

水煤浆循环流化床燃烧及污染物排放特性研究

史 媛 王芳勇

胜利石油管理局有限公司热力分公司 山东 东营 257000

摘 要：本文系统研究了水煤浆在循环流化床中的燃烧特性及污染物排放机理。分析了水煤浆的着火、燃烧过程及影响因素，探讨了NO_x、SO₂、颗粒物等污染物的生成机制与控制策略。结合燃料特性和运行参数优化，提出减排技术路径，并展望该技术的发展趋势，为其高效清洁应用提供理论支持和实践指导。

关键词：水煤浆；循环流化床；燃烧特性；污染物排放

1 引言

随着能源需求增长和环保要求提高，高效清洁的煤炭燃烧技术成为研究重点。水煤浆作为一种高浓度、易输送的煤基燃料，结合燃料适应性强、污染低的循环流化床燃烧技术，展现出高效清洁利用煤炭的优势。然而，其燃烧过程复杂，涉及多相流动、传热传质与化学反应，同时排放NO_x、SO₂、颗粒物等污染物，影响环境与健康。因此，深入研究其燃烧特性与污染物排放规律，并探索有效控制技术，对推动该技术工业化应用和可持续发展具有重要意义。

2 水煤浆及循环流化床技术概述

2.1 水煤浆的基本概念与特性

水煤浆是由约65%-70%煤粉、30%-35%水及少量添加剂制成的煤基流体燃料，具有类似重油的流动性和雾化性能，便于储存、运输和燃烧。其燃烧效率高，可达95%以上，燃烧充分，污染物排放低，尤其通过添加脱硫剂等措施可有效减少SO₂和NO_x排放^[1]。此外，水煤浆燃料适应性广，可利用多种煤炭资源，提高劣质煤利用率，是一种高效、清洁的煤炭利用方式。

2.2 循环流化床燃烧技术原理与特点

循环流化床燃烧技术基于气固两相流体力学，通过高速一次风将燃料和脱硫剂（如石灰石）在炉膛内形成流化状态并进行燃烧和脱硫反应。未燃尽颗粒及脱硫产物经分离器回收后重返炉膛燃烧，提高了燃烧和脱硫效率。该技术燃料适应性广，可处理劣质煤、生物质等多种燃料；燃烧效率高达98%以上；低温燃烧（850-950℃）有效抑制NO_x生成，并实现90%以上的脱硫效率；且负荷调节范围大，在30%-100%负荷间稳定运行，兼具高效和低排放的优点。

3 水煤浆在循环流化床中的燃烧过程分析

3.1 水煤浆的着火特性

水煤浆的着火特性受多种因素影响，包括煤种、水

煤浆浓度、添加剂种类及用量、加热速率、炉内温度和氧气浓度等。不同煤种因其挥发分含量差异导致着火温度不同，高挥发分煤种制备的水煤浆着火性能较好。水煤浆浓度增加时，着火温度先降低后升高。添加剂如分散剂和稳定剂可改善水煤浆的流动性和稳定性，促进着火。

3.2 水煤浆的燃烧阶段

水煤浆在循环流化床中的燃烧分为四个主要阶段：

（1）水分蒸发：水分迅速蒸发，吸收热量。（2）挥发分析出与燃烧：挥发分析出并快速燃烧，释放大热量。（3）煤焦燃烧：固定碳形成煤焦，在高温和充足氧气条件下缓慢燃烧。（4）燃尽阶段：未燃尽的碳通过循环燃烧直至完全燃烧。

3.3 影响水煤浆燃烧效率的因素

燃烧效率受燃料特性（如煤种、水煤浆浓度、煤粉细度）、燃烧条件（炉内温度、氧气浓度、气流速度）以及锅炉结构与运行参数的影响。此外，使用添加剂如分散剂、稳定剂和燃烧促进剂也能提高燃烧效率。合理的锅炉设计和运行参数优化是实现高效燃烧的关键。

4 水煤浆循环流化床燃烧过程中污染物排放特性研究

4.1 氮氧化物（NO_x）的生成机理及排放特性

在循环流化床锅炉中，水煤浆燃烧产生的氮氧化物主要包括热力型NO_x、燃料型NO_x和快速型NO_x。

热力型NO_x：热力型NO_x是由空气中的氮气在高温下与氧气发生化学反应生成的。其生成反应遵循泽尔多维奇机理，主要反应式为： $N_2+O \rightleftharpoons NO+N$ ， $N+O_2 \rightleftharpoons NO+O$ 。热力型NO_x的生成速率与温度呈指数关系，当炉膛温度高于1300℃时，热力型NO_x的生成量会急剧增加。在循环流化床锅炉中，由于采用低温燃烧（炉膛温度一般在850-950℃），热力型NO_x的生成量相对较少，通常占总NO_x排放量的10%-20%。

燃料型NO_x：燃料型NO_x是由燃料中含有的氮化合物在燃烧过程中热分解并与氧气反应生成的。燃料中的氮

化合物主要以杂环氮化物的形式存在,在燃烧过程中,这些氮化物首先分解为HCN、NH₃等中间产物,然后进一步与氧气反应生成NO_x。燃料型NO_x的生成量与煤种、燃烧温度、氧气浓度以及燃烧过程中氮化物的转化率等因素密切相关^[2]。在循环流化床锅炉中,燃料型NO_x是NO_x的主要来源,占总NO_x排放量的70%-80%。

快速型NO_x:快速型NO_x是在燃料过浓燃烧时,由空气中的氮气与碳氢离子团(如CH、CH₂等)快速反应生成的。快速型NO_x的生成量相对较少,一般占总NO_x排放量的5%以下。

影响水煤浆循环流化床锅炉NO_x排放的因素主要包括炉膛温度、氧气浓度、煤种、燃烧方式以及添加剂的使用等。降低炉膛温度和氧气浓度可以有效抑制热力型和燃料型NO_x的生成。采用分级燃烧技术,将燃烧空气分为一次风和二次风,使燃料在缺氧条件下先进行部分燃烧,然后再与二次风混合完成燃烧,能够降低燃烧区域的氧气浓度,减少NO_x的生成。此外,向炉内添加选择性非催化还原(SNCR)或选择性催化还原(SCR)脱硝剂,也可以进一步降低NO_x的排放。

4.2 二氧化硫(SO₂)的生成机理及排放特性

水煤浆中的硫在燃烧过程中主要以SO₂的形式排放到大气中。硫的转化过程主要包括以下几个步骤:首先,煤中的有机硫和黄铁矿硫在高温下分解生成硫蒸气;然后,硫蒸气与氧气反应生成SO₂。SO₂的生成量主要取决于煤中的含硫量、燃烧温度以及氧气浓度等因素。

循环流化床锅炉采用炉内脱硫技术,通过向炉内添加石灰石等脱硫剂,使脱硫剂在高温下分解生成CaO, CaO再与SO₂发生反应生成CaSO₄,从而实现炉内脱硫。其脱硫反应方程式为: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, $\text{CaO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$ 。

影响循环流化床锅炉脱硫效率和SO₂排放的因素主要有钙硫比(Ca/S)、脱硫剂粒度、炉膛温度、停留时间以及脱硫剂活性等。增加钙硫比可以提高脱硫效率,但当钙硫比超过一定值后,脱硫效率的增加幅度会逐渐减小,同时会增加灰渣量和运行成本。脱硫剂粒度越小,比表面积越大,与SO₂的接触反应机会越多,脱硫效率越高。炉膛温度在850-900℃时,脱硫反应速率最快,脱硫效率最高。延长脱硫剂在炉内的停留时间,能够使脱硫反应进行得更充分,提高脱硫效率。此外,选择活性高的脱硫剂也有利于提高脱硫效率。

4.3 颗粒物(PM)的生成机理及排放特性

水煤浆循环流化床燃烧过程中产生的颗粒物主要包括飞灰和底渣。飞灰是由燃料燃烧过程中未燃尽的碳、

矿物质以及脱硫产物等细小颗粒组成,随烟气排出炉膛;底渣则是燃烧后残留的较大颗粒物质,从炉膛底部排出。

颗粒物的生成与煤种、燃烧温度、气流速度、锅炉运行参数以及除尘设备等因素密切相关。煤中的灰分含量越高,燃烧产生的颗粒物排放量越大。较高的燃烧温度会使矿物质熔融、气化,然后在冷却过程中形成细小的颗粒物。气流速度过高会导致颗粒物在炉膛内的停留时间缩短,部分未燃尽的颗粒物随烟气排出,增加颗粒物排放^[3]。此外,锅炉的运行参数,如一次风量、二次风量、返料量等的调整不当,也会影响颗粒物的生成和排放。

为了降低颗粒物排放,循环流化床锅炉通常配备高效的除尘设备,如静电除尘器、布袋除尘器等。这些除尘设备能够有效地捕集烟气中的颗粒物,使颗粒物排放浓度达到国家环保标准要求。

4.4 其他污染物的排放特性

除了NO_x、SO₂和颗粒物外,水煤浆循环流化床燃烧过程中还可能产生少量的其他污染物,如一氧化碳(CO)、汞(Hg)等。CO的生成主要是由于燃烧不完全造成的,其排放量与燃烧条件、燃料特性等因素有关。通过优化燃烧过程,保证充足的氧气供应和合适的燃烧温度,可以有效降低CO的排放。汞是一种有毒重金属,在煤炭燃烧过程中会部分挥发并随烟气排放到大气中。循环流化床锅炉可以通过在尾部烟道添加活性炭吸附剂等方法,对汞进行吸附和脱除,减少汞的排放。

5 降低水煤浆循环流化床污染物排放的控制策略与技术措施

5.1 优化燃烧过程控制

(1) 合理调整燃烧参数:通过精确控制炉膛温度、氧气浓度、气流速度等燃烧参数,使水煤浆在最佳燃烧条件下进行燃烧。例如,适当降低炉膛温度可以减少热力型NO_x的生成;采用分级燃烧技术,合理分配一次风和二次风量,降低燃烧区域的氧气浓度,抑制燃料型NO_x的生成。(2) 优化燃料与空气混合:改善燃料与空气的混合效果,能够使燃烧反应更加充分,提高燃烧效率,同时减少污染物的生成。可以采用特殊的燃烧器设计,如旋流燃烧器、浓淡分离燃烧器等,增强燃料与空气的混合和扰动,促进燃烧的稳定和完全。(3) 控制煤粉细度:合理控制水煤浆中煤粉的细度,使煤粉颗粒大小均匀,有利于提高煤粉与氧气的接触面积,加速燃烧反应的进行,降低未燃尽碳和污染物的排放。

5.2 采用先进的污染物脱除技术

(1) 脱硝技术:除了上述提到的分级燃烧技术外,

还可以采用选择性非催化还原 (SNCR) 和选择性催化还原 (SCR) 技术进一步降低NO_x排放。SNCR技术是在炉膛温度为850-1100℃的区域内喷入还原剂 (如氨水、尿素溶液等), 将NO_x还原为氮气和水。SCR技术则是在催化剂的作用下, 将NO_x与还原剂在较低温度 (一般为300-420℃) 下进行反应, 实现NO_x的高效脱除^[4]。(2) 脱硫技术: 除了炉内脱硫外, 对于排放要求较高的地区或对SO₂排放有更严格限制的情况, 可以采用炉外脱硫技术, 如石灰石-石膏湿法脱硫技术。该技术具有脱硫效率高、技术成熟等优点, 但投资和运行成本相对较高。(3) 除尘技术: 选用高效的除尘设备, 并根据锅炉的实际情况进行合理设计和优化运行。例如, 采用布袋除尘器时, 可以选择合适的滤料材质和过滤风速, 提高除尘效率; 定期对除尘设备进行维护和检修, 保证其正常运行。

5.3 开发新型添加剂与燃料预处理技术

(1) 添加剂研发: 研发新型的燃烧促进剂、脱硝剂、脱硫剂等添加剂, 进一步提高燃烧效率和污染物脱除效果。例如, 开发具有高效脱硝功能的添加剂, 能够在较低温度下实现NO_x的还原; 研制新型的脱硫剂, 提高脱硫剂的活性和利用率, 降低钙硫比。(2) 燃料预处理: 对水煤浆燃料进行预处理, 如洗选、配煤、生物预处理等, 降低燃料中的硫分、灰分和氮含量, 改善燃料的燃烧特性, 从源头上减少污染物的生成。

6 水煤浆循环流化床燃烧技术的发展前景展望

一是大型化与高效化: 随着能源需求的不断增长, 水煤浆循环流化床锅炉将朝着大型化、高效化方向发展。通过提高锅炉的单机容量和燃烧效率, 降低单位发电量的能耗和污染物排放, 提高能源利用效率和经济效益。二是清洁化与低碳化: 在环保要求日益严格的背景下, 水煤浆循环流化床燃烧技术将更加注重清洁化和低

碳化发展。进一步优化燃烧过程和污染物控制技术, 降低NO_x、SO₂、颗粒物等污染物的排放; 同时, 积极开展碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术的研究与应用, 减少二氧化碳排放, 实现煤炭的清洁低碳利用。三是智能化与自动化: 借助先进的传感器技术、信息技术和人工智能技术, 实现水煤浆循环流化床锅炉的智能化和自动化运行。通过对锅炉运行参数的实时监测、分析和优化控制, 提高锅炉的运行稳定性和可靠性, 降低运行成本和劳动强度。

结语

水煤浆循环流化床燃烧技术具有燃料适应广、燃烧效率高、污染排放低等优势, 是高效清洁利用煤炭的重要途径。研究表明, 燃烧效率与污染物排放受煤种、浓度、锅炉结构及运行参数等多因素影响, 需通过优化燃烧控制、先进脱污技术及添加剂应用等手段实现清洁燃烧。未来该技术将向大型化、高效化、低碳智能化方向发展, 应用前景广阔。但其推广仍面临挑战, 需政府、企业与科研机构协同推进技术研发、政策扶持与人才培养, 助力能源结构调整与环境保护。

参考文献

- [1]张代鑫.水煤浆循环流化床燃烧及污染物排放特性研究[D].太原理工大学,2023.
- [2]张代鑫,张国庆,刘海军,等.水煤浆循环流化床燃烧飞灰特性研究[J].太原理工大学学报,2025,56(01):25-33.
- [3]包绍麟,宋国良,傅海涛,等.70MW水煤浆循环流化床热水锅炉的设计与运行[J].工业锅炉,2020,(05):7-10.
- [4]柯希玮,张缙,杨海瑞,等.水煤浆循环流化床锅炉物料平衡特性模型[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(01):86-95.