-62792647, E-mail: lvjf@mail.tsinghua.edu.cn

deep peak regulation and rapid load changing flexibility should be exploited. To meet the peak regulating demand of high proportion of new energy consumption, pulverized coal CFB technology can be developed, distributed small-capacity high-parameter CFBs can be explored, and the potential of 0-100% load long-term combustion break and fast restart of CFB units can be explored, so as to further improve the operational flexibility of CFB units. On the basis of operation flexibility, the advantages of CFB boiler fuel flexibility are used to realize high-sulfur anthracite ultra-supercritical high-efficiency power generation and to achieve ultra-low emissions simultaneously. Furthermore, mixed fuel CFB power generation should be developed to realize the consumption of low-carbon combustible wastes such as municipal sludge, domestic waste, biomass and other inferior fuels from coal mining and washing. In addition, ultra-low emission control technology under flexible operation and intelligent CFB power generation technology should be developed to assist the transformation and development of China's energy structure.

Key words: circulating fluidized bed; combustion technology; carbon neutralization; fuel flexibility; coal combustion

0 引 言

2020 年,我国能源消费总量为 4.98×10^9 t 标准煤,其中煤炭占比为 56.8%^[1]。我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋,决定了燃煤发电在我国电力行业中的重要地位。煤炭发挥着国家能源安全的“压舱石”作用^[2-3]。在诸多洁净煤燃烧技术中,循环流化床(CFB)锅炉具有燃料适应性广、污染物控制成本低以及负荷调节范围宽等优势^[4-5]。CFB 锅炉是低温燃烧,热力型 NO_x 原始生成量可以忽略;通过宏观的过量空气系数、分级配风控制,以及微观的气固两相流动传质调控,能够在炉膛中形成局部还原性气氛,降低燃料型 NO_x 生成,从而低成本实现 NO_x 原始低排放^[6-7]。在燃烧过程中,通过向炉内投入石灰石颗粒进行脱硫,相比于烟气脱硫,投资和运行简单,低成本降低 SO_2 排放。工程实践表明,通过控制适当的钙硫比、床温、氧量,CFB 锅炉脱硫效率能够达到 90% 以上^[8]。CFB 燃烧技术对于我国煤炭资源的高效清洁利用有着独特优势和重要意义,在我国发展迅速,CFB 发电机组广泛使用^[5,9-11],近几十年来取得长足进步,在 11 亿 kW 发电装机容量中,CFB 机组超过 1 亿,机组蒸汽参数、单机容量、总台数、总容量以及运行性能、排放控制水平,均引领了国际发展。

2020 年,中国提出 2030 年实现碳达峰,2060 年实现碳中和的发展目标^[12],其中重要措施是要构建以新能源为主体的新型能源系统。新能源的不稳定性势必会给电网系统带来极大的调峰压力,这就要求火力发电机组从基础发电量保障向系统调节、托底电网安全的方向转型。CFB 锅炉由于其特有的循环回路以及床料的蓄热性,有望在新型电力系统构建中发挥更大的作用^[13]。

笔者回顾了我国 CFB 燃烧技术的发展历程和技术进步,立足于 CFB 燃烧技术本身特点,探讨新形势下 CFB 燃烧技术的需求、挑战和发展前景。

1 中国 CFB 锅炉技术的发展历程

1.1 高性能 CFB 锅炉

中国从 20 世纪 60 年代开始进行流化床锅炉研究,最初是基于鼓泡流态化理论进行设计建造,先后投运了一系列鼓泡流化床锅炉。80 年代起,我国开始循环流化床的研发,最初自主研制的循环流化床锅炉循环量不足,锅炉负荷低,没有完全脱出带飞灰循环的鼓泡流化床锅炉范畴^[14]。从 90 年代开始,通过系统的循环流化床气固两相流动、燃烧、传热的基础研究工作,揭示了 CFB 锅炉主循环回路的性能的重要性,及其“一进二出”的物料平衡特性^[15],建立了密相区以及炉膛上部稀相区的床料浓度、燃烧行为和传热预测模型^[16-18],构建了完整的 CFB 锅炉设计理论体系^[19-20]。

图 1 所示为典型 CFB 锅炉主循环回路,对于床料而言是个一进二出系统,进入的床料来自于燃料中的灰分、脱硫剂及脱硫产物,有时还有外加惰性床料。对于较大粒径的床料颗粒,若流化风速小于其终端沉降速度而难以被携带到炉膛上部,这一部分床料将在炉膛底部密相区运动直至从排渣口排出炉膛。而较小粒径的床料被带到炉膛上部稀相区,离开炉膛进入分离器进行气固分离,其中部分非常细的颗粒未被分离器捕集下来,随烟气一起从分离器上部流出,以飞灰的形式进入尾部对流烟道;离开炉膛的大部分颗粒被分离器分离,经过返料阀回到炉膛中,继续循环。这个循环过程,通过高效分离器、低反窜返料阀,能够实现炉膛中床料的强烈团聚并形成较高的空间床料浓度,从而有效地延长了燃料颗粒和脱硫剂颗粒在炉膛中的停留时间,为燃烧效率和石灰石利用率提供条件^[6];较高的床料浓度,可以强化炉膛中的传热^[18]。这些设计理论为高性能 CFB 锅炉的设计开发提供了基础,指导开发了系列的高性能 CFB 锅炉,实现了产业化系列化,设计技术、

研制的装备出口海外^[14]。21 世纪初,我国自主研发的高性能 CFB 锅炉完全满足了国内需求,并且在国际上显示出良好的竞争力。

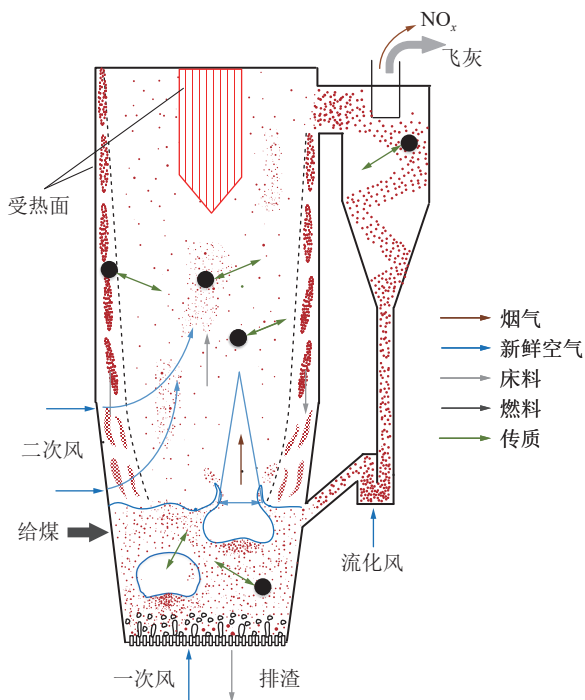


图 1 典型 CFB 燃烧系统

Fig.1 Typical CFB combustion system

1.2 节能型 CFB 锅炉

CFB 锅炉的广泛应用取得了良好的经济、社会、环保效益,但同时表明,其厂用电率相较于煤粉炉高、炉膛中受热面存在磨损的风险。降低厂用电率、提高可靠性是高性能 CFB 锅炉的发展方向。

研究表明,CFB 锅炉的必要条件是炉膛中形成以颗粒团聚为根本特征的快速床^[19]。炉膛上部颗粒的团聚行为决定了气固两相流向受热面的传热性能。颗粒团聚的发生条件之一是其粒径。颗粒越细,团聚的程度越强。分析炉膛中的床料,其中的一部分粒度较细,能够被携带到炉膛上部形成快速床、参与主循环回路的外循环,这些细床料对炉内传热系数以及受热面的布置起决定性作用,可称为有效床料;与之相对粗颗粒,主要在下部密相区运动,为燃料的着火提供热源,对快速床的形成、颗粒团聚程度以及炉膛传热贡献甚微,则称为无效床料^[21]。因此,无效床料的存量只要满足点火需求即可,研究表明,经典的 CFB 燃烧技术中,无效床料的存量普遍超过需求,有很大的降低的空间。降低的程度与给煤粒度有关。若合理控制入炉煤粒度分布,可以显著降低无效颗粒的存量,降低流化的一次风压头,从而节约一次风电耗。与此同时,必须维持炉膛上部颗粒浓度不

变^[22]。这对循环系统的性能提出了新的要求。若改善分离器和返料阀的性能,以晋能集团山西国峰电厂 300 MW CFB 锅炉为例,稀相区床压降几乎保持不变的情况下,总床压降低了 30.6%,一次风机能耗降低 21%^[23],如图 2 所示。

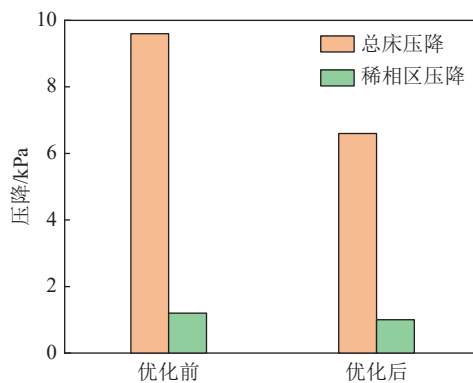


图 2 优化前后炉膛床压降

Fig.2 Furnace bed pressure drop after optimization

1.3 超低排放型 CFB 燃烧技术

CFB 锅炉具有天然的污染物控制优势,其原因在于:利用炉内石灰石脱硫技术可以省去复杂的烟气脱硫系统,极大程度降低脱硫成本;CFB 锅炉燃烧温度低,一般在 850 ~ 900 ℃、存在大量还原性床料,通过合理的过量空气系数以及分级配风手段,能够有效降低 NO_x 原始生成。大量的工程实践表明,在不外加污染物处理系统的情况下,CFB 燃烧技术能够实现世界上绝大部分国家的排放标准。

由于环境容量的限制,2013 年,我国提出了燃煤超低排放要求,规定燃煤发电锅炉的 SO₂ 和 NO_x 排放分别不得高于 35 mg/m³ 和 50 mg/m³,这是世界上最为严格的燃煤烟气排放要求,给低成本污染控制优势的 CFB 煤电机组带来了新的挑战。

为此,我国科研工作者提出,通过采用超细石灰石增大反应表面积的方法来提高脱硫反应速率,改善炉内脱硫效率和石灰石利用率^[24]。为了解决细石灰石因分离效率引起的停留时间不足的问题,采取措施提高主循环回路系统对细颗粒石灰石的保存能力,并强化炉膛中的颗粒团聚。这一技术路线得到工程验证,在钙硫比低于 2 的条件下,对于收到基全硫含量低于 1.5% 的煤,利用炉内脱硫,锅炉原始 SO₂ 排放即可达到超低排放限值要求^[25]。

抑制燃烧过程 NO_x 生成的关键是强化燃烧的还原性气氛。考虑到受热面的高温腐蚀约束,还原性气氛的强化必须在局部实现。根据密相区、稀相区各自的气固流动和燃烧反应特点,以及氧气向燃料

颗粒传质过程的控制因素,发现降低床料粒度可以显著强化燃烧反应的还原性气氛^[26],因此提出通过降低床料粒度调控化学反应,实现了 NO_x 原始超低排放。可见,炉内高效脱硫和燃烧低氮排放的技术路径是一致的,都是通过降低床料粒度实现的。

CFB 炉内脱硫和低氮燃烧不是两个独立的过程,其反应是相互耦合的,主要体现在:低氮燃烧要求炉内一定区域有较强的还原性氛围而 CFB 炉内固硫反应需要氧化性气氛;石灰石炉内脱硫的反应物和生成物 CaCO_3 、 CaO 、 CaSO_4 、 CaS 等在不同情况下,对不同含氮反应均具有催化效果,影响程度各不相同^[26],如图 3 所示。

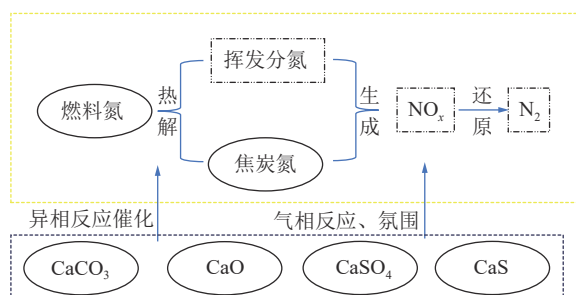


图 3 CFB 炉内脱硫与 NO_x 生成与还原系统耦合

Fig.3 Coupling of desulfurization with limestone and NO_x reaction system in CFB furnace

因此,炉内脱硫和低氮燃烧之间存在着矛盾。上述技术路线中,气固反应的还原性气氛是在微观的气固两相流动中实现的,而宏观的脱硫反应气氛是氧化性的,即利用床料粒度的降低,将氧化性气氛和还原性气氛分区可控实现,解决了 NO_x 和 SO_2 协同控制问题。

1.4 超临界 CFB 锅炉

为了提高发电效率,随着锅炉容量的增大,超临界 CFB 锅炉的开发成为必然^[27]。在 21 世纪初,我国就已经开始开展超临界 CFB 锅炉可行性探索研究。“十五”期间,在国家“863”计划、科技支撑计划等支持下,我国率先开展超临界 CFB 锅炉的开发。经过多年的持续研究^[6,28-31],2013 年 4 月,由东方锅炉股份有限公司设计制造的世界首台 600 MW 超临界 CFB 锅炉在四川白马电厂通过 168 h 满负荷运行试验,蒸汽参数达 25.5 MPa, 571 °C/569 °C(过热蒸汽温度/再热蒸汽温度)。该机组主要运行参数和设计十分吻合,性能指标达到世界领先水平^[32]。

600 MW 超临界 CFB 锅炉是完全自主开发的,相关的设计理论研究和关键技术开发构成了完整的体系,可以拓展应用。因此“白马 600 MW 示范项目”投运后,利用这些技术开发了 350 ~ 660 MW 超临界

CFB 锅炉,燃料涵盖几乎所有煤种,解决了劣质燃料的规模化经济高效发电利用问题。由于劣质燃料的运输范围,350 MW 超临界 CFB 锅炉显示出巨大的市场需求。自 2015 年 9 月第一台 350 MW 超临界 CFB 锅炉在山西国金电厂投运至今,投运的 350 MW 超临界 CFB 机组超过 50 台。在此期间,2 台 660 MW 超临界 CFB 锅炉也投入运行。中国引领了超临界 CFB 锅炉的国际发展。

超临界 CFB 锅炉取得巨大成功,发电效率显著改善。为了进一步提高发电效率,要求发展更高参数的 CFB 锅炉。在国家科技部的支持下,开展了超超临界 CFB 锅炉的研究开发和工程示范,以期在蒸汽参数、原始排放、厂用电率等方面取得更大的成就。通过多年的研究开发,已经形成了相关的关键技术体系^[33-35]。2019 年,国家能源局正式批复了贵州威赫、陕西彬长 660 MW 超超临界 CFB 机组示范项目;2022 年 3 月广东国粤 700 MW 超超临界 CFB 机组示范项目通过核准。目前上述 3 个示范项目均在建设中。贵州威赫 660 MW 高效超超临界 CFB 锅炉如图 4 所示,设计参数在超临界 CFB 机组基础上提升至 29.4 MPa, 605 °C/623 °C,与 660 MW 一次再热超超临界煤粉炉的最高水平相同^[36]。这意味着该机组的受热面材料和布置方式的要求将会更加严格。由于该机组将燃用当地的高硫无烟煤,一方面要解决无烟煤机组 NO_x 排放控制困难的问题,另一方面要解决超超临界参数下高温腐蚀控制困难的问题,以及无烟煤燃尽困难的问题^[37]。

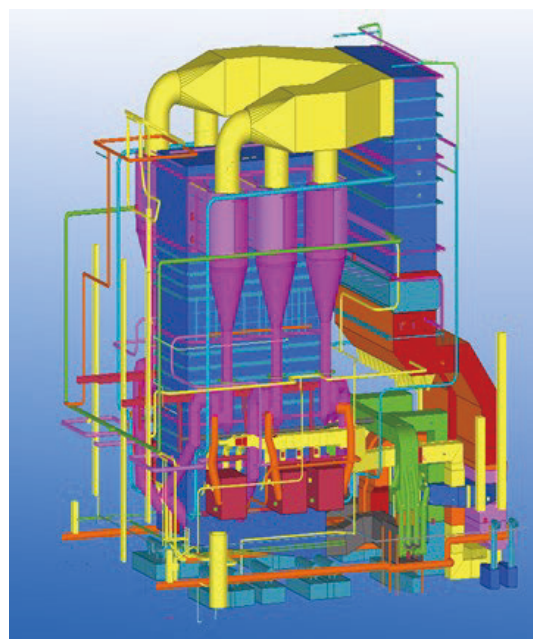


图 4 660 MW 高效超超临界 CFB 锅炉

Fig.4 660 MW advanced ultra-supercritical CFB boiler

2 碳中和背景下 CFB 燃烧技术展望

双碳目标的提出,对我国煤电行业产生了深远的影响,同时也为其发展注入了新的动力。碳中和的实现是一个逐渐降低煤电发电量份额比例的过程,也是一个解决风电、太阳能等新能源对电力系统安全性冲击的过程。在此过程中,现实可靠解决电力系统安全性的措施是,让燃煤发电机组承担调峰任务。在这一大背景下,CFB 燃烧技术在运行灵活性、燃料灵活性以及低负荷污染控制方面,具有非常广阔的技术潜力和发展空间。

2.1 CFB 锅炉运行灵活性

运行灵活性包括深度低负荷能力和快速变负荷能力 2 个方面。深度低负荷能力一般是指稳燃负荷下限。CFB 锅炉的特征是有大量高温物料循环的主循环回路以及炉膛下部的密相区,炉内床料蓄热量大,温度分布均匀。燃料进入炉膛后,能够从周围的床料中迅速吸收热量达到着火温度,因此其燃料适应性非常好,低负荷稳燃性能十分出色,从而具有天然的深度调峰优势。但是同时由于其热惯性较大,燃烧速度的变化速度缓慢,变负荷速度较煤粉炉不足。CFB 机组灵活性,有进一步改善的空间。

2.1.1 粉煤 CFB 锅炉技术

在 CFB 锅炉中,由于优越的着火条件,稳定燃烧的化学过程通常不是限制低负荷能力的主要因素,而是气固流动的物理过程,即稳燃下限取决于流化质量,也就是均匀流化需要的最低风速,该速度下必须满足充分流化的要求,而且密相区的热平衡温度要为燃料颗粒稳定着火提供足够的着火热。这个最低流化速度与床料性质尤其是粒度有关^[6]。床料粒度是给煤粒度的直接结果,若降低给煤粒度至 0~1 mm^[38]从而降低流化速度的要求,可以显著降低稳燃的负荷下限。

蒸汽循环的负荷变化速度由燃烧侧和汽水侧 2 方面共同决定。CFB 发电机组中,锅炉系统的惯性大^[39],决定发电机组负荷变化速率在锅炉燃烧侧,其中 2 个主要环节是燃烧速率和传热速率。在给煤粒度较细条件下,可以通过调节给煤量来快速调节燃料的总反应表面积^[40],从而调控燃烧反应的速度,进而实现燃烧速率的快速调节。CFB 炉内传热依赖于床料浓度^[41],而床料浓度的变化依赖于主循环回路的累计过程,通常这是个缓慢过程^[42];而 CFB 条件下的燃烧温度只能在 850~900 ℃,否则不利于流化安全和污染控制,因此快速调节传热速率只能依赖

于床料浓度的快速调整。这可以采取对循环系统进行干预,迅速调节炉膛中的床料浓度也就是传热速率,与燃烧速率的快速调节一起,提高 CFB 锅炉的负荷调节速率。

同时由于床料粒度变细,还能进一步降低受热面的磨损,有利于进一步降低 NO_x 原始排放。粉煤 CFB 锅炉技术可望在深度低负荷能力、快速变负荷、燃烧控制 NO_x 排放、低受热面磨损等各方面性能均有出色的表现。

2.1.2 小容量高参数 CFB 锅炉技术

面对机组灵活性的新需求,机组长时间低负荷运行的现状,可以在电网系统更加智能化的前提下,合理安排发电端各单元机组的负荷,分解大容量机组变负荷速率慢的劣势,发挥小容量的发电单元在电网调度上的灵活性优势^[43]。

小容量机组要实现高效率,也必须采用高参数。大型高参数 CFB 锅炉技术积累^[44-48],为小容量高参数 CFB 锅炉的开发提供了坚实的技术基础^[49]。我国小型燃煤机组,主要存在于地方热电厂和自备热电厂中,由于燃料供给的频繁变化,这些机组中 CFB 居多。这些机组通常参数较低,通过提高蒸汽参数,可以显著改善这些小型 CFB 发电机组的效率。发展高参数的小容量 CFB 锅炉,兼顾小容量机组的灵活性和高参数锅炉的高效率,十分重要。开发亚临界、超临界小容量 CFB 锅炉以及相应的汽轮机组是发展方向。

2.1.3 CFB 机组长周期压火与快速启动技术

CFB 炉内有大量的高温床料,具有良好的压火能力。运行过程中,突然风机停转、给煤中止,炉内床料将回落堆积在炉膛底部,由于布风板和下部炉膛四周水冷壁均由耐火材料覆盖,高温床料的向四周和底面的导热系数很低,主要是床层表面向上部炉膛水冷壁及炉内悬吊受热面的辐射,床层表面温度下降比较快,但床料内部向表面的导热系数较低,因而整个床层的散热非常缓慢,3 h 后床料平均温度仅下降 100 ℃ 左右,高于燃料着火温度^[50]。此时启动一次风机、投煤,可实现重启,因此 CFB 机组长周期压火性能非常优越。

经过一定时间的压火,若床料温度仍然较高,可以不投油迅速重启^[51],受热面是安全的^[52]。在相当长的压火期间,利用床料的散热、自然通风引发的残存燃料缓慢氧化放热,锅炉的蒸发量可以在 2% 左右,这一流量可以维持汽轮机近零负荷运转,形成旋转备用,利于热态快速启动。这是 CFB 发电机组的独

特优势。

CFB 机组在长周期压火和热态快速启动上有很好的潜力,具备的 0~100% 负荷调节能力,对于新能源尤其是太阳能光伏发电占比较高的条件下煤电结构优化具有重大意义。

2.2 CFB 锅炉燃料灵活性

CFB 锅炉中的高温床料为其优异的燃料适应性提供了条件,工程实践已经证明,CFB 锅炉能够高效清洁燃用低热值煤、难燃无烟煤、煤洗选副产品煤矸石和煤泥等劣质煤。面对碳中和背景,在运行灵活性的基础上,充分发挥 CFB 锅炉的燃料适应性,利用消纳处理劣质煤和各种低碳可燃废弃物,助力碳中和战略。

2.2.1 高硫无烟煤

我国西南地区富产高硫无烟煤,具有高硫、难着火、难燃尽的特点,其高效清洁发电利用一直受限,煤粉燃烧和 W 火焰燃烧,均无法解决其高温腐蚀和 NO_x 排放超标问题,沾污结渣问题也较为突出,因此长期没有实现超超临界参数突破。

人们早期利用 CFB 锅炉高效利用无烟煤发电的设想,已经为包括 350 MW 超临界 CFB 锅炉在内的系列实践所验证^[53],已有的实践表明,CFB 锅炉在燃用低挥发分的劣质贫煤、无烟煤取得了成功,即使是高含硫量,也能通过方便地实现 SO_2 超低排放,而炉内的高温腐蚀完全可控, NO_x 原始排放远低于常规的煤粉炉或 W 火焰炉,大约比后二者低一个数量级。高硫无烟煤超超临界发电不再遥不可及,CFB 燃烧技术成为清洁高效燃用高硫无烟煤的可行途径。正在实施的威赫 660 MW 超超临界 CFB 机组项目,就是燃用当地高硫无烟煤,可望为无烟煤的发电利用取得重要进展。

2.2.2 高比例煤泥

既然煤炭利用不可避免,那么煤炭洗选率将进一步提高,以便洗选加工分质利用也就是必然。洗选副产的煤泥,是典型的低热值燃料。其特点是颗粒粒度细、水分含量高且持水性很强、黏度大、灰分高,其形态不稳定性导致堆放、贮存和运输困难,极易造成环境污染。其利用的最佳方式是在 CFB 锅炉中燃烧^[54],我国多将煤泥和煤矸石混合燃烧,具有丰富的经验^[55]。由于矸石和煤泥的粒度分布相差悬殊,煤泥 CFB 锅炉的可靠性与燃煤 CFB 锅炉相比有改善的空间。我国煤炭多产自北方,这些地区又具有丰富的风电、太阳能资源,可以配套建设具有灵活性优势的大容量 CFB 发电机组,以煤泥为主要燃料,利

于形成可靠的可再生能源为基础的能源基地,成为绿色煤炭不可或缺的重要一环。

2.2.3 低碳可燃废弃物

可以利用着火条件优越、燃料适应性强的特点,在 CFB 锅炉中燃烧消纳处理低碳可燃废弃物,包括城市污泥、生活垃圾、生物质等。近年来,在秸秆直燃发电方面取得了重大突破,生物质锅炉蒸汽参数达到了超高压一次再热,每公斤生物质发电量提高 25%,显著改善了生物质发电项目的经济性^[56]。结合高参数 CFB 锅炉,发展亚临界甚至超临界低碳可燃废弃物 CFB 锅炉,市场潜力巨大。

通常 CFB 机组是根据特定燃料来进行设计的。利用 CFB 锅炉的燃料适应性,可以掺烧其他燃料,包括低碳可燃废弃物,以降低燃料成本、消纳废弃物。这有良好的市场前景。

2.3 灵活性下的 CFB 锅炉排放控制

目前正常运行的 CFB 燃烧技术,在排放控制方面已经走在世界前列,但值得注意的是,灵活性运行下,超低排放控制面临新的挑战。

锅炉负荷的快速变化往往意味着炉内流动、燃烧状态的明显波动,此时 SO_2 和 NO_x 的瞬时排放浓度也会剧烈变化,甚至超标^[57]。另一方面,锅炉超低负荷下床温降低,炉膛出口和分离器中烟温降低,偏离 SNCR 反应温度窗口,导致脱硝反应缓慢甚至停止。CFB 锅炉是一个复杂的整体,污染物原始排放受多因素控制,与给煤、石灰石粒径和给入位置,过量空气系数与分级配风等控制手段均具有重要关系,每一种工况理论上都应存在一个最优化运行参数组合,通过流态优化和燃烧组织来探索污染物排放极限,突破燃煤机组超低负荷下的 NO_x 排放的控制难题,通过燃烧调控解决超低负荷运行的 NO_x 排放控制,结合智能化发电需求,打造智能化 CFB 发电技术。这些需要进一步研究探索。

3 结 语

经过几十年的持续研究开发,我国相继开发出高性能 CFB 锅炉、节能型 CFB 锅炉、超低排放 CFB 锅炉和超临界 CFB 锅炉,实现了从跟踪学习到国际引领的跨越,成为世界上 CFB 锅炉最大的设备供应国、机组使用国。CFB 锅炉发电机组作为我国燃煤发电体系中的重要组成部分,为可靠廉价电力供应和劣质燃料消纳做出了重要贡献。双碳目标为 CFB 锅炉技术的发展注入了新的动力,在构建以新能源为主体的新型电力系统中,CFB 锅炉因其卓越

的运行灵活性和燃料灵活性优势,将发挥更重要的安全保障作用。结合新能源高比例消纳的调峰需求,可以开发粉煤 CFB 锅炉技术、探索分布式小容量高参数 CFB 锅炉、挖掘 CFB 机组 0~100% 负荷长周期压火与快速热态启动潜力,进一步提高 CFB 机组运行灵活性;在运行灵活性基础上发挥 CFB 锅炉燃料灵活性的优势,突破高硫无烟煤超超临界高效发电并超低排放的难题,适应煤炭绿色开采的需求,消纳开采和分选副产的煤泥、洗中煤和矸石,并纯烧或者掺烧城市污泥、生活垃圾、生物质等低碳可燃废弃物;开发灵活性运行下的超低排放控制技术;实现 CFB 发电技术智能化。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021
- [2] 袁亮, 张农, 阚甲广, 等. 我国绿色煤炭资源量概念、模型及预测[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 1-8.
YUAN Liang, ZHANG Nong, KAN Jianguang, *et al.* The concept, model and reserve forecast of green coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 1-8.
- [3] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, *et al.* New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [4] BO Leckner. Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(1): 31-61.
- [5] JOHNSON J E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion[J]. Fuel, 1994, 73(9): 1398-1415.
- [6] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] WANG X, GIBBS B M, RHODES M J. Impact of air staging on the fate of NO and N₂O in a circulating fluidized-bed combustor[J]. Combustion and Flame, 1994, 99(3/4): 508-515.
- [8] 李建锋, 郝继红, 吕俊复, 等. 中国 300 MWe 级循环流化床锅炉机组运行现状分析[J]. 锅炉技术, 2010, 41(5): 37-41.
LI Jianfeng, HAO Jihong, LYU Junfu, *et al.* Status of 300 MWe circulating fluidized bed boiler operation in China[J]. Boiler Technology, 2010, 41(5): 37-41.
- [9] BASU P. Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(22): 5547-5557.
- [10] YUE Guangxi, CAI Runxia, LYU Junfu, *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, 2017, 316: 18-28.
- [11] ARJUNWADKAR A, BASU P, ACHARYA B. A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 672-694.
- [12] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 中华人民共和国国务院公报, 2020-09-22(3).
- [13] 杨海瑞, BO Leckner, RAFAL Kobylecki, 等. 国际对话: “碳达峰、碳中和”背景下循环流化床锅炉的发展与挑战[J]. 电力学报, 2022, 37(2): 118-120.
YANG Hairui, BO Leckner, RAFAL Kobylecki, *et al.* International Dialogue: Development and challenges of CFB boiler under the background of “Carbon emission peak and carbon neutralization” [J]. Journal of Electric Power, 2022, 37(2): 118-120.
- [14] YUE Guangxi, YANG Hairui, LYU Junfu, *et al.* Latest development of CFB boilers in China [C]//Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Xi'an: 2009, 3-12.
- [15] 杨海瑞, 岳光溪, 王宇, 等. 循环流化床锅炉物料平衡分析[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 291-295.
YANG Hairui, YUE Guangxi, WANG Yu, *et al.* Analysis of mass balance in a circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(3): 291-295.
- [16] LI Shaohua, YANG Hairui, ZHANG Hai. Measurements of solid concentration and particle velocity distributions near the wall of a cyclone[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 150(1): 168-173.
- [17] JIN Xiaozhong, LYU Junfu, YANG Hairui, *et al.* Comprehensive mathematical model for coal combustion in the circulating fluidized bed combustor[J]. Tsinghua Science and Technology, 2010, 6(4): 319-325.
- [18] LU Junfu, ZHANG Jiansheng, YUE Guangxi, *et al.* Heat transfer coefficient calculation method of the heater in the circulating fluidized bed furnace[J]. Heat Transfer, 2002, 31(7): 540-550.
- [19] 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(6): 761-767.
LUO Zhongyang, HE Hongzhou, WANG Qinhui, *et al.* Status quo-technology of circulating fluidized bed boiler and its prospects of development[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2004(6): 761-767.
- [20] YUE Guangxi, LYU Junfu, ZHANG Hai, *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.
- [21] 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(LEC) CFB technology based on state specification design theory[J]. Electric Power Technology, 2010, 19(2): 9-16.
- [22] SU Jianmin, HU Nan. Application of fluidization reconstruction energy-saving combustion technology on 300MW CFB boiler[J]. Advanced Materials Research, 2012, 516-517: 140-145.
- [23] 汪佩宁, 蔡润夏, 柳成亮, 等. 300 MWe节能型循环流化床锅炉的设计与运行[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2016, 12(4): 308-313.
WANG Peining, CAI Runxia, LIU Chengliang, *et al.* Design and

- operation of a 300 MWe low energy consumption CFB boiler[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2016, 12(4): 308-313.
- [24] 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.
- [25] CAI Runxia, KE Xiwei, HUANG Yiqun, *et al.* Applications of ultrafine limestone sorbents for the desulfurization process in CFB boilers[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(22): 13514-13523.
- [26] 柯希玮, 蒋 苓, 吕俊复, 等. 循环流化床燃烧低污染排放技术研究展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(3): 120-128.
- KE Xiwei, JIANG Ling, LYU Junfu, *et al.* Prospects for the low pollutant emission control of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(3): 120-128.
- [27] 程乐鸣, 周星龙, 郑成航, 等. 大型循环流化床锅炉的发展[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 817-826.
- CHENG Lemin, ZHOU Xinglong, ZHENG Chenghang, *et al.* Development of large-scale circulating fluidized bed boiler [J] Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2008, 28(6): 817-826.
- [28] 胡 南, 刘雪敏, 杨 石, 等. 双分离器并联CFB系统的稳定性分析[J]. 动力工程学报, 2013, 33(7): 497-501.
- HU Nan, LIU Xuemin, YANG Shi, *et al.* Stability analysis on CFB system with two cyclones in parallel[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(7): 497-501.
- [29] 胡 南, 郭兆君, 杨海瑞, 等. CFB锅炉炉膛内颗粒横向扩散系数研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(3): 168-171, 206.
- HU Nan, GUO Zhaojun, YANG Hairui, *et al.* Experimental study on lateral dispersion coefficient of solid particles in a CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(3): 168-171, 206.
- [30] 鲁佳易, 卢啸风, 王 虎, 等. 引进300 MW循环流化床锅炉后燃特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 12-18.
- LU Jiayi, LU Xiaofeng, WANG Hu, *et al.* Experimental study on post combustion characteristics of the imported 300 MW circulating fluidized bed boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 12-18.
- [31] 周 旭, 杨 冬, 肖 峰, 等. 超临界循环流化床锅炉中等质量流速水冷壁流量分配及壁温计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 13-18.
- ZHOU Xu, YANG Dong, XIAO Feng, *et al.* Mass flow rate profile and metal temperature calculation in water wall of an supercritical circulating fluidized bed boiler at medium mass flow rate[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 13-18.
- [32] CAI Runxia, KE Xiwei, LYU Junfu, *et al.* Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: a review[J]. Clean Energy, 2017, 1(1): 36-49.
- [33] 凌 文, 吕俊复, 周 托, 等. 660 MW超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2523.
- LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, *et al.* Research and development progress of the 660 MW Ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2515-2523.
- [34] 肖惠仁, 姚禹歌, 张 缦, 等. 流化床锥形阀流量特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1694-1700.
- XIAO Huiren, YAO Yuge, ZHANG Man, *et al.* Experimental investigation on flow characteristics of fluidized bed cone valve[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1694-1700.
- [35] 莫 鑫, 黄逸群, 向柏祥, 等. 燃煤循环流化床锅炉中并联分离器的性能实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2503-2507.
- MO Xin, HUANG Yiqun, XIANG Baixiang, *et al.* Experimental study on the performance of parallel cyclones in a coal-fired CFB boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2503-2507.
- [36] 聂 立, 巩李明, 邓启刚, 等. 东方660 MW高效超超临界CFB锅炉的设计[J]. 电站系统工程, 2019, 35(4): 21-24.
- NIE Li, GONG Liming, DENG Qigang, *et al.* Design of Dongfang 660 MW highly-efficient ultra-supercritical CFB boiler [J]. Power System Engineering, 2019, 35(4): 21-24.
- [37] 陈陆剑, 陶 欣, 张 缦, 等. 660 MW超超临界CFB锅炉物料平衡模拟[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3913-3920.
- CHEN Lujian, TAO Xin, ZHANG Man, *et al.* Simulation of material balance in a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3913-3920.
- [38] 尚曼霞, 黄 中, 张 缦, 等. 一种极窄筛分粒径粉煤循环流化床燃烧系统[P]. 中国专利: CN114353059A, 2022-04-15.
- [39] 李金晶, 李 燕, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉热惯性分析[J]. 热能动力工程, 2009, 24(5): 609-613.
- LI Jinjing, LI Yan, LYU Junfu, *et al.* An analysis of thermal inertia of a CFB(circulating fluidized bed) boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(5): 609-613.
- [40] 吕俊复, 佟博恒, 董建勋, 等. 循环流化床内煤矸石一维燃烧模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2418-2425.
- LYU Junfu, TONG Boheng, DONG Jianxun, *et al.* One-dimensional model of coal gangue combustion in circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2418-2425.
- [41] 张瑞卿, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉炉膛的传热计算[J]. 动力工程学报, 2011, 31(4): 248-252.
- ZHANG Ruiqing, YANG Hairui, LYU Junfu, *et al.* Calculation of heat transfer in furnace of a circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(4): 248-252.
- [42] 贺辉宝, 胡 南, 吕俊复, 等. 低灰分燃料循环流化床锅炉的外加物料河沙粒度分析. 动力工程学报, 2010, 30(4): 409-414.
- HE Huibao, HU Nan, LYU Junfu, *et al.* Sand size of a circulating fluidized bed boiler fired low ash fuel. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(4): 409-414.
- [43] 张 海, 吕俊复, 岳光溪. 美国能源部Coal FIRST计划介绍[C]//中国动力工程学会锅炉专业委员会2020年会, 成都: 2020.
- ZHANG Hai, LYU Junfu, YUE Guangxi. Introduction of Coal

- FIRST Initiative[C]//2020 Annual meeting of the Chinese Power Engineering Society Boiler, Chengdu:2020.
- [44] LI Zhouhang, WU Yuxin, LU Junfu, *et al.* Heat transfer to supercritical water in circular tubes with circumferentially non-uniform heating[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1): 190–200.
- [45] LI Zhouhang, WU Yuxin, TANG Guoli, *et al.* Comparison between heat transfer to supercritical water in a smooth tube and in an internally ribbed tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 529–541.
- [46] LI Zhouhang, LU Junfu, TANG Guoli, *et al.* Effects of rib geometries and property variations on heat transfer to supercritical water in internally ribbed tubes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 303–314.
- [47] TANG Guoli, ZHANG Man, GU Junping, *et al.* Thermal-hydraulic calculation and analysis on evaporator system of a 660 MWe ultra-supercritical CFB boiler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 151: 385–393.
- [48] TANG Guoli, LI Zhouhang, LYU Junfu, *et al.* The critical mass flux for positive flow characteristic of heated tubes in the vertical water wall[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 29–38.
- [49] 高 琴, 孔 皓, 杨海瑞, 等. 超高参数二次再热循环流化床锅炉技术可行性分析[J]. *热力发电*, 2020, 49(6): 32–37.
- GAO Qin, KONG Hao, YANG Hairui, *et al.* Feasibility analysis for ultra-high parameter CFB boiler with secondary reheat[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(6): 32–37.
- [50] YAO Yuge, JIANG Ling, DENG Boyu, *et al.* Heat transfer analysis of stationary bed materials in a CFB boiler after a sudden power failure[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 211: 106857.
- [51] YAO Yuge, JIANG Ling, XIAO Huiren, *et al.* Restart-up performance of a CFB boiler after a sudden power failure accident[J]. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(3): 830–839.
- [52] JIANG Ling, LI Yiran, YAO Yuge, *et al.* Heat transfer and protection of high-temperature reheater of a 660 MW circulating fluidized bed boiler after black out[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118654.
- [53] 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.
- [54] 尹炜迪, 李 博, 吴玉新, 等. 循环流化床锅炉煤泥燃烧行为模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1628–1633.
- YIN Weidi, LI Bo, WU Yuxin, *et al.* Model of coal slime combustion behavior in CFB boiler[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1628–1633.
- [55] 张 平, 陈陆剑, 江 华, 等. 300 MW 循环流化床锅炉大比例掺烧煤泥试验研究[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(1): 65–70.
- ZHANG Ping, CHEN Lujian, JIANG Hua, *et al.* Research on large proportion of coal slime co-combustion in a 300 MW CFB boiler[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(1): 65–70.
- [56] 柯希玮, 吕俊复, 郭学茂, 等. 高参数生物质循环流化床锅炉技术研发与应用[J]. *热力发电*, 2022, 51(6): 1–8.
- KE Xiwei, LYU Junfu, GUO Xuemao, *et al.* Development and application of the biomass-fired circulating fluidized bed boiler with high steam parameters [J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(6): 1–8.
- [57] 柯希玮, 张 缦, 杨海瑞, 等. 循环流化床锅炉 NO_x 生成和排放特性研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(8): 2757–2770.
- KE Xiwei, ZHANG Man, YANG Hairui, *et al.* Research progress on the characteristics of NO_x emission in circulating fluidized bed boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(8): 2757–2770.