

关于氧化镁湿法脱硫副产物有效回收工艺的探讨

丰晨琛¹ 姜永奇²

1.国能龙源环保有限公司；2.国能（山东）能源环境有限公司

DOI：10.32629/jpm.v7i7.8988

[摘要] 本文探讨的内容是氧化镁湿法脱硫技术（Mg-WFGD）副产物的有效回收工艺。氧化镁湿法脱硫技术因其高效、不易结垢等优势得到广泛应用，但其副产物（主要为亚硫酸镁和硫酸镁）的结晶困难一直是制约其进一步推广的难题。针对此问题，本文提出了通过三效闪蒸工艺，利用较少的能源将脱硫副产物浓缩并结晶为七水硫酸镁的方法。该方法首先通过三效蒸发系统将脱硫后的硫酸镁溶液提浓至约 30%，然后在结晶槽中冷却结晶生成七水硫酸镁晶体。此工艺不仅解决了副产物结晶困难的问题，还具有较高的经济性和工程实践可行性，为氧化镁湿法脱硫副产物的有效回收提供了理论依据和技术支持。

[关键词] 氧化镁湿法脱硫、副产物回收、三效闪蒸、七水硫酸镁

Discussion on Effective Recovery Processes for By-products in Magnesium Oxide Wet Flue Gas Desulfurization

Feng Chenchen¹ Jiang Yongqi²

1.Guoneng Longyuan Environmental Protection Co., Ltd.;

2.Guoneng (Shandong) Energy Environment Co., Ltd.

[Abstract] This paper investigates effective recovery processes for by-products generated during magnesium oxide wet flue gas desulfurization (Mg-WFGD) technology. Although Mg-WFGD is widely adopted due to its high efficiency and resistance to scaling, the crystallization challenges of its primary by-products—magnesium sulfite and magnesium sulfate—have hindered its broader application. Addressing this issue, we propose a three-effect flash evaporation process that concentrates desulfurization by-products into magnesium sulfate heptahydrate with minimal energy consumption. The process first concentrates the desulfurized magnesium sulfate solution to approximately 30% concentration via a three-effect evaporation system, followed by cooling and crystallization in a crystallization tank to produce magnesium sulfate heptahydrate crystals. This approach not only resolves the crystallization difficulties but also demonstrates significant economic viability and practical engineering feasibility, providing both theoretical foundation and technical support for efficient recovery of Mg-WFGD by-products.

[Key words] Magnesium oxide wet desulfurization, by-product recovery, triple-effect flash distillation, magnesium sulfate heptahydrate

1、引言

随着环保法规的日益严格，烟气脱硫技术已成为控制大气污染的重要手段。氧化镁湿法烟气脱硫技术以其高效、不易结

垢等优势，在众多脱硫技术中脱颖而出^[1]。然而，该技术副产物的大量产生及其综合利用的难题，不仅造成了资源浪费，还可能引发二次污染。因此，研究氧化镁湿法脱硫副产物的有效

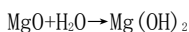
回收工艺，对于促进该技术的可持续发展具有重要意义。

2、氧化镁湿法脱硫技术概述

2.1 技术原理

氧化镁湿法烟气脱硫是一种比较成熟的脱硫技术，脱硫效率可达 99.9%。该法是将氧化镁粉末或氢氧化镁粉末与水按照一定的比例进行混合，配制成所需浆液，与烟气中所含 SO_2 进行逆流接触，发生物理、化学反应，产物为亚硫酸镁或者亚硫酸氢镁，强制氧化系统将一部分的亚硫酸镁氧化成硫酸镁^[2]。该法吸收剂是氢氧化镁，由氧化镁与水反应熟化后制取，溶液 pH 与硫酸根含量决定氢氧化镁溶解率，浆液中氢氧化镁含量越高，粒径越小，二氧化硫吸收效果越好。镁法烟气脱硫的主要化学方程式如下所示：

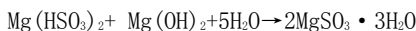
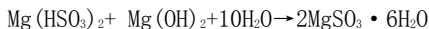
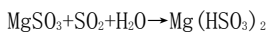
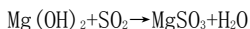
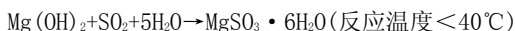
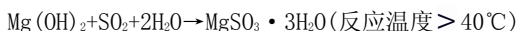
(1) 氧化镁熟化反应



调研现有的氧化镁脱硫项目运行企业，确定熟化温度为 85℃ 熟化时间为 2 个小时。

(2) 吸收塔内的反应

发生的反应为：



2.2 氧化镁湿法脱硫的技术优势

(1) 脱硫效率高，吸收剂利用率高，机组适应性强。理论上脱硫率可以达到并超过 99.9%。

(2) 液气比小，吸收塔高度低。由于镁基的溶解碱性比钙基高数百倍，所需液气比仅为钙基脱硫的 1/6~1/3，而且吸收强度更高，大大减少了循环液量^[3]。

(3) 系统不易结垢，不易堵塞，运行可靠性高。

(4) 对煤种变化的适应性强。

(5) 脱硫副产物亚硫酸镁、硫酸镁可综合利用，具有较高的商业价值，能抵消一部分运行费用。

2.3 副产物处理现状

氧化镁湿法脱硫副产物主要为亚硫酸镁和硫酸镁，这两种物质在水中的溶解度较高，且随着温度的升高而降低^[4]。因此，在脱硫液排放至氧化槽氧化过程中，亚硫酸镁和硫酸镁容易形成过饱和溶液，导致结晶困难。此外，副产物中还含有一定量的杂质，如未反应的氧化镁、氯化物等，这些杂质的存在进一步增加了结晶的难度。

尽管氧化镁湿法脱硫技术具有诸多优势，但其副产物（主要为亚硫酸镁和硫酸镁）的综合利用问题一直未能得到有效解决^[5]。目前，副产物大多采用抛弃法处理，即将其排放至氧化槽氧化成硫酸镁后外排，这不仅造成了资源浪费，还可能对环境造成二次污染。因此，研究氧化镁湿法脱硫副产物的有效回

收工艺，对于实现资源的循环利用和环境保护具有重要意义。

3、氧化镁副产物浓缩结晶工艺

脱硫塔后的溶液进入浓缩系统（三效闪蒸）将硫酸镁溶液提浓至 30% 左右，随后在结晶槽里冷却结晶生成七水硫酸镁，加水溶解七水硫酸镁，随后进入结晶槽进行重结晶，在结晶槽控制温度 10℃~35℃，析出七水硫酸镁晶体： $\text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ ，经过固液分离器分离出七水硫酸镁晶体，重结晶过程中分离的液体利用脱硫塔进口烟气热量蒸干，过程中产生的蒸汽冷凝后可回用脱硫塔补水或用于制造氢氧化镁浆液。

表 1 单效与三效蒸发数据对比表（1m³ 原溶液）

	加热介质	加热介质用量 t/h
单效蒸发	低品质蒸汽	0.91
三效蒸发	低品质蒸汽	0.4
节省百分数%	/	56

3.1 三效蒸发系统

经过脱硫塔系统得到的溶液中硫酸镁浓度较低达不到结晶的条件，需要经过蒸发浓缩，而单效蒸发耗能太大。因此采用三效蒸发系统，可以最大化的利用热量，进行能量的梯级利用，对系统的节能减排具有实际意义。

三效蒸发系统中，通入厂区蒸汽作为第 1 效加热器的热源，溶液经强循环泵及真空泵抽负压将加热器加热的溶液打入分离器，利用第 1 效分离器的二次蒸汽作为第 2 效加热器热源，依次类推串接成三效蒸发系统。

经过脱硫塔系统得到的硫酸镁溶液进入第 1 效分离器，液体被泵强制循环经过加热器加热后部分在分离器中负压环境下蒸发，第 1 效系统的部分溶液被送到第 2 效蒸发系统。第 1 效蒸发系统的热源是 0.05MPa，95℃ 左右的饱和蒸汽。

第 2 效蒸发系统进料是第 1 效蒸发系统来的未蒸发的残液，液量由第 1 效蒸发系统分离器的液位调节器控制，蒸发所需热量由第 1 效分离器顶部二次蒸汽提供。进入第 2 效蒸发系统的液体继续进行循环加热、闪蒸汽化、汽液分离的过程。

第 3 效蒸发系统进料是第 2 效蒸发系统来的未蒸发的残液，液量由第 2 效蒸发系统分离器的液位调节器控制，蒸发所需热量由第 2 效分离器顶部二次蒸汽提供。进入第 3 效蒸发系统的液体继续进行循环加热、闪蒸汽化、汽液分离的过程。

蒸发凝结水回用脱硫塔补水，三效蒸发系统后的硫酸镁溶液排出至重结晶系统。

3.2 重结晶系统

由三效蒸发系统来的浓缩的硫酸镁溶液降温后进入结晶槽逐步冷却，在 10℃~35℃ 条件下结晶析出七水硫酸镁晶体，随后含有七水硫酸镁晶体的悬浊液进入旋液分离器，固液分离后得到粗制七水硫酸镁晶体。粗制七水硫酸镁晶体加工工艺水在溶解槽溶解后再降温进入结晶槽循环蒸发结晶得到较为纯净的七水硫酸镁晶体产品，结晶过程中产生的蒸汽冷凝后循环使用。

分析结晶器的温度、压力对结晶产物七水硫酸镁晶体质量的影响。详细温度、压力灵敏度分析数据图见图 1-结晶器温度对产品质量影响图、图 2-结晶器压力对产品质量影响图。由趋势图可知随温度降低，压强增大七水硫酸镁晶体的质量不断增加。考虑到实际工业生产当中的能耗与设备安全问题，并参考相关文献选择结晶温度为 10℃。对于压力的选择，由图 2-结晶器压力对产品质量影响图发现，随着压力的增大，七水硫酸镁晶体的质量增加并不大，考虑前后流体管道的压力，选择结晶器压力为 2.5bar。

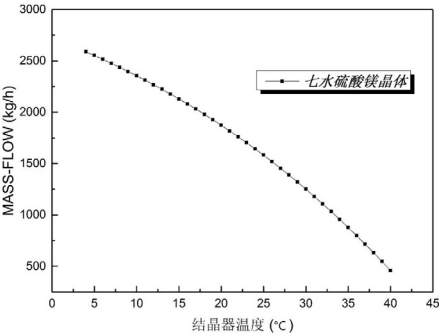


图 1 结晶器温度对产品质量影响图

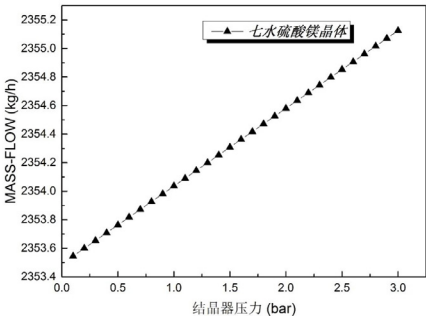


图 2 结晶器压力对产品质量影响图

4、虚拟项目

虚拟项目参数：燃煤锅炉；原烟气体积流量（标态，湿基，6%氧）200000Nm³/h；烟气温度 130℃，初始 SO₂浓度 1200mg/Nm³，要求处理后 SO₂浓度 35mg/Nm³，其他参数按理想状态考虑。

4.1 氧化镁湿法脱硫工艺物料衡算（节选）：

项目	参数	单位
输入项		
原烟气体积流量（标态，湿基，6%氧）	200000	Nm ³ /h
烟气温度	130	℃
初始 SO ₂ 浓度	1200	mg/Nm ³
处理后 SO ₂ 浓度	35	mg/Nm ³
输出项		
吸收塔塔径	5	m
水耗量	9.09	m ³ /h
氧化镁耗量（85%）	0.99	t/h
生产硫酸镁溶液	1.63	m ³ /h

4.2 三效蒸发系统选型

项目	参数	单位
三效蒸发系统处理能力	5	m ³ /h
处理后浓液	1.5	m ³ /h
凝结水量	3.5	m ³ /h
三效蒸发系统蒸汽耗量	2	t/h

4.3 重结晶系统选型

项目	参数	单位
结晶槽处理能力	5	m ³
旋液分离器处理能力	5	m ³ /h
旋流水量	3.5	m ³ /h
粗制七水硫酸镁量	3	t/h
新加工艺水量	1400	m ³ /h
系统蒸汽耗量	1.4	t/h

5、结论

氧化镁湿法脱硫技术凭借 99.9%以上的脱硫效率、低液气比特性及抗结垢优势，已成为部分燃煤电厂的主流脱硫方案。针对副产物硫酸镁结晶困难导致的资源化瓶颈，本研究提出“三效闪蒸浓缩+重结晶”集成工艺。通过构建闪蒸系统实现溶液浓缩至原溶液体积的 30%，通过重结晶工艺最终获得较为纯净的七水硫酸镁产品，实现了副产物的有效回收。该工艺具有节能减排、资源循环利用等优势，为氧化镁湿法脱硫技术的可持续发展提供了理论依据和技术支持。

[参考文献]

[1]司傲龙,马亚丽,高欣悦,等. 硅烷偶联剂湿法改性氢氧化镁阻燃剂及其性能的研究 [J]. 化学工程师, 2025, 39 (8): 7-11+75.

[2]徐晨. 脱硫副产物为电子供体的焦化废水自养反硝化深度脱氮研究[D]. 大连理工大学, 2023.

[3]廖圣德,杨要峰,李亚新,等. 十二胺浮选脱硫副产物亚硫酸镁实验及其机理研究 [J]. 无机盐工业, 2023, 55 (2): 113-118+148.

[4]庄佳乐. 氧化镁湿法脱硫优化与废液废渣资源化利用研究[D]. 江苏大学, 2021.

[5]严明伟. 基于烟气余热的氧化镁湿法脱硫产物资源化利用研究[D]. 山东大学, 2021.

一作简介：丰晨琛，1984.7.26，男，山东省济南市，汉族，本科，三维工程师，中级，研究方向：从事设计工作。主要设计方向为烟气脱硫(脱硝)的湿法、干法、半干法工艺，脱硫液氨改尿素工艺等。专注于多专业协同三维设计及数字化交付方向。

二作简介：姜永奇，男，1987.10，汉族，山东济南商河，大学本科，工程师，研究方向：大气污染治理，节能减排技术。