烟气处理中硫酸浓度梯度对 SO_2 吸收效果的工程实践

张贤亮

西北铅锌冶炼厂

摘要：在流程工业中，冶炼烟气制酸对于资源回收与环境保护意义重大，吸收工段作为制酸关键环节，其硫酸浓度梯度对 SO_2 吸收效率影响显著。本文基于流程工业视角，剖析铅锌冶炼工艺，阐述冶炼烟气制酸的常规流程，并介绍吸收工段原理及填料吸收塔、板式吸收塔等常用设备。从传质过程、反应动力学及物理性质层面，深入探究硫酸浓度梯度对 SO_2 吸收效率的影响机制。结合铅锌冶炼实际，分析烟气成分、工艺条件和设备对硫酸浓度梯度的影响。提出通过优化吸收液循环量等工艺参数、改进填料结构等设备，以及应用智能控制系统，实现硫酸浓度梯度的优化，提高 SO_2 吸收效率。研究成果对优化冶炼烟气制酸工艺，推动行业可持续发展具有指导价值。

关键词：冶炼烟气制酸；硫酸浓度梯度；SO_2 吸收效率；铅锌冶炼

在流程工业中，冶炼过程会产生大量含有 SO_2 的烟气。若直接排放，不仅会造成严重的环境污染，还会导致硫资源的浪费[1]。将冶炼烟气中的 SO_2 转化为硫酸，既实现了资源的回收利用，又减少了对环境的危害。在冶炼烟气制酸的整个流程中，吸收工段是将 SO_2 转化为硫酸的关键环节，其吸收效率直接影响到制酸的产量与质量。而硫酸浓度梯度作为吸收工段中的一个重要参数，对 SO_2 吸收效率有着显著的影响。深入研究硫酸浓度梯度对 SO_2 吸收效率的影响，对于优化冶炼烟气制酸工艺、提高资源利用率以及降低生产成本具有重要意义[2]。

1　冶炼烟气制酸工艺概述

1.1　铅锌冶炼工艺简述

铅锌冶炼工艺主要分为火法冶炼和湿法冶炼。火法冶炼是传统的冶炼方法，包括烧结焙烧、鼓风炉熔炼、反射炉熔炼等。以铅冶炼为例，在烧结焙烧过程中，铅精矿与熔剂等混合，在高温下发生氧化反应，使其中的硫转化为 SO_2 进入烟气。锌的火法冶炼如竖罐蒸馏法、密闭鼓风炉法等，同样在高温熔炼过程中产生大量含 SO_2 的烟气[3]。湿法冶炼则是利用浸出剂将铅锌矿石中的铅锌溶解出来，再通过一系列的分离、提纯步骤得到铅锌产品。在湿法冶炼的某些环节，如锌精矿的焙烧过程，也会产生含 SO_2 的烟气。这些烟气是冶炼烟气制酸的重要原料来源[4]。

1.2　冶炼烟气制酸的一般流程

冶炼烟气首先经过除尘、除杂等预处理工序，以去除烟气中的粉尘、重金属等杂质，防止其对后续制酸设备造成磨损和催化剂中毒。预处理后的烟气进入转化工段，在催化剂的作用下，SO_2 被氧化为 SO_3。常用的催化剂为钒催化剂，其活性温度一般在 400 ～ 600 ℃[5]。转化后的含 SO_3 烟气进入吸收工段，在吸收塔中接触硫酸吸收液，SO_3 被吸收生成硫酸。吸收后的尾气经进一步处理达标后排放。吸收工段在整个流程中，如图 1 所示，吸收工段是 SO_3 向硫酸转化的重要环节，其操作条件的优化对提高制酸效率和产品质量都具有重要意义。

2　吸收工段原理与设备

2.1　吸收工段的基本原理

吸收工段主要基于化学吸收原理。含 SO_3 的烟气与硫酸吸收液相遇时，SO_3 与硫酸中水反应生成硫酸，其反应方程式为 $SO_3+H_2O=H_2SO_4$。该反应是强放热反应，放出了大量热量。在实际

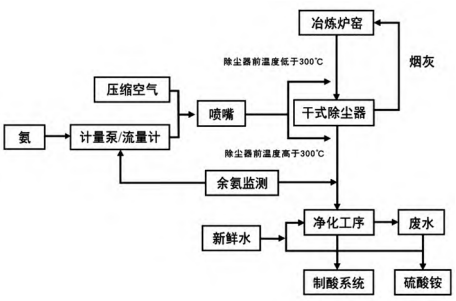


图 1　冶炼烟气吸收工段流程图

吸收过程中，硫酸浓度、温度、气液接触面积等因素都影响 SO_3 吸收效率。其中，硫酸浓度梯度是一个重要的影响因素。由于吸收过程之中 SO_3 不断被吸收，因此吸收液中硫酸在不同位置的浓度不同，形成浓度梯度。这种浓度梯度影响 SO_3 在气液界面的传质推动力，影响吸收效率。

2.2 常用吸收设备介绍

2.2.1 填料吸收塔

填料吸收塔是冶炼烟气制酸吸收工段常采用的设备之一。填料塔内填充有拉西环、鲍尔环、阶梯环等各种填料。含 SO_3 的烟气从塔底进入，自下而上通过填料层，硫酸吸收液从塔顶喷淋而下，在填料表面形成液膜，与烟气充分接触。填料增加了气液的接触面积，增加了吸收效率，如图 2 所示。同时，塔顶通常设有液体分布器以保证吸收液的均匀分布。填料吸收塔由于结构简单、操作稳定、吸收效率高等优点，在铅锌冶炼烟气制酸中有着广泛的应用。

2.2.2 板式吸收塔

板式吸收塔由若干层塔板组成如图 3 所示，每层塔板上有特定的气液接触装置，如筛板、泡罩塔板、浮阀塔板等。从塔底进入的含 SO_3 的烟气依次穿过各层塔板，与塔板上硫酸吸收液传质传热。在每一层塔板上，气液均匀混合，SO_3 被吸收。板式吸收塔气液接触效率高，处理能力大，但结构较复杂，对设备制造和安装要求较高。一些大型冶炼烟气制酸装置也采用板式吸收塔。

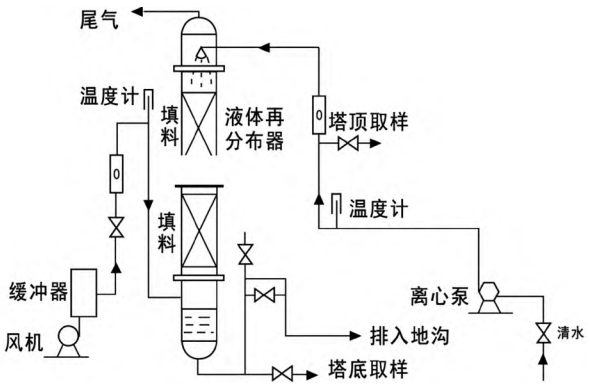


图 2 填料吸收塔结构简图

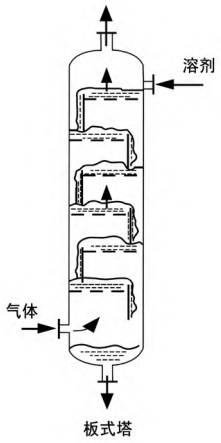


图 3 板式吸收塔结构简图

3 硫酸浓度梯度对 SO_3 吸收效率的影响机制

3.1 传质过程分析

冶炼烟气制酸吸收工段的吸收过程其实质是气液传质过程。SO_3 从气相主体向气液界面扩散，最后经气液界面进入液相主体，这一过程传质效率直接影响着 SO_3 的吸收效率。硫酸浓度梯度也是影响 SO_3 在气液界面传质推动力的重要因素。当吸收液中硫酸浓度较低时，气相中的 SO_3 与液相表面的 SO_3 有较大的分压差。按照菲克定律，这种较大的分压差形成了较大的传质推动力，使得 SO_3 从气相迅速向液相扩散。又如，在某铅锌冶炼厂实际生产初期，吸收塔上部新喷淋的吸收液硫酸浓度较低，吸收塔上部 SO_3 的吸收速率明显较高。随着吸收过程的继续进行，吸收液中硫酸的浓度不断升高，气液界面处 SO_3 的分压差减小。传质推动力，SO_3 吸收速率不断下降。在吸收塔底部，由于吸收液中反应生成的硫酸的浓度较高，吸收 SO_3 的速率相对较低。因此，吸收塔内不同位置硫酸浓度梯度，决定了 SO_3 在该位置的传质速率，从而影响着整个吸收塔的吸收效率。合理地调控硫酸浓度梯度可以优化传质过程，提高 SO_3 吸收效率 [6]。

3.2 反应动力学因素

SO_3 与水反应生成硫酸的过程，受多种因素制约，反应速率很高。除反应物浓度外，温度、催化剂等也起重要作用。在吸收工段，硫酸浓度梯度对该反应的进行有着不可忽视的影响。当硫酸浓度较低时，反应物水的浓度就相对较高。按照化学反应动力学原理，反应物的浓度越大，反应速率越快。所以吸收过程初期反应速率快。

但硫酸浓度增加后，硫酸分子会阻碍 SO_3 与水的反应。硫酸分子在溶液中形成的特定结构会使 SO_3 与水分子有效的碰撞概率降低，反应速率逐渐下降。另外该反应是强放热反应，反应过程中产生的大量热能将升高吸收液温度。温度的变化反过来也影响反应速率和传质速率 [7]。温度升高，虽然一定程度上加速了分子运动速度，但过高的温度会使 SO_3 在液相中的溶解度下降，减弱传质推动力。在铅锌冶炼烟气制酸过程中，烟气成分复杂，可能含有铅、锌的氧化物粉尘及氟、氯等杂质。这些杂质可能和反应物发生副反应，或者改变反应的活化能，影响反应动力学，使硫酸浓度梯度对 SO_3 吸收效率的影响变得复杂。

3.3 物理性质的影响

硫酸浓度的变化，吸收液的物理性质也发生明显的变化，其中，密度和黏度的变化对 SO_3 吸收效率有间接的影响。当硫酸浓度升高时，吸收液密度和黏度均增大。密度越大，吸收液的分布也会失去原有的流动状态。填料吸收塔中吸收液可能会有偏流现象，导致部分填料不能充分与气相接触，降低气液接触效率。黏度越大，SO_3 在液相中的扩散阻力越大。依据分子扩散理论，黏度增加会增加 SO_3 分子在液相中的移动，不利于 SO_3 的吸收。

在实际生产中，吸收液黏度越大，

液体在填料表面的润湿性越差，在填料表面很难形成均匀的液膜，气液接触面积减少。再如某铅锌冶炼厂在吸收时，因硫酸浓度控制不当，吸收液黏度大大增加，吸收塔的吸收效率明显下降。所以硫酸浓度梯度通过影响吸收液的物理性质而间接影响 SO_3 吸收的效率，在实际生产过程中要严格控制硫酸浓度梯度，以保证 SO_3 吸收过程的高效进行[8]。

4 结合铅锌冶炼工艺分析硫酸浓度梯度的影响

4.1 铅锌冶炼烟气成分对硫酸浓度梯度的影响

除 SO_2、SO_3 外，铅锌冶炼烟气中还含有铅、锌氧化物粉尘及少量氟、氯等杂质成分。这些杂质对吸收工段也会造成影响，从而改变硫酸浓度梯度。例如粉尘可能在吸收塔内积累，影响气液流动和传质效率。氟、氯等元素可能会和硫酸反应，消耗硫酸，改变吸收液的浓度分布。

铅冶炼烟气中，铅的氧化物粉尘含量相对较高，粉尘易沉积在吸收塔的塔板或填料表面，导致吸收液分布不均，造成硫酸浓度梯度复杂。锌冶炼烟气中，含有较多的 F，F 能与硫酸中的氢离子结合生成氢氟酸，消耗硫酸，影响硫酸浓度梯度和 SO_3 吸收效率。

4.2 铅锌冶炼工艺条件对硫酸浓度梯度的影响

铅锌冶炼的工艺条件，如熔炼温度、烟气流量、鼓风强度等，影响烟气中 SO_2 的产生量和浓度，进而影响吸收工段的硫酸浓度梯度。在火法炼铅过程中，熔炼温度过高会使铅精矿中的硫氧化得更充分，进入吸收工段的 SO_2 量增加，可能导致吸收液中硫酸浓度上升更快，浓度梯度变化更大。另外，烟气流量的大小还影响着吸收塔内气液的接触时间和传质效率。当烟气流量大时，气液接触时间相对短一些，SO_3 可能来不及充分吸收，吸收液中硫酸浓度在塔内不同位置的差别也就小，浓度梯度变缓。而鼓风强度又将影响熔炼过程中的氧化程度和烟气流动状态，间接影响吸收工段的硫酸浓度梯度。

4.3 铅锌冶炼设备对硫酸浓度梯度控制的挑战

铅锌冶炼过程中的设备，如烧结机、鼓风炉、浸出槽等，是与冶炼烟气制酸系统相联系的。这些设备运行情况都会影响烟气的性质和流量，对硫酸浓度梯度的控制带来困难。例如，烧结机在运行过程中，若出现布料不均匀、烧结效果不佳等情况，会导致烟气中 SO_2 浓度波动较大，使得吸收工段难以维持稳定的硫酸浓度梯度。鼓风炉的炉况不稳定，可能会使烟气温度、流量发生变化，进而影响吸收塔内的传质传热过程和硫酸浓度梯度。在湿法冶炼中，浸出槽的操作条件对烟气产生量和成分有影响，若浸出过程控制不当，也会给硫酸浓度梯度的控制带来困难。

5 优化硫酸浓度梯度提高 SO_2 吸收效率的策略

5.1 工艺参数优化

在冶炼烟气制酸吸收工段，工艺参数的精准调控对优化硫酸浓度梯度、提升 SO_2 吸收效率起着关键作用。吸收液循环量、吸收温度和吸收压力等参数相互关联，共同影响着吸收过程的进行。适当提升吸收液循环量，能够促使吸收液在吸收塔内均匀分布。

以某铅锌冶炼厂为例，在原先生产过程中吸收液循环量较低，导致吸收塔底部硫酸浓度过高，而顶部浓度相对较低，浓度梯度差异较大，SO_2 吸收效率受限。通过增加吸收液循环量，不仅减小了硫酸浓度梯度的差异，而且能迅速带走 SO_2 与水反应产生的大量热量。该反应为强放热反应，若热量不能及时移除，会导致吸收液温度升高，降低 SO_2 吸收效率。稳定的吸收过程对于保证硫酸产品的质量和生产的连续性至关重要。降低吸收温度，有利于提高 SO_3 的吸收效率。在低温下，SO_3 在硫酸中的溶解度大幅度上升，从而使得传质推动力大幅度提高。

然而，吸收温度并非越低越好。如温度过低时，硫酸将产生结晶现象，堵塞管路及设备，严重影响生产的正常运行。例如某冶炼企业，试图降低吸收温度，温度控制不当，硫酸结晶，停产清理设备，造成较大的经济损失。

因此，在实际操作中，应找到一个吸收温度范围，在保证吸收效率的同时，保证设备的稳定运行。同样，调节吸收压力也能够改变 SO_3 的吸收性能。在一定范围内提高吸收压力，有利于 SO_3 的吸收。这是因为压力的增加使 SO_3 在气相中的分压增大，传质推动力增大所致。但是，吸收压力的提高将增加设备投资和运行成本。例如要求采用更耐压的设备和更大的动力系统来保证压力。企业在铅锌冶炼烟气制酸过程中，必须结合自身生产规模、经济实力和环保要求等实际情况，对这些工艺参数进行全面的权衡，确定最佳的操作条件，使其实现经济效益和环境效益的最大化。

5.2 设备改进

对吸收设备进行合理改进，是优化硫酸浓度梯度，提高气液接触效率的重要途径。在填料结构优化上，新型填料的研制和应用对改善硫酸浓度梯度提出了新办法。规整填料具有比表面积大，流体阻力小，液体分布均匀等优点。

以某大型铅锌冶炼企业为例，将传统散装填料改为规整填料，气液接触面积大幅度增加，传质效率大幅度提高。吸收塔内硫酸浓度的分布更加合理，硫酸浓度梯度得到了有效改善。有效地解决了原先由于填料性能不好而造成的吸收效率低的问题，SO_3 吸收效率得到明显地提高。

在塔板设计方面，采用高效的塔板形式可以有效地提高气液传质效率。新型浮阀塔板由于浮阀的结构和排列方

式优化，气液间扰动增强，降低了塔板上的液体返混。例如某企业在吸收塔中使用新型浮阀塔板后，塔板上气液传质更充分，硫酸浓度梯度优化。此外，吸收塔内还设置液体再分布器等辅助装置，能够使吸收液在吸收塔内均匀分布。在塔内吸收液流动过程中出现分布不均时，液体再分布器可以及时对吸收液进行重新分配，改善硫酸浓度梯度，提高吸收效率。

5.3 智能控制系统应用

采用智能控制系统来监测吸收工段运行过程并进行精准控制是优化硫酸浓度梯度的前沿手段。通过在吸收塔内设置各类传感器，可以对吸收塔内各处硫酸浓度、温度、压力等参数以及烟气的组成和流量进行实时监测。智能控制系统基于这些实时数据，采用 MPC 等先进的控制算法对吸收过程进行精确调控。MPC 技术通过建立吸收过程的数学模型来预测未来的操作状态，并且提前调整控制变量。

以某铅锌冶炼厂为例，在使用智能控制系统以前，烟气成分和流量变化很大，人工难以及时调整工艺参数，导致硫酸浓度梯度不稳定，SO_3 吸收效率变化很大。引进智能控制系统后，系统可根据实时监测数据，自动调整吸收液循环量、吸收温度等操作参数，使硫酸浓度梯度始终保持最佳状态。

这不仅提高了生产过程的自动化水平，减少了人工操作的误差，增强了生产过程的稳定性，有效提高了 SO_3 吸收效率，降低了生产成本。智能控制系统的运用，有利于铅锌冶炼烟气制酸行业的智能化发展，推动行业的技术进步与可持续发展。

6 结语

流程工业冶炼烟气制酸中，吸收工段硫酸浓度梯度对 SO_3 吸收效率有很大的影响。通过吸收工段原理、设备和硫酸浓度梯度影响机制分析，结合铅锌冶炼工艺特点，可以看出铅锌冶炼烟气成分、工艺条件、设备等因素对硫酸浓度梯度存在影响。硫酸浓度梯度优化要从工艺参数优化、设备改进和智能控制系统应用等方面入手，以提高 SO_3 吸收效率。在实际生产中，必须结合铅锌冶炼工艺的实际情况，综合考虑各种因素，采取合适的措施，使冶炼烟气制酸过程高效、稳定运行，提高资源利用率，减少环境污染，为流程工业的可持续发展提供有力支持。未来，随着技术的不断进步，还需要对硫酸浓度梯度与 SO_3 吸收效率之间的关系做进一步深入的研究，探索更加先进的优化策略和技术手段，以满足不断提高的环保要求和生产要求。

参考文献

[1] 赵宇涵，李山东，陈虎，等．冶炼烟气制酸酸性废水铜砷分离及反应装置选型 [J]. 有色金属（冶炼部分），2025(03):160-164.

[2] 戚永辉．铜冶炼烟气制酸系统技术改进 [J]. 世界有色金属，2025(01):4-6.

[3] 郝晓东．铜冶炼烟气制酸系统中污酸污水装置节能增效改造实践 [J]. 硫酸工业，2024(06):38-41.

[4] 李桂珍．有色金属冶炼厂铜、酸系统平衡优化改造实践 [J]. 硫酸工业，2024(05):41-44.

[5] 毛艳丽．冶炼烟气制酸系统技术优化与产能提升实践 [J]. 硫酸工业，2024(05):28-33.

[6] 李恒，来倩，鲁宗升，等 .600 kt/a 铜冶炼烟气制酸生产实践 [J]. 硫酸工业，2024(05):37-40.

[7] 朱圣高．铜冶炼环集烟气和制酸尾气脱硫工艺分析 [J]. 世界有色金属，2024(18):23-25.

[8] 林世凡，自振华．铜冶炼烟气制酸系统浓酸泵变频器节能改造实践 [J]. 硫酸工业，2024(04):34-37.



广告