

# 脱硫灰制备高附加值碳酸钙与硫酸钙工艺研究

郭宏雨<sup>1</sup>, 胡彦杰<sup>1\*</sup>, 鞠杰<sup>1</sup>, 宣绍峰<sup>1</sup>, 赵鑫元<sup>1</sup>, 张沈裔<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237; 2. 宝武集团环境资源科技有限公司, 上海 201900)

**摘要:**为实现高效的脱硫灰资源化利用,探索从钢铁生产过程中产生的烧结烟气脱硫灰制备高附加值碳酸钙和硫酸钙工艺,推动工业废弃物的高效转化与再利用,从而减轻环境污染。该工艺包括磁选去除金属杂质、调节浆液pH、通空气氧化、静态混合以及循环利用等多个环节,显著提高了脱硫灰的资源化利用效率,并成功制得高纯度碳酸钙与硫酸钙产品。实验结果表明,所制得硫酸钙纯度超过95%、碳酸钙纯度高达98%以上,且碳酸钙的白度值超过94%。此外,碳酸钙的粒径和比表面积等关键性能指标亦得到有效控制,为脱硫灰资源化利用提供了创新途径,展示了显著的经济和环境双重效益。

**关键词:**脱硫灰;资源化利用;高附加值;碳酸钙;硫酸钙

中图分类号:TQ9

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0251-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.047

## Research on process for preparing high value-added calcium carbonate and calcium sulfate from desulfurization ash

GUO Hong-yu<sup>1</sup>, HU Yan-jie<sup>1\*</sup>, JU Jie<sup>1</sup>, XUAN Shao-feng<sup>1</sup>, ZHAO Xin-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Shen-yi<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Environmental Resource Science and Technology Company Limited, China Baowu Steel Group Corp., Shanghai 201900, China)

**Abstract:** In order to achieve efficient re-utilization of desulfurization ash, the process for preparation of high value-added calcium carbonate and calcium sulfate products from the sintering flue gas desulfurization ash generated during the iron/steel production process is explored, which promotes the efficient conversion and re-utilization of industrial wastes, thereby reducing environmental pollution. This process, which includes magnetic separation to remove metal impurities, adjustment of slurry pH, air oxidation, static mixing and recycling, significantly improves the efficiency of re-utilization of flue gas desulfurization ash, and successfully produces high-purity calcium carbonate and calcium sulfate products. Experimental results show that the purity of calcium sulfate obtained exceeds 95%, that of calcium carbonate obtained exceeds 98%, and the whiteness value of calcium carbonate product is higher than 94%. In addition, the key performance indexes of calcium carbonate product, such as particle size and specific surface area, can be effectively controlled, which provides an innovative way to re-utilize the desulfurization ash, and demonstrates significant economic and environmental benefit.

**Key words:** desulfurization ash; re-utilization; high value-added; calcium carbonate; calcium sulfate

在我国,钢铁行业的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)排放量仅次于电力和工业锅炉行业,其中约50%至70%的SO<sub>2</sub>排放源自烧结工序。随着钢铁工业的快速发展,烧结烟气脱硫技术已成为控制SO<sub>2</sub>排放的关键手段。面对日益严峻的环保压力,半干法和干法脱硫技术得到了广泛应用。然而,这些脱硫工艺虽然能够高效去除SO<sub>2</sub>,但通常伴随大量副产物——烧结烟气脱硫灰的产生<sup>[1]</sup>。随着钢铁产量的持续增加,烧结烟气脱硫灰的产量也不断上升。如果不加以有效处理,这些脱硫灰将大量堆积,不仅占用土地

资源,还成为重大环境问题<sup>[2]</sup>。烧结烟气脱硫灰的成分复杂,主要包括CaSO<sub>3</sub>、CaSO<sub>4</sub>、CaCO<sub>3</sub>、CaO等化合物,还含有Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等杂质<sup>[3-5]</sup>,复杂成分不仅增加其处理难度,也增加了其环境风险。烧结烟气脱硫灰可能通过空气、水和土壤等途径对环境造成污染,且其资源化利用的技术难度较大,处理成本高昂。因此,必须着力解决烧结烟气脱硫灰的环境问题<sup>[6]</sup>,采取综合措施,加强监管和技术研发,以实现其安全处置和资源化利用。

为了有效解决脱硫灰带来的环境问题,国内外

收稿日期:2025-01-07;修回日期:2025-03-09

基金项目:国家自然科学基金(22378128,22108079,U22B20143,U22A20429);上海市科学技术委员会项目(22dz1205900)

作者简介:郭宏雨(2000-),男,硕士生,研究方向为烧结烟气脱硫灰资源化利用,ghyecust2022@163.com;胡彦杰(1979-),男,博士,教授,研究方向为功能纳米材料的燃烧合成及其产业化应用,通讯联系人,zsybgjc@163.com。

学者在脱硫灰资源化利用方面开展了大量研究。欧美地区较早开展了相关研究,主要集中于将脱硫灰用于土壤修复、混凝土掺合、水泥生产及矿坑回填等领域<sup>[7-10]</sup>。例如,Chen 等<sup>[11]</sup>通过在酸性土壤中添加脱硫副产物,研究了其对紫花苜蓿生长的影响。Rudisell 等<sup>[12]</sup>研究发现,脱硫灰不仅能减少酸性废水的排放,还能改善矿山的地质条件。同时,国内研究也取得了显著进展,研究者们尝试利用烧结脱硫灰渣制备新型充填胶凝材料<sup>[13-14]</sup>,将脱硫灰应用于蒸压砖、硫铝酸盐水泥及水泥混合材料的生产,已经在一定程度上缓解了脱硫灰堆存及二次污染问题<sup>[15-18]</sup>。

尽管现有研究取得了一定进展,脱硫灰的资源化利用仍面临诸多挑战,特别是在提高利用效率、降低环境负面影响、拓展新型应用领域等方面。脱硫灰具有高钙高硫特性,使其在不同应用中的稳定性较差,并且工艺较为复杂<sup>[19]</sup>。因此,亟需探索更加高效且环保的技术路径。此外,脱硫灰中的钙和硫化合物对其后续利用效果有重要影响<sup>[20-21]</sup>。因此,深入研究脱硫灰性质、改性方法及在不同工业领域的应用具有重要意义。

为此,探索了一种新型的脱硫灰资源化利用技术,重点研究通过工艺创新将脱硫灰转化为高附加值的轻质碳酸钙和硫酸钙等产品。通过优化制备工艺,确定了最佳实验条件,为工业化应用提供技术支持。

## 1 材料与仪器及试剂

### 1.1 材料

实验原料半干法烧结烟气脱硫灰取自宝武集团南京梅山钢铁有限公司,其元素组成和含量由 X 射线荧光光谱测试得到,如表 1。XRD 分析结果如图 1 所示。

表 1 烧结烟气脱硫灰的元素组成和含量

元素种类	Ca	S	O	Fe	Cl
含量/%	34.53	13.15	35.68	1.48	1.47
元素种类	Si	K	Mg	Al	Na
含量/%	0.69	0.62	0.29	0.27	0.12

从 X 射线荧光光谱测试和 XRD 分析结果可以得知,烧结烟气脱硫灰主要成分为亚硫酸钙、氢氧化钙和碳酸钙,小部分氯化物和铁的氧化物,以及其他少量的固体杂质。

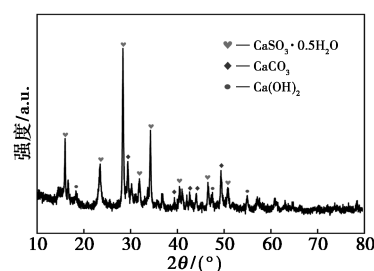


图 1 烧结烟气脱硫灰 XRD 图

### 1.2 仪器及试剂

BS210S 分析天平,德国 Sartorius 公司生产;ST2100 型 pH 计,美国 OHAUS 公司生产;DF-101S 型集热式恒温磁力搅拌器,上海力辰仪器科技有限公司生产;DHG-9036A 型电热鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司生产;SHZ-D III 型循环水式真空泵,上海越众仪器设备有限公司生产;HTA-120 型空气压缩机,上海欣霸瓦机电有限公司生产;D8 Advance 型 X 射线衍射仪,德国 Bruker 公司生产;JEM-2100 型透射电子显微镜、JSM-IT210 型扫描电子显微镜,日本电子株式会社生产;Axios Max 型 X 射线荧光光谱仪,荷兰帕纳科公司生产;ZP300ST 型蠕动泵,雷熔流体科技(上海)有限公司生产;12000 高斯磁力棒,江苏泰古德磁业有限公司生产。

去离子水;空气;98% 冰乙酸溶液、36% 盐酸溶液、固体氢氧化钠、固体碳酸钠,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产。

## 2 实验方法

### 2.1 实验工艺路线

通过一系列工艺步骤处理半干法/干法脱硫过程中产生的脱硫灰,以制备高附加值碳酸钙和硫酸钙产品。具体工艺流程如图 2,包括磁选、浆液 pH 调节、通空气氧化反应、固液分离、金属离子去除、静态混合及溶液的循环利用等步骤。

### 2.2 实验产品制备

#### 2.2.1 硫酸钙产品的制备

在烧杯中,将 10 g 脱硫灰与 90 g 水混合得到质量比为 10% 的浆液,使用磁力棒搅拌磁选,去除浆液中的磁性金属渣,以保证后续碳酸钙、硫酸钙产品的纯度。后向脱硫灰浆液中加入冰乙酸调节 pH (循环步骤中加入盐酸即可),调节后的浆液加热至一定温度并通入空气进行氧化反应,亚硫酸钙被氧化,得到含有硫酸钙的浆液。将氧化后的浆液进行固液分离,得到固体硫酸钙产品和乙酸钙、氯化钠的混合溶液。

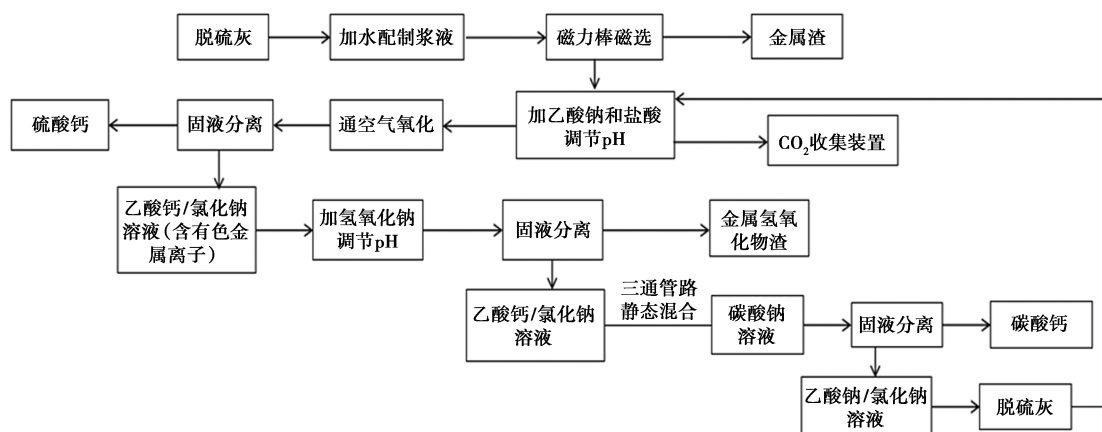


图2 脱硫灰制备高附加值碳酸钙和硫酸钙工艺步骤

### 2.2.2 高附加值碳酸钙产品的制备

向上述步骤所得乙酸钙、氯化钠的混合溶液中加入氢氧化钠调节其 pH, 通过固液分离去除有色金属氢氧化物渣, 此步骤便于后续得到的碳酸钙具有更高的纯度和白度。计算所得滤液的钙离子含量, 根据钙离子含量配制相同体积、相同摩尔浓度的碳酸钠溶液, 以两台可调节流速的蠕动泵帮助滤液和碳酸钠溶液实现静态混合, 两台蠕动泵设置相同的流速, 两溶液通过三通管路混合反应生成碳酸钙, 反应后经过固液分离, 所得固相经干燥得到固体碳酸钙产品, 液相为乙酸钠和氯化钠的混合溶液。回收乙酸钠和氯化钠的混合溶液, 在其中加入与乙酸钠摩尔比为 1:1 的盐酸, 可循环用于硫酸钙产品制备中浆液 pH 调节过程。

### 2.3 测试方法

硫酸钙纯度按照国标 GB 1886.6—2016 所述的方法测定; 采用碘量法测定亚硫酸钙的氧化率; 碳酸钙纯度、白度按照国标 GB/T 19281—2014 所述的方法测定; 利用 ST2100 型 pH 计测量浆液的 pH; 利用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪分析产品碳酸钙、硫酸钙的物相结构; 利用 JEM-2100 型透射电子显微镜和 JSM-IT210 型扫描电子显微镜分析产品碳酸钙、硫酸钙的形貌特征; 利用 Axios Max 型 X 射线荧光光谱仪分析烧结烟气脱硫灰、碳酸钙产品、硫酸钙产品的成分组成。

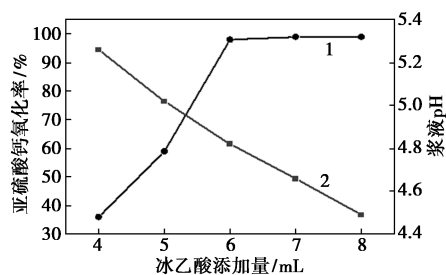
## 3 结果与分析

### 3.1 硫酸钙产品的制备工艺参数探究

#### 3.1.1 浆液 pH 对亚硫酸钙氧化的影响

由于冰乙酸是弱酸, 亚硫酸是中强酸, 以冰乙酸调节浆液 pH, 不仅有效避免了  $\text{SO}_2$  的生成, 还促进

了亚硫酸钙的氧化。在固定条件下 (加热温度  $80^\circ\text{C}$ , 通入空气, 氧化 4 h), 研究了不同冰乙酸用量 (即不同浆液 pH) 对亚硫酸钙氧化率的影响。分别将 4、5、6、7、8 mL 冰乙酸添加到浆液中, 得到的浆液 pH 分别为 5.26、5.02、4.82、4.66、4.49。在加热温度  $80^\circ\text{C}$ 、通入空气并搅拌氧化 4 h 的条件下, 亚硫酸钙的氧化率分别为 36%、59%、98%、99%、99%。从图 3 可见, 当浆液 pH 调节至 5.0 以下, 并在  $80^\circ\text{C}$ 、通入空气并搅拌氧化 4 h 的条件下, 亚硫酸钙的氧化率达到 98% 以上。



1—亚硫酸钙氧化率; 2—浆液 pH

图3 不同冰乙酸用量时浆液 pH 和亚硫酸钙氧化率

在脱硫灰浆液中, 初始时氧化钙和碳酸钙可能会一定程度上包覆在亚硫酸钙的表面, 从而会影响其氧化过程。然而, 当调节浆液的 pH 至 5.0 以下时, 氧化钙和碳酸钙均能够转化为游离的钙离子, 有助于亚硫酸钙的氧化。同时, 在 pH 降至 5.0 以下时, 浆液中可能更容易生成羟基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ )。羟基自由基是一种高度反应性的自由基, 具有强大的氧化能力, 能够与亚硫酸钙反应, 促进其氧化为硫酸钙 ( $\text{CaSO}_4$ )。这一氧化过程可能通过自由基链反应进行, 其中羟基自由基攻击亚硫酸根离子, 从而产生硫酸钙作为氧化产物。因此, 调节 pH 至 5.0 以下被

确定为优化条件,有效促进亚硫酸钙的氧化过程。

### 3.1.2 加热温度和通空气氧化时间对亚硫酸钙氧化的影响

根据 3.1.1 节的探究结果,选择了冰乙酸最佳用量为 6 mL,此时浆液的 pH 为 4.82。进一步研究了不同加热温度和通空气氧化时间对亚硫酸钙氧化的影响。根据表 2,氧化温度为 60℃,通空气氧化 2 h,亚硫酸钙的氧化效果最佳。

表 2 不同加热温度和通空气氧化时间对亚硫酸钙氧化的影响

实验编号	冰乙酸添加量/mL	浆液 pH	加热温度/℃	通空气氧化时间/h	亚硫酸钙氧化率/%
1	6	4.82	80	3.0	99
2	6	4.82	80	2.0	99
3	6	4.82	70	2.0	99
4	6	4.82	70	1.5	78
5	6	4.82	60	2.0	98
6	6	4.82	60	1.5	65

当空气通入亚硫酸钙浆液中时,氧气首先溶解在溶液中形成溶解氧(DO)。在酸性条件下加热,溶解氧的浓度会更高,溶解氧与亚硫酸钙发生氧化反应,将其氧化为硫酸钙。同时,酸性条件下的加热溶液中更容易生成羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),这些自由基与溶解氧协同作用,进一步推动亚硫酸钙的氧化反应,亚硫酸钙能够高效地转化为硫酸钙。

### 3.1.3 浆液质量比对亚硫酸钙氧化的影响

根据 3.1.1 和 3.1.2 节的探究结果,选择了调节浆液 pH 为 4.80,加热至 60℃,通空气氧化 2 h 作为实验条件,并进一步探讨了不同固液质量比对亚硫酸钙氧化率的影响。实验中,浆液的固液质量比分别设定为 10%、15%、20%、25%、30%。在这些条件下,经过调节浆液 pH 至 4.80、加热至 60℃、通空气氧化 2 h 后,亚硫酸钙的氧化率分别为 98%、98%、95%、78%、59%。

实验结果如图 4 所示。在相同条件下,当浆液

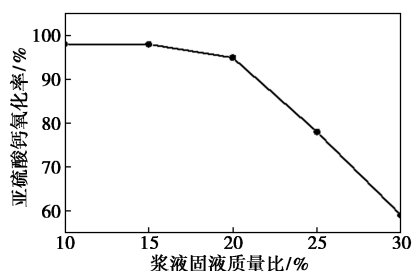


图 4 浆液不同固液质量比对亚硫酸钙氧化的影响

的固液质量比控制在 10%~20%之间时,亚硫酸钙的氧化率可保持在 98%以上,最终得到了高纯度的硫酸钙。因此,选择 10%~20%的固液质量比可有效保证亚硫酸钙的高氧化率,并为制备高纯度硫酸钙提供了理想条件。

当浆液的固液质量比高于 20%时,在相同条件下,亚硫酸钙的氧化率显著降低。亚硫酸钙的氧化是一个气、液、固三相反应过程,其中氧气的扩散是关键步骤之一。当固液质量比过大,即液体相对较少时,浆液中的液体量较低,这会限制氧气在液相中的扩散速率。氧气扩散速率的降低将直接影响亚硫酸钙与氧气的接触机会,进而降低氧化速率和氧化效率。

此外,过高的固液质量比还可能导致传质过程的障碍。在氧化反应中,亚硫酸钙需要首先溶解在液体中,才能与氧气发生反应。如果液体量不足,亚硫酸钙的溶解和传质过程将受到限制,从而影响氧化反应的进行。过高的固液质量比可能还需要通过增加搅拌强度或延长反应时间来改善氧气的扩散和传质过程,但这将增加能耗和生产成本。因此,为了提高氧化效率,控制浆液的固液质量比在 10%~20%范围内显得尤为重要。

### 3.2 产品硫酸钙表征分析

对氧化得到的硫酸钙产品进行了 X 射线衍射(XRD)测试,得到的谱图如图 5(a)所示。谱图中所有特征峰都可归属于二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , PDF#70-0982),从而确认硫酸钙的晶型为二水硫酸钙。此外,采用扫描电子显微镜(SEM)对硫酸钙产品进行了形貌观察,结果如图 5(b)所示。SEM 图像显示,硫酸钙颗粒的粒径约为 5  $\mu\text{m}$ ,并呈现出典型的棒状形貌。

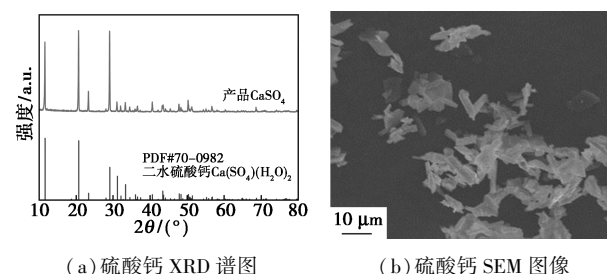


图 5 硫酸钙 XRD、SEM 表征

### 3.3 加氢氧化钠调节 p 对碳酸钙的影响

在碳酸钙制备步骤 2.2.2 中,通过固液分离得到的乙酸钙和氯化钠的混合溶液呈酸性,且由于步骤 2.2.1 中加入了乙酸,溶液中可能含有有色金属离子,这些离子会影响后续碳酸钙的纯度、白度以及

碳酸钠的用量。为了解决这一问题,首先加入氢氧化钠调节混合溶液的 pH,使溶液中的有色金属离子沉淀出来。通过固液分离去除有色金属氢氧化物渣后,再将调节后的溶液与碳酸钠溶液通过静态混合,得到碳酸钙产品。此步骤不仅可以节省碳酸钠的用量,还能提高碳酸钙的纯度和白度。

若不加入氢氧化钠调节 pH,混合溶液呈酸性,这将导致在制备碳酸钙时消耗更多的碳酸钠。同时,乙酸钙和氯化钠的混合溶液中含有有色金属离子,这些离子会随着碳酸钠的加入一起沉淀,导致最终得到的碳酸钙纯度和白度较低。

使用氢氧化钠调节 pH 对碳酸钙产品的影响如图 6 所示。当 pH 调节后仍小于 8.0 时,有色金属离子未完全沉淀,导致碳酸钙的纯度和白度较低;当 pH 调节至 8.0 时,作为最优条件,有色金属离子完全沉淀,从而得到纯度和白度较高的碳酸钙产品。继续提高 pH 时,虽然可以得到较高纯度和白度的碳酸钙,但氢氧化钠的过量加入会与溶液中的钙离子反应生成氢氧化钙沉淀,导致最终碳酸钙的产率降低。因此,调节 pH 至 8.0 为最佳,可以实现碳酸钙的高纯度、高白度,同时避免过量氢氧化钠对产率的负面影响。

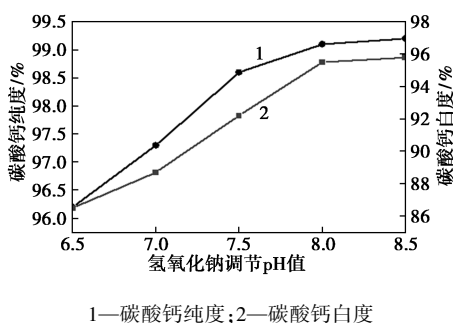


图 6 氢氧化钠调节 pH 对碳酸钙的影响

### 3.4 静态混合晶型控制剂的添加对碳酸钙粒径的影响

为制备高附加值的碳酸钙产品,采用静态混合反应法合成碳酸钙。溶液在三通管路中进行静态混合,具有结构简单、操作便捷等优点。此外,通过蠕动泵维持恒定流速,有助于混合更加均匀,从而获得粒径均一的碳酸钙产品。实验中,探讨了在 100 mL/min 流速下进行静态混合时,不同晶型控制剂的添加对最终碳酸钙产品粒径的影响。

#### 3.4.1 未添加晶型控制剂

通过计算,确定了乙酸钙和氯化钠混合溶液中钙离子的含量,并根据该含量配制了相同体积、相同

摩尔浓度的碳酸钠溶液。实验中,蠕动泵的流速设置为 100 mL/min。两种溶液中均未添加晶型控制剂,在三通管路中进行混合反应,生成碳酸钙产品。反应后,通过固液分离和干燥处理,获得了固体碳酸钙产品以及乙酸钙和氯化钠的混合溶液。根据图 7 所示,得到的碳酸钙产品为约 5 μm 的球形颗粒,且粒径较为均一。测试结果表明,碳酸钙的纯度为 99.2%,白度为 95.8%。

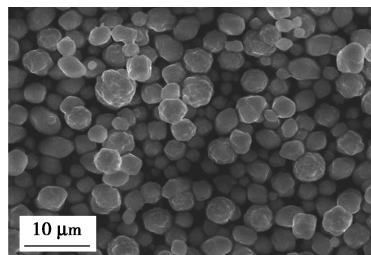


图 7 未添加晶型控制剂时碳酸钙产品的扫描电子显微镜图

#### 3.4.2 六聚磷酸钠为晶型控制剂

添加 6% 六聚磷酸钠作为晶型控制剂,其中 6% 指的是在该溶液反应中得到的碳酸钙的质量分数。蠕动泵流速设置为 100 mL/min,将 6% 六聚磷酸钠溶解在碳酸钠溶液中,通过三通管路进行混合反应,生成碳酸钙产品。反应后固液分离和干燥处理得到固体碳酸钙产品,同时得到乙酸钙和氯化钠的混合溶液。根据图 8 所示,添加 6% 六聚磷酸钠作为晶型控制剂后,得到的碳酸钙产品包含部分纳米级颗粒,同时也存在较大的微米级颗粒,粒径分布较为不均匀。测试结果表明,碳酸钙的纯度为 99.0%,白度为 95.3%。

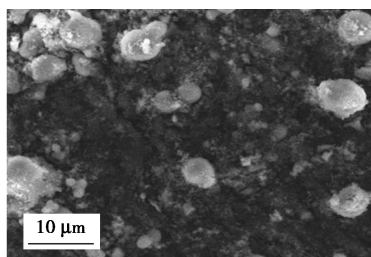
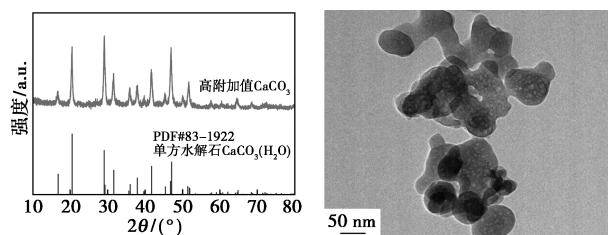


图 8 添加六聚磷酸钠时碳酸钙产品的扫描电子显微镜图

#### 3.4.3 三聚磷酸钠为晶型控制剂

添加 6% 三聚磷酸钠作为晶型控制剂,其中 6% 指的是在溶液反应中得到的碳酸钙的质量分数。实验中,蠕动泵流速设置为 100 mL/min,将 6% 三聚磷酸钠溶解于碳酸钠溶液中,通过三通管路进行混合反应,生成碳酸钙产品。经过固液分离和干燥处理,

得到固体碳酸钙产品,同时获得乙酸钠和氯化钠的混合溶液。根据图 9 所示,添加 6% 三聚磷酸钠作为晶型控制剂后,得到的碳酸钙颗粒均匀且为纳米级,粒径约为 50 nm。测试结果表明,碳酸钙的纯度为 99.2%,白度为 95.2%,比表面积为 22.91 m<sup>2</sup>/g。其 X 射线衍射(XRD)图谱中的特征峰对应于 CaCO<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O(PDF#83-1922),表明产品主要为水合碳酸钙。



(a) 碳酸钙 XRD 谱图

(b) 透射电子显微镜

图 9 产物碳酸钙 XRD、TEM 表征

### 3.5 循环工艺对产物硫酸钙、碳酸钙的影响

乙酸钠和氯化钠混合溶液的循环利用不仅降低了脱硫灰资源化利用的成本,还提高了原料的利用效率。实验结果表明,在循环工艺中,保持其他条件不变时,乙酸钠和氯化钠混合溶液对产物硫酸钙和碳酸钙的生成没有显著影响。需要注意的是,在该工艺路径下,随着循环次数的增加,混合溶液中的氯化钠含量会逐渐增加。该循环工艺主要利用溶液中的乙酸根离子,经过多次循环后,仅需通过蒸发结晶去除混合溶液中的氯化钠即可继续使用,该步骤也得到了副产物氯化钠。

## 4 结论

(1) 开发并优化了一种高效的脱硫灰资源化利用工艺,成功制备了高纯度的碳酸钙和硫酸钙。通过磁选工艺和加酸调节浆液 pH 有效去除了脱硫灰中的杂质,显著提高了产品纯度,最终得到的碳酸钙和硫酸钙的纯度分别为 98% 和 95%。在氧化反应过程中,通过将浆液 pH 调节至 5.0 以下,并在 60℃ 下搅拌进行 2 h 反应,亚硫酸钙的氧化率可达 98% 以上,从而显著促进了硫酸钙的生成。

(2) 利用氢氧化钠调节溶液 pH 至 8.0,有效去除了有色金属离子。通过精心选择晶型控制剂,成功制备出高纯度、高白度的碳酸钙产品,且其粒径、比表面积等关键指标均可控,从而赋予了碳酸钙产品更高的附加值。

(3) 该工艺实现了乙酸钠与氯化钠混合溶液的循环回收,向其中加入与乙酸钠摩尔比为 1:1 的盐酸,成功应用于硫酸钙制备过程中的浆液 pH 调节。

该循环利用工艺不仅显著降低了生产成本,提高了资源利用效率,而且未对产品质量产生显著影响,充分验证了该工艺的可持续性与经济性。

## 参考文献

- [1] 毛艳丽,张东丽,曲余玲.半干法烧结烟气脱硫灰渣的资源化利用[J].鞍钢技术,2011,(4):6-10.
- [2] 薛永杰,李雄浩,韩旭,等.烟气脱硫副产物资源化利用现状与发展方向[J].电力环境保护,2009,25(4):47-49.
- [3] 陈露露,陈宏,尤钰锋,等.3 种典型干法脱硫灰的理化特性研究[J].现代化工,2022,42(S2):248-254.
- [4] Taerakul P, Sun P, Walker H, et al. Variability of inorganic and organic constituents in lime spray dryer ash[J]. Fuel, 2005, 84(14-15):1820-1829.
- [5] 郭斌,卞京凤,任爱玲,等.烧结烟气半干法脱硫灰理化特性[J].中南大学学报,2010,41(1):387-392.
- [6] 党辉,王洪升,黄红,等.循环流化床脱硫灰渣的特性及应用初探[J].国际电力,2004,8(6):55-58.
- [7] Wu Z, Naik T R. Properties of concrete produced from multicomponent blended cements[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(12):1937-1942.
- [8] Qiao X C, Poon C S, Cheeseman C. Use of flue gas desulphurisation (FGD) waste and rejected fly ash in waste stabilization/solidification systems[J]. Waste Management, 2006, 26(2):141-149.
- [9] 潘红樱. 飞灰和脱硫残渣的利用[J]. 中国煤炭, 2000, 26(1):59-61.
- [10] 王红梅,王凡,张凡.半干半湿法脱硫灰制砖实验研究[J].环境科学研究,2004,17(1):74-76,80.
- [11] Chen L, Dick W A, Nelson S. Flue gas desulfurization by-products additions to acid soil: Alfalfa productivity and environmental quality[J]. Environmental Pollution, 2001, 114(2):161-168.
- [12] Rudisell M T, Stuart B J, Novak G, et al. Use of flue gas desulfurization by-product for mine sealing and abatement of acid mine drainage[J]. Fuel, 2001, 80(6):837-843.
- [13] 闫国斌,许立顺,赵建文.利用脱硫灰烧结渣制备新型充填胶凝材料的试验[J].矿业研究与开发,2015,35(12):22-27.
- [14] 杨志强,熊良锋,方林,等.利用烧结脱硫灰渣制备新型充填胶凝材料试验[J].有色金属科学与工程,2015,6(1):8-12.
- [15] 任丽.半干法脱硫副产物烧制硫铝酸盐水泥的试验研究[D].济南:山东大学,2009.
- [16] 傅伯和,葛介龙,郑月华.干法脱硫灰用作水泥混合材及缓凝剂的可行性研究[J].电力环境保护,2000,16(4):35-38.
- [17] Hu S G, He Y J, Lu L N, et al. Effect of fine steel slag powder on the early hydration process of Portland cement [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2006, 21(1):147-149.
- [18] 王文龙,任丽,董勇,等.半干法烟气脱硫产物对水泥缓凝作用的研究[J].水泥,2008,(3):1-4.
- [19] 张志国.半干法烟气脱硫灰资源化利用技术研究[D].石家庄:河北科技大学,2012.
- [20] 杨新亚,张丽英,刘洪波.干法与半干法脱硫渣中亚硫酸钙的低温催化氧化的研究[J].粉煤灰,2006,(4):10-12.
- [21] 石林.脱硫灰与钾矿石复合生产钾钙硅镁硫肥料研究[J].环境工程学报,2010,4(10):2339-2342. ■