

# 脱硫技术在火电厂的应用分析

付海冰

哈尔滨锅炉厂有限责任公司 黑龙江哈尔滨 150046

**【摘要】**脱硫技术是指从烟气中去除硫氧化物的技术，主要应用于燃煤电厂、冶金、化工等行业。燃煤是造成大气污染的主要来源之一，其中硫氧化物是酸雨的主要前体物，会对环境和人体健康造成严重危害。因此，脱硫技术是治理大气污染的重要手段。

**【关键词】**脱硫技术; 火电厂; 应用路径研究

## 前言

脱硫技术是指从烟气中去除二氧化硫(SO<sub>2</sub>)的技术。火电厂燃烧煤炭会产生大量的SO<sub>2</sub>，SO<sub>2</sub>排入大气后会形成酸雨，对环境造成严重污染。因此，火电厂需要安装脱硫装置，对烟气进行脱硫处理。脱硫技术是治理大气污染的重要手段，在火电厂中的应用具有重要的环保效益、经济效益和社会效益。随着脱硫技术的不断发展和完善，火电厂的硫氧化物排放将得到有效控制，大气环境质量也将得到进一步改善。

## 1 脱硫技术的原理与应用效果、通行技术标准

脱硫技术的基本原理是利用化学反应将烟气中的硫氧化物转化为不溶于水的物质，然后通过烟气净化装置将其捕集并排出。脱硫技术可以有效去除烟气中的SO<sub>2</sub>，脱硫效率一般可达90%以上。常用的脱硫技术包括以下几种：1. 湿法脱硫：利用碱性溶液吸收烟气中的硫氧化物，生成可溶性的硫酸盐或亚硫酸盐，再通过氧化、结晶等工艺将其转化为固体脱硫产物。湿法脱硫技术成熟可靠，脱硫效率高，应用最为广泛。2. 干法脱硫：利用碱性固体物质吸收烟气中的硫氧化物，生成固体脱硫产物。干法脱硫技术不需要水，但脱硫效率相对较低，且脱硫产物不易处理。3. 半干法脱硫：介于湿法脱硫和干法脱硫之间，用水量较少，脱硫效率和脱硫产物处理性介于两者之间。火电厂脱硫技术经历了石灰石-石膏法、钠法-硫酸钠法、氨法-硫酸铵法 etc 发展阶段，目前以石灰石-石膏法为主流。为保证脱硫效率和生产安全性，火电厂管理人员应根据发电量、燃煤消耗量等基本条件和二氧化硫排放控制要求，选择合适的脱硫技术，如石膏法脱硫、石灰石法脱硫、氨法脱硫等。据相关研究显示，21世纪以来，我国火电厂脱硫技术进入大规模

推广应用阶段。截至2023年，我国火电厂脱硫设施的装机容量已达到90%以上，脱硫率达到95%以上<sup>[1]</sup>。

火电厂脱硫技术的应用取得了显著成效，火电厂脱硫技术的应用，大幅减少了火电厂SO<sub>2</sub>的排放量。据统计，2023年我国火电厂SO<sub>2</sub>排放量比2013年下降了70%以上。火电厂脱硫技术的应用，可以提高火电厂的综合效率，促进节能减排。据统计，火电厂脱硫技术的应用，可以使火电厂的煤耗降低2%~3%。目前，我国火电厂脱硫技术主要有以下几个国家通行技术标准：首先是《火电厂烟气脱硫工程技术规范》(DL/T5196-2018)，该标准规定了火电厂烟气脱硫工程的设计、施工、验收和运行等技术要求。其次是《火电厂烟气脱硫脱硝一体化技术规范》(DL/T5334-2019)，该标准规定了火电厂烟气脱硫脱硝一体化技术的工艺、设备、运行等技术要求<sup>[2]</sup>。

## 2 脱硫技术的基本类型与应用方式

### 2.1 石灰石-石膏法脱硫

石灰石-石膏法脱硫是目前应用最广泛的烟气脱硫技术之一，其原理是利用石灰石或石灰浆液吸收烟气中的二氧化硫，生成亚硫酸钙和硫酸钙，从而达到脱硫的目的。该方法具有以下优点：脱硫效率高，可达90%以上；技术成熟，运行可靠；吸收剂资源丰富，价格低廉；同时脱除烟气中的部分HCl、HF、颗粒物和重金属。石灰石-石膏法脱硫主要应用于火电厂烟气脱硫，也可用于其他工业锅炉烟气脱硫。根据吸收剂的制备和使用方式，该方法可分为以下两种工艺：首先是石灰石-石膏湿法脱硫，这一方法是将石灰石磨成细粉，加水制成石灰石浆液，喷入吸收塔与烟气接触，吸收烟气中的SO<sub>2</sub>。吸收后的浆液经氧化、浓缩、脱水，生成石膏副产品。石灰-石膏湿法脱硫：将石灰消化

成消石灰浆液，喷入吸收塔与烟气接触，吸收烟气中的SO<sub>2</sub>。吸收后的浆液经氧化、浓缩、脱水，生成石膏副产品<sup>[3]</sup>。

该方法的常用技术设备包括：石灰石制浆系统、氧化系统、吸收塔、浓缩系统、浆液脱水装置等。该工艺的脱硫流程如下：在烟气预处理阶段，烟气经除尘器后，进入换热器进行降温，降低烟气的湿度，提高脱硫效率。在吸收阶段，降温后的烟气进入吸收塔，与石灰石或石灰浆液进行接触，发生化学反应生成亚硫酸钙。亚硫酸钙浆液经氧化塔，在空气或氧气的作用下氧化成石膏。在脱水环节，石膏浆液经浓缩器浓缩后，进入离心机或真空过滤器进行脱水，得到湿石膏或干石膏。最后是废水处理，脱硫过程中产生的废水经沉淀、过滤等处理后，达标排放或回用。石灰石-石膏法脱硫技术已在全球范围内得到广泛应用，取得了显著的环保效益。据统计，截至2020年底，中国火电厂烟气脱硫装置总容量已达4.5亿千瓦，其中石灰石-石膏法脱硫装置容量占比超过90%。该技术的应用，有效降低了火电厂烟气中SO<sub>2</sub>的排放量，对改善大气环境质量、防治酸雨等方面发挥了重要作用<sup>[4]</sup>。

## 2.2 氨法脱硫

氨法脱硫技术是一种应用于火电厂烟气脱硫的成熟技术，其原理是利用氨水吸收烟气中的二氧化硫，生成亚硫酸铵和硫酸铵。该技术具有脱硫效率高、运行成本低、副产物可利用等优点，在火电厂烟气脱硫领域得到广泛应用。该技术的流程如下：首先是烟气预处理：烟气经除尘器后进入脱硫系统，首先进行预处理，包括降温、除湿等，以满足脱硫工艺的要求。其次是氨水吸收：预处理后的烟气进入吸收塔，与氨水溶液逆流接触，二氧化硫与氨水反应生成亚硫酸铵和硫酸铵。氧化：部分亚硫酸铵在氧化塔中，在空气或氧气的作用下氧化成硫酸铵。脱硫液处理：脱硫液经氧化后，进入脱水结晶装置，将硫酸铵结晶析出，得到成品硫酸铵，同时脱硫后的烟气经引风机排入大气。

该方法应用难度较大，对工艺质量要求较高，基本要求包括脱硫效率、氨逃逸效率、硫酸铵质量等。其中脱硫效率是指烟气中二氧化硫的去除率，一般要求脱硫效率≥90%。氨逃逸率是指氨水吸收二氧化硫后，未被吸收的氨气随烟气排放的比例，一般要求氨逃逸率≤5ppm。由于硫酸铵是氨法脱硫的主要副产物，其质量应符合国家标准GB/T 21044-2007《工业硫酸铵》。这一方法的应用优势在于脱硫效率高，可达90%以上；运行成本低，特别是煤中含硫量

较高时，运行成本更低；副产物可利用，硫酸铵是一种常用的化肥原料<sup>[5]</sup>。

## 2.3 石灰石-氧化钙干法脱硫

石灰石-氧化钙干法脱硫技术是一种成熟、可靠的脱硫技术，具有脱硫效率高、运行成本低、无二次污染等优点，在火电厂中得到广泛应用。石灰石-氧化钙干法脱硫的脱硫反应主要有以下两个步骤：石灰石分解： $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ；脱硫反应： $\text{CaO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$ 。这一技术的应用流程如下：烟气经过除尘器后，进入预热器进行预热，提高烟气温度，降低湿度，以便于后续的脱硫反应。预热后的烟气进入喷雾干燥器，与喷雾的石灰石浆液混合。石灰石浆液在高温烟气的作用下，迅速脱水分解为氧化钙，并与烟气中的二氧化硫发生反应生成硫酸钙。脱硫后的烟气进入烟气冷却器，通过与冷却水或空气进行热交换，降低烟气温度，使其达到排放标准。冷却后的烟气进入布袋除尘器，收集脱硫产物硫酸钙。这一脱硫工艺的质量要求为脱硫效率：≥90%，烟尘排放浓度：≤30mg/Nm<sup>3</sup>。由于石灰石是干法脱硫工艺的关键原料，其质量直接影响脱硫效率和脱硫产物的质量。石灰石应具有以下特点：CaO含量高，一般不低于50%；MgO含量不高于5%；粒度均匀，一般为0-3mm。石灰石-氧化钙干法脱硫的脱硫产物主要是硫酸钙。硫酸钙是一种白色粉末，不溶于水，但溶于酸。硫酸钙的形态和粒度对脱硫效率和烟气后处理有重要影响。一般来说，硫酸钙的形态越细，粒度越小，脱硫效率越高，烟气后处理越容易。

## 2.4 钠基-镁基湿法脱硫

钠基-镁基湿法脱硫技术是一种利用钠基或镁基吸收剂吸收烟气中的二氧化硫，生成可利用的硫酸盐产品的新型脱硫技术。与传统的石灰石-石膏湿法脱硫技术相比，钠基-镁基湿法脱硫技术具有以下优势：脱硫效率高，可达98%以上；副产物可利用，可制成硫酸钠或硫酸镁，具有较高的经济价值；废水量少，易于处理；运行成本低，经济效益好。钠基-镁基湿法脱硫的基本流程如下：在烟气预处理环节，烟气经过除尘器、脱水器等设备，去除烟尘和水雾，降低烟气温度，为后续脱硫过程做好准备。预处理后的烟气进入吸收塔，与含有氧化镁和氢氧化钠的吸收剂溶液逆流接触，烟气中的二氧化硫与吸收剂发生化学反应，生成亚硫酸镁和硫酸镁，化学表达式为 $\text{SO}_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 。其次是氧化

环节，部分亚硫酸镁在氧化塔中，通过空气氧化或喷雾氧化等方式，氧化成硫酸镁。氧化后的浆液进入浓缩塔，通过蒸发浓缩，提高浆液浓度。浓缩后的浆液进入结晶器，通过冷却结晶，得到硫酸镁晶体。硫酸镁晶体经过干燥热烘处理，得到成品硫酸镁。

### 3 现阶段火电厂应用脱硫技术的常见问题与解决策略

#### 3.1 固体沉积物累积形成污垢层

燃煤电厂中的脱硫技术通常使用湿法脱硫，其中使用石灰石或石膏来吸收烟气中的二氧化硫（SO<sub>2</sub>）。这些废水中含有大量的悬浮颗粒和溶解性离子，这些颗粒和离子会在锅炉内沉积并形成污垢层。脱硫废水的pH值和总溶解固体含量会随着浓缩比例的增加而发生变化。当烟气中含有SO<sub>2</sub>或SO<sub>3</sub>时，废水的pH值会迅速降低，并在2-3之间稳定。具有较高SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量的废水，其电导率增加较小。污垢层会导致锅炉设备传热效率下降、设备内部元件腐蚀故障等问题。为解决此问题，应定期清洁、检查和维护程序对于在结垢沉积物严重影响性能之前识别和清除沉积的污垢。清洁检查应侧重于热交换器表面，确保及时处理任何沉积物。技术人员可在锅炉管道中安装过滤设备，去除流体中的悬浮颗粒，防止其沉积在交换器表面。

#### 3.2 脱硫系统影响锅炉正常传热

脱硫设备主要包括湿法脱硫、干法脱硫和半干法脱硫三种类型。其中，湿法脱硫应用最为广泛，对锅炉传热的影响也最为显著。脱硫过程中，烟气与脱硫剂混合，会吸收大量的热量，导致烟气温度降低。烟气温度降低会影响锅炉的蒸汽参数，降低锅炉效率。脱硫后烟气中含有大量水蒸气，会增加烟气的含湿量。烟气含湿量增加会降低烟气热导率，增加锅炉传热阻力，导致锅炉传热效率下降。同时脱硫过程中会产生硫酸、硫酸氢铵等腐蚀性物质，会对锅炉的受热面造成腐蚀，降低锅炉使用寿命。为解决此问题，技术人员应在脱硫系统附近设置烟气再热器，提高烟气温度，减少烟气中水蒸气的凝结，降低锅炉的传热阻力，并采用耐腐蚀材料制造锅炉受热面，或在受热面上涂覆防腐涂层，延长锅炉的使用寿命。锅炉操作人员必须根据锅炉运行情况，调整脱硫系统的运行参数，如喷淋塔液气比、吸收塔温度等，提高脱硫效率，减少对锅炉传热的影响。

#### 3.3 石灰失活影响脱硫效率

火电厂脱硫技术主要依靠石灰石-石膏法，其中石灰石在脱硫过程中会发生一系列物理化学反应，最终生成石

膏。然而，在实际应用过程中，部分石灰石会因各种因素影响而无法有效参与脱硫反应，导致脱硫效率下降，这种现象称为石灰失活。导致石灰失活问题的原因在于石灰石质量较低、烟气温度过高等。其中石灰石的活性直接影响其脱硫效率。石灰石中碳酸钙含量越高、杂质越少，活性越高，脱硫效率越高。烟气温度越高，石灰石的脱硫反应速度越快，但同时也可能导致石灰石发生烧结，降低脱硫效率。还有浆液pH值是影响石灰石溶解的关键因素。浆液pH值过低会抑制石灰石的溶解，导致脱硫效率下降。石灰失活会降低石灰石的脱硫反应活性，导致脱硫效率下降。主要表现为脱硫率下降、石膏生成量减少等。脱硫率是衡量脱硫效率的重要指标。石灰失活会导致脱硫率下降，无法满足环保排放标准；石灰失活会导致石膏生成量减少，无法有效吸收烟气中的SO<sub>2</sub>；石灰失活会导致烟气SO<sub>2</sub>排放量增加，加剧大气污染。为解决问题，应选用活性高、杂质少的石灰石，提高石灰石的脱硫反应活性。技术人员应将烟气温度控制在适宜范围内（一般为50到60摄氏度），既保证脱硫反应速度，又避免石灰石烧结。还应控制浆液pH值，使其保持在合适的范围（一般为6.0-6.5）。技术人员应研发新型脱硫剂，替代传统的石灰石，可以提高脱硫效率，减少石灰石的失活。

### 4 结论

脱硫技术是控制SO<sub>2</sub>排放、防止酸雨污染的重要措施。火电厂是SO<sub>2</sub>排放的主要来源之一，因此脱硫技术在火电厂中的应用具有重要意义。石灰石-石膏湿法脱硫工艺是目前火电厂应用最广泛的脱硫技术，具有脱硫效率高、运行成本低、技术成熟等优点。但该工艺也存在产生二次污染、设备腐蚀等缺点。未来，需要进一步开发和应用更加高效、低成本、环保的脱硫技术。

#### 参考文献：

- [1] 张君杰. 脱硫技术在火电厂的应用分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 120-121+155.
- [2] 王天喜. 炉内燃烧脱氮尾部烟气流化床脱硫技术在火电厂的应用[J]. 宁夏电力, 2006(6): 45-49.
- [3] 许晟源. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保研究[J]. 中国设备工程, 2023(13): 213-215.
- [4] 杨道武, 朱志平, 周晓蓉. 我国火电厂脱硫技术的应用及分析[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, 17(2): 74-76.