

# 氧化镁脱硫渣资源化制备高纯度氢氧化镁研究及环境效益分析

宁斌, 韩瑜, 袁琳

(贵州省化工研究院, 贵州 贵阳 550002)

**[摘要]** 针对镁法脱硫渣资源化利用难题, 开发了“溶解-净化-化学沉淀”闭环新工艺。该工艺以脱硫渣为原料, 通过钙-氨两步沉淀法, 同步制备高纯度氢氧化镁与高白度硫酸钙。通过正交实验优化了氢氧化镁制备工序的工艺条件, 在最佳条件下(温度60℃、反应时间1.0 h, 净化后硝酸镁溶液中MgO质量分数3.5%、S质量分数0.03%、Ca<sup>2+</sup>质量分数0.05%)可获得纯度≥99.5%的片状纳米氢氧化镁(收率≥90%)和白度≥98%的硫酸钙。该工艺实现了副产物的全量转化, 构建了“变废为宝”的循环模式。它不仅彻底消除了固废污染风险, 其产品替代高能耗材料还可带来显著碳减排效益。本研究为烟气净化系统提供了一条技术可行、经济且环保的废弃物资源化解决方案, 对推动“无废城市”建设与工业碳中和具有重要意义。

**[关键词]** 氧化镁脱硫渣; 资源化; 高纯度氢氧化镁; 循环经济; 环境效益评估; 碳中和; 工业固废

**[中图分类号]** TQ132.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 03-0012-07

## Study on the process and environmental benefits of recycling magnesium oxide desulfurization residue to prepare high-purity magnesium hydroxide

NING Bin, HAN Yu, YUAN Lin

(Guizhou Chemical Research Institute, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** To address the challenge of resource utilization of magnesium-based desulfurization residue, a new closed-loop process of “dissolution-purification-chemical precipitation” is developed. Using the desulfurization residue as raw material, the process simultaneously produces high-purity magnesium hydroxide and high-whiteness calcium sulfate through a calcium-ammonia two-step precipitation method. The process conditions for magnesium hydroxide preparation are optimized through orthogonal experiments. Under the optimal conditions (temperature of 60 °C, reaction time of 1.0 h, mass fraction of MgO, S, Ca<sup>2+</sup> in purified magnesium nitrate solution are 3.5%, 0.03% and 0.05%), flaky nano-structured magnesium hydroxide with a purity of ≥99.5% (yield ≥90%) and calcium sulfate with a whiteness of ≥98% can be obtained. This process achieves complete conversion of by-products, establishing a circular model of “turning waste into treasure”. It not only thoroughly eliminates the risk of solid waste pollution, but also provides significant carbon reduction benefits by substituting high energy-intensive materials. This study presents a technically feasible, economical, and environmentally friendly waste resource solution for flue gas purification systems, which holds important implications for promoting the development of “zero-waste cities” and industrial carbon neutrality.

**Key words:** magnesium oxide desulfurization residue; resource utilization; high-purity magnesium hydroxide; circular economy; environmental benefit assessment; carbon neutrality; industrial solid waste

### 0 引言

煤炭作为我国主体能源的地位短期内难以根本

改变, 其燃烧产生的大量二氧化硫(SO<sub>2</sub>)是形成酸雨和二次细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)的关键前体物, 对大

收稿日期: 2026-01-07

作者简介: 宁斌(1984—), 男, 河南三门峡人, 高级工程师, 研究方向为固体废物污染防治和资源化利用。

通信作者: 韩瑜(1990—), 男, 贵州遵义人, 仡佬族, 高级工程师, 研究方向为无机化工工艺与应用、环境污染防治和资源化利用。

基金项目: 贵州省科技计划项目“中低品位磷矿及磷尾矿新型选矿创新技术”(黔科合成果[2022]重点004); 贵阳市科技计划项目“中低品位磷矿/磷尾矿热化选磷精矿深加工制备电池用磷酸二氢铵技术研究”(筑科合同[2023]3号)

气环境、生态系统和公众健康构成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。因此,SO<sub>2</sub>的高效脱除始终是我国大气污染治理的核心任务。目前,石灰石-石膏湿法脱硫技术因技术成熟稳定在市场占据主导地位,然而,该技术存在明显的短板:其副产物脱硫石膏的纯度低、品质不稳定,综合利用率长期不足30%,导致全国每年数千万吨脱硫石膏被迫堆存,不仅占用大量土地,其淋溶液中的重金属及酸性物质更对土壤和地下水构成持续性污染风险<sup>[3]</sup>。此外,该工艺对高硫煤的适应性较差,系统易结垢、堵塞,运行维护成本高昂,并产生难以处理的废水。

相比之下,氧化镁(轻烧粉)湿法脱硫技术因其脱硫效率高(>95%)、无废水排放、系统运行稳定,尤其适用于高硫烟气等优势,正成为燃煤烟气净化领域的重要补充和升级选择<sup>[4]</sup>。该技术以氧化镁浆液吸收SO<sub>2</sub>,主要生成亚硫酸镁和硫酸镁。然而,随着该技术的推广应用,一个新兴的环境问题随之凸显:即副产物脱硫渣(主要成分为七水硫酸镁(MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O))的规模化处置与利用。据估算,若该技术大规模应用,我国氧化镁脱硫渣年产量将很快突破百万吨级。若沿用传统填埋或堆存方式,不仅浪费了其中蕴含的镁、硫资源,且因其高溶解度易迅速溶出和迁移,可能引发比石膏堆场更为严重的土壤盐碱化与水体富营养化风险<sup>[5]</sup>。因此,开发一条高效、高值化的脱硫渣资源化利用路径,已成为解决制约氧化镁脱硫技术可持续发展瓶颈的关键,也是实现“烟气治理-固废消纳-资源回收”全链条绿色化的必然要求,同时契合国家《固体废物综合治理行动计划》和《“无废城市”建设试点工作方案》的战略导向。

目前,国内外对氧化镁脱硫渣的利用研究尚处于起步阶段,已有研究多聚焦于将氢氧化镁用作镁质水泥缓凝剂、加工成硫酸镁肥料或土壤改良剂以及高温热解再生氧化镁等。这些途径虽能实现一定程度的消纳,但存在产品附加值低、市场容量有限、能耗高、对杂质敏感性高、可能引入新的环境风险(如土壤盐分积累)等问题。高纯氢氧化镁是一种重要的绿色无机材料,广泛应用于高效环保阻燃剂、烟气脱硫脱硝吸收剂、重金属废水处理吸附剂以及医药、食品添加剂等领域,市场需求旺盛且持续增长<sup>[5]</sup>。因此,将脱硫渣转化为高纯度氢氧化镁是一条极具市场前景的高值化方向。

传统制备高纯度氢氧化镁的工艺多以菱镁矿、水镁石或卤水为原料<sup>[6]</sup>,需经过开采、煅烧、消

化、沉淀等多道工序,存在能耗高、资源消耗大、环境影响显著等问题。以脱硫渣为原料,实质上是将工业固废作为“城市矿山”,通过温和的化学转化直接合成高附加值产品,完美契合“源头减量、资源循环”的循环经济与清洁生产理念。然而,现有研究大多简单套用传统矿物制备工艺<sup>[7-8]</sup>,对脱硫渣复杂体系(含烟尘、未反应氧化镁,以及由煤灰引入的Al、Fe、Si等杂质)的针对性预处理不足,对杂质在转化过程中的迁移规律及其对产物品型、粒径和纯度的影响机制缺乏系统认识,导致产物品质不稳定,难以满足高端应用要求,且大多忽略工艺流程的整体闭环设计及环境经济效益的系统量化。

鉴于此,本研究提出一种针对氧化镁脱硫渣特性的“硝酸钙沉淀除硫-氨水沉淀提镁”耦合资源化新工艺。核心目标在于:一是建立一套高效、稳定的全流程工艺,实现脱硫渣中镁、硫元素的全量资源化,分别转化为高纯度氢氧化镁和高白度硫酸钙;二是通过系统实验研究,揭示关键工艺参数对产物质量的影响规律,并确定最优操作条件;三是从循环经济和生命周期视角,深入评估该工艺的环境效益与碳减排潜力,为其工业化应用提供坚实的技术与环境依据。

本研究的创新性主要体现在:(1)工艺集成创新。设计了“溶解-净化-再沉淀”的闭合循环流程,母液全部回用,实现过程零废水排放,并将钙、镁、硫、氨等元素高效固定在最终产品中,避免了二次污染。(2)不仅关注产物纯度与收率,更着重探究脱硫渣中特征杂质(如烟尘携带的硅铝酸盐、微量重金属)的迁移控制机制,确保环境安全性。(3)环境效益深度量化,超越传统的技术经济评价,将生命周期评价思维引入对该工艺的评估,定量分析其相对于传统处置方式及原生矿物加工路线的资源节约与碳减排效益,阐明了其在国家“双碳”目标背景下的独特价值。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 原料与试剂

本研究所用主要原料为某电厂高硫燃煤锅炉烟气采用氧化镁(轻烧粉)湿法脱硫后产生的脱硫渣,其外观为灰白色湿基滤饼,在105℃干燥、研磨后备用,其主要化学成分如表1所示。由表1可知,其主要有效成分为MgO和SO<sub>3</sub>(以七水硫酸镁形式存在),同时含有少量来自煤灰的SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等杂质。烧失量主要来自结晶水和少量未分解的碳酸盐。

表1 脱硫渣化学成分

Table 1 Chemical composition of desulfurization

residue							%
$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{烧失})$	$w(\text{其他})$
27.47	55.45	0.06	0.01	0.02	0.32	16.21	0.46

实验所用化学试剂包括：浓硝酸 ( $w(\text{HNO}_3)$  65%~68%，分析纯)、 $w(\text{NH}_3)$  25%~28%的浓氨水(分析纯)、硝酸钙(分析纯)、硝酸钡(分析纯)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na, 分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、工业石灰 ( $w(\text{CaO}) \geq 90\%$ )等。所有实验用水均为去离子水。

1.2 实验设备

实验主要设备包括：精密恒温水浴锅、带搅拌的高压反应釜(TSZ-3C型, 1 L)、JJ-1型精密增力电动搅拌器、循环水真空泵、电热鼓风干燥箱、激光粒度分析仪(BT-9300HT)、扫描电子显微镜(SEM)、智能白度计(WSB-2型)等。

1.3 实验流程

本研究设计的资源化全流程工艺如图1所示，

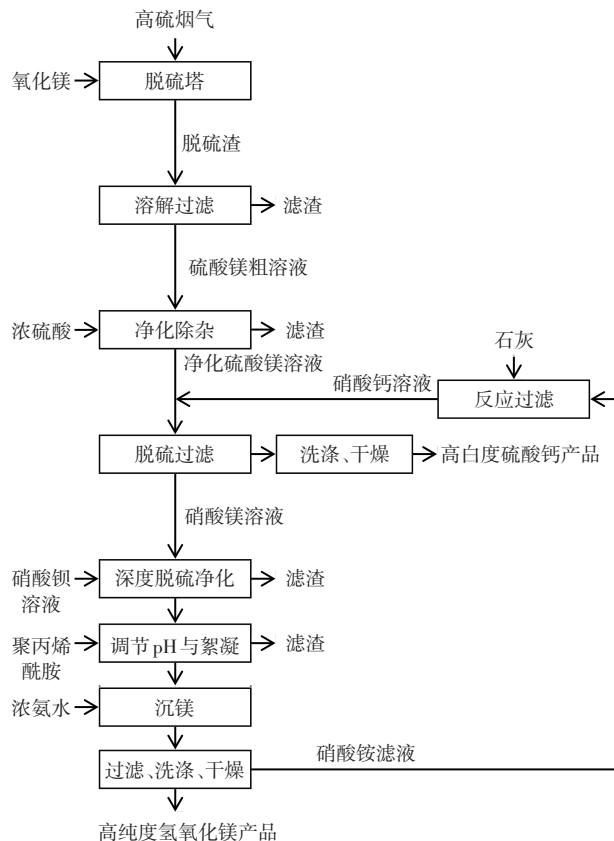


图1 氧化镁脱硫渣资源化制备高纯度氢氧化镁和高白度硫酸钙的工艺流程

Fig. 1 Process for resource utilization of magnesium oxide desulfurization residue to prepare high-purity magnesium hydroxide and high-whiteness calcium sulfate

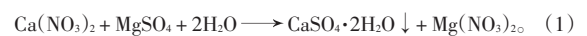
其核心在于两步沉淀反应与物料循环。

1.3.1 硫酸镁溶液的制备与净化

称取一定量干燥氧化镁烟气脱硫渣粉末，按固液质量比1:10加入去离子水，于60℃下搅拌溶解1.5 h。随后进行抽滤，除去不溶性烟尘、硅铝酸盐等固体杂质，得到澄清的硫酸镁粗溶液。向硫酸镁粗溶液加入浓硫酸，反应过滤，进一步脱除其中的有机质等杂质，得到净化后的硫酸镁溶液。此步骤旨在将可溶性的镁、硫组分与固体杂质进行初步分离。

1.3.2 硫酸钙的沉淀(第一步沉淀：固硫)

将上述净化后的硫酸镁溶液加热至80℃，在持续搅拌条件下，缓慢滴加过量的硝酸钙溶液(由工业石灰与硝酸铵溶液反应制备)，发生如下复分解反应：

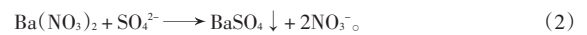


该反应利用 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (二水石膏)溶度积较小的特性( $K_{sp} \approx 4.93 \times 10^{-5}$ )，将净化后硫酸镁溶液中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 以硫酸钙形式选择性沉淀出来，从而实现硫元素的分离与固定。所得沉淀经热去离子水充分逆流洗涤后，于105℃干燥，得到高白度硫酸钙产品。

1.3.3 硝酸镁溶液的深度净化

沉淀硫酸钙后的滤液主要成分为硝酸镁，但含有少量残余的 $\text{SO}_4^{2-}$ 、过量的 $\text{Ca}^{2+}$ 及微量金属离子。为获得适用于制备高纯度氢氧化镁的精制溶液，进行两步净化。

(1) 深度除硫。向热滤液中滴加硝酸钡溶液，发生如下反应：

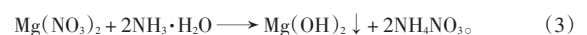


利用 $\text{BaSO}_4$ 极低的溶度积( $K_{sp} \approx 1.08 \times 10^{-10}$ )彻底去除残余硫酸根。

(2) 调节pH与絮凝。用稀硝酸调节溶液pH至5.0~6.0，加入少量聚丙烯酰胺(PAM)絮凝剂，使微量 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 等形成氢氧化物絮体共沉淀。经精密过滤后，得到高纯度的硝酸镁溶液。

1.3.4 氢氧化镁的制备(第二步沉淀：提镁)

将精制硝酸镁溶液转移至高压反应釜中，控制一定温度，在搅拌下缓慢滴加浓氨水，发生如下沉淀反应：

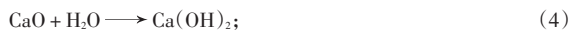


该反应基于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的溶度积( $K_{sp} \approx 5.61 \times 10^{-12}$ )低的特性，在碱性条件下使 $\text{Mg}^{2+}$ 生成沉淀。通过控制浓氨水加入速率、反应温度和陈化时间，

调控氢氧化镁的成核与生长过程，从而影响其晶体形貌和粒度。沉淀经去离子水和稀氨水洗涤至无NO<sub>3</sub><sup>-</sup>检出，于80℃真空干燥，得到高纯度氢氧化镁产品。

### 1.3.5 母液闭路循环

沉淀氢氧化镁后产生的母液主要成分为硝酸铵。将其返回系统，与新鲜工业石灰反应，再生硝酸钙溶液并回收氨，反应方程式如下：



反应过程中释放的氨气经水吸收得到氨水，可回用于沉镁步骤。再生得到的硝酸钙溶液用于下一批次脱硫渣处理。此设计实现了铵根(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)和硝酸根(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)在系统内部的闭路循环，无含氮废水排放。

### 1.4 分析表征方法

产物纯度与化学组成采用化学滴定法(EDTA络合滴定测镁，重量法测硫酸根)分析。采用扫描电子显微镜(SEM)观察氢氧化镁和硫酸钙颗粒的形貌、尺寸及分散状态。采用WSB-2型智能白度计测量硫酸钙粉末的白度。采用激光粒度分析仪测定产物的粒度分布特征(*d*<sub>10</sub>、*d*<sub>50</sub>、*d*<sub>90</sub>)。

### 1.5 正交实验设计

为系统探究高纯氢氧化镁制备工序各工艺参数对氢氧化镁收率与纯度的影响，并确定最优工艺组合，设计了五因素三水平的正交实验，因素水平见表2。

表2 正交实验因素水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

A(温度/℃)	B(MgO质量分数/%)	C(w(Ca <sup>2+</sup> )/%)	D(w(S)/%)	E(反应时间/h)
50	2.85	0.05	0.03	1.0
60	3.50	0.10	0.07	1.5
70	4.65	1.58	0.12	2.0

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交实验设计与结果分析

#### 2.1.1 正交实验结果与极差分析

以氢氧化镁的收率和纯度作为评价指标，选用L<sub>27</sub>(3<sup>5</sup>)正交表安排实验。所有实验均进行两次取平均值，实验装置统一为高压反应釜(排除反应器形式干扰)。正交实验方案及结果见表3，以收率为指标的极差分析见表4，以纯度为指标的极差分析见表5。

表3 正交实验方案及结果(以收率和纯度为指标)

Table 3 Design and results of orthogonal experiment (with yield and purity as the index)

序号	温度/℃	w(MgO)/%	w(Ca <sup>2+</sup> )/%	w(S)/%	反应时间/h	收率/%	氢氧化镁纯度/%
1	50	2.85	0.05	0.03	1.0	85.2	98.3
2	50	3.50	0.05	0.07	1.5	86.1	97.5
3	50	4.65	0.05	0.12	2.0	85.7	96.3
4	50	2.85	0.10	0.07	2.0	87.2	98.5
5	50	3.50	0.10	0.12	1.0	86.1	96.8
6	50	4.65	0.10	0.03	1.5	86.3	98.4
7	50	2.85	1.58	0.12	1.5	88.3	97.1
8	50	3.50	1.58	0.03	2.0	86.4	97.8
9	50	4.65	1.58	0.07	1.0	85.9	96.5
10	60	2.85	0.05	0.03	1.5	91.1	99.5
11	60	3.50	0.05	0.07	2.0	91.5	99.6
12	60	4.65	0.05	0.12	1.0	91.3	97.3
13	60	2.85	0.10	0.12	1.0	90.8	97.2
14	60	3.50	0.10	0.03	2.0	91.5	99.5
15	60	4.65	0.10	0.07	1.5	90.6	99.1
16	60	2.85	1.58	0.07	1.0	91.5	98.3
17	60	3.50	1.58	0.12	1.5	90.9	97.2
18	60	4.65	1.58	0.03	2.0	91.0	99.1
19	70	2.85	0.05	0.03	2.0	91.2	99.5
20	70	3.50	0.05	0.07	1.0	91.4	99.2
21	70	4.65	0.05	0.12	1.5	91.6	97.2
22	70	2.85	0.10	0.12	1.5	91.5	97.1
23	70	3.50	0.10	0.03	1.0	91.5	99.6
24	70	4.65	0.10	0.07	2.0	91.7	99.1
25	70	2.85	1.58	0.07	2.0	91.6	99.3
26	70	3.50	1.58	0.12	1.0	91.5	97.3
27	70	4.65	1.58	0.03	1.5	91.7	99.2

表4 正交实验极差分析(收率指标)

Table 4 Range analysis of orthogonal experiment (yield index)

因素	K1/%	K2/%	K3/%	极差(R)/%	最优水平
A	86.30	91.07	91.50	5.20	A3(70℃)
B	89.60	89.73	89.53	0.20	B2(3.50%)
C	89.50	89.67	89.37	0.30	C2(0.10%)
D	89.90	88.53	89.07	1.37	D1(0.03%)
E	89.30	89.07	89.13	0.23	E1(1.0h)

表5 正交实验极差分析(纯度指标)

Table 5 Range analysis of orthogonal experiment (purity index)

因素	K1/%	K2/%	K3/%	极差(R)/%	最优水平
A	97.50	98.50	98.50	1.00	A2(60℃)/A3(70℃)
B	98.30	98.30	98.00	0.30	B1(2.85%)/B2(3.50%)
C	98.30	98.10	97.90	0.40	C1(0.05%)
D	98.90	98.50	97.10	1.80	D1(0.03%)
E	97.90	97.80	98.60	0.80	E3(2.0h)

2.1.2 关键影响因素分析

(1) 反应温度 (A): 对收率影响最为显著 ( $R=5.20$ ), 是影响收率的决定性因素。60~70 °C 时收率稳定在 90% 以上, 50 °C 时收率仅为 86.3%。这是因为低温下反应动力学速率慢,  $Mg^{2+}$  沉淀不完全; 60 °C 时反应达到平衡, 收率超过 91%; 70 °C 与 60 °C 时相比收率提升不明显, 可能因温度过高导致局部过饱和度过大, 产生细晶或胶体, 影响过滤效率。结合纯度数据与能耗, 60~70 °C 时纯度均  $\geq 98\%$ , 因此确定 60 °C 为最优温度。

(2) S 杂质含量 (D): 对纯度影响最为显著 ( $R=1.80$ ), 是控制产品纯度的关键因素。当深度脱硫净化后  $Mg(NO_3)_2$  溶液  $w(S) \leq 0.07\%$  时, 产品纯度  $\geq 98.50\%$ ; 当  $w(S)$  升至 0.12% 时, 纯度降至 97.10%。这是因为过量  $SO_4^{2-}$  会以  $MgSO_4$  形式被包裹或吸附在  $Mg(OH)_2$  晶体中, 导致纯度下降。本工艺通过硝酸钡深度除硫, 可将溶液残留硫降至  $w(S)$  0.05% 以下, 有效保障产品纯度。

(3) 反应时间 (E): 对纯度和收率均有一定影响 ( $R$  分别为 0.80 和 0.23)。反应时间 1.0~1.5 h 时, 收率和纯度均能达到较高水平, 延长至 2.0 h 无明显增益, 因此确定最优反应时间为 1.0 h。

(4)  $Ca^{2+}$  杂质含量 (C): 对纯度有轻微影响 ( $R=0.40$ )。当  $w(Ca^{2+})$  过高 (1.58%) 时, 可能与  $Mg^{2+}$  共沉淀生成  $Ca(OH)_2$  或掺杂进入  $Mg(OH)_2$  晶格, 导致纯度略有下降。通过优化硫酸钙沉淀反应条件 (钙镁摩尔比、加料速度) 及终产品弱酸洗涤, 可将深度净化后  $Mg(NO_3)_2$  溶液  $w(Ca^{2+})$  控制在 0.1% 以下。

(5) MgO 质量分数 (B): 对收率和纯度影响较小。当  $w(MgO)$  为 3.50% 时 (水平 2), 收率 (89.73%) 和纯度 (98.30%) 均达到较高水平。因此, 确定  $w(MgO)$  最佳范围为 3.0%~4.0%, 最优值为 3.50%。

2.1.3 最优工艺条件验证

综合分析, 确定最优工艺条件为: A2 (60 °C)、B2 (MgO 质量分数 3.50%)、C1 ( $Ca^{2+}$  杂质质量分数 0.05%)、D1 (S 杂质质量分数 0.03%)、E1 (反应时间 1.0 h)。在此条件下进行 3 组平行验证实验, 得到氢氧化镁平均收率 91.8%, 平均纯度 99.7%, 与正交实验结果一致, 验证了最优条件的可靠性。

2.2 微观形貌与粒度

图 2 的 SEM 图揭示了在最优工艺条件 (氢氧化镁制备阶段反应釜温度 60 °C, 深度脱硫净化后硝酸镁溶液中 MgO 质量分数 3.50%、 $Ca^{2+}$  质量分数

0.05%、S 质量分数 0.03%, 反应时间 1.0 h) 下制备的高纯度氢氧化镁的独特微观结构。产物呈现为厚度均匀 (约 50 nm)、边缘清晰的六方片状晶体。这些纳米片状晶体自组装形成具有多级孔道的花状微球团聚体, 直径为 2~5  $\mu m$ 。这种“纳米片-微米球”的二级结构具有较高的比表面积和良好的分散性, 有利于其在聚合物基体中作为阻燃剂时形成致密的保护炭层, 提升阻燃效率。

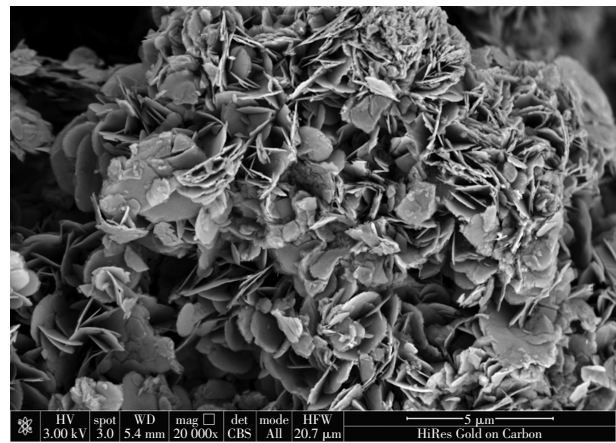


图 2 最优条件下制备的高纯度氢氧化镁的 SEM 图

Fig. 2 SEM image of high-purity magnesium hydroxide prepared under optimal conditions

最优条件下制备的高纯度氢氧化镁的粒度分布见图 3, 氢氧化镁的  $d_{50}$  约为 4.3  $\mu m$ , 粒度分布均匀 (Span 值小), 符合高端应用对材料加工流动性和相容性的要求。硫酸钙则呈现为典型的短柱状晶体, 长度均匀, 有利于提高其作为填料的白度和力学性能。

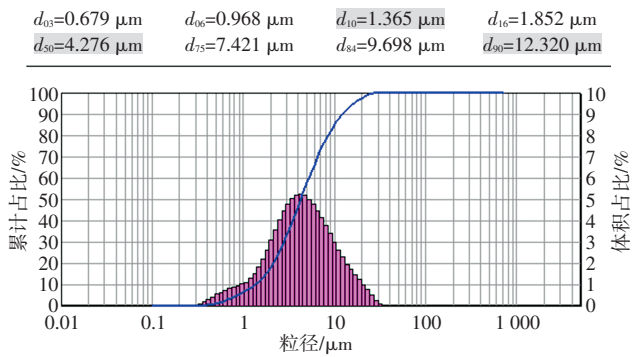


图 3 最优条件下制备的高纯度氢氧化镁的粒度分布

Fig. 3 Particle size distribution of high-purity magnesium hydroxide prepared under optimal conditions

3 环境效益与生命周期分析

本工艺的价值远不止于生产出高纯产品, 其核心优势在于环境正效益, 本节将从定性定量两个层面, 系统阐述其环境贡献。

### 3.1 直接环境效益：固废消纳与污染预防

(1) 彻底消除固废堆存环境风险：传统填埋处置脱硫渣，存在渗滤液污染地下水的长期风险。本工艺实现了脱硫渣的资源化利用，避免了相应的土地占用、生态破坏和潜在污染，环境效益显著。

(2) 实现污染物全过程控制：工艺自身设计为闭环系统。镁、硫元素被固定于稳定的化工产品中；氨在系统内循环；生产废水经处理后全部回用，实现零外排；微量重金属在净化步骤被有效去除并安全处置。整个流程体现了“污染控制”向“物质循环”的范式转变。

### 3.2 间接环境效益：资源节约与碳减排

采用生命周期评价的思维进行对比分析，能更全面地揭示其环境优势。针对以下两条路径进行对比研究：路径一（本工艺），脱硫渣→高纯度氢氧化镁+高白度硫酸钙。路径二（传统路径），①脱硫渣填埋；②从菱镁矿开采煅烧制备氢氧化镁；③从天然石膏矿开采加工制备硫酸钙。

#### 3.2.1 资源消耗对比

路径二（②+③）需要大量开采不可再生的菱镁矿和石膏矿，消耗矿产资源，并对矿区生态环境造成破坏。本工艺（路径一）则以工业废渣为原料，不消耗原生矿产资源，是典型的“城市矿山”开发。每利用干基脱硫渣1 t，相当于节约了品位50%的菱镁矿约0.5 t和天然石膏矿0.6 t。

#### 3.2.2 碳足迹对比

碳减排是本工艺在“双碳”背景下最突出的贡献。直接替代的碳减排：传统以菱镁矿为原料生产氢氧化镁1 t，需要经过约800℃的高温煅烧（ $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$ ），此过程会直接释放大量二氧化碳，并消耗大量化石燃料。本工艺在常温至60℃下进行，完全避免了高温煅烧环节，直接碳排放几乎为零。系统性碳减排：首先，避免了脱硫渣填埋场可能产生的甲烷（强温室气体）无组织排放；其次，高纯度氢氧化镁作为高效阻燃剂，应用于电线电缆、汽车部件等，可以提高材料的阻燃安全性和使用寿命，间接减少因火灾导致的碳排放和资源损失；最后，副产的高白度硫酸钙若替代部分水泥生产中的天然石膏，也能减少水泥工业的部分碳排放。初步估算表明，采用本工艺每生产氢氧化镁1 t，相较于传统矿法，可减少2.5~3.0 t的二氧化碳当量排放。对于一个年处理10万t脱硫渣的工厂，年碳减排潜力可达数十万吨级，具有显著的碳中和贡献。

### 3.3 经济-环境协同效益分析

基于中试规模的测算，处理干基脱硫渣1 t，可生产高纯度氢氧化镁（市场价约6 000元/t）约0.35 t和高白度硫酸钙（市场价约800元/t）0.55 t。扣除原材料、能耗、人工及折旧等成本后，吨渣净利润可达1 600~1 700元。与石灰石-石膏法产生的脱硫石膏（处置成本20~50元/t）相比，经济效益显著。

更重要的是，这种经济效益是建立在环境效益基础上的。高附加值产品带来的利润，能够完全覆盖并远超环保投入，使得企业从“被动承担环保成本”转向“主动追求绿色利润”，形成了“环保驱动盈利，盈利反哺环保”的良性内生动力。这种经济与环境的正协同效应，是该技术能否被市场主动采纳和推广的关键。

## 4 结论与展望

### 4.1 研究结论

本研究成功开发了一条以氧化镁烟气脱硫渣为原料，制备高纯度氢氧化镁和高白度硫酸钙的绿色资源化集成工艺，并得出以下结论。

(1) 技术可行性：提出的“硝酸钙沉淀除硫—氨水沉淀提镁”两步法工艺路线合理、有效。通过溶解过滤、深度除杂和密闭反应等关键步骤控制，能够稳定制备出纯度 $\geq 99.5\%$ 、形貌规则的高纯度纳米片状氢氧化镁（厚度约50 nm，花状微球团聚体直径2~5  $\mu\text{m}$ ， $d_{50}$ 约4.3  $\mu\text{m}$ ），以及白度 $\geq 98\%$ 、纯度 $\geq 99\%$ 的优质硫酸钙，技术指标满足高端应用要求。

(2) 参数规律性：正交实验及极差分析表明，反应温度是影响氢氧化镁收率的决定性因素（极差 $R=5.20$ ），在70℃的密闭反应条件下可获得最高收率（ $>90\%$ ）；S杂质含量是影响产品纯度的关键因素（极差 $R=1.80$ ）， $w(\text{S})$ 需控制在0.05%以下； $\text{Mg}^{2+}$ 初始浓度显著影响产物形貌和过滤性能， $w(\text{Mg}^{2+})$ 最佳范围为3.0%~4.0%（最优值3.5%）； $w(\text{Ca}^{2+})$ 需控制在0.1%以下，反应时间以1.0 h为宜。上述参数通过工艺优化均可实现有效控制。

(3) 卓越的环境效益：该工艺实现了脱硫渣的全量化、高值化利用，彻底根除了其堆存带来的环境风险，且过程清洁、闭环循环（零废水外排）。从生命周期视角看，该工艺通过替代高能耗、高碳排放的传统矿物加工路线，实现显著的资源节约和二氧化碳减排，单吨产品碳减排潜力达 $\text{CO}_2$  2.5~3.0 t，是典型的低碳技术。

(4) 显著的经济竞争力：工艺将环境负资产转

化为具有高市场价值的产品，创造了可观的经济利润（吨渣净利润1 600~1 700元），实现了环境保护与经济发展的双赢，具备强大的市场推广潜力和产业化前景。

#### 4.2 展望与建议

本研究为氧化镁脱硫渣的规模化、高值化资源利用提供了一条技术可行、环境友好、经济合理的完整解决方案，对推动工业绿色转型和“无废城市”建设具有积极意义。但要实现大规模工业化应用，仍需在以下方面开展进一步工作。

(1) 工程放大与系统集成：未来需要开展千吨级的中试乃至万吨级的工业示范，解决大规模生产中的传质、传热、过滤、干燥等工程问题，优化全套装备的集成设计与自动化控制。

(2) 杂质深度迁移与产品多元化研究：需更深入研究脱硫渣中微量重金属（如As、Pb、Cd）及卤素（如Cl、F）在整个工艺链中的迁移规律和最终归宿，确保所有产出物对环境绝对安全。同时，可探索以氢氧化镁和硫酸钙为前驱体，开发阻燃剂、吸附剂、耐火材料等更高端的下游产品，进一步提升价值链。

(3) 政策激励与标准建立：建议国家层面将此类“固废高值化资源化技术”纳入重点扶持的绿色技术目录，并通过碳交易、绿色信贷、税收优惠等政策工具加以激励。同时，需加快制定以工业固废为原料生产的氢氧化镁、硫酸钙等产品的国家或行业标准，规范市场，引导绿色消费。

(4) 区域循环经济模式构建：鼓励在大型煤电基地或工业园区内，布局“氧化镁脱硫—脱硫渣资源化—化工产品生产—下游应用”一体化产业集群，构建区域性的“硫—镁—钙”物质代谢循环，最大化地发挥其生态与经济效益。

综上所述，本研究不仅提供了一项具体的固废资源化技术，更展示了一种将末端治理压力转化为前端循环动力的绿色发展新模式。它为解决我国巨

量工业固废难题、协同推进减污降碳提供了富有启示性的技术选择和系统解决方案。

#### [参考文献]

- [1] 郝吉明,马广大,王书肖.大气污染控制工程[M].4版.北京:高等教育出版社,2021.
- [2] 王峰.烟气脱硫脱硝技术在火电厂大气污染治理中的运用分析[J].中国资源综合利用,2025,43(10):217-219.  
WANG F. Analysis of the Application of Flue Gas Desulfurization and Denitrification Technology in Air Pollution Control in Thermal Power Plants [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025, 43(10): 217-219.
- [3] 李娟.燃煤烟气脱硫脱硝一体化技术探讨[J].当代化工研究, 2025(3): 158-160.  
LI J. Discussion on integrated technology of desulphurization and denitrification of coal-fired flue gas [J]. Modern Chemicals Research, 2025(3): 158-160.
- [4] 张晓伟,鲁军.循环镁法烟气脱硫产物MgSO<sub>3</sub>的热解回用工艺研究[J].环境科学与管理,2011,36(12):93-97.  
ZHANG X W, LU J. Study of pyrolysis and recycling of MgSO<sub>3</sub> in FGD process by magnesia [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(12): 93-97.
- [5] 吴丹,王玉琪,骆碧君,等.氢氧化镁制备工艺及研究进展[J].盐科学与化工,2019,48(7):3-6.  
WU D, WANG Y Q, LUO B J, et al. Preparation technology and research progress of magnesium hydroxide [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2019, 48(7): 3-6.
- [6] 朱明明,周贵元,刘红梅,等.硫酸镁制备高纯氢氧化镁工艺技术的研究[J].磷肥与复肥,2016,31(3):13-15.  
ZHU M M, ZHOU G Y, LIU H M, et al. Study on technology of high purity magnesium hydroxide preparation with magnesium sulfate [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31(3): 13-15.
- [7] 杨桂芝.直接沉淀法制备超细氢氧化镁的实验研究[J].当代化工,2012,41(11):1182-1184.  
YANG G Z. Experimental investigation into preparation of ultrafine magnesium hydroxide by using direct precipitation method [J]. Contemporary Chemical Industry, 2012, 41(11): 1182-1184.
- [8] SMITH J, BROWN K. Life cycle assessment of industrial solid waste valorization pathways: A comparative study [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 158: 104789.