

# 磷尾矿高值化利用技术进展

赵小燕<sup>1</sup>, 白青宁<sup>1</sup>, 董意<sup>1</sup>, 贾丽娟<sup>1</sup>, 冯嘉予<sup>1</sup>, 崔硕<sup>1</sup>, 曹睿<sup>1</sup>, 潘自斌<sup>1</sup>, 宁平<sup>2</sup>, 刘彦章<sup>3</sup>, 王访<sup>1\*</sup>  
(1. 云南民族大学化学与环境学院, 云南昆明 650504; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南昆明 650500; 3. 中天达玻璃钢开发有限公司, 云南昆明 650600)

**摘要:** 立足于磷尾矿的物化特性, 系统梳理了其资源化技术路径, 重点聚焦于有价元素回收、肥料化制备、建材化生产及环境修复应用等方面, 并提出了相应的发展建议, 以期磷尾矿的高值化与绿色清洁利用提供理论与技术支撑。

**关键词:** 磷尾矿; 有价元素回收; 回收工艺; 综合利用; 资源化

**中图分类号:** TH3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2026)05-0043-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.008

## Advances in high-value valorization technologies of phosphate tailings

ZHAO Xiao-yan<sup>1</sup>, BAI Qing-ning<sup>1</sup>, DONG Yi<sup>1</sup>, JIA Li-juan<sup>1</sup>, FENG Jia-yu<sup>1</sup>, CUI Shuo<sup>1</sup>,  
CAO Rui<sup>1</sup>, PAN Zi-bin<sup>1</sup>, NING Ping<sup>2</sup>, LIU Yan-zhang<sup>3</sup>, WANG Fang<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemistry and Environmental Science, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China;

2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650500, China; 3. Zhongtianda FRP Development Co., Ltd., Kunming 650600, China)

**Abstract:** Based on the physicochemical properties of phosphate tailings, this paper reviews technological approaches for their resource utilization, emphasizing the recovery of these elements, fertilizer preparation, construction material production, and environmental remediation. Corresponding development suggestions are proposed to provide theoretical and technical support for the high-value and green utilization of phosphate tailings.

**Key words:** phosphate tailings; valuable element recovery; recovery process; integrated utilization; resource utilization

磷矿石是全球重要的战略性不可再生矿产资源,在农业、化工、医药和材料等多个领域发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。目前,磷矿的主要用途集中在磷肥生产,同时在磷化工产业中用于生产高附加值产品,如磷酸盐、磷酸酯及含磷阻燃剂等。全球已探明磷矿储量超过 3 000 Gt,其中,中国磷矿储量位居世界第二,但中国磷矿资源利用率相对有限,仅占全球总量的不到 5%<sup>[2]</sup>。

我国磷矿石总体品位较低( $P_2O_5$  平均品位 <17%),而磷化工生产对磷精矿品位的要求较高<sup>[3]</sup>( $P_2O_5 \geq 28.5\%$ ),因此行业被迫转向低品位矿选矿提纯技术,在此过程中产生大量的磷尾矿。每生产 1 t 磷精矿约产生 0.44 t 磷尾矿,目前年排放量超 7 Mt,累计堆存量已超 1.2 Gt<sup>[4]</sup>。磷尾矿综合利用率不足 10%,长期堆存占用土地并污染环境。其中富含碳氟磷灰石、白云石、方解石及 Fe、Al 等有价成分,资源潜力显著。

2024 年 1 月,工业和信息化部等 8 部门印发《推进磷资源高效高值利用实施方案》,明确要求推

进磷尾矿高效综合利用,实现全元素回收和梯级利用,促进磷化工绿色低碳转型。因此,实现磷尾矿高效环保的资源化利用已成为行业可持续发展的关键课题。本文中系统分析了磷尾矿有价元素回收与综合利用途径,以期对相关技术开发提供参考。

## 1 有价元素的回收利用

磷尾矿是重要的工业固体废弃物,主体成分见表 1。由表可知,磷尾矿富含 P、Ca、Mg 和 Si 等有价元素。为回收利用这些元素(特别是 Ca、Mg、P)并实现高值化利用,研究者已开发出多种工艺方法。

表 1 磷尾矿的 XRF 表征结果

元素	Ca	P	Fe	Si	Al	K	Cr	Mn
含量	71.37	14.94	3.413	7.775	0.727	0.552	0.033	0.228

### 1.1 酸浸工艺

酸浸法利用酸性介质与磷尾矿中的碱性组分反应,生成可溶性盐,从而提取有价元素,磷尾矿的酸浸工艺如图 1 所示。

收稿日期:2025-07-08;修回日期:2026-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(22476171);云南省外国专家项目基金项目(202405AP120038)

作者简介:赵小燕(2000-),女,硕士生;王访(1989-),女,博士,副教授,研究方向为固体废物处理处置与资源化,通讯联系人,wfkm330@163.com。

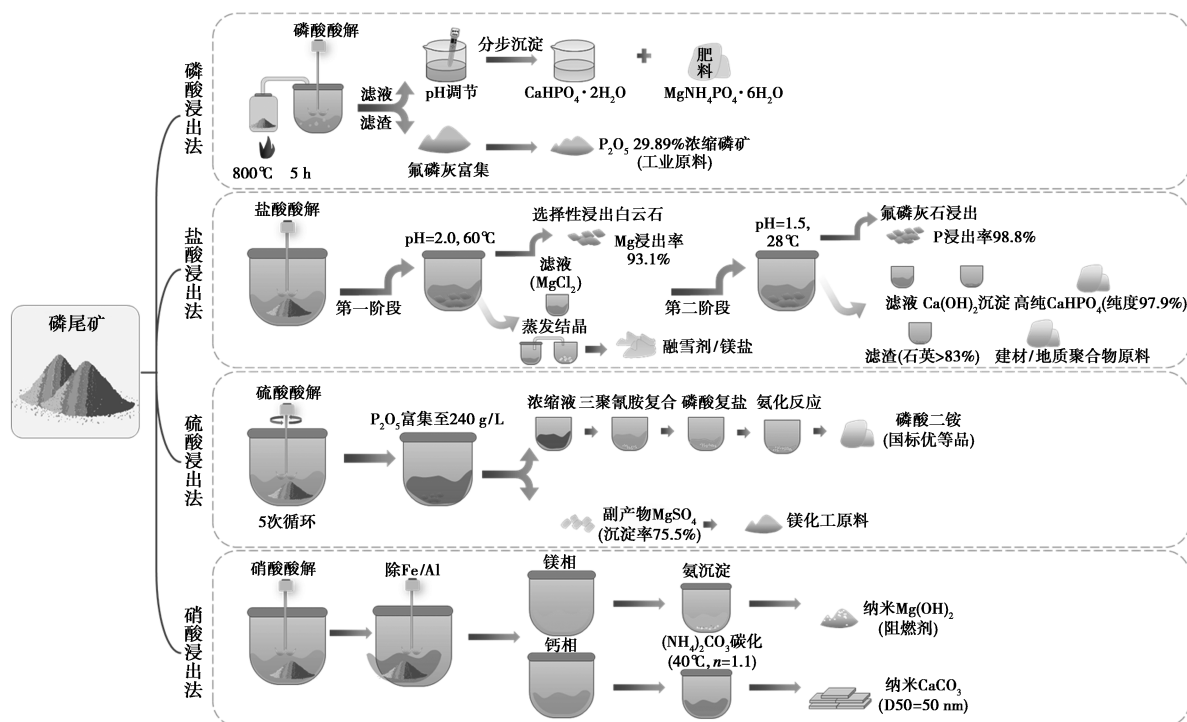


图 1 酸浸工艺

该方法可高效回收磷及其他副产品,尤其适用于磷尾矿处理,但也面临酸耗大、需耐酸设备、废液处理困难等问题。Yu 等<sup>[5]</sup>采用 HCl 两阶段酸浸结合沉淀法回收 Mg、P,浸出率分别为 93.1%、98.8%,但存在废液处理难题。Ding 等<sup>[6]</sup>对磷尾矿先煅烧,再用稀 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 选择性浸出 Ca、Mg,通过 pH 调控析出 CaHPO<sub>4</sub> 和 MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O,未反应的氟磷灰石等转化为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位质量分数 29.89% 的磷酸盐精矿,磷回收率达 99.86%。谭志斗等<sup>[7]</sup>采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 连续分解高镁磷尾矿,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 与 MgO 转化率均在 95% 以上。张萍花等<sup>[8]</sup>使用 HNO<sub>3</sub> 复合溶剂溶解磷尾矿,经除杂与分离得到有效 CaCO<sub>3</sub> 纯度为 89.27%,钙回收率 85.54%。

尽管酸浸法适用性强且回收率高,但面临酸耗大、设备防腐要求高及废液处理困难等瓶颈,需进一步探索环保的替代或优化方案。

### 1.2 矿化工艺

磷尾矿中的 CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 经煅烧分解为 CaO 和 MgO,可通过矿化反应与 CO<sub>2</sub> 生成碳酸盐,实现 CO<sub>2</sub> 固定与资源化,并能联产高纯度 Mg(OH)<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub>,同时富集磷、降低污染。Ma 等<sup>[9]</sup>开发了 CO<sub>2</sub> 吸收-矿化一体化工艺,通过煅烧活化与 MEA (单乙醇胺) 选择性浸出 Ca,制备轻质 CaCO<sub>3</sub> 并富集 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。该工艺中 MEA 循环再生效率达 90% ~

100%,每吨磷尾矿可产出 265.93 kg CaCO<sub>3</sub>,经济效益约 9.55 美元。张宾等<sup>[10]</sup>将磷尾矿在 900°C 煅烧 60 min,得到 CaO 与 MgO 混合物,经水化后通入 CO<sub>2</sub> 调节 pH 至 6.5,形成可溶性 Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 和沉淀 CaCO<sub>3</sub>;过滤后向滤液加 NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 即可析出 Mg(OH)<sub>2</sub>。该矿化工艺(流程如图 2 所示)相比酸浸法,既能固定 CO<sub>2</sub>,又可避免强酸废液排放与设备腐蚀,同时联产高附加值化学品,兼具环境与经济效益,但相对处理周期较长。

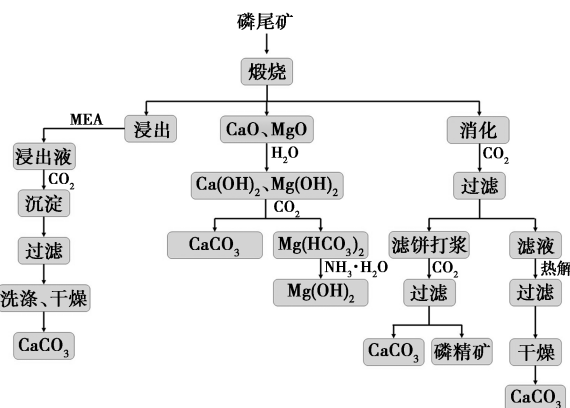


图 2 磷尾矿矿化法制取 CaCO<sub>3</sub> 与 Mg(OH)<sub>2</sub> 流程

### 1.3 氨法回收

磷尾矿经煅烧生成 CaO、MgO 等易溶化合物,

可通过铵盐反应高效浸出 Ca、Mg、P,进而用于制备  $Mg(OH)_2$ 、轻质  $CaCO_3$  等高附加值产品,如图 3 所示。邓杰等<sup>[11]</sup>采用煅烧-铵盐两步浸出法回收磷尾矿中的 Ca 和 Mg, CaO 和 MgO 的浸出率分别为 56.69% 和 83.43%,实现了两者的有效分离回收。黄芳等<sup>[12]</sup>通过煅烧-铵盐分步浸出工艺,在 900℃ 煅烧选择性分解白云石,再用  $NH_4NO_3$  优先浸出 Ca (CaO 浸出率 80.43%),随后以  $(NH_4)_2SO_4$  二次浸出 Mg (MgO 浸出率 >91%),最终获得  $P_2O_5$  品位 38.37% 的磷精矿 (回收率 88.58%),并联产轻质  $CaCO_3$  和 MgO。该工艺实现了氨介质的闭环循环,反应释放的氨气可回收用于后续沉淀,降低了试剂消耗与环境影响。

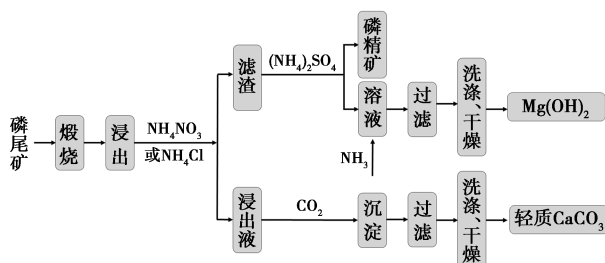


图 3 磷尾矿氨法制取  $Mg(OH)_2$  和  $CaCO_3$  工艺流程

与酸浸法和矿化法相比,氨法可通过 pH 调控实现 Ca、Mg、P 的高选择性分离,并借助  $NH_3$  循环形成闭路工艺,在高效制备轻质  $CaCO_3$ 、高纯  $Mg(OH)_2$  等产品的同时,避免了强酸腐蚀或  $CO_2$  转化率低的问题。但需注意控制含氮废水排放和  $NH_3$  挥发,并配备相应废气吸收装置。

#### 1.4 协同利用

磷尾矿富含 Ca、Mg、P 等元素,可与其他含 Si、Al 的工业固废协同处理,实现成分互补,提高资源回收效率。协同利用能共享工艺流程,降低能耗与成本,避免单独处理磷尾矿时工艺复杂、条件苛刻的问题。Yu 等<sup>[13]</sup>研究了钢渣与磷尾矿的高温重熔耦合技术,使磷富集于特定矿相,再经酸浸回收。并利用酸浸分离回收磷资源,如图 4 所示。在钢渣与磷尾矿质量比 7:3、pH = 1 条件下,P 的溶出率达 89.2%,Fe 几乎不溶出;中性条件下  $PO_4^{3-}$  以  $Ca_3(PO_4)_2$  形式沉淀,P 回收率可达 80%,余下  $Fe_2O_3$ 、MgO 等可回用于钢铁冶炼,展现了良好的协同利用前景。陈晓等<sup>[14]</sup>开发了磷石膏与磷尾矿协同工艺,通过酸浸-碳化-分离闭路流程高效回收 Ca、Mg、P。磷石膏碳化转化率达 96.94%,联产出工

业级  $CaCO_3$ 、氮镁磷肥 ( $P_2O_5$  含量 23.89%) 和  $NH_4Cl$  (N 含量 23.76%)。该技术使废渣减少 90% 以上,实现了资源循环与废物减量。

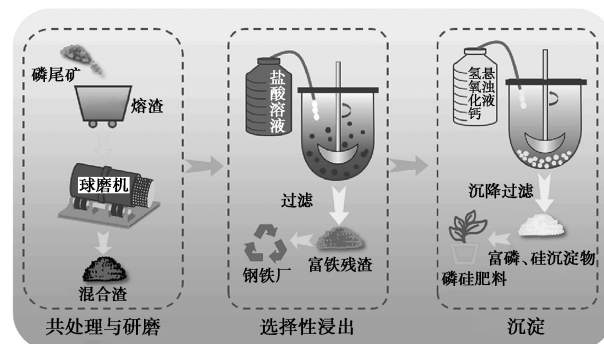


图 4 钢渣和磷矿尾矿的协同处理流程图

总体而言,当前各类回收技术原理与效能各有优势与局限(表 2),未来需聚焦工艺优化与绿色闭路循环设计。

表 2 有价元素回收方法优缺点

方法	优势	弊端
酸浸法	适用性广,元素回收率高,工艺成熟	耗酸大,产酸性废水,腐蚀设备
矿化法	降碳,无污染,操作简单	处理周期长,产率较低
氨法	反应条件温和,废液毒性低	氨气挥发,浸出速率较慢
协同利用法	降低生产成本,减量	受限于固废种类,杂质多化显著

## 2 磷尾矿再利用

除了提取单一元素,磷尾矿因富含微量元素、具备较好的矿物相容性及多孔吸附等物理特性,在农业施肥、建材制备及环境修复等多领域也展现出巨大的整体再利用价值(图 5)。

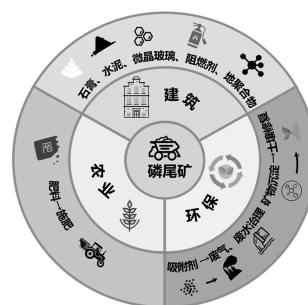


图 5 磷尾矿综合利用

### 2.1 生产肥料

磷尾矿中含有一定的 P 元素,可用作磷肥的生

产原料。Miao 等<sup>[15]</sup>将磷尾矿与未净化湿法磷酸(WPA)和尿素混合,在 225℃下对混合物煅烧 10 min,最终得到聚磷酸钙镁铵(CMAPP)缓释肥料,CMAPP 的聚合机理见图 6,该肥料展现出良好的 MWD 分布特性(MWD=1.41,PD=2.86),同时具有养分缓释与磷活化的双重作用。张锐<sup>[16]</sup>以磷尾矿和沼渣为基质,利用筛选获得的高效解磷菌开展固态发酵,制备得到了生物有机肥。该有机肥中有效磷含量达 9 293 mg/kg,难溶性磷活化率为 12.06%,有机质含量为 67.90%,活菌数达 0.32 亿个/g,与商品化的肥料相比,该生物有机肥工艺简单,成本较低,与单独施用沼渣相比,生物有机肥对大豆的产量增加了 20%,油菜薹生物量增加了 19.70%。此外,磷尾矿中除主要元素 P 外,还富含 Ca、Mg 等微量元素,这些微量元素对酸性土壤有良好的改良作用。

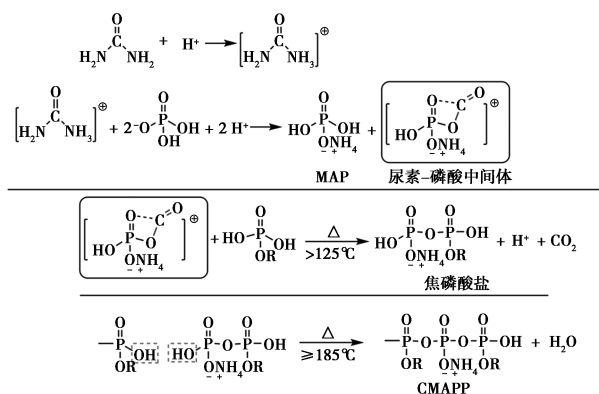


图 6 CMAPP 的聚合机理

## 2.2 制建筑材料

依托结构稳定性与矿物成分,磷尾矿可作为填料替代天然原料,实现大宗固废的大规模消纳。Gu 等<sup>[17]</sup>将磷尾矿与酸性废水共处理制备硫氧镁水泥,酸性废水中的磷促进 517 相 $[5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ 形成,显著提高抗压强度;煅烧磷尾矿增强稳定性,浸泡 28 d 后耐水性和耐酸性保留率分别为 92% 和 82%,该工艺实现废物协同资源化,降低成本和提升耐用性。Zhang 等<sup>[18]</sup>以磷尾矿和粉煤灰(质量比 60:40)通过原位聚合法制备地质聚合物,水灰比 0.22,水玻璃激发,抗压强度达 38.8 MPa,形成致密沸石-凝胶结构包裹尾矿颗粒,实现无害化处理。Zhou 等<sup>[19]</sup>利用磷尾矿经酸解和水热法合成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 阻燃剂,可提高材料耐热性、减缓热释放,燃烧时形成稳定残渣,有效阻止热量和气体扩散。

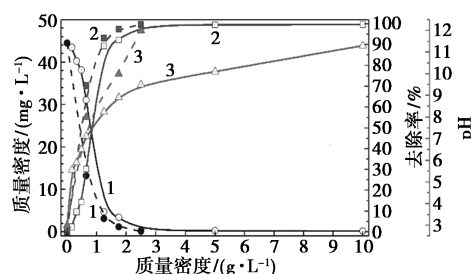
## 2.3 环境修复

磷尾矿因含有碱性组分,具有较好的吸附性能

和矿物结构特征,使其成为具有环境友好性和经济可行性的新型环境修复材料,在污水处理、土壤稳定、有害气体吸收等方面有显著的利用价值。

### 2.3.1 废水治理

磷尾矿的化学活性成分与多孔结构使其适用于废水治理<sup>[20]</sup>。经高温焙烧可激活其碱性组分(如 CaO、MgO),用于中和酸性废水并沉淀重金属;其表面特性也能吸附磷酸盐和有机污染物。成倩兰等<sup>[21]</sup>将焙烧磷尾矿(950℃)用于除磷,如图 7 所示,投加量 2.5 g/L,在 20℃ 反应 2 min 后对含磷废水的去除率达 99.44%。Meng 等<sup>[22]</sup>通过水热改性制备的磷尾矿吸附剂,比表面积增至 151.26 m<sup>2</sup>/g,在 pH=5.94、亚甲基蓝初始浓度 1 400 mg/L、293 K 反应 60 min 条件下,最大吸附量为 321.5 mg/g。此外,Wu 等<sup>[23]</sup>利用磷尾矿中的 Ca、P 合成羟基磷灰石基吸附剂,可同步固定重金属:磷尾矿溶解促进 Pb 形成磷酸盐,产生的 MgO 协助沉淀 Cd 和 Zn,使污水中 Pb、Cd、Zn 分别降低 53%、93%、79%。



1—磷含量(添加 NH<sub>4</sub>OH);2—除磷率(添加 NH<sub>4</sub>OH);  
3—pH(添加 NH<sub>4</sub>OH)

图 7 不同煅烧磷尾矿投加量与废水残留磷含量、去除率、pH 的关系

### 2.3.2 土壤稳定

磷尾矿中的磷酸盐或碳酸盐成分可通过沉淀反应固定土壤重金属,降低生物有效性与毒性<sup>[23]</sup>,其中所含的 Ca、Mg、Si 等元素也可通过复合改良土壤理化性质。吴珊珊等<sup>[24]</sup>以磷尾矿制备羟基磷灰石材料,在酸性条件下释放 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,与 Pb、Cd、Zn 等重金属形成沉淀,同时提高土壤 pH,促进生成碳酸盐和氢氧化物,实现对重金属的稳定固化。Venäläinen 等<sup>[25]</sup>利用磷尾矿修复酸性污染土壤,借助碳酸盐的碱化作用提高土壤 pH,促使 As、Sb 从有机态释放,进而与磷尾矿释放的 Ca<sup>2+</sup>形成难溶钙锑酸盐[如 Ca(Sb(OH)<sub>6</sub>)<sub>2</sub>]和钙砷酸盐[如 Ca<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O],降低其溶解度。Li 等<sup>[26]</sup>通过添加聚合 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>与 FeSO<sub>4</sub>制备复合固化剂处理磷尾矿,

使 F 浸出毒性降至 0.956 9 mg/L, 固定率达 74.92%, 对水溶性磷截留率达 82.75%; 经固化培养 28 d 后的“人工土壤”在种植试验中使白菜种子发芽率达 83.33%, 验证了其用作栽培基质的可行性。尽管成效显著, 未来仍需关注其在复杂土壤环境中的长期稳定与二次污染风险评估。

### 2.3.3 废气吸收

针对传统酸浸法成本高、污染大的痛点, 引入含硫/硝工业烟气替代酸液浸提尾矿, 是一项实现废气净化与固废资源化双赢的创新举措。Jia 等<sup>[27]</sup>利用磷尾矿与黄磷制备复合浆液去除烟气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ 。磷尾矿中钙镁化合物可吸附  $\text{SO}_2$ , 黄磷促进  $\text{O}_3$  的生成以氧化  $\text{NO}_x$ , 最终转化为硝酸盐。Nie 等<sup>[28]</sup>将磷尾矿用作脱硫剂(图 8), 脱硫性能优于原矿石, 表征表明白云石 [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] 在脱硫中起主导作用。马海翔<sup>[29]</sup>采用含  $\text{SO}_2$  烟气替代传统酸液浸提磷尾矿, 浸出液中  $\text{PO}_4^{3-}$  含量达 75.41 mg/L; 滤液循环 10 次后,  $\text{PO}_4^{3-}$  含量提升至 188.47 mg/L (提升 149.93%), 且脱硫效率不受影响, 实现了烟气净化、固废减量与磷资源回收。目前磷尾矿在废气吸收方面的研究主要集中于  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ , 对其他废气的研究较少。

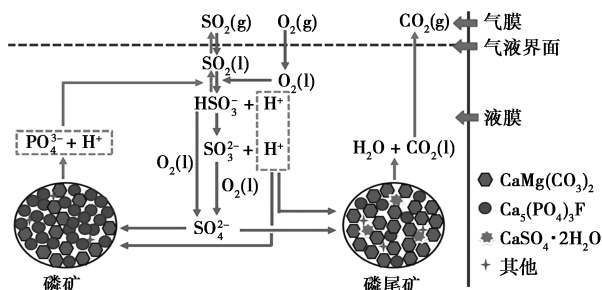


图 8 磷尾矿脱硫机理

## 3 结语

在政策引导与资源约束双重驱动下, 磷尾矿的高效综合利用已成为磷化工产业转型升级的核心战略方向。将磷尾矿中所含大量有价元素进行回收, 并资源化利用, 不仅符合绿色环保的理念, 同时还能提高经济效益, 可实现环境和经济双重发展。目前, 对磷尾矿的综合利用主要集中在元素回收、建材开发、环保等方面, 但存在磷尾矿原料性质不稳定、尾矿占地面积大、资源利用过程复杂、成本高等问题。未来, 磷尾矿的资源化利用可能更加集中在以下方面: ①针对磷尾矿性质不同的问题, 加强技术合作, 采用合适的方法对磷尾矿进行利用, 提高磷尾矿的

回收率; ②研究开发出高效利用技术, 充分回收磷尾矿中的 P、Mg、Ca 等元素, 生产高附加值产品; ③现阶段对磷尾矿的利用, 能耗较高, 对设备的要求较苛刻, 研究在低能耗的情况下实现对磷尾矿的高效利用, 是坚持可持续发展的必然趋势。

## 参考文献

- [1] 曹阳阳, 唐远, 田承涛, 等. 宜昌某磷尾矿工艺矿物学[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 165-169.
- [2] 王保明, 王兴龙, 杨英, 等. 磷尾矿综合利用现状及研究进展[J]. 无机盐工业, 2024, 56(10): 1-11.
- [3] 杜令攀, 李江丽, 范培强, 等. 云南省磷尾矿资源化利用现状及发展建议[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(3): 85-93.
- [4] 杨俊杰. 从磷尾矿中分离提取钙镁的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [5] Yu Y, Du C, Zhang Y, et al. Phosphorus recovery from phosphate tailings through a two-stage leaching-precipitation process: Toward the harmless and reduction treatment of P-bearing wastes[J]. Environmental Research, 2024, 248: 118328.
- [6] Ding S, Yin L, Zhang T, et al. Resource utilization of phosphate tailings by calcination and leaching with dilute  $\text{H}_3\text{PO}_4$  solution[J]. Minerals Engineering, 2025, 222: 109172.
- [7] 谭志斗, 谭小红, 胡远芳, 等. 高镁磷尾矿在磷酸中的溶解动力学[J]. 化工矿物与加工, 2007, 35(4): 1-3.
- [8] 张萍花, 燕云洁, 陈建钧, 等. 高镁钙磷尾矿酸解制纳米级碳酸钙[J]. 无机盐工业, 2019, 51(3): 63-65.
- [9] Ma Z, Li D, Yue S, et al. Separation of calcium and magnesium from phosphorus tailings by the integrated  $\text{CO}_2$  absorption-mineralization process[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 364: 132534.
- [10] 张缤, 孙成斌, 周骏宏. 磷尾矿碳化法制取氢氧化镁的研究[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(4): 17-18.
- [11] 邓杰, 毛益林, 张俊辉, 等. 煅烧-铵盐两步浸出法对磷矿浮选尾矿钙镁回收研究[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(1): 39-47.
- [12] 黄芳, 王华, 李军旗, 等. 磷矿浮选尾矿煅烧铵盐法实验研究[J]. 化工矿物与加工, 2010, (1): 10-12.
- [13] Yu Y, Du C, Yang X. Recovery of phosphorus from steelmaking slag and phosphate tailings by a collaborative processing method[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 313: 123499.
- [14] 陈晓, 代典, 黄靖宇, 等. 磷化工“双废”联用工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(2): 51-55.
- [15] Miao L, Yan Z, Wang X, et al. A novel hierarchical structured calcium magnesium ammonium polyphosphate for high-performance slow-release fertilizer[J]. Reactive and Functional Polymers, 2022, 181: 105413.
- [16] 张锐. 基于磷尾矿和沼渣综合利用的生物有机肥制备及应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [17] Gu K, Chen B, Yan P, et al. Recycling of phosphate tailings and acid wastewater from phosphorus chemical industrial chain to prepare a high value-added magnesium oxysulfate cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 369: 133343.

(下转第 54 页)

- pounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 82-88.
- [20] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰-矿渣地质聚合物砂浆凝结时间及力学性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(12): 138-144.
- [21] Chen X, Zhang J, Lu M, *et al.* Study on the effect of calcium and sulfur content on the properties of fly ash based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314: 125650.
- [22] 宋丽娜. 陈化拜耳法赤泥基地聚合材料的制备与水化机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [23] Han X, Zhang P, Zheng Y, *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with coal fly ash/metakaolin for geopolymer composites preparation [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133060.
- [24] 高梦实. 活化赤泥制备地聚物的力学和工作性能及微观机理研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
- [25] 袁正璞, 李新颖, 陈泉源, 等. 垃圾焚烧飞灰合成地聚物及重金属稳定化效果[J]. *环境工程*, 2012, 30(6): 91-94.
- [26] Ye N, Chen Y, Yang J, *et al.* Co-disposal of MSWI fly ash and Bayer red mud using an one-part geopolymeric system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 70-78.
- [27] 毕广泽, 王伯昕, 郭嘉欢, 等. 偏高岭土-矿渣地聚物水化过程中的环境敏感性[J/OL]. *复合材料学报*, 1-10. [2025-07-15]. 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250102.007.
- [28] 刘俊芳, 张天然, 刘霖, 等. 矿渣复合物固化/稳定化铅污染沙土特性[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(28): 12287-12295.
- [29] Liang G, Zhu H, Zhang Z, *et al.* Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 872-881.
- [30] 郭凌志, 周梅, 王丽娟, 等. 煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(10): 1092-1100. ■

## (上接第 42 页)

- [23] Tariq M, Wang J, Sehar S, *et al.* Organics and nutrient transformation in a Microbial Fuel Cell influenced by antibiotics [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2023, 51(6): 2200299.
- [24] Cui Q T, Fan M K, Liu X Y, *et al.* Activation ability of Yellow River (Huanghe) suspended sediment to degrade carbamazepine pollutants in water environment using peroxymonosulfate: Performance, mechanism, and potential toxicity evaluation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 337: 126422.
- [25] Lin W, Chen R L, Gong C X, *et al.* Sustained oxidation of Tea-Fe (III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> simultaneously achieves sludge reduction and carbamazepine removal: The crucial role of EPS regulation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134182.
- [26] Bogusz A, Tomczyk B, Trzcńska M, *et al.* Effect of zeolites on the reduction of the ecotoxicity of carbamazepine in the environment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 277: 116320.
- [27] Yao M C, Duan L, Wei J, *et al.* Carbamazepine removal from wastewater and the degradation mechanism in a submerged forward osmotic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123732.
- [28] Rahman K O, Aziz K H H. Utilizing scrap printed circuit boards to fabricate efficient Fenton-like catalysts for the removal of pharmaceutical diclofenac and ibuprofen from water [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 109015. ■

## (上接第 47 页)

- [18] Zhang S, Xie X, Xie R, *et al.* Preparation and interface state of phosphate tailing-based geopolymers [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(6): 1900-1914.
- [19] Zhou K, Zhou Q, Gong K, *et al.* Waste-to-resource strategy to fabricate environmentally benign flame retardants from waste phosphorus tailings [J]. *Composites Communications*, 2020, 19: 173-176.
- [20] Zheng Y, Wan Y, Zhang Y, *et al.* Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorus removal technologies [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 53(11): 1148-1172.
- [21] 成倩兰, 张豪, 刘雁, 等. 焙烧磷尾矿处理含磷废水的研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2021, 43(5): 496-499.
- [22] Meng W, Ma Z, Shu J, *et al.* Efficient adsorption of methylene blue from aqueous solution by hydrothermal chemical modification phosphorus ore flotation tailings [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 281: 119496.
- [23] Wu S, Liu Y, Shang L, *et al.* Recycling of phosphate tailings for an efficient hydroxyapatite-based adsorbent to immobilize heavy metal cations [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 72160-72170.
- [24] 吴珊珊, 刘意章, 周旺旺, 等. 磷尾矿钝化材料研制及其对土壤重金属的修复机制[J]. *矿物学报*, 2024, 44(3): 326-334.
- [25] Venäläinen S, Nousiainen A, Silvennoinen M, *et al.* Stabilization of As and Sb in contaminated acidic shooting range soil with apatite mine tailings: Challenge of co-contamination [J]. *Soil & Environmental Health*, 2025, 3(100124): 1-10.
- [26] Li H, Yang J, Qu G, *et al.* Solidification and stabilization of fluorine and phosphorus in phosphate mine tailings and the mechanism of F and P fixation during soilization [J]. *Chemistry Select*, 2024, 9: e202401515.
- [27] Jia L, Yang S, Feng J, *et al.* Simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO by phosphate tailings-derived composite slurry: A study of phosphorus element migration and transformation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119430.
- [28] Nie Y, Dai J, Hou Y, *et al.* An efficient and environmentally friendly process for the reduction of SO<sub>2</sub> by using waste phosphate mine tailings as adsorbent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121748.
- [29] 马海翔. 含硫烟气浸提磷尾矿中磷元素及强化机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024. ■