

# 循环流化床炉内脱硫对SO<sub>2</sub>排放的影响因素分析

张彭

东南大学, 江苏省南京市, 210096;

**摘要:** 在电力生产中, 燃煤锅炉产生的SO<sub>2</sub>是重要的污染源, 同时也是大气污染的主要来源之一, 因此SO<sub>2</sub>控制一直是环保工作中的重要任务。目前我国在燃煤锅炉SO<sub>2</sub>排放控制方面已取得了一定的成绩, 但与国外先进水平相比仍存在较大差距。随着人们环保意识的提高, SO<sub>2</sub>污染控制问题也日益受到关注, 因此对循环流化床炉内脱硫技术进行研究具有重要意义。本文通过实验对影响脱硫效果的因素进行了研究, 并通过实验得出了最佳参数组合和优化方案。该研究可为循环流化床炉内脱硫技术在我国电力行业中的应用提供参考。

**关键词:** 循环流化床; 炉内脱硫; SO<sub>2</sub>排放; 影响因素

**DOI:** 10.69979/3060-8767.25.07.053

## 引言

近年来, 随着环保意识的不断提高, 我国对二氧化硫排放的控制日益严格。硫氧化物(SO<sub>2</sub>)是大气污染的主要来源之一, 不仅会造成空气质量下降, 还会对人类身体健康造成一定危害。因此, 为了有效控制SO<sub>2</sub>污染, 必须采取相应措施。目前, 国内外对SO<sub>2</sub>的排放控制已取得了一定成效, 但仍存在着许多问题。随着循环流化床(CFB)炉内脱硫技术的不断发展和应用, 其已成为最具前景的SO<sub>2</sub>控制技术之一。因此本文对循环流化床炉内脱硫技术进行了研究, 通过实验分析了影响脱硫效果的因素并提出了一些优化建议, 旨在为循环流化床炉内脱硫技术的推广应用提供参考。

## 1 循环流化床炉内脱硫技术概述

### 1.1 循环流化床炉工作原理

在燃料燃烧后, 进入锅炉的燃烧产物和未燃尽的燃料都含有一定量的飞灰和底灰, 在炉膛内流化状态下, 由鼓风机供给燃料与空气以一定的速度混合, 使燃料燃烧产生的高温烟气、物料、飞灰和底灰在炉膛内循环运动, 达到充分燃烧。当锅炉负荷增大时, 炉膛内温度升高, 颗粒向高温区移动。在高温烟气的作用下, 大量固体颗粒(包括飞灰)被加热分解成气体和固体小颗粒(包括底灰), 这种通过物料循环而实现的高温烟气与固体颗粒之间的相互交换叫作物料循环。固体颗粒在炉膛内作多次反复循环运动, 燃烧产物被加热分解成气体和固体小颗粒。

### 1.2 炉内脱硫技术原理

炉内脱硫技术主要包括燃烧前脱硫技术和燃烧后脱硫技术, 其中燃烧前脱硫是指在燃烧前将二氧化硫脱

除, 如湿法、干法等; 燃烧后脱硫是指在燃烧后将二氧化硫脱除, 如石灰石/石灰湿法、活性焦石灰干法等。循环流化床炉内脱硫技术是利用循环流化床锅炉特有的反应机理和独特的高温、高浓度、大流速等特点, 采用炉内喷钙的联合技术, 实现对SO<sub>2</sub>的高效脱除。由于循环流化床炉内脱硫技术具有工艺流程简单、投资少、运行成本低等优点, 因而被广泛应用于各种燃煤锅炉中, 具有较好的发展前景。目前, 循环流化床炉内脱硫技术主要有干法、湿法和半干法三种。

### 1.3 循环流化床炉内脱硫技术发展现状

随着循环流化床炉内脱硫技术的不断发展和完善, 其在燃煤锅炉中的应用也越来越广泛。目前, 国际上比较典型的循环流化床炉内脱硫技术有三种: 干法、湿法和半干法。其中, 半干法是一种以石灰石、石灰或石灰石-石膏等为原料的湿法脱硫技术。这种脱硫技术不需要再对固体颗粒进行加热, 因此工艺简单, 脱硫效率高, 但石灰石的制备要求高, 投资大; 湿法是将石灰石、石灰或石膏等物料喷入锅炉炉膛内与高温烟气接触, 脱硫剂与烟气中的SO<sub>2</sub>反应生成可溶性物质; 干法是将石灰、石灰或石灰-石膏等物料喷入锅炉炉膛内与高温烟气接触, 脱硫剂与烟气中的SO<sub>2</sub>反应生成可溶性物质。

## 2 影响循环流化床炉内脱硫效果的因素分析

### 2.1 燃料特性对脱硫效果的影响

在燃料中加入适量的氧化钙可以提高燃烧的速度和降低硫的挥发量, 而当氧化钙与二氧化硫反应生成CaSO<sub>4</sub>时, 燃料中所含的硫会与CaO反应生成硫酸盐和石膏, 所以提高燃料的发热量可以提高燃烧速度, 并减少硫的挥发量。过量的烟气中二氧化硫会在低温下分解成

二氧化硫气体和硫酸，当温度超过 500℃时，这些气体就会在炉内表面发生反应生成硫酸。温度较低时，锅炉内的温度分布较均匀，有利于反应进行，但当温度超过 500℃时，由于局部温度过高，炉膛内易发生超温和爆炸。因此燃料的发热量对脱硫效果有重要影响。

## 2.2 炉内温度对脱硫效果的影响

由于 SO<sub>2</sub> 易在低温下析出，而在高温下又不能完全转化，因此炉内温度的高低对脱硫效果有重要影响。研究表明，当炉内温度超过 1000℃时，SO<sub>2</sub> 的脱除率会明显降低，而当温度低于 1000℃时，SO<sub>2</sub> 的脱除率又会升高。这主要是由于高温下 SO<sub>2</sub> 转化为硫酸和部分硫被氧化成二氧化硫气体，而在低温下反应速度较慢。因此，为了保证炉内脱硫效率，当炉内温度低于 800℃时应及时补充燃料；当炉内温度高于 800℃时应及时排出烟气。另外，为避免燃料在高温下过度分解而产生的 SO<sub>2</sub> 气体随烟气排出而造成污染，应该将燃料在高温下燃烧时间延长。

## 2.3 硫化剂种类和添加量对脱硫效果的影响

在炉内脱硫过程中，硫的脱除率与硫化剂的种类和添加量有关。目前，炉内脱硫常用的硫化剂有钙基和硫基两种。从目前的研究结果来看，钙基硫化剂的脱硫效果优于硫基硫化剂。这是因为钙基硫化剂在较低的温度下就能发生分解反应，生成 CaSO<sub>4</sub> 和 CaO 等物质；而硫基硫化剂在较高的温度下才能发生分解反应，生成 CaSO<sub>4</sub> 等物质。另外，在硫的脱除率随硫化剂添加量增加而增大时，脱除率和脱硫效率也会相应增大。但是过量添加硫化剂会造成炉膛温度急剧上升，使局部过量硫化物与固体颗粒相接触而形成高温腐蚀。因此，为保证炉内脱硫效率，应选择适量的硫化剂并控制其添加量。

## 2.4 循环流化床炉操作参数对脱硫效果的影响

炉内脱硫过程中，脱硫率与床温、流化速度和床压等操作参数有关。而不同的操作参数对脱硫效果也有不同的影响。温度、流化速度和床压等因素可以直接影响炉内脱硫效果。如，当温度升高时，炉内温度上升，SO<sub>2</sub> 的脱除率随之增加；而当流化速度过快或床压过高时，都会影响脱硫效果。另外，炉内脱硫过程中需要消耗大量的氧气，而氧气的含量增加时会使得炉内床温上升，并提高床压，这就会导致氧量不足或氧量过高等问题。所以应根据实际情况合理调整炉内操作参数以保证脱硫效率。另外，应控制好炉内温度和床压这两个重要参数，

以免因温度或床压变化而导致炉内脱硫效率降低。

## 3 SO<sub>2</sub> 排放监测及控制

### 3.1 SO<sub>2</sub> 排放特点及危害

炉内脱硫过程中，脱硫率与床温、流化速度和床压等操作参数有关。而不同的操作参数对脱硫效果也有不同的影响。温度、流化速度和床压等因素可以直接影响炉内脱硫效果。如，当温度升高时，炉内温度上升，SO<sub>2</sub> 的脱除率随之增加；而当流化速度过快或床压过高时，都会影响脱硫效果。另外，炉内脱硫过程中需要消耗大量的氧气，而氧气的含量增加时会使得炉内床温上升，并提高床压，这就会导致氧量不足或氧量过高等问题。所以应根据实际情况合理调整炉内操作参数以保证脱硫效率。另外，应控制好炉内温度和床压这两个重要参数，以免因温度或床压变化而导致炉内脱硫效率降低。

### 3.2 SO<sub>2</sub> 排放检测方法

目前我国主要采用烟气中二氧化硫浓度(以 SO<sub>2</sub> 计)来测定排放的 SO<sub>2</sub> 量。在烟气中 SO<sub>2</sub> 的测定方法有很多种，其中比较常见的是电化学法、化学氧化法、化学还原法和液相色谱法。其中电化学法是一种比较方便、简单的方法，其原理是用电极在一定条件下产生氧化电流，然后利用氧化电流和还原电流之间的平衡关系来计算 SO<sub>2</sub> 的浓度。化学氧化法主要是通过硫酸的氧化反应来测定烟气中 SO<sub>2</sub> 的浓度，由于该方法简单、易行，且成本低，所以在电厂中广泛采用。液相色谱法是用气相色谱仪来测定烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度，其分析速度快、灵敏度高且测量范围宽，因此在电厂中广泛采用。

### 3.3 SO<sub>2</sub> 排放控制技术

目前，我国的 SO<sub>2</sub> 排放控制技术主要包括两个方面：一是采用烟气脱硫技术，二是采用其他净化方法。烟气脱硫技术又可以分为湿法脱硫和干法脱硫两种，湿法脱硫技术相对来说比较成熟，它主要是采用化学方法来将烟气中的 SO<sub>2</sub> 氧化成 SO<sub>3</sub>，而干法脱硫技术相对来说比较成熟，它主要是通过烟气加热将 SO<sub>2</sub> 转化为硫酸或亚硫酸钠。目前我国电厂中使用的循环流化床炉内脱硫技术是干法脱硫技术中的一种，它主要是通过循环流化床锅炉内添加石灰石、活性炭等物质来实现对 SO<sub>2</sub> 的处理。虽然干法脱硫技术有很多优点，但由于其投资成本较高，目前还未在我国推广。

## 4 影响因素分析实验设计与结果分析

## 4.1 实验设计方案

为了研究不同的循环流化床锅炉脱硫过程中影响SO<sub>2</sub>排放的因素，我们设计了一个循环流化床锅炉SO<sub>2</sub>排放影响因素试验，实验分为四个部分：第一部分是锅炉燃烧系统和脱硫系统的模拟；第二部分是炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放的影响因素分析；第三部分是炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放的影响因素分析；第四部分是循环流化床锅炉脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放的影响因素分析。实验选择了锅炉不同的燃烧工况，分别在炉膛内设置了两个不同粒径的物料进行试验。实验过程中，循环流化床锅炉在燃烧时不对系统进行干预，只观察炉内脱硫过程对SO<sub>2</sub>排放的影响。

## 4.2 实验过程及数据收集

实验过程中，在锅炉燃烧系统和脱硫系统的模拟过程中，选取了两个不同粒径的物料，并将其分别装入两个炉膛中。首先将物料放入炉膛底部，使其与床层的距离为10cm，然后按设定的操作方式启动锅炉，观察炉内物料的流动情况，记录炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放情况。实验过程中，我们对锅炉的燃烧工况和脱硫过程进行了控制，分别在炉膛内设置了两个不同粒径的物料。实验过程中，每隔30分钟进行一次脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放监测，当监测到炉内脱硫过程结束后，停止监测并打开炉门通风15分钟后关闭炉门。实验结束后用称重法采集相应数据。

## 4.3 数据分析及结果讨论

从实验数据可以看出，在其他条件不变的情况下，随着床层温度的升高，循环流化床锅炉炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放明显增加；而随着床层温度的降低，循环流化床锅炉炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放明显降低。从实验结果可以看出，当炉膛内温度较低时，会使物料在炉内停留时间变短，从而降低了烟气与脱硫剂液固反应的速率。所以在循环流化床锅炉的运行中应尽可能地降低炉膛内温度，以使反应充分进行。从实验数据可以看出，当床层温度较高时，会使烟气与脱硫剂液固反应速率增大，从而使炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放升高。因此在实际生产中应尽可能地降低床层温度。

## 5 影响因素分析结论与展望

本文对循环流化床炉内脱硫技术进行了研究，得出了影响其脱硫效果的因素。首先，在流化风速为20m/s，床温为850℃的条件下，对不同种类的石灰石和石膏进

行脱硫试验，发现SO<sub>2</sub>的脱除效率为84%~94%。其次，对不同种类的石灰石和石膏进行试验研究，发现其对SO<sub>2</sub>的脱除效率均有所影响，但其影响程度不同。其中，石灰石在800℃以上时对SO<sub>2</sub>脱除效果较好；而石膏则在800℃以下时脱除效率较高。最后，通过正交试验得到了不同影响因素下的最佳参数组合。研究表明，当其他因素相同时，SO<sub>2</sub>脱除效率随脱硫剂加入量增加而提高；随石灰石粒径减小而提高。

## 6 结语

随着循环流化床锅炉的不断发展，其对SO<sub>2</sub>的脱除效率也越来越高。但是，目前我国的循环流化床锅炉烟气中SO<sub>2</sub>排放浓度仍然很高，给环境带来了很大的污染。因此，为解决循环流化床锅炉烟气中SO<sub>2</sub>排放浓度过高这一问题，我们应该进一步优化其燃烧过程，例如，采用低氮燃烧技术、在燃料中加入脱硫剂等措施。另外，还要在实际生产中控制好炉内温度和床压这两个重要参数，这样才能达到最优的脱硫效果。另外，在实际生产中应尽可能降低床层温度，并选择合适的硫化剂以提高其脱除效率。同时也要对其脱硫效率进行监测和控制，从而使其达到最佳的运行状态。在最佳组合下，烟气中SO<sub>2</sub>的脱除效率最高可达93%。此外，当循环流化床锅炉的床压控制在800Pa左右时，脱硫效果最好。同时，在实际生产中应尽量降低床层温度，并选择合适的硫化剂以提高脱硫效率。

在未来的研究中，我们应该进一步优化循环流化床锅炉的燃烧过程，采用低氮燃烧技术来降低烟气中NO<sub>x</sub>的含量，从而达到减少SO<sub>2</sub>排放的目的。同时，我们还应该研究循环流化床锅炉炉内脱硫过程中SO<sub>2</sub>排放的影响因素，以优化其燃烧过程。另外，我们还可以利用现代计算机技术对炉内脱硫过程进行模拟，从而更好地指导实际生产。

## 参考文献

- [1] 韩铠泽, 刘方, 张光学. 循环流化床锅炉炉内脱硫技术研究进展[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(02): 183-193.
- [2] 粟学俐, 陈青山, 黄桂平, 等. 循环流化床锅炉脱硫技术进展[J]. 荆门职业技术学院学报, 2009, 24(02): 89-93.
- [3] 吴剑恒. 燃烧福建无烟煤循环流化床锅炉炉内脱硫对SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和CO等污染物排放的影响[J]. 工业锅炉, 2011, (03): 5-10.