

# 循环流化床锅炉炉内脱硫效率分析

刘 飞

中煤鄂尔多斯能源化工有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017300

**摘要：**循环流化床锅炉炉内脱硫效率是影响环保性能的关键指标。本文通过分析燃煤选择与破碎粒度、脱硫剂的选择与使用、床温、风量及氧量控制以及炉内气固两相流动特性等因素对脱硫效率的影响，提出相应的优化策略。研究表明，通过合理调整这些影响因素，可以有效提升循环流化床锅炉的脱硫效率，降低烟气中的SO<sub>2</sub>排放浓度，对实现绿色、低碳的能源利用具有重要意义。

**关键词：**循环流化床；锅炉；炉内脱硫；效率

## 1 循环流化床锅炉炉内脱硫技术概述

循环流化床锅炉炉内脱硫技术，是目前工业化程度最高的洁净煤燃烧技术之一。该技术通过在锅炉内部实施特定的燃烧和脱硫过程，有效降低了燃煤过程中二氧化硫（SO<sub>2</sub>）的排放，实现了环保与能源利用的双重目标。循环流化床锅炉炉内脱硫技术主要基于石灰石作为脱硫吸收剂。燃煤和石灰石自锅炉燃烧室下部送入，在高速气流的作用下，燃煤与石灰石颗粒在燃烧室内形成流化床状态，充分混合并燃烧。在此过程中，燃煤烟气中的SO<sub>2</sub>与石灰石受热分解产生的氧化钙（CaO）发生化学反应，生成硫酸钙（CaSO<sub>4</sub>）或亚硫酸钙（CaSO<sub>3</sub>），从而实现了SO<sub>2</sub>的脱除。技术特点；高效脱硫：该技术脱硫率可达80%~95%，显著降低了SO<sub>2</sub>的排放。特别适合中、低硫煤的燃烧，燃料适应性强。清洁燃烧：负荷适应性好；负荷调节范围广泛，可达30%~100%，适用于不同规模的电力和工业用锅炉。关键技术参数；钙硫比：影响脱硫效率的关键因素之一，通常控制在2~2.5左右，此时脱硫率可达90%以上。流化速度：炉内流化速度在3.5~4.5m/s范围内，保证燃煤与石灰石的充分混合和燃烧。循环倍率的提高有助于提高脱硫效率，但也会增加系统能耗。循环倍率的控制范围应根据具体的工艺条件和运行要求进行确定。

## 2 循环流化床锅炉的结构与工作原理

循环流化床锅炉主要由锅炉本体和辅助设备组成。锅炉本体包含燃烧室、循环系统以及热交换系统。密相区是煤炭燃烧的主要区域，稀相区则负责进一步燃烧和气体混合。循环回路，包含高温气固分离器和返料系统。高温气固分离器用于将燃烧产生的高温气体和固体颗粒进行分离，而返料系统则将分离出的固体颗粒重新送回燃烧室进行再次燃烧。其他部分包括汽包、下降管、水冷壁、过热器、省煤器、空气预热器等，它们共

同构成锅炉的热交换系统，用于产生蒸汽或热水。辅助设备：送风机、引风机：用于向燃烧室提供空气并排出燃烧废气。返料风机：负责将固体颗粒从分离器送回燃烧室。破碎机、给煤机：分别用于煤炭的破碎和给料。冷渣器、除尘器、脱硫脱硝设备、烟囱等：用于处理燃烧过程中产生的废渣、废气等<sup>[1]</sup>。

在燃料进料阶段，煤炭等燃料经过给料系统精准地送入锅炉燃烧室。在燃烧室内，燃料与经优化配比的空气充分混合，并发生剧烈的燃烧反应，释放出大量热能。这一过程中，燃料中的硫分会被氧化成二氧化硫（SO<sub>2</sub>），同时产生的高温烟气则通过燃烧室顶部进入循环流化床。循环流化床是锅炉技术的核心部分，它通过高速气流的作用，使床层内的固相颗粒呈现类似于沸腾的流化状态。这种流化状态极大地提高燃料与空气的混合程度，不仅提升燃烧效率，还为后续的脱硫反应创造了有利条件。在脱硫环节，循环流化床锅炉采用向床层内添加石灰石或其他脱硫剂的方法。当含硫烟气通过床层时，脱硫剂与烟气中的SO<sub>2</sub>发生化学反应，生成硫酸盐或亚硫酸盐等固体物质，从而将SO<sub>2</sub>从烟气中固定下来。这种脱硫方式不仅高效，而且成本相对较低，是实现清洁燃烧的重要手段。经过脱硫处理的烟气，在循环流化床内与高温固体颗粒燃烧剩余物、石英砂或沸石砂等混合，并流向位于循环下部的分离器。分离器利用重力和离心力的作用，有效地将固态颗粒与烟气分离。洁净的烟气通过废气排放管道排出，而分离出的固态颗粒则通过回流装置重新送回循环流化床，与新添加的燃料和脱硫剂混合，继续参与燃烧和脱硫过程。在热交换环节，燃烧生成的高温烟气通过锅炉的热交换器，与水或蒸汽进行热交换，产生高温高压的蒸汽或热水。这些蒸汽或热水可以进一步用于发电、供热等能源利用场景。

## 3 循环流化床锅炉炉内脱硫效率影响因素分析

### 3.1 燃煤性质与粒度对脱硫效率的影响

在循环流化床锅炉炉内脱硫过程中,燃煤的性质和粒度对脱硫效率具有显著影响。燃煤性质主要包括煤的含硫量、挥发分、灰分等。其中,煤的含硫量直接影响 $\text{SO}_2$ 的生成量,进而影响脱硫效率。当燃煤的含硫量较高时,这会导致燃烧过程中 $\text{SO}_2$ 的生成量显著增加。为了有效地降低烟气中 $\text{SO}_2$ 的浓度,脱硫剂的使用量必须相应增加,以应对更高的脱硫需求。脱硫剂的增加并不一定能够直接提升脱硫效率,因为脱硫过程受到多种因素的复杂影响,如脱硫剂的活性、反应温度、混合程度等。在高硫煤的情况下,除了增加脱硫剂的使用量,还需要对脱硫系统进行优化调整,以确保达到理想的脱硫效果。燃煤的挥发分和灰分含量也会影响脱硫效率。当燃煤粒度过大时,燃煤与脱硫剂的接触面积减小,反应时间缩短,导致脱硫剂未能充分发挥其脱硫能力<sup>[2]</sup>。粒度较大的燃煤在燃烧过程中,由于其表面积相对较小,与氧气的接触不充分,导致其燃烧速度较慢且不够均匀。这种不充分的燃烧方式会产生更高的热量和更大的气体流速。这是因为较大的燃煤颗粒在燃烧时,内部的碳质成分受到传热和传质过程的限制,往往无法在短时间内充分燃烧。同时,燃烧过程中形成的灰层会覆盖在颗粒表面,这些灰层具有一定的隔热和隔绝作用,阻碍了氧气与颗粒内部未燃碳质的直接接触和进一步渗透。因此,燃烧反应往往集中在颗粒的外部区域,导致热量集中释放和产生的气体流速增加。这种不均匀的燃烧过程不仅降低燃烧效率,而且可能引发一系列的燃烧问题,如热应力不均匀、燃烧器磨损等。虽然粒度较小的燃煤与脱硫剂的接触面积增大,但过小的粒度可能导致燃煤在燃烧过程中被吹出炉膛,减少了与脱硫剂的接触时间,同样影响脱硫效率。

### 3.2 脱硫剂种类与用量对脱硫效率的影响

目前,循环流化床锅炉中常用的脱硫剂主要包括石灰石、白云石和生石灰等。其中,石灰石因其价格低廉、来源广泛且反应活性适中,成为最常用的脱硫剂。不同的石灰石品种在化学成分和物理性质上存在差异,这可能导致脱硫效率有所不同。脱硫剂的用量对脱硫效率也有显著影响。脱硫剂的用量不足时,无法充分吸收烟气中的 $\text{SO}_2$ ,导致脱硫效率下降。

### 3.3 床温、风量及氧量对脱硫效率的影响

在循环流化床锅炉的炉内脱硫过程中,床温、风量以及氧量是影响脱硫效率的关键因素。这些参数不仅关系到燃烧效率,同时也直接决定脱硫剂的活性和脱硫反应的效率。床温对脱硫效率有着显著影响。当床温过

高,例如超过约 $870^\circ\text{C}$ 时, $\text{CaO}$ 内部分布均匀的小晶粒会逐渐融合为大晶粒,温度越高,晶粒越大,单位质量内晶粒数量减少, $\text{CaO}$ 的比表面积下降,从而显著降低脱硫效率。温度大于 $1000^\circ\text{C}$ , $\text{CaSO}_4$ 还会分解为 $\text{SO}_2$ ,进一步降低脱硫率。如果床温小于 $800^\circ\text{C}$ 时,石灰石焙烧生成 $\text{CaO}$ 的速度减慢,减少了可供反应的表面积,脱硫率下降。当床温小于 $750^\circ\text{C}$ 时,脱硫反应几乎不再进行。为了保持高效的脱硫性能,需要严格控制床温,避免其超过 $900^\circ\text{C}$ ,但也不要低于 $850^\circ\text{C}$ 。这样可以确保脱硫剂能够充分发挥其脱硫作用,提高整个脱硫系统的效率。因此,保持适当的床温是确保高效脱硫的关键因素之一。风量对于脱硫效率的影响显著且复杂,其大小不仅与燃煤锅炉的具体设计有关,还受到煤量、煤质、锅炉负荷等多种因素的影响。风量过大可能导致脱硫剂在炉内停留时间过短,无法充分与烟气中的 $\text{SO}_2$ 反应;而风量过小则可能导致燃烧不充分,同时还会降低烟气中 $\text{SO}_2$ 与脱硫剂之间的接触机会,从而影响其被有效吸收。根据锅炉负荷和燃煤性质,合理调整送风机和引风机的风量至关重要。氧量对脱硫效率也有显著影响。一方面,氧量过高会让已经生成的 $\text{SO}_2$ 向 $\text{SO}_3$ 转化, $\text{SO}_3$ 的形成不利于石灰石的脱硫反应,因为石灰石对 $\text{SO}_3$ 的脱除效果较差。氧量过低则可能导致燃烧不完全,增加未燃尽物质的排放,造成机械不完全燃烧热损失增大,降低锅炉热效率,进而降低锅炉运行的经济性。

## 4 循环流化床锅炉炉内脱硫效率提升策略

### 4.1 优化燃煤选择与破碎粒度

燃煤的含硫量、挥发分、灰分等性质不仅影响燃烧效率,也关系到脱硫剂的消耗量和脱硫反应的进行。在循环流化床锅炉炉内脱硫过程中,燃煤的选择对脱硫效率具有直接影响。燃煤的含硫量、挥发分、灰分等性质不仅影响燃烧效率,也关系到脱硫剂的消耗量和脱硫反应的进行。因此,选择含硫量较低(如低于 $1.5\%$ )、挥发分较高(如高于 $25\%$ )、灰分较低(如低于 $20\%$ )的燃煤是提升脱硫效率的关键。这些数值范围可以依据实际燃煤的特性和脱硫效率要求进行调整。燃煤的破碎粒度对脱硫效率的影响主要体现在两方面。粒度过大时,即燃煤的粒径过大,比如平均粒径超过 $10\text{mm}$ ,会导致燃煤与脱硫剂的接触面积减小,反应时间缩短,脱硫剂无法充分发挥其脱硫能力;其次,粒度过小,即燃煤的粒径过小,如平均粒径小于 $1\text{mm}$ ,燃煤在燃烧过程中容易被吹出炉膛,减少与脱硫剂的接触时间,同样影响脱硫效率。为了保证脱硫效率,需要控制燃煤的破碎粒度在适当的范围内,如 $1\text{mm}$ 到 $10\text{mm}$ 之间。具体的粒度范围还

需根据锅炉设计、燃煤特性和脱硫要求等因素来确定。优化燃煤的破碎粒度是提高脱硫效率的重要手段。建立燃煤质量监控体系,对燃煤的含硫量、挥发分、灰分等指标进行定期检测,确保燃煤质量符合锅炉运行要求。在燃煤破碎后,通过筛分设备对燃煤粒度进行筛选,确保燃煤粒度在适宜范围内。通过优化燃煤选择与破碎粒度,可以显著提高循环流化床锅炉的脱硫效率。一方面,低硫、高挥发分、低灰分的燃煤可以减少SO<sub>2</sub>的生成量,降低脱硫剂的消耗;另一方面,粒度均匀的燃煤可以确保与脱硫剂充分接触和反应,提高脱硫效率。

#### 4.2 调整床温、风量及氧量以改善脱硫环境

床温是影响脱硫效率的关键因素,在实际操作中,建议将床温控制在850℃至900℃之间,这个范围内既能保证燃烧效率,又能维持较高的脱硫效率。风量的大小直接影响炉膛内的气体流速和分布,进而影响脱硫剂与烟气的混合程度和接触时间。为了优化脱硫效率,实际操作中通常会根据煤量来设定一个适宜的风量比例,要确定具体的风煤比,需要综合考虑煤种、锅炉负荷、燃烧工况等多种因素,并根据锅炉的实际运行情况进行调整。当煤量稳定在某一特定水平时,通常建议将风煤比(风量与煤量的比值)控制在一定范围内。运行中通常会参考炉膛出口氧量来进行风煤比的调节,出口氧量一般要维持在3%~5%之间。在这个范围内,炉膛内的气体流速适中,分布合理,能够确保脱硫剂与烟气充分混合,延长接触时间,从而提高脱硫效率<sup>[4]</sup>。我厂的风煤比大约在7~8左右,目前运行效果较好。实际运行中,合理控制氧量是提高锅炉效率和降低排放的重要手段。一般而言,氧量控制应根据燃煤种类、锅炉设计、负荷变化等实际情况进行灵活调整。在典型工况下,建议氧量控制在3%至5%的范围内,以保证充分燃烧和脱硫效率。但由于氧量升高会造成氮氧化物生成量增加,增加脱硝成本,就目前我厂锅炉的运行来看,氧量控制在2.5%-3.0%效果较好,可以兼顾环保和经济性。

#### 4.3 改进炉内气固两相流动特性

通过精心设计和调整炉膛的几何形状和尺寸,能有效减少炉膛内部的死角和涡流区域。这样的设计能够确保气流在炉膛内流动得更加均匀和稳定,有利于脱硫剂与烟气的充分混合和反应。在循环流化床锅炉中,脱硫剂的喷射位置应当位于烟气流动的核心区域,以便脱硫剂能够充分接触到烟气中的SO<sub>2</sub>。喷射角度则需要根据炉膛内气流的流向和速度来确定,通常应设置为与主流方向呈一定夹角,以促进脱硫剂颗粒在烟气中的均匀分布。在炉膛内安装适当的混合装置,如旋流器或搅拌器,可以有效增强气固两相的混合程度。这些装置能够将脱硫剂颗粒更加均匀地分散在烟气中,提高脱硫剂与SO<sub>2</sub>的接触面积和反应效率。密切关注锅炉负荷和燃煤性质等因素的变化。适时调整送风机、引风机等设备的运行参数,以应对这些变化对炉内气固两相流动特性的影响,确保脱硫效率的稳定性和高效性。

#### 结束语

随着环保要求的日益严格,提升循环流化床锅炉炉内脱硫效率成为行业发展的重要方向。本文的分析和策略为优化锅炉运行、降低污染物排放提供了有价值的参考。未来,随着技术的不断进步和创新,有理由相信循环流化床锅炉将在环保领域发挥更加重要的作用,为实现可持续发展贡献力量。

#### 参考文献

- [1] 张晓辉,李华,王磊.循环流化床锅炉炉内脱硫效率影响因素研究[J].热力发电.2022.51(3): 18-23.
- [2] 李明,赵亮,陈艳.循环流化床锅炉炉内脱硫效率优化策略研究[J].环境工程学报.2023.17(1): 45-50.
- [3] 王刚,刘芳,高翔.循环流化床锅炉炉内脱硫效率实验研究[J].洁净煤技术.2021.27(6): 76-81.
- [4] 陈勇,杨国华,孙志坚.循环流化床锅炉炉内脱硫效率提升技术及应用[J].能源与环境.2022.44(2): 34-39.