

# 锅炉热能脱硫设备腐蚀机理及防护技术研究

王天东

申能吴忠热电有限公司 宁夏 吴忠 751100

**摘要:** 随着环保要求的日益严格, 锅炉热能脱硫设备的腐蚀问题日益凸显。本文系统研究了锅炉脱硫设备的腐蚀机理, 包括化学腐蚀、电化学腐蚀及冲刷磨损与腐蚀等。同时, 深入探讨了烟气成分、温度、设备材质与结构、脱硫工艺与操作管理等对腐蚀的影响。在此基础上, 提出了多种防护技术, 如优化燃煤粒径、耐磨喷涂、结构防磨以及高性能防腐材料的应用等, 旨在为锅炉热能脱硫设备的防腐蚀提供理论支持和技术指导, 确保设备的安全高效运行。

**关键词:** 锅炉热能脱硫设备; 腐蚀机理; 防护技术

**引言:** 在当今社会, 环保已成为全球关注的焦点, 锅炉热能脱硫设备作为减少大气污染的重要设施, 其稳定运行和长期使用至关重要。然而, 该设备在运行过程中长期接触高温、高湿、腐蚀性强的烟气, 导致其面临严重的腐蚀问题。腐蚀不仅降低了设备的性能和寿命, 还增加了运行和维护成本。因此, 深入研究锅炉热能脱硫设备的腐蚀机理, 开发有效的防护技术, 对于提升设备性能、延长使用寿命、降低维护成本具有重要意义。

## 1 锅炉热能脱硫设备腐蚀机理分析

### 1.1 化学腐蚀

化学腐蚀是指烟气中的有害化学成分, 如 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{HF}$ 等, 与设备材质(通常为钢铁)在特定条件下发生的化学反应, 导致设备逐渐腐蚀。(烟气中的有害化学成分与设备材质的化学反应过程。在锅炉燃烧过程中, 煤中的硫元素会转化为 $\text{SO}_2$ 和 $\text{SO}_3$ 。当这些气体进入脱硫设备时, 它们会与设备材质(如钢铁)发生化学反应。 $\text{SO}_2$ 在水蒸气存在下会转化为亚硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), 而 $\text{SO}_3$ 则直接与水反应生成硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )。这些酸性物质会与钢铁中的铁元素反应, 生成可溶性的铁盐, 如硫酸亚铁( $\text{FeSO}_4$ )或亚硫酸亚铁( $\text{FeSO}_3$ ), 导致设备材质的腐蚀。此外, 烟气中还含有 $\text{HF}$ 等氟化物, 它们会与钢铁中的铁元素反应生成氟化铁( $\text{FeF}_2$ )或氟化亚铁( $\text{FeF}_3$ ), 这些氟化物在潮湿环境下会进一步加速腐蚀过程<sup>[1]</sup>。脱硫后烟气在低温条件下对设备的露点腐蚀问题。脱硫过程中, 烟气中的 $\text{SO}_2$ 和 $\text{SO}_3$ 被吸收剂(如石灰石或氨水)吸收, 生成硫酸盐或亚硫酸盐。这些盐类物质在脱硫后的烟气中随水蒸气一起存在。当烟气温度降至露点以下时, 水蒸气会凝结成水, 与烟气中的盐类物质结合, 形成腐蚀性更强的酸性溶液。这些溶液附着在设备内壁和内件上, 会对其造成严重的露点腐蚀。露点腐蚀的特点是腐蚀速度快、局部腐蚀严重, 且往往难以预测

和控制。

### 1.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀是指金属表面存在水及电解质时, 由于金属内部的电位差形成原电池, 产生电流而导致金属腐蚀的现象。电化学腐蚀原理。电化学腐蚀是指金属在电解质溶液中由于电位差而发生的腐蚀。在脱硫设备中, 钢铁等活泼金属与含有溶解氧、酸根离子等物质的溶液接触时, 会形成一个原电池。在这个原电池中, 金属作为阳极发生氧化反应, 失去电子成为金属离子进入溶液; 而溶液中的氧或其他阴离子则作为阴极接受电子发生还原反应。这个过程会不断消耗金属, 导致设备的腐蚀。络合铁催化剂不稳定时的电化学腐蚀。在某些脱硫工艺中, 如络合铁催化氧化法, 络合铁催化剂在溶液中可能不稳定, 导致铁离子释放到溶液中。这些铁离子会与溶液中的阴离子结合, 形成新的化合物, 从而改变了溶液的电化学性质。此外, 络合铁催化剂的不稳定还可能导致溶液中的电位分布不均, 形成局部电池效应, 进一步加剧电化学腐蚀。特别是在设备表面的缺陷处, 如裂纹、划痕等, 这些缺陷处往往电位较低, 成为腐蚀的起始点。随着时间的推移, 这些起始点会逐渐扩大, 形成腐蚀坑, 甚至导致设备穿孔。

### 1.3 冲刷磨损与腐蚀

冲刷磨损与腐蚀是指烟气及脱硫液中固体颗粒对设备内壁及内件的冲刷作用, 以及由此引发的腐蚀现象。冲刷磨损作用。在脱硫过程中, 烟气及脱硫液中常含有固体颗粒, 如石灰石粉末、石膏颗粒、飞灰等。这些固体颗粒在烟气流动或脱硫液循环过程中, 会对设备内壁及内件(如喷嘴、搅拌器、除雾器等)造成冲刷磨损。冲刷磨损会破坏金属表面的保护层, 如钝化膜, 使金属直接暴露在腐蚀环境中。冲刷磨损加剧腐蚀过程。冲刷磨损不仅减少了设备材料的厚度, 降低了设备的强度,

还破坏了金属表面的钝化膜。钝化膜是一种致密的金属氧化物层，能够阻止金属与腐蚀介质直接接触，从而减缓腐蚀速率。当钝化膜被破坏后，金属表面变得更为活跃，更容易与腐蚀介质发生反应。此外，冲刷磨损还会产生应力集中现象，导致设备在应力集中处更容易发生腐蚀开裂。

## 2 锅炉热能脱硫设备腐蚀的主要影响因素

### 2.1 烟气成分与温度

烟气中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、HF、HCl等有害成分的含量。烟气中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、HF、HCl等有害成分是导致脱硫设备腐蚀的主要因素。 $\text{SO}_2$ 和 $\text{SO}_3$ 在脱硫过程中会转化为硫酸盐和亚硫酸盐，这些盐类物质对设备材质具有强烈的腐蚀作用，特别是在高温和潮湿环境下，腐蚀速率会显著增加。HF和HCl则是强酸，能直接与设备材质发生反应，生成相应的金属氟化物或氯化物，导致设备表面的腐蚀和破坏。这些有害成分的含量越高，对设备的腐蚀威胁就越大。烟气温度及其变化对腐蚀的影响。烟气温度是影响脱硫设备腐蚀的另一个重要因素。在高温下，烟气中的有害成分更为活跃，与设备材质的化学反应速率加快，腐蚀速率也随之增加。同时，高温还会加剧设备的热应力，导致金属材质发生变形或开裂，为腐蚀介质提供渗透通道。而低温条件下，烟气中的水蒸气容易凝结成水，与烟气中的腐蚀性成分结合，形成腐蚀性更强的溶液，对设备造成严重的露点腐蚀。此外，烟气温度的频繁波动也会导致设备材质的热疲劳，进一步加剧腐蚀问题。

### 2.2 设备材质与结构

设备主体材质（如碳钢）的抗腐蚀性能。设备主体材质的选择直接影响其抗腐蚀性能。碳钢是脱硫设备中常用的材质之一，虽然成本低廉，但抗腐蚀性能较差。在含硫烟气环境中，碳钢容易发生腐蚀，特别是在高温、潮湿和酸性条件下，腐蚀速率会显著加快。为了提高设备的抗腐蚀性能，通常会选择不锈钢、合金钢等耐腐蚀材质，但这些材质的成本较高，需要综合考虑经济性和耐腐蚀性能进行选择。设备结构（如缝隙、焊缝、表面缺陷）对腐蚀的促进作用。设备结构的设计对腐蚀也有重要影响。缝隙、焊缝和表面缺陷等结构特点容易成为腐蚀的起点。缝隙和焊缝处由于难以清洗和维护，容易积累腐蚀介质，形成腐蚀电池，加速腐蚀进程。表面缺陷则破坏了金属表面的完整性，使金属直接暴露在腐蚀环境中，增加了腐蚀的风险。因此，在设备设计和制造过程中，应尽量避免这些结构特点的出现，或采取特殊的防腐措施进行保护<sup>[2]</sup>。

### 2.3 脱硫工艺与操作管理

不同脱硫工艺（如石灰石/石膏法、氨法）对腐蚀的影响。脱硫工艺的选择也会影响设备的腐蚀速率。石灰石/石膏法是目前应用最广泛的脱硫工艺之一，但在脱硫过程中会产生大量的石膏浆液，这些浆液中含有大量的硫酸盐和亚硫酸盐，对设备材质具有较强的腐蚀性。氨法则利用氨水作为吸收剂，与烟气中的 $\text{SO}_2$ 反应生成硫酸铵，虽然腐蚀性问题相对较小，但氨水本身也具有一定的腐蚀性，且氨逃逸问题也可能导致设备二次腐蚀。因此，在选择脱硫工艺时，需要综合考虑其经济性、脱硫效率和腐蚀性等因素。操作管理水平（如脱硫液成分控制、设备清洗与维护）对腐蚀的控制作用。操作管理水平对于控制脱硫设备的腐蚀具有至关重要的作用。脱硫液的成分控制是关键之一。脱硫液中硫酸盐、亚硫酸盐、氯离子等有害成分的含量过高会加剧设备的腐蚀。因此，需要定期检测脱硫液的成分，并根据检测结果进行调整，以保持脱硫液在合适的范围内。同时，设备清洗与维护也是防腐的重要措施。定期清洗设备内壁和喷嘴等关键部位，去除积累的污垢和腐蚀产物，可以有效防止腐蚀介质在设备内部积累。此外，对设备的焊缝、表面缺陷等潜在腐蚀点进行定期检查和维修也是必要的。通过提高操作管理水平，可以显著降低脱硫设备的腐蚀速率，延长设备的使用寿命。

## 3 锅炉热能脱硫设备防护技术研究

### 3.1 主动防护技术

主动防护技术侧重于从源头上减少设备所受的伤害，通过优化燃煤粒径、提高设备耐磨性与耐高温性设计、加强炉墙密闭性管理等手段，有效减轻脱硫设备的运行负担。优化燃煤粒径与煤粉质量控制。燃煤粒径的大小直接影响燃烧效率和烟气中颗粒物的含量。通过优化燃煤粒径，可以减少煤粉在燃烧过程中的不完全燃烧现象，从而降低烟气中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、HF、HCl等有害成分的含量，减轻脱硫设备的负担。同时，加强煤粉质量控制，如控制煤粉的水分、灰分和硫分等指标，也有助于减少烟气的腐蚀性。提高设备耐磨性与耐高温性设计。脱硫设备在运行过程中需要承受高温烟气的冲刷和磨损，因此提高设备的耐磨性和耐高温性是至关重要的。在设备设计阶段，可以采用耐磨性能优异的材质，如不锈钢、合金钢等，同时优化设备的结构，减少烟气对设备的直接冲刷<sup>[3]</sup>。此外，还可以在设备表面增加耐磨层或耐高温涂层，如陶瓷涂层、金属碳化物涂层等，以提高设备的耐磨性和耐高温性。加强炉墙密闭性管理，防止烟气泄漏。炉墙的密闭性对于防止烟气泄漏至关重要。

一旦烟气泄漏,不仅会降低脱硫效率,还会加剧设备的腐蚀。因此,需要加强炉墙的维护和检修,及时修补裂缝和孔洞,确保炉墙的密闭性。同时,还应加强烟道、脱硫塔等关键部位的密封设计,防止烟气通过缝隙泄漏到设备外部。

### 3.2 被动防护技术

被动防护技术主要依赖于在设备表面或内部应用特定的涂层或结构来减少磨损和腐蚀。这些技术包括耐磨喷涂技术、结构防磨技术以及高性能防腐材料的应用。耐磨喷涂技术的应用。耐磨喷涂技术是一种将耐磨材料喷涂在设备表面以形成保护层的技术。根据喷涂方式的不同,耐磨喷涂技术可分为真空离子喷涂、电弧喷涂和火焰喷涂等。这些技术能够形成致密的耐磨层,有效提高设备的耐磨性和耐腐蚀性。例如,真空离子喷涂技术可以形成高硬度、高结合力的陶瓷涂层,显著提高设备的耐磨性和耐高温性。结构防磨技术。结构防磨技术主要通过优化设备的结构设计来减少颗粒物的冲击和磨损。例如,在脱硫塔的入口和出口处设置导流板,可以引导烟气流向,减少颗粒物对塔壁的冲刷。同时,还可以优化管道的走向和角度,减少颗粒物在管道内的撞击和磨损<sup>[4]</sup>。此外,还可以采用耐磨性能更好的管道材质和连接方式,如陶瓷管道和柔性连接等。高性能防腐材料的应用。高性能防腐材料是一种具有优异耐腐蚀性能的材料,能够有效抵抗烟气中腐蚀性成分对设备的侵蚀。例如,RLHY-9035抗高温防腐漆是一种耐高温、耐腐蚀的涂料,能够在高温下形成致密的保护膜,有效隔绝腐蚀性介质对设备的侵蚀。将这些高性能防腐材料应用于脱硫设备的表面或内部,可以显著提高设备的防腐性能和使用寿命。

### 3.3 脱硫设备的节能改造与运行优化

脱硫设备的节能改造和运行优化是提高设备运行效率、降低能耗和排放的关键措施。这包括低温省煤器的改造、脱硫塔的设计与运行优化等方面。低温省煤器的改造与能效提升。低温省煤器是一种利用烟气余热预热

锅炉给水的设备,可以有效提高锅炉的热效率。通过改造低温省煤器,可以将其应用于脱硫设备的尾部烟道,利用烟气余热预热脱硫塔入口的循环水或浆液,从而降低脱硫塔的运行能耗。同时,还可以对低温省煤器进行优化设计,如增加换热面积、优化传热系数等,进一步提高其能效。脱硫塔的设计与运行优化。脱硫塔是脱硫设备中的核心部件,其设计和运行效率直接影响脱硫效果和设备能耗。为了优化脱硫塔的性能,可以采用多层喷淋、复合塔结构以及折板脱水除雾器等先进技术。多层喷淋可以增加浆液与烟气的接触面积和接触时间,从而提高脱硫效率。复合塔结构则可以根据烟气的成分和温度等参数进行分段处理,提高脱硫效率和设备运行的灵活性。折板脱水除雾器则可以有效去除烟气中的水滴和雾气,降低烟气排放的含水量和腐蚀性。

### 结束语

综上所述,锅炉热能脱硫设备的腐蚀问题是一个复杂且关键的研究领域,其机理涉及多个方面的相互作用。通过本文的研究,我们不仅深入剖析了腐蚀产生的根本原因,还提出了多种针对性强、效果显著的防护技术。未来,随着环保要求的不断提升和脱硫技术的持续创新,我们有理由相信,锅炉热能脱硫设备的腐蚀问题将得到更为有效的解决。同时,也希望本研究能为相关领域提供有益的参考和启示,共同推动环保事业的进步与发展。

### 参考文献

- [1]蔡伟.余热锅炉低温腐蚀机理及预防措施[J].化工设计通讯,2019,(09):79-80.
- [2]陈祥.锅炉本体的腐蚀机理及防护[J].中国新技术新产品,2020,(04):82-83.
- [3]杨自龙.余热锅炉低温腐蚀机理及防护措施分析[J].科技创新导报,2020,(07):72-73.
- [4]陈才贵,周井祝.工业锅炉本体的腐蚀机理与防护措施[J].科技资讯,2021,(12):103-104.