

# 脱硫废水零排放工艺设计及经济性分析

黄开进

武汉龙净环保工程有限公司 湖北 武汉 430000

**摘要:** 本文探讨了脱硫废水的来源、水质特点及处理工艺。脱硫废水主要来源于燃煤电厂和钢铁厂等工业生产过程,具有高盐度、高悬浮物和高重金属含量的特点,对环境危害严重。为实现脱硫废水零排放,本文提出低温闪蒸(三效蒸发)与高温干燥(旋转雾化)相结合的处理工艺。该工艺通过高效蒸发和干燥,实现废水的固液分离和彻底干燥,得到无害化固体产物。还详细分析了该工艺的投资成本、运行成本和经济效益,证明了其在实际应用中的可行性和经济合理性。

**关键词:** 脱硫废水; 零排放; 低温闪蒸; 经济性分析

## 1 脱硫废水特性分析

### 1.1 废水来源

脱硫废水主要源自燃煤电厂、钢铁厂等工业生产中脱硫系统的排水环节。以燃煤电厂为例,在采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺时,脱硫剂石灰石( $\text{CaCO}_3$ )与烟气中的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )发生一系列复杂的化学反应。首先, $\text{SO}_2$ 溶于水生成亚硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ),接着 $\text{H}_2\text{SO}_3$ 与 $\text{CaCO}_3$ 反应生成亚硫酸钙( $\text{CaSO}_3$ ),部分 $\text{CaSO}_3$ 会被烟气中的氧气进一步氧化为硫酸钙( $\text{CaSO}_4$ ),也就是石膏。在这个过程中,除了生成亚硫酸盐和硫酸盐,烟气中原本含有的其他杂质,如重金属汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)等,以及氟化物(如HF等),都随着反应的进行和气体的洗涤过程进入到废水中。钢铁厂在烧结、炼铁等工序中进行脱硫操作时,同样会产生类似成分的废水,这些废水若不加以妥善处理,直接排放将对周边水体、土壤等生态环境造成严重的污染。

### 1.2 水质特点

脱硫废水具有显著的高盐度、高悬浮物、高重金属含量的特点。其中,主要盐分包含氯化钠( $\text{NaCl}$ )、硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )等。这些盐分的积累会改变水体的渗透压,当废水排入自然水体后,会导致周边水生生物细胞失水,影响其正常的生理代谢和生长繁殖,严重时甚至会导致水生生物死亡,破坏水生态系统的平衡。高悬浮物主要为石膏颗粒等,大量的悬浮物会使水体变得浑浊,降低水体的透明度,阻碍阳光穿透,影响水中植物的光合作用,进而影响整个水生态系统的能量流动和物质循环<sup>[1]</sup>。

而废水中的重金属离子,如汞、镉、铅、铬等,对环境和人体健康危害极大。汞具有很强的神经毒性,进入人体后会在体内蓄积,损害神经系统,导致记忆力减

退、肢体震颤等症状,严重时可致人死亡。镉会在人体内富集,引发肾功能障碍、骨质疏松等疾病,长期接触还可能诱发癌症。铅会影响人体的造血系统、神经系统和消化系统,对儿童的智力发育影响尤为严重。铬的不同价态具有不同的毒性,六价铬的毒性远高于三价铬,它能强烈刺激和腐蚀人体的皮肤、黏膜,还具有致癌性。这些重金属离子即使在环境中以极低的浓度存在,也会通过食物链的生物放大作用,在生物体内不断积累,最终对整个生态系统和人类健康构成巨大威胁。

## 2 低温闪蒸(三效蒸发)工艺原理与设计

在环保和节能日益受到重视的今天,低温闪蒸与三效蒸发技术作为高效、节能的废水处理技术,被广泛应用于脱硫废水的处理中。这两种技术的结合不仅能有效去除废水中的有害物质,还能实现资源的最大化利用。

### 2.1 低温闪蒸原理

低温闪蒸是一种基于热力学原理的高效蒸发技术。其基本原理是利用物质沸点随压力变化的特性,即在降低压力时,液体的沸点会随之降低。在脱硫废水处理过程中,首先将废水加热至接近其常压下的沸点温度。随后,将加热后的废水迅速引入闪蒸罐内。由于闪蒸罐内部被抽真空或维持在一个较低的压力水平,废水在罐内的沸点随之下降,导致废水迅速闪蒸蒸发。这一过程中,废水中的水分以蒸汽的形式迅速脱离液体,从而实现固液的高效分离。低温闪蒸技术不仅能够快速处理大量废水,而且能够显著降低能耗,提高处理效率。

### 2.2 三效蒸发流程设计

三效蒸发技术是将多个蒸发器通过串联的方式连接起来,形成一个多级的蒸发系统。在这个系统中,前一效蒸发器产生的二次蒸汽被用作后一效蒸发器的热源,从而实现热能的高效利用。具体到脱硫废水处理过程,

第一效蒸发器通常运行在较高的温度和压力下，利用外部提供的蒸汽对废水进行加热蒸发。蒸发过程中产生的二次蒸汽，其温度和压力均较高，具有较高的热能价值。这些二次蒸汽随后被引入第二效蒸发器，作为该效的热源继续蒸发废水。第二效蒸发器中的废水在较低的温度和压力下蒸发，产生的二次蒸汽再次被引入第三效蒸发器。在第三效蒸发器中，废水在更低的温度和压力下进一步蒸发浓缩，同时回收热能。通过这种逐级利用热能的方式，三效蒸发技术能够显著提高热能的利用率，降低能耗。在设计三效蒸发流程时，需要合理确定各效蒸发器的温度、压力和流量等参数。这些参数的确定依赖于废水的具体性质、处理量以及蒸发效率的要求<sup>[2]</sup>。通过精确的计算和模拟，可以确保各效蒸发器之间的热能传递高效、稳定，从而实现废水的高效蒸发浓缩。

### 2.3 设备选型与参数确定

在低温闪蒸与三效蒸发工艺的设计中，设备选型与参数确定至关重要。根据废水的处理量、水质特点以及蒸发效率的要求，可以选择不同类型的蒸发器，如降膜蒸发器、强制循环蒸发器等。降膜蒸发器适用于处理量大、粘度较低的废水，而强制循环蒸发器则适用于处理含有较多固体颗粒或粘度较高的废水。在确定蒸发器类型后，需要进一步确定各效蒸发器的传热面积、蒸发量、操作温度和压力等关键参数。这些参数的确定需要结合废水的具体性质和蒸发效率的要求，通过精确的计算和模拟得出。同时，为了确保系统的稳定运行，还需要配备相应的冷凝器、真空泵等辅助设备。冷凝器用于将蒸发器产生的蒸汽冷凝成液体，以便回收或处理；真空泵则用于维持蒸发器内的低压力环境，确保废水能够迅速闪蒸蒸发。

## 3 高温干燥（旋转雾化）工艺原理与设计

在环保技术领域，高温干燥（旋转雾化）工艺凭借其高效、节能及环保的特点，在脱硫废水处理中占据重要位置。该工艺通过将浓缩后的脱硫废水转化为细小液滴，并使其与高温热空气充分接触，从而迅速蒸发水分，达到干燥固化的目的。

### 3.1 旋转雾化原理

旋转雾化技术的核心在于利用高速旋转的雾化器将脱硫废水转化为细小而均匀的液滴。雾化器通常由电机驱动，使其内部的雾化盘以极高的速度旋转。当浓缩后的脱硫废水被送入雾化器时，受到离心力的作用，液滴被均匀分散并喷射到干燥室内。这一过程不仅增大了液滴与热空气的接触面积，还提高了水分蒸发的速率。另外，由于雾化器的高速旋转，液滴获得较大的离心力，

从而能够均匀分布在干燥室内，避免局部过热或干燥不均的问题。

### 3.2 高温干燥流程设计

高温干燥流程的设计需要综合考虑脱硫废水的性质、处理量以及干燥效率等因素。首先，经过三效蒸发浓缩后的脱硫废水被输送至旋转雾化器。在干燥室内，高温热空气从底部或侧面进入，与雾化后的液滴逆流或并流接触。逆流接触能够增加液滴与热空气的接触时间，从而提高水分蒸发的效率；而并流接触则有利于减少干燥室内的温度梯度，保证干燥过程的均匀性。在水分迅速蒸发的同时，干燥后的固体颗粒在重力或气流的作用下逐渐沉积到干燥室的底部或被收集装置捕获，实现了固液的彻底分离<sup>[3]</sup>。这一过程不仅去除了废水中的水分，还保留了固体颗粒中的有用成分，为后续利用或处置提供便利。

### 3.3 设备选型与参数确定

在设备选型方面，旋转雾化器的选择至关重要。其转速、雾化盘直径等参数直接影响液滴的雾化效果和干燥效率。根据脱硫废水的性质（如粘度、浓度等）和处理量的大小，需要选择适当型号的旋转雾化器。此外，还需要考虑雾化器的材质和耐腐蚀性能，以确保其长期稳定运行；干燥室的结构和尺寸设计也是影响干燥效果的关键因素。合理的干燥室结构能够优化热空气的流动路径，提高热量传递效率。同时，干燥室的尺寸应根据处理量的大小进行适当调整，以确保液滴与热空气能够充分接触；在确定热空气的参数时，需要综合考虑干燥效率、能耗以及设备运行稳定性等因素。热空气的温度应根据脱硫废水的性质和干燥效率的要求进行设定；流量则应根据处理量和干燥室的结构进行调整；流向的选择则应根据液滴与热空气的接触方式（逆流或并流）来确定。为了确保高温干燥（旋转雾化）工艺的稳定运行和高效处理废水，还需要配备相应的辅助设备和控制系统。例如，可以采用自动化控制系统对旋转雾化器的转速、热空气的温度和流量等参数进行精确调节；同时，还需要设置安全保护装置和报警系统，以应对可能的异常情况。

## 4 零排放工艺整体流程与协同作用

### 4.1 整体工艺流程

脱硫废水零排放工艺的整体流程精心设计，以确保高效、环保的处理效果。首先，废水需经过预处理阶段，这一过程至关重要，它主要目的是去除废水中所含的大部分悬浮物和重金属离子，为后续处理奠定坚实基础。预处理完成后，废水进入核心处理环节——低温闪

蒸（三效蒸发）系统。在这一阶段，废水被有效蒸发浓缩，体积大幅减小，同时保留了较高的热能，为接下来的处理步骤节省了能源。经过浓缩的废水随后被送入高温干燥（旋转雾化）系统，进行最终的干燥处理。这一阶段至关重要，它确保废水中的水分被彻底蒸发，转化为干燥的固体产物，从而实现废水零排放的目标<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 两阶段工艺的协同作用

低温闪蒸与高温干燥两阶段工艺相辅相成，共同构成脱硫废水零排放工艺的核心。前者通过初步浓缩降低废水的体积和后续处理的能耗，后者则确保了废水的彻底干燥，得到无害且可处置的固体产物。两阶段的紧密配合，不仅提高整体处理效率，还确保零排放目标的顺利实现，彰显了工艺设计的智慧与合理性。

### 5 低温闪蒸（三效蒸发）+ 高温干燥（旋转雾化）路线的经济性分析

#### 5.1 投资成本分析

实施低温闪蒸（三效蒸发）+ 高温干燥（旋转雾化）路线的投资成本构成相对复杂，涵盖了多个方面。首先，设备购置费占据投资成本的主要部分，这包括但不限于蒸发器、分离器、冷凝器、旋转雾化器、干燥塔、除尘器和引风机等关键设备的费用。这些设备的性能、材质和规格将直接影响整个处理系统的效率和稳定性，因此，在选购时需充分考虑技术先进性和性价比。其次，安装费和调试费也是不可忽视的一部分。由于该工艺涉及的设备较多且相互之间的连接复杂，安装工作不仅要求技术精湛，还需严格按照规范进行，以确保系统的安全稳定运行。调试阶段则需要对各设备进行联动测试，调整各项参数以达到最佳运行状态，这一过程同样需要专业的技术支持和丰富的经验积累。

#### 5.2 运行成本分析

在运行成本方面，能耗费、维护费和人工费构成了主要的开支。能耗费作为运行成本的主要组成部分，涵盖了电力、蒸汽和水等能源的消耗。由于该工艺需要消耗大量的热能来加热废水并维持蒸发和干燥过程中的高温环境，因此能耗费用相对较高。为了降低能耗成本，可以采取一系列节能措施，如优化设备设计、提高热能利用效率、回收利用余热等；维护费则包括设备的日常维护和维修费用。由于该工艺涉及的设备多为精密仪器，且长期在高温、高压和腐蚀性环境下运行，因此设备的维护和保养工作显得尤为重要。定期的检查、清

洁、润滑和更换易损件可以有效延长设备的使用寿命，降低维修费用；人工费则根据操作人员的数量和工资水平而有所不同<sup>[5]</sup>。为了降低人工费用，可以通过提高自动化程度、优化操作流程、培训熟练操作人员等方式来实现。

#### 5.3 经济效益分析

低温闪蒸（三效蒸发）+ 高温干燥（旋转雾化）路线的经济效益主要体现在资源回收、节能减排和环境效益三个方面。在资源回收方面，该技术路线通过蒸发和干燥处理，可以将废水中的盐分进行回收和利用。这些盐分可以作为化工原料或用于其他工业生产过程，实现了资源的循环利用，降低了生产成本；在节能减排方面，该技术充分利用电厂烟气余热作为蒸发废水的主要热源，有效降低了对传统能源的依赖，实现了能量的高效利用。同时，由于该技术路线避免了废水直接排放到环境中，从而减少污染物的排放，降低了环境治理成本；在环境效益方面，该技术路线实现了脱硫废水的零排放，有效避免了废水对环境的污染和破坏。这不仅有助于提升企业形象，增强社会责任感，还可以为企业带来一定的政策支持和税收优惠等间接经济效益。

#### 结束语

综上所述，脱硫废水零排放工艺设计不仅有助于环境保护，还能实现资源的循环利用和节能减排。通过低温闪蒸与高温干燥技术的结合，实现了废水的高效处理和固液分离，有效避免了废水对环境的污染。未来，随着技术的不断进步和成本的进一步降低，脱硫废水零排放工艺将在更多领域得到推广和应用，为生态环境保护和企业可持续发展做出更大贡献。

#### 参考文献

- [1]梁大新.燃煤电厂脱硫废水零排放工艺路线研究解析[J].电气技术与经济,2023,(01):131-132+141.
- [2]李城孝.关于燃煤火力发电厂脱硫废水零排放处理工艺的探讨[J].中国设备工程,2022,(12):123-125.
- [3]李鹏.脱硫废水的零排放处理技术应用[J].电子技术,2022,51(06):224-225.
- [4]章小园.燃煤电厂脱硫废水零排放工艺路线分析[J].中国资源综合利用,2024,42(01):159-161.
- [5]刘静颖,贾阳杰,杨凤玲,等.燃煤电厂脱硫废水零排放预处理工艺研究进展[J].无机盐工业,2023,55(12):12-25.