

# 热动专业视角下循环流化床锅炉的污染物排放控制

常艳春

内蒙古伊泰煤制油有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010321

**摘要:** 本文围绕循环流化床锅炉展开, 先是剖析其工作原理与特点, 指出其燃料适应性强、燃烧效率高、负荷调节能力强等优势。随后着重探讨污染物排放, 涵盖粉尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>的排放源及特性。详细介绍对应的控制技术, 如NO<sub>x</sub>排放控制的低氮燃烧等, SO<sub>2</sub>排放控制的多种脱硫技术, 颗粒物排放控制的不同除尘器。最后提出控制策略, 旨在通过多举措降低排放, 保障锅炉清洁高效运行, 契合环保与可持续发展要求。

**关键词:** 循环流化床锅炉; 污染物; 排放控制技术; 控制策略

## 引言

随着环保要求的不断提高, 能源领域中各类锅炉的污染物排放问题备受关注。循环流化床锅炉作为一种先进的燃烧技术, 在能源生产中占据重要地位。了解其工作原理、特点以及污染物排放情况, 并掌握有效的排放控制技术和策略, 对于减少环境污染、提高能源利用效率具有重要意义。本文将对循环流化床锅炉的上述方面进行全面探讨, 以期为该领域的发展提供有益的参考和指导, 推动循环流化床锅炉朝着更加环保、高效的方向发展。

## 1 循环流化床锅炉的工作原理及特点

### 1.1 工作原理

循环流化床锅炉是基于鼓泡流化床锅炉发展起来的更先进的技术。其核心在于燃烧室内的大量固体颗粒在气流的作用下悬浮起来, 形成一个流动的床层。燃料颗粒在这个床层中进行燃烧, 释放出大量的热能。这些热能通过热交换器传递给水, 生成蒸汽, 进而驱动汽轮机发电。

### 1.2 主要特点

(1) 燃料适应性强: CFB锅炉可以燃烧多种燃料, 包括煤、煤泥、生物质等, 尤其适合燃烧高灰分、高水分的劣质燃料。(2) 燃烧效率高: 由于固体颗粒在炉内循环流动, 燃料颗粒的停留时间长, 燃烧充分, 燃烧效率高。(3) 污染物排放低: CFB锅炉的燃烧温度较低, 通常低于灰熔点, 有利于减少NO<sub>x</sub>的生成。同时, 通过添加脱硫剂, 可以有效降低SO<sub>2</sub>的排放。(4) 负荷调节能力强: CFB锅炉的负荷调节范围宽, 可以快速响应电网负荷的变化。

## 2 循环流化床锅炉的污染物排放

### 2.1 粉尘排放

CFB锅炉的粉煤灰颗粒较小, 单位体积的烟气粉煤灰

量比煤粉燃烧高得多, 因此烟气除尘负荷相对较重。为了减少粉尘排放, 通常需要采用高效的除尘设备, 如电除尘器或电袋除尘器。

### 2.2 SO<sub>2</sub>排放

CFB锅炉通过向炉内添加石灰石等脱硫剂, 可以实现炉内脱硫。脱硫剂在高温下分解生成CaO, 与烟气中的SO<sub>2</sub>反应生成硫酸钙, 从而降低SO<sub>2</sub>的排放。

### 2.3 NO<sub>x</sub>排放

CFB锅炉的燃烧温度较低, 有利于减少热力型NO<sub>x</sub>的生成。然而, 由于燃料中的氮元素在燃烧过程中会转化为燃料型NO<sub>x</sub>, 因此CFB锅炉的NO<sub>x</sub>排放仍然需要控制。传统的脱硝技术如选择性催化还原和选择性非催化还原可以在一定程度上降低NO<sub>x</sub>排放, 但存在能耗高、效率低等问题。

## 3 循环流化床锅炉污染物排放控制技术

### 3.1 氮氧化物(NO<sub>x</sub>)排放控制技术

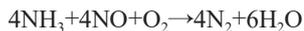
#### (1) 低氮燃烧技术

1) 空气分级燃烧: 通过将燃烧所需的空气分阶段送入炉膛, 在主燃烧区形成还原性气氛, 抑制NO<sub>x</sub>的生成。在主燃烧区, 燃料在缺氧条件下不完全燃烧, 产生的还原性气体将已生成的NO<sub>x</sub>还原为N<sub>2</sub>。然后, 在燃尽区再通入二次风, 使未完全燃烧的燃料完全燃烧, 保证燃烧效率。2) 燃料分级燃烧: 将燃料分成两部分, 一部分在主燃烧区进行正常燃烧, 另一部分作为再燃燃料在主燃烧区上方的再燃区喷入, 形成富燃料燃烧环境, 产生大量的还原性自由基, 将主燃烧区生成的NO<sub>x</sub>还原为N<sub>2</sub>。再燃区后的燃尽风用于保证再燃燃料的完全燃烧, 减少未完全燃烧损失。3) 低温燃烧技术: 通过控制循环流化床锅炉的燃烧温度在850-950°C的范围内, 抑制热力型NO<sub>x</sub>的生成, 同时该温度范围也有利于燃料型NO<sub>x</sub>的还原反应进行, 从而降低NO<sub>x</sub>的整体排放水平。这可以通

过优化炉膛结构、调整流化风速、控制给煤量和风量配比等方式实现。

### (2) 选择性非催化还原技术

向炉膛内温度为850-1100°C的区域喷入氨基还原剂，还原剂在高温下迅速热解生成NH<sub>3</sub>等活性基团，这些基团与NO<sub>x</sub>发生选择性还原反应，将NO<sub>x</sub>还原为N<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O，其主要反应方程式如下：



SNCR技术具有系统简单、投资成本低、占地面积小等优点，但存在还原剂利用率相对较低、氨逃逸量较高等问题。其适用于对NO<sub>x</sub>排放要求不是特别严格的中小型循环流化床锅炉<sup>[1]</sup>。在实际应用中，需要精确控制还原剂的喷入位置、喷入量和喷入方式，以提高脱硝效率并降低氨逃逸。

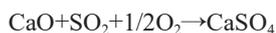
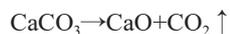
### (3) 选择性催化还原技术

在催化剂的作用下，向烟气中喷入氨气或尿素等还原剂，使NO<sub>x</sub>与还原剂在较低温度下发生选择性催化还原反应，生成N<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。常见的催化剂有V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>、MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>等，其催化反应机理较为复杂，主要包括吸附、反应和解吸等过程。SCR技术具有脱硝效率高、氨逃逸低、运行稳定可靠等优点，是目前大型火力发电锅炉和部分大型循环流化床锅炉控制NO<sub>x</sub>排放的主流技术。然而，其投资成本和运行成本较高，催化剂的寿命和中毒问题也需要重点关注。在循环流化床锅炉应用中，需要根据锅炉的排烟温度和烟气成分等特点，合理选择催化剂类型和反应器布置方式，以确保系统的高效稳定运行。

## 3.2 二氧化硫(SO<sub>2</sub>)排放控制技术

### (1) 炉内脱硫技术

在循环流化床锅炉炉膛内直接添加石灰石等脱硫剂，石灰石在高温下煅烧分解为CaO，CaO与烟气中的SO<sub>2</sub>发生反应生成CaSO<sub>4</sub>，从而实现脱硫目的，其主要反应方程式如下：



炉内脱硫技术具有系统简单、投资成本低、脱硫效率相对稳定等优点，可在一定程度上降低SO<sub>2</sub>的排放浓度，满足中低硫燃料的脱硫要求。但其脱硫效率一般在80%左右，且石灰石的利用率相对较低，会产生大量的脱硫灰渣，需要进行后续处理。在实际运行中，需要合理控制石灰石的粒度、给料位置和给料量，以及炉膛温度、流化风速等运行参数，以提高脱硫效果。

### (2) 烟气脱硫技术

湿法烟气脱硫技术采用石灰石-石膏法、双碱法等工艺，利用吸收剂（如石灰石浆液、氢氧化钠溶液等）在洗涤塔内对烟气中的SO<sub>2</sub>进行吸收，生成亚硫酸盐或硫酸盐，然后经过氧化、结晶等过程生成石膏等副产品。该技术具有脱硫效率高、技术成熟、运行稳定等优点，但存在设备投资大、运行成本高、易产生废水和二次污染等问题，适用于对SO<sub>2</sub>排放要求严格的大型循环流化床锅炉。干法烟气脱硫技术利用粉状或粒状脱硫剂在干燥状态下与烟气中的SO<sub>2</sub>发生反应，实现脱硫。常见的干法脱硫工艺有循环流化床干法脱硫、喷雾干燥法等。干法脱硫技术具有设备简单、占地面积小、无废水产生等优点，但脱硫效率相对较低，且对脱硫剂的活性和粒度要求较高，适用于中小规模的循环流化床锅炉或对脱硫场址有限制的场合。

## 3.3 颗粒物排放控制技术

(1) 静电除尘器。利用高压电场使烟气中的颗粒物带电，然后在电场力的作用下向电极移动并沉积在电极上，从而实现颗粒物的分离和捕集。其除尘效率与电场强度、极板间距、烟气流速、颗粒物的比电阻等因素密切相关。ESP具有除尘效率高、处理烟气量大、运行费用相对较低等优点，是循环流化床锅炉控制颗粒物排放的常用设备之一。但其对细微颗粒物（特别是亚微米级颗粒）的捕集效率相对较低，且存在设备占地面积大、一次性投资高、对粉尘性质较为敏感等问题。在实际应用中，通常需要对ESP进行优化设计和改造，如采用高频电源、宽间距极板、预荷电技术等，以提高其对细微颗粒物的捕集能力和适应性。(2) 布袋除尘器。含尘烟气通过布袋时，颗粒物被布袋表面的纤维层拦截、过滤，从而实现与烟气的分离。布袋除尘器的除尘效率主要取决于布袋的材质、过滤风速、清灰方式等因素。随着过滤过程的进行，布袋表面会形成一层粉尘层，这层粉尘层也会参与过滤过程，进一步提高除尘效率，但同时也会增加阻力，因此需要定期进行清灰操作，以保证布袋除尘器的正常运行<sup>[2]</sup>。BF对细微颗粒物具有很高的捕集效率，能够有效控制循环流化床锅炉排放的粉尘浓度，满足严格的环保标准要求。其具有占地面积小、投资成本相对较低、运行稳定可靠等优点，但存在滤袋寿命有限、对烟气温度和湿度较为敏感、运行阻力较大等问题。在应用中，需要根据烟气的特性和工况条件，合理选择滤袋材质和清灰方式，并加强对布袋除尘器的运行维护和管理，以确保其长期稳定高效运行。(3) 电袋复合除尘器。电袋复合除尘器结合了静电除尘器和布袋除尘器的优点，前级采用静电除尘器预收尘，去除大部

分粗颗粒粉尘,同时使烟气中的粉尘荷电,后级布袋除尘器利用粉尘的荷电特性,提高对细微颗粒物的捕集效率,从而实现高效除尘。EHSF具有除尘效率高、运行阻力低、滤袋寿命长、对粉尘特性和烟气工况适应性强等优点,在循环流化床锅炉颗粒物排放控制领域得到了越来越广泛的应用。其在新建项目和现有锅炉的除尘改造中都具有较好的应用前景,能够有效解决单一除尘器存在的问题,实现更加严格的颗粒物排放控制目标。

#### 4 循环流化床锅炉的污染物排放控制策略

##### 4.1 优化燃烧条件

CFB锅炉的燃烧条件对其污染物生成具有显著影响。优化燃烧条件,特别是调整一次风和二次风的配比以及控制床温,是减少氮氧化物生成的关键。一次风和二次风的合理配比对于CFB锅炉的燃烧过程至关重要。一次风主要用于将燃料颗粒吹入炉膛并维持其悬浮状态,而二次风则用于增强炉膛内的扰动和混合,促进燃料的充分燃烧。通过精确调整一次风和二次风的配比,可以优化炉膛内的氧气分布,减少局部过氧和缺氧现象,从而降低NO<sub>x</sub>的生成。床温是影响CFB锅炉燃烧效率和污染物生成的重要因素。过高的床温会导致燃料中的氮元素更容易转化为NO<sub>x</sub>,而过低的床温则可能引发燃料的不完全燃烧。因此,通过精确控制床温,可以确保燃料在最佳燃烧状态下运行,既提高了燃烧效率,又减少了污染物的生成。此外,还可以考虑采用先进的燃烧控制系统,如基于人工智能或大数据技术的智能燃烧优化系统,以实现燃烧条件的实时监测和动态调整。

##### 4.2 加强除尘和脱硫管理

除尘和脱硫设备是CFB锅炉污染物控制的重要组成部分。为了确保其正常运行和高效工作,需要加强设备的管理和维护。定期对除尘器和脱硫设备进行检查和维修是确保其高效运行的关键。这包括检查设备的磨损情况、清理积灰和结垢、更换损坏的部件和耗材等。通过及时的维护和保养,可以延长设备的使用寿命,提高其除尘和脱硫效率。此外,还可以考虑采用先进的除尘和脱硫技术,如电除尘器、布袋除尘器以及湿式脱硫装置等。这些技术具有更高的净化效率,能够更好地满足日益严格的环保要求。

##### 4.3 推广先进的脱硝技术

脱硝技术是控制CFB锅炉NO<sub>x</sub>排放的重要手段。为了降低NO<sub>x</sub>排放,需要积极推广先进的脱硝技术。中低温SCR脱硝工艺是一种高效、可靠的脱硝技术。它利用催化剂在较低的温度下将NO<sub>x</sub>还原为氮气和水蒸气,从而实现NO<sub>x</sub>的高效脱除。与传统的高温SCR技术相比,中低温SCR技术具有更低的能耗和更高的脱硝效率。除了技术选择外,还需要加强对脱硝设备的运行管理和维护<sup>[3]</sup>。这包括定期检查催化剂的活性、清理堵塞的喷嘴和管道、调整脱硝剂的注入量等。通过精细化的管理和维护,可以确保脱硝设备长期稳定运行,实现NO<sub>x</sub>的持续减排。

##### 4.4 加强环保监管和执法力度

环保监管和执法是确保CFB锅炉污染物排放合规性的重要保障。为了加强监管和执法力度,需要采取以下措施:首先,建立健全的环保法规和标准体系。明确CFB锅炉的污染物排放限值,为监管和执法提供法律依据。其次,加强环保监测和信息公开。利用先进的监测技术和手段,对CFB锅炉的污染物排放进行实时监测和数据分析。同时,将监测结果向社会公开,接受公众监督。最后,加大对违法排放行为的处罚力度。对违反环保法规的企业进行严厉处罚,并公开曝光其违法行为。通过形成有效的震慑作用,促使企业自觉遵守环保法规,实现污染物的合规排放。

#### 结束语

循环流化床锅炉在能源工业中有着广阔的应用前景,但污染物排放问题不容忽视。通过对其工作原理和污染物排放特性的深入理解,结合先进的排放控制技术和科学的控制策略,我们能够在保障能源供应的同时,有效降低其对环境的负面影响。未来,还需不断探索和创新,进一步优化循环流化床锅炉的性能,加强各环节的精细化管理,以适应更加严格的环保法规和可持续发展的要求,为构建绿色、低碳的能源体系贡献力量。

#### 参考文献

- [1]王少东.循环流化床锅炉污染物排放与控制[J].电力设备管理,2024(3):226-228.
- [2]陈伟.循环流化床锅炉的污染物排放与控制[J].化工设计通讯,2019,45(12):53-54,91.
- [3]李冰.循环流化床锅炉的污染物排放与控制[J].化工设计通讯,2019,45(8):192,218.