

# 碳中和目标下循环流化床锅炉技术分析

张启飞

(北京国电电力有限公司上湾热电厂, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

**摘要** 在碳中和的目标下, 循环流化床锅炉技术具有明显的优势, 其燃料适应性强, 污染物控制经济且运行灵活, 能支撑电网调峰, 与碳中和目标高度适配。基于此, 本文论述了该项技术的核心优势与碳中和目标的适配性, 探讨了技术升级的方向与碳中和路径, 分析了多燃料协同利用与碳减排潜力, 并对未来技术发展进行了展望, 以期为进一步推动循环流化床锅炉技术的应用和升级提供有益参考, 进而提高生态效益与环境效益, 更好地实现碳中和目标。

**关键词** 碳中和; 循环流化床; 锅炉

中图分类号: TD8; X5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.015

## 0 引言

在全球气候变暖的环境下, 碳中和目标逐渐成为国际共识, 能源领域的低碳转型也迫在眉睫。传统的燃煤锅炉由于碳排放高, 面临着巨大的减排压力。循环流化床锅炉技术具有独特的优势, 在能源行业得到广泛应用。该技术目前在燃料适应性及污染物控制等方面已取得一定的成果, 但面对碳中和的严格要求, 仍有继续提升的空间, 在参数提升、脱硝脱硫优化、多燃料协同利用等方面均有发展机遇。因此, 探索循环流化床锅炉技术的未来发展方向, 对能源行业低碳转型有重要价值。

## 1 循环流化床锅炉技术核心优势与碳中和目标的适配性

在碳中和的目标下, 循环流化床锅炉技术具有多方面的核心优势, 如燃料适应性、污染物控制经济性、运行灵活性等。而这些优势与碳中和的目标具有较高的适配性, 能够较好地满足碳中和发展要求, 因而具有较高的推广应用价值。

### 1.1 燃料适应性优势

循环流化床锅炉技术在燃料适应性方面与碳中和目标高度契合, 我国煤炭储量虽然丰富, 但是优质煤相对稀缺, 大量高硫、高灰分的煤矸石和油页岩等劣质煤均有待开发。而循环流化床锅炉技术采用了独特的低温燃烧方式, 对燃料粒径要求宽泛, 能将这些劣质煤充分燃烧, 提高利用效率, 减少对优质煤的依赖, 进而降低优质煤开采带来的碳排放。该技术在生物质掺烧上也有较大潜力, 生物质作为可再生能源, 燃烧过程中释放的二氧化碳和生长过程中吸收的二氧化碳

基本平衡, 因而有碳中性特点<sup>[1]</sup>。锅炉能精准调控床料粒径并优化分级配风, 实现生物质和煤的稳定混烧, 降低化石燃料比例。生物质中还含有碱土金属等成分, 可在一定程度上辅助脱硫, 减少脱硫剂石灰石的用量, 降低运行成本和污染物排放, 助力碳中和。

### 1.2 污染物控制经济性

该技术在污染物控制方面有较高的经济性, 例如在脱硫脱硝方面, 采用炉内添加石灰石的方式脱硫, 在钙硫比达到 1.5~2.5 时, 能达到 90% 以上的脱硫效率, 使硫化物排放浓度降低到 35 mg/m<sup>3</sup>, 满足严格的环保要求。利用分级送风和低温燃烧技术, 能有效控制氮氧化物生成, 使其排放浓度控制在 150 ppm 以下, 满足超低排放的标准, 同时无需额外复杂的脱硝装置, 大幅降低了成本。此外, 针对生物质燃料燃烧可能带来的污染问题, 也可采取一定的应对措施。生物质中氮元素含量较高, 燃烧容易生成氯化氢及重金属氯化物, 对此, 可在锅炉内添加高岭土等吸附剂, 能协助脱除铅、镉等重金属及二噁英, 从源头上减少二次污染, 用经济高效的方式实现多种污染物协同控制, 进而有力地推动碳中和进程。

### 1.3 运行灵活性支撑电网调峰

循环流化床锅炉具有较高的运行灵活性, 能够支撑电网调峰。在应对负荷变化方面, 其独特的床料蓄热特性赋予了锅炉快速变负荷的能力, 可在 30%~100% 的负荷区间内稳定运行, 适应风电、光伏等新能源发电中由于自然条件变化而产生的波动性。同时, 利用循环干预技术, 可将锅炉变负荷速率提高到每分钟 5%, 快速响应电网调度指令, 及时调整发电功率, 满足电网的调峰需求。另外, 锅炉还具备了零出力热备用功能,

主循环回路中高温循环物料持续循环，能够维持锅炉始终处于热备用状态，可实现“秒级”启停。这一特性使得锅炉可根据新能源发电的实时情况，快速投入或退出运行，减少因新能源发电和用电负荷不匹配导致的弃电现象，提高电网的稳定性及可靠性，为碳中和目标的实现提供有力的支撑。

## 2 循环流化床锅炉技术升级方向与碳中和路径

### 2.1 超临界与超超临界参数突破

超临界和超超临界循环流化床锅炉在蒸汽参数上实现了较大提高，因而在效率提升及碳排放下降方面均取得了显著的成效。例如：当主蒸汽压力达到或超过25 MPa，温度达到或超过580 °C时，其供电效率可提升到42%～45%。因此，在发电过程中，燃料能量的转化更为高效，单位发电量消耗的燃料明显减少，因此其碳排放相比于亚临界机组降低了10%～15%，对于减少碳排放发挥了明显作用。另外，高温高压环境对于锅炉设备的要求较高，需要注意避免受热面超温及磨损的问题。对此，需研发耐高温蠕变的水冷壁材料，确保其在长期高温运行下保持稳定性能；还要开发高效防磨内衬，降低物料对设备的磨损。经过一系列创新后，能够延长设备使用寿命，保障锅炉稳定高效的运行，推动碳中和目标的实现。

### 2.2 深度脱硝与脱硫技术优化

循环流化床锅炉向碳中和升级的一项重要举措就是优化深度脱硝与脱硫技术<sup>[2]</sup>。在脱硫方面，可采用粒径小于50 μm的超细石灰石，其比表面积大，可增加与二氧化硫的接触反应机会，提高脱硫剂利用率。在钙硫比小于2的较低条件下，即可实现二氧化硫超低排放，使排放浓度控制在35 mg/m<sup>3</sup>以下，有效降低了脱硫成本和石灰石消耗。在脱硝处理方面，低氮燃烧和选择性非催化还原协同技术可发挥较大的作用。将床料粒径降低到1 mm以内，强化炉内还原性气氛，从源头上抑制燃料型氮氧化物的生成。同时结合选择性非催化还原技术，在850～950 °C的最佳窗口温度精准注入氨水，使氮氧化物排放浓度降低到50 mg/m<sup>3</sup>，满足严格的环保排放标准，进而有力地推动循环流化床锅炉的低碳清洁发展。

### 2.3 生物质高参数直燃技术

生物质高参数直燃技术能够较好地契合碳中和路径，在应对生物质燃料特性带来的挑战上，应重视防沾污腐蚀设计。生物质当中含有钾、钠等碱金属成分，在燃烧过程中容易使受热面产生沾污和腐蚀的问题，影响锅炉高效运行及蒸汽参数提升。可引入循环床料

清洗技术，提供有效解决方案，利用返料阀将惰性床料精准喷入高温分离器，借助床料冲刷作用清除沉积物，从而保护锅炉受热面清洁，使蒸汽参数提升到600 °C以上，提高发电效率。同时，生物质直燃循环流化床锅炉在提升能效方面也有明显优势，其供电效率可达35%～38%，如果结合热电联产模式，将发电产生的余热充分利用，还可将综合能效提高到85%以上，远超传统煤电机组，减少碳排放的同时也实现了能源的高效利用，推动碳中和目标实现。

## 3 多燃料协同利用与碳减排潜力

### 3.1 煤与生物质耦合燃烧

煤与生物质耦合燃烧是实现多燃料协同及挖掘碳减排潜力的重要方式，在燃料配比优化上，充分考虑生物质和煤的特性差异。生物质热值一般在12～18 MJ/kg，且灰分特性与煤不同。采用大量实验和实践确定最佳掺烧比例在10%～30%之间，在此比例范围内既能充分利用生物质燃料保证整体燃烧效率，又能减少化石燃料煤的使用量，从源头上降低碳排放<sup>[3]</sup>。在碳减排量核算过程中，以掺烧20%生物质计算，由于生物质在生长过程中吸收二氧化碳，具有碳中性的特点，单位发电量碳排放可降低15%～20%。如果生物质来源为秸秆等农业废弃物，其处理过程原本可能产生碳排放，而将其用于耦合燃烧，不但避免了废弃物处理带来的污染，也进一步提升了碳减排效益，为碳中和目标达成提供了有力支撑。

### 3.2 污泥与工业废弃物资源化利用

在循环流化床锅炉技术中，可将污泥和工业废弃物进行资源化利用。常规污泥处理中城市污泥含水率在80%～90%，直接处理难度大且容易造成二次污染。而循环流化床锅炉能发挥其独特优势，利用锅炉余热对污泥进行干化处理，将含水率降低至30%～40%，然后与煤混合燃烧。这一过程能实现污泥减量化，减量幅度在90%以上，还可通过高温燃烧杀灭污泥中的病原体与寄生虫，达到无害化处理目标，解决城市污泥处理难题。针对工业废弃物，例如油漆渣、废轮胎等可燃废弃物，过去多采用填埋的方式处理，不但会占用大量土地，而且也会在分解过程中产生甲烷等温室气体。利用循环流化床锅炉，可用这些工业废弃物代替部分煤炭燃烧，既减少了煤炭消耗，也降低了废弃物填埋带来的甲烷排放，助力碳减排。

### 3.3 碳捕集与封存技术集成

利用燃烧后捕集技术，在循环流化床锅炉尾部烟道中增设胺法吸收装置，能对含有12%～15%二氧化

碳的烟气进行有效捕集。该项技术相对成熟，能通过优化吸收剂和工艺流程，将捕集成本控制在 300 ~ 400 元 / 吨二氧化碳的水平上，并在一定程度上平衡经济性与碳减排效果，为大规模碳捕集提供了可行性方案参考和依据。富氧燃烧技术也具有高效的碳减排效率和经济性潜力，利用空气分离的方式提取纯氧，让循环流化床锅炉在富氧环境下燃烧，使烟气中二氧化碳的浓度达到 80% 以上。高浓度的二氧化碳可以使后续捕集过程更加简便高效，大幅降低了捕集能耗和成本<sup>[4]</sup>。如果能够将该项技术大范围推广应用，将会极大地提升循环流化床锅炉的碳减排能力，进而推动整个行业向低碳、零碳方向加速迈进。

#### 4 循环流化床锅炉技术发展展望

随着各领域技术水平的持续发展和提升，循环流化床锅炉技术也将取得新的发展。其主要体现在智能化与数字化升级、新型循环流化床技术研发、零碳燃料替代探索等方面，可实现运行效率及效能的全面提升，取得更好的效益。

##### 4.1 智能化与数字化升级

在智能化与数字化技术升级的背景下，AI 技术能促进燃烧控制的优化。例如：锅炉引入机器学习算法后，能实时感知运行状态，精准动态调整一二次风配比和燃料量等关键参数。这一过程相当于给锅炉配置了“智能大脑”，可依据不同燃料特性、负荷需求等因素，实现燃烧效率的最大化，甚至突破 99% 的大关。同时，还可精细调控污染物排放，使二氧化硫排放浓度控制在 20 mg/m<sup>3</sup> 以下，氮氧化物排放浓度在 30 mg/m<sup>3</sup> 以下。数字孪生技术应用能为锅炉稳定运行提供前瞻性保障，构建高度逼真的数字孪生模型，模拟锅炉在各种工况下的运行状态，提前发现潜在设备故障隐患，及时采取维护措施，降低非计划停机风险，提高锅炉运行的可靠性与经济性，推动循环流化床锅炉向智能化、高效化的方向发展。

##### 4.2 新型循环流化床技术研发

增压循环流化床是一种代表性的新型循环流化床技术，其创新性地将煤气化与燃气轮机结合，有望实现热效率突破 45% 的重大跨越。在高压环境下，煤气化更充分，与燃气轮机联合循环能更高效地将燃料能量转化为电能。不过其发展也面临一定的挑战，如高温高压密封要求极高，一旦密封失效就会影响设备运行，还可能造成安全隐患。材料腐蚀问题也不容忽视，高温高压且含腐蚀性物质的工况对设备材料要求十分严格，还需要研发出新型耐高温、抗腐蚀的材料予以

解决<sup>[5]</sup>。化学链燃烧技术也是一项新型技术，利用金属氧化物载氧体实现二氧化碳内分离，从源头上避免传统燃烧中氮氧化物的生成，环保优势明显。不过还需开发高效载氧体，提升载氧能力和循环稳定性，同时优化反应器设计，提高反应效率，并降低成本。

##### 4.3 零碳燃料替代探索

绿氢掺烧和氨燃料燃烧技术是零碳燃料替代领域的重要探索方向，对于循环流化床锅炉低碳转型有重要意义。绿氢掺烧是借助可再生能源电解水制取绿氢，按 5% ~ 10% 的比例掺入循环流化床锅炉，逐步减少对化石燃料的依赖。绿氢在燃烧过程中仅产生水，不排放二氧化碳。随着掺烧比例的提升，能有效降低锅炉整体碳排放，实现近零碳排放目标。不过目前绿氢制备成本较高，且大规模存储运输均存在难度，还需进一步深入研究。在氨燃料燃烧技术方面，氨燃料的热值为 18.6 MJ/kg，开发氨—煤混烧技术，其燃烧产物仅有氮气和水。如果氨来源于绿电电解，从全生命周期看，可实现真正意义上的零碳排放。不过该技术中也存在着氨燃烧稳定性、与煤混合燃烧均匀性等方面的问题，需要继续研发和解决。

#### 5 结束语

在碳中和的目标下，循环流化床锅炉技术展现出了显著的优势和巨大的发展潜力，其燃料适应性强，污染物控制经济，运行灵活，与碳中和目标高度适配。通过超临界参数突破、深度脱硫脱硝优化、生物质高参数直燃等技术升级，以及多燃料协同利用、碳捕集与封存技术集成，可有效挖掘碳减排潜力。未来智能化与数字化升级、新型循环流化床技术研发，零碳燃料替代探索等方向将进一步提升其能效并降低碳排放。

#### 参考文献：

- [1] 崔长颢, 刘美佳, 葛金林, 等. 燃煤锅炉协同处置油基岩屑碳排放核算及降碳贡献度分析 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(02):540-546.
- [2] 冯玉鹏. 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(02):118-120.
- [3] 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(01): 514-522.
- [4] 崔续桐, 朱健, 赵博, 等. 基于设计的循环流化床床内磨损特性研究 [J]. 辽宁化工, 2025, 54(01):19-22.
- [5] 胡仙楠, 邓博宇, 刘欢鹏, 等. 循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(06): 11-23.