

# 磷精矿烟气脱硫与传统脱硫工艺的经济性比较分析

董维旋 (瓮福 (集团) 有限责任公司, 贵州 福泉 550500)

**摘要:** 磷精矿烟气脱硫工艺是一种利用磷精矿浆液中的碱性金属氧化物 (如 CaO) 与烟气中的 SO<sub>2</sub> 反应, 达到脱硫效果的新型技术, 具有流程简洁、运行稳定、成本低、可回收利用脱硫剂、无二次污染等优点。传统脱硫工艺主要包括石灰石 - 石膏法、钠碱法和镁法等。石灰石 - 石膏法技术成熟, 操作简单, 但易结垢; 钠碱法脱硫效率高, 运行费用低, 对煤种变化适应性强; 镁法尚未详细阐述。相比传统脱硫工艺, 磷精矿烟气脱硫工艺在投资成本、运行成本上可能更具优势, 且副产物处理更为简便, 脱硫效率也较高。综合来看, 磷精矿烟气脱硫工艺在经济性和环保性方面具有一定优势。

**关键词:** 磷精矿烟气脱硫; 传统脱硫工艺; 经济性

中图分类号: TQ-9 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 012-0052-03

## Economic comparative analysis of flue gas desulfurization of phosphate concentrate and traditional desulfurization processes

Dong Weixuan (Wengfu (Group) Co., Ltd., Fuquan Guizhou 550500, China)

**Abstract:** Phosphorus concentrate flue gas desulfurization process is a new technology that utilizes alkaline metal oxides (such as CaO) in phosphorus concentrate slurry to react with SO<sub>2</sub> in flue gas to achieve desulfurization effect. It has the advantages of simple process, stable operation, low cost, recyclable desulfurizer, and no secondary pollution. Traditional desulfurization processes mainly include limestone gypsum method, sodium alkali method, and magnesium method. The limestone gypsum method has mature technology and simple operation, but it is prone to scaling; Sodium alkali desulfurization has high efficiency, low operating costs, and strong adaptability to changes in coal types; The magnesium method has not been elaborated in detail yet. Compared to traditional desulfurization processes, the phosphorus concentrate flue gas desulfurization process may have more advantages in investment and operating costs, and the by-product treatment is simpler, with higher desulfurization efficiency. Overall, the desulfurization process of phosphate concentrate flue gas has certain advantages in terms of economy and environmental protection.

**Keywords:** Phosphorus concentrate flue gas desulfurization; Traditional desulfurization process; economic

随着工业化步伐的加快, 磷精矿生产伴随的烟气脱硫议题愈发受到瞩目。既往的脱硫方法, 包括湿法、干法及半干法脱硫技术, 已在工业界获得广泛应用。然而, 这些传统手段在经济性和环境适应性层面仍面临多重挑战。近年来, 磷精矿烟气脱硫技术作为一项新兴的脱硫方案, 逐渐凸显其独特优势。此技术不仅脱硫效率高, 运行成本也相对较低, 且不会产生副产物及二次污染。因此, 对比磷精矿烟气脱硫与传统脱硫工艺的经济性, 对于优化工艺选择、削减企业开支、推动环保技术革新具有深远意义。

### 1 磷精矿烟气脱硫工艺概述

磷精矿烟气脱硫技术是一项创新的湿法脱硫方法, 其核心在于运用磷矿内含的钙质资源作为脱硫媒介, 取代常规的石灰石, 并与烟气中的二氧化硫发生化学反应, 达成脱硫与磷精矿生产的联合生产。此工艺通过让磷矿与复合酸进行不完全的酸解反应, 生成钙盐溶液, 随后在脱硫塔内与烟气中的二氧化硫反应, 形成亚硫酸钙, 再进一步氧化为硫酸钙 (即石膏), 完成脱硫过程。在此流程中, 生成的复合酸能够循环

再利用, 显著提升了资源的使用效率并削减了成本。

该技术的优势体现在: 一方面, 利用磷矿中的钙质资源进行脱硫, 不仅增强了脱硫效果, 还减少了石灰石的采掘, 减轻了环境负担; 另一方面, 通过烟气中的二氧化硫替代硫酸在磷矿除杂中的应用, 省去了磷精矿生产所需的硫酸原料费用, 同时使得低品质的磷矿得以资源化利用, 提升了磷资源的利用效率, 且构建了脱硫、磷精矿生产和石膏联产的循环体系, 解决了传统工艺中存在的资源浪费和二次污染难题。

### 2 传统脱硫工艺概述

#### 2.1 石灰石 — 石膏法

石灰石 - 石膏脱硫技术是一种成熟且广泛运用的湿法脱硫手段, 主要应用于燃煤电厂、烧结机等烟气净化领域。其核心在于借助石灰石浆液与烟气中的二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 进行化学反应, 生成亚硫酸钙 (CaSO<sub>3</sub>), 再经由氧化过程转化为硫酸钙 (CaSO<sub>4</sub>), 最终结晶为石膏形态析出。在脱硫流程中, 烟气首先经过除尘预处理, 接着由增压风机送入吸收塔。塔内, 烟气与喷淋而下的石灰石浆液逆流相遇, SO<sub>2</sub> 与浆液中的石

灰石发生反应，完成脱硫。处理后的烟气再经除雾器去除携带的水分后排放，而生成的亚硫酸钙则在塔底浆液池中，通过氧化风机鼓入的空气强制氧化，转化为石膏。此工艺的脱硫效率高，一般可达 90% 以上，优化条件下甚至可达 95%。影响脱硫效率的因素包括石灰石的细度、浆液酸碱度、液气比例、烟气温度及石膏在浆液池中的过饱和程度等。例如，石灰石粉的细度越细，其与  $\text{SO}_2$  的接触面越广，反应速率越快，脱硫效率越高。然而，该技术也面临一些挑战，如设备投资成本较高、废水处理需求以及设备可能存在结垢等问题。

## 2.2 钠碱法

钠碱脱硫技术是一种高效的湿法脱硫方案，主要采用氢氧化钠 (NaOH) 或碳酸钠 (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 作为脱硫媒介。其核心机制在于钠碱溶液与烟气中的二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 进行化学反应，生成亚硫酸钠 (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) 或亚硫酸氢钠 (NaHSO<sub>3</sub>)，从而达到脱硫目的。在工艺进程中，烟气先经过除尘预处理，然后进入吸收塔，与喷淋的钠碱溶液充分接触反应。反应生成的亚硫酸钠溶液再经过氧化步骤，转化为硫酸钠 (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)。然而，钠碱脱硫技术也面临一些限制。由于钠碱成本较高，导致脱硫的整体费用相对较高，一定程度上限制了其广泛应用。另外，脱硫副产物的处理方式多样，包括直接排放的抛弃法和需进一步提取化学品的回收法。

## 2.3 镁法

镁基脱硫技术是一种采用氧化镁 (MgO) 为核心的湿法脱硫方案，兼具高效、经济及环境亲和性。其核心机制在于利用氧化镁与烟气中的二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 进行化学反应，生成亚硫酸镁 (MgSO<sub>3</sub>) 或硫酸镁 (MgSO<sub>4</sub>)，从而达成脱硫目标。在工艺执行过程中，氧化镁首先经历熟化阶段，转化为氢氧化镁 (Mg(OH)<sub>2</sub>)，进而配制成浆液输入至吸收塔。烟气中的 SO<sub>2</sub> 与氢氧化镁浆液相遇后，发生中和反应，生成亚硫酸镁，该产物随后经由强制氧化过程转变为硫酸镁。硫酸镁可进一步加工为七水硫酸镁 (MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O)，作为一种高价值副产品推向市场。镁基脱硫的效能卓越，普遍可达 95% 以上，适配于高硫与低硫煤种；吸收剂反应速率快，设备运行平稳，结垢与堵塞风险低。然而，镁基脱硫亦面临一些挑战，诸如氧化镁的采购成本偏高，以及副产物处理需配备特定工艺设施。

## 3 磷精矿烟气脱硫与传统脱硫工艺的经济性比较

### 3.1 投资成本

磷精矿烟气脱硫的核心机制在于运用磷精矿浆作为脱硫媒介，经由化学反应捕获烟气内的二氧化硫并转换成硫酸，这些硫酸又能为磷化工生产所用。此技

术的亮点在于原料成本的优势，因为磷精矿本身是磷化工流程中的附属产品，无需额外的高昂支出以获取脱硫剂。

相对而言，石灰石 - 石膏法作为广泛应用的湿法脱硫技术典范，其投资涵盖了设备购置、安装施工、土建工程及其他附带费用。该法要求构建复杂的吸收塔、氧化装置、废水净化设施等，设备投资庞大，还需考虑石灰石的购置及运输开支。例如，针对单台 300MW 发电机组，石灰石 - 石膏法的脱硫设施投资约在 2651 万元至 3355 万元间。

钠碱脱硫工艺同样面临较高的投资挑战。钠碱的高昂价格及其在脱硫过程中的持续补给，推高了运行与投资成本，还需配套专门的废液处理设施，以规避环境二次污染风险，这无疑进一步增加了投资负担。

镁法脱硫的投资成本亦不容忽视。镁基脱硫剂的价位较高，脱硫过程镁的大量消耗导致投资与运行成本双高，其副产物硫酸镁的后续处理亦提升了系统复杂度和投资成本。

综合考量，磷精矿烟气脱硫技术在投资成本上展现出明显优势，利用磷精矿浆作为脱硫剂，既削减了原料成本，又通过副产品的循环利用优化了资源配置，降低了整体投资。反观传统脱硫技术，如石灰石 - 石膏法、钠碱法及镁法，因复杂的设备架构、昂贵的脱硫剂及必需的废水处理系统，其投资成本相对较高。更值得一提的是，磷精矿烟气脱硫技术的副产品可直接融入磷化工产业链，替代硫酸原料，进一步压缩了综合成本。此技术不仅降低了初期投资，还通过资源回收减少了长期运营成本，兼具经济性和环境友好特性。因此，在投资成本层面，磷精矿烟气脱硫技术尤其贴合磷化工企业或园区的需求，能显著削减企业的环保与运营成本，同时规避了传统脱硫技术中常见的二次污染难题。

### 3.2 运行成本

磷精矿烟气脱硫技术的运行成本相对较低，主要体现在脱硫剂成本、副产品处置及能耗等多个维度。磷精矿作为磷化工流程中的副产物，其获取成本远低于传统脱硫工艺所常用的石灰石、钠碱或镁基脱硫剂，而且在脱硫过程中产生的副产品能够无缝对接磷化工产业链，替代部分硫酸原料，进一步削减了系统的整体运行成本。

相较于此，传统脱硫工艺的运行成本则因技术路线的差异而大相径庭。以石灰石 - 石膏法为例，作为广泛应用的湿法脱硫技术，其运行成本涵盖了石灰石的采购与运输、电力消耗、废水处理及设备维护等费用。特别是当处理高硫煤烟气时，石灰石的消耗量显

著上升，进一步推高了运行成本。

钠碱脱硫工艺的运行成本更为高昂。钠碱的高价位及其在脱硫过程中的持续补给，导致其运行成本远高于磷精矿烟气脱硫。此外，钠碱脱硫还需配备专门的废液处理设施，以避免环境二次污染，这无疑进一步加重了运行成本。

镁法脱硫的运行成本同样不容小觑。镁基脱硫剂的高价位及其在脱硫过程中的大量消耗，使得其运行与投资成本均处于较高水平，且镁法脱硫产生的副产品硫酸镁需进一步处理。

### 3.3 副产物处理

磷精矿烟气脱硫技术通过化学反应将烟气中的二氧化硫转化为硫酸，并直接用于磷化工生产，规避了传统脱硫工艺中副产物处理的棘手问题，实现了资源的高效转化。脱硫过程中生成的副产物能无缝融入磷化工产业链，替代部分硫酸原料，从而削减了硫酸的采购成本。资源循环利用的模式不仅降低了脱硫工艺的运行费用，还提升了整个磷化工产业链的经济效率。

反观传统脱硫工艺，副产物处理往往伴随着诸多挑战和高昂成本。以石灰石-石膏法为例，该工艺是广泛应用的湿法脱硫技术，但其副产物石膏需达到一定纯度才具有经济价值。此外，石灰石-石膏法脱硫系统还需配备复杂的废水处理设施，以防止副产物对环境造成二次污染。这不仅增加了设备投资，还提升了运行成本。

钠碱法脱硫工艺的副产物处理同样复杂。钠碱的高成本及其在脱硫过程中的持续消耗，使得运行成本居高不下，其产生的副产物通常需要进一步处理，如氧化回收硫酸铵盐，但这一过程需要额外的设备和能源支持。

镁法脱硫工艺的副产物处理方式多样，但成本同样不菲，包括抛弃法、再生法和硫酸镁回收法等。其中，抛弃法虽简便，但废水处理量大；再生法则需复杂的工艺步骤，如分离、干燥和焙烧等，这些步骤不仅增加了设备投资，还提升了运行成本。

可见，磷精矿烟气脱硫技术在副产物处理方面的优势不仅体现在经济层面，还体现在资源利用效率和环保性上，尤其适合磷化工企业或园区，能显著降低企业的环保投入和运营成本，同时规避传统脱硫工艺中常见的二次污染问题。

### 3.4 脱硫效率

脱硫效能不仅直接关联到二氧化硫的减排成效，还与运营成本、设备投入及工艺繁简程度紧密相连。研究显示，磷精矿烟气脱硫的脱硫效能普遍可达90%以上，在优化条件下，其效能还能进一步提升。这种

高效的脱硫能力不仅有效减少了二氧化硫的排放，还通过资源的回收利用降低了运营成本，避免了传统脱硫工艺中副产物处理的难题。

相比之下，传统脱硫工艺的脱硫效能虽然也较高，但在经济性和副产物处理上存在一定的限制。以石灰石-石膏法为例，这是目前广泛采用的湿法脱硫技术，其脱硫效能普遍可达90%以上，高负荷运行时可达92%，低负荷下甚至可达95%。然而，石灰石-石膏法需处理大量废水及副产物石膏，这增加了运营成本和环境压力。

钠碱法脱硫工艺的脱硫效能通常可达90%以上，但在实际应用中，其运营成本较高，主要归因于钠碱的高昂价格及持续补充需求，且产生的副产物需进一步处理，这增加了工艺的复杂度和经济压力。

镁法脱硫工艺的脱硫效能也较高，可达90%以上，但其运营成本和投资成本均较高。镁法脱硫需消耗大量镁基脱硫剂，且副产物硫酸镁的处理增加了系统的复杂性，且能耗较高，进一步影响了其经济性。

从经济性视角出发，磷精矿烟气脱硫技术在脱硫效能上具有显著优势。其高效的脱硫能力不仅降低了二氧化硫的排放，还通过资源的回收利用削减了运营成本。相比之下，传统脱硫工艺尽管脱硫效能较高，但在运营成本、设备投入及副产物处理上存在一定的局限。

## 4 结语

综上所述，磷精矿烟气脱硫工艺作为创新技术，展现出在烟气脱硫领域的巨大潜力。相较于传统的石灰石-石膏法、钠碱法及镁法等脱硫工艺，磷精矿烟气脱硫在经济性上展现出一定优势，尤其在投资成本和运行成本方面表现突出。且磷精矿烟气脱硫工艺的副产物处理相对简便，且脱硫效率高，有利于减少环境污染。随着环保要求的日益严格，磷精矿烟气脱硫工艺有望成为一种更加经济、高效的烟气脱硫解决方案，对于推动环保产业升级和实现可持续发展具有重要意义。

## 参考文献：

- [1] 江来,胡阳,魏泽华,等.减少焦炉气湿法脱硫工艺中副盐产生的措施分析[J].电站系统工程,2025,41(01):72-73.
- [2] 唐猛,王英伟,张晓雷,等.HDCY一体化脱硫废水处理工艺在火电厂的应用[J].电站系统工程,2025,41(01):68-71.

## 作者简介：

董维旋(1996.02.03-),男,汉,贵州瓮安,硕士研究生,助理工程师,研究方向:磷精细化工。