**doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.021**

**引用格式：**陈燕，瞿军，曹艳敏，袁木平，李中军，董攀飞，徐志高. 低碳导向下磷石膏可溶磷的Fe-Ca协同稳定化过程与资源化路径[J]. 矿冶，2026，35(1)：163-168.

CHEN Yan, QU Jun, CAO Yanmin, YUAN Pingmu, LI Zhongjun, DONG Panfei, XU Zhigao. Fe-Ca synergistic stabilization process and resource utilization pathway for soluble phosphorus in phosphogypsum under low-carbon guidance[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 163-168.

# 低碳导向下磷石膏可溶磷的Fe-Ca协同稳定化过程与资源化路径

陈 燕[1] 瞿 军[2] 曹艳敏[2] 袁木平[1] 李中军[3] 董攀飞[3] 徐志高[2]

（1. 湖北兴发化工集团股份有限公司，湖北 宜昌 443700；
2. 中南民族大学 资源与环境学院，催化转化与能源材料化学教育部重点试验室，
资源转化与污染物控制国家民委重点试验室，武汉 430074；
3. 湖北三峡试验室，湖北 宜昌 443700）

**摘 要：**针对磷石膏传统石灰中和法碳排量高、不利于国家“双碳”目标实现的问题，提出采用Fe-Ca中性固磷剂（七水硫酸亚铁与碳酸钙）处理磷石膏，以提高可溶性磷的固化率并改善制品性能。通过单因素与正交试验，探究了固磷剂用量、反应温度和陈化时间对固化效果的影响，确定最佳工艺条件为：七水硫酸亚铁添加量4%、碳酸钙添加量4%，在50 ℃下搅拌反应3 h后陈化24 h。该条件下磷浸出浓度降至0.02 mg·L$^{-1}$，固化率达到99.9%。机理分析表明，$Fe^{2+}$在碳酸钙表面沉淀并氧化为$Fe^{3+}$，进而与磷酸根形成稳定的磷酸铁，实现了磷的高效稳定固化。使用固化后磷石膏制备的$\beta$-半水石膏，其力学性能显著优于未固化样品。研究表明，Fe-Ca固磷剂可实现磷石膏的无害化与资源化利用，为行业低碳转型提供了理论依据与技术途径。

**关键词：**磷石膏；可溶磷固化；Fe-Ca协同作用；中性固磷剂；稳定化机理；资源化利用

**中图分类号：**X781；X75 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)01-0163-06

# Fe-Ca synergistic stabilization process and resource utilization pathway for soluble phosphorus in phosphogypsum under low-carbon guidance

CHEN Yan[1] QU Jun[2] CAO Yanmin[2] YUAN Muping[1] LI Zhongjun[3] DONG Panfei[3] XU Zhigao[2]

(1. Hubei Xingfa Chemicals Group Co. Ltd., Yichang 443700, Hubei, China;
2. Key Laboratory of Resources Conversion and Pollution Control of the State Ethnic Affairs Commission, Key Laboratory of Catalysis and Energy Materials Chemistry of Ministry of Education, College of Resources and Environmental Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China;
3. Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang 443700, Hubei, China)

**Abstract:** To address the issues of high carbon emissions associated with the traditional lime neutralization method for phosphogypsum and its incompatibility with the national "Dual Carbon" goals, this study proposes the use of an Fe-Ca neutral phosphorus-fixing agent (ferrous sulfate heptahydrate and calcium carbonate) to treat phosphogypsum. This approach aims to enhance the solidification rate of soluble phosphorus and improve the performance of the resulting products. Through single-factor and orthogonal experiments, the effects of the phosphorus-fixing agent dosage, reaction temperature, and aging time on the solidification efficiency were investigated. The optimal process

**收稿日期：**2024-11-25

**基金项目：**湖北省科技计划重大项目(2022ACA004-3)；湖北省自然科学基金-宜昌创新发展联合基金资助项目(2024AFD136)；湖北三峡实验室创新基金资助项目(SC240015)；中南民族大学学术创新团队资助项目(XTZ24019)

**第一作者：**陈燕，硕士，工程师，主要从事磷化工生产与管理。E-mail：121190068@qq.com

**通信作者：**徐志高，博士，教授；E-mail：xuzhigaotc@126.com

conditions were determined as follows: 4% ferrous sulfate heptahydrate, 4% calcium carbonate, stirring at 50 ℃ for 3 h, followed by aging for 24 h. Under these conditions, the phosphorus leaching concentration decreased to 0.02 mg·$L^{-1}$, with a solidification rate of 99.9%. Mechanistic analysis revealed that $Fe^{2+}$ precipitated on the surface of calcium carbonate and oxidized to $Fe^{3+}$, which subsequently formed stable iron phosphate with phosphate ions, achieving efficient and stable phosphorus solidification. The mechanical properties of $\beta$-hemihydrate gypsum prepared from solidified phosphogypsum were significantly superior to those of untreated samples. This study demonstrates that the Fe-Ca phosphorus-fixing agent enables the harmless treatment and resource utilization of phosphogypsum, providing theoretical foundations and technical pathways for low-carbon transformation in the industry.

**Key words:** phosphogypsum; soluble phosphorus solidification; Fe-Ca synergistic effect; neutral phosphorus-fixing agent; stabilization mechanism; resource utilization

磷石膏是磷肥生产过程中产生的一种工业副产物，其主要成分为$CaSO_4 \cdot 2H_2O$[1-3]，主要毒害元素是磷，磷在磷石膏中以可溶形式存在，对磷石膏资源化产品的性能产生严重影响。因此需要通过特定的处理方法去除[4]。在工业上，常用去除可溶磷的方法包括水洗、酸洗和石灰中和法[5]，这些方法往往伴随着高昂的成本和对环境的潜在风险，因此有必要探索更环保、更经济的除磷技术。

固化技术是一种有效处理磷石膏中可溶磷的方法，通过添加具有胶凝活性的物质与可溶磷反应，生成稳定的不溶物，并将其包裹在磷石膏表面，从而实现有害物质的稳定固化。目前，磷石膏处理主要采用石灰中合法，但该方法石灰消耗量大，且石灰生产过程能耗高、碳排放多，不利于我国“碳达峰”与“碳中和”目标的实现[6,7]。此外，石灰中和后磷石膏中的氟、磷等杂质仍可能再次溶出，长期稳定固化效果有限[8]。因此，开发一种低成本、高效率且针对性强的新型固化剂，对降低处理成本并提升磷石膏无害化处理的效能具有重要意义。

七水硫酸亚铁是一种常用的水处理剂，可通过生成不溶物、吸附及包裹等作用高效去除水中的磷酸根。单独使用时除磷效果有限，通常需与双氧水等氧化剂联用，将$Fe^{2+}$氧化为$Fe^{3+}$，才能显著提高磷的去除率。已有研究报道，七水硫酸亚铁与碳酸钙联合使用，可使$Fe^{2+}$在碳酸钙表面沉淀并氧化为$Fe^{3+}$，原位生成具有高反应活性的三价铁化合物，进而高效去除水体中的磷、砷等元素[9]。目前该体系主要应用于模拟水体的研究，尚未见在磷石膏实际样品处理中的报道，该方法有望为磷石膏无害化处理提供更高效的新途径[10]。基于此，本研究选用七水硫酸亚铁与碳酸钙作为复合固化剂，旨在通过优化其配比及工艺条件，提高对磷石膏中可溶磷的固化效率并控制成本。采用单因素试验方法，系统探究七水硫酸亚铁用量、碳酸钙用量、反应温度和陈化时间等因素对可溶磷固化效果的影响，以期建立经济高效的处理工艺，为实现磷石膏中可溶磷的低成本无害化处理提供理论支持与技术参考。

# 1 试验

## 1.1 材料与仪器

磷石膏样品取自山东联盟磷复合有限公司，外观呈灰色。试验所用试剂碳酸钙、七水硫酸亚铁和氧化钙均为分析纯，由国药集团生产。采用X射线荧光光谱仪（XRF）测定样品化学成分，结果如表1所示。分析表明，磷石膏主要组成为Ca、S、O，其中主要有害杂质P和F的质量分数分别为2.62%和0.80%。磷石膏的X射线衍射（XRD）图谱见图1。结合XRD分析结果，确认其主相为$CaSO_4 \cdot 2H_2O$。

试验使用的主要仪器包括：DELTA320型pH计、524G型恒温磁力搅拌器、XMTD-8222型电热恒温鼓风干燥箱、美普达P5型紫外分光光度计，以及ZQTY-70V型恒温振荡培养箱。

**表1 磷石膏样品的主要化学成分**

**Table 1 Main chemical compositions of phosphogypsum sample** /%

| 成分 | CaO | $SO_3$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | $K_2O$ | $Na_2O$ | $TiO_2$ | $P_2O_5$ | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 29.32 | 40.49 | 5.61 | 0.62 | 0.32 | 0.12 | 0.12 | 0.07 | 0.09 | 2.62 | 0.80 |

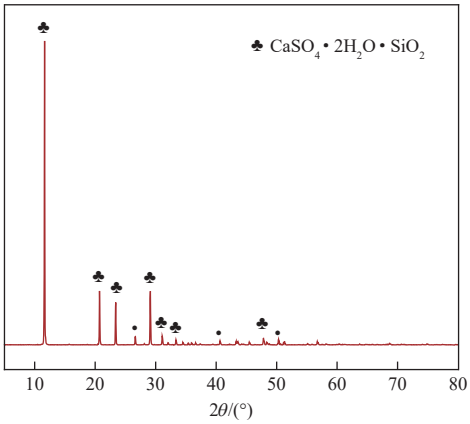



**图1 磷石膏的XRD图谱**

**Fig. 1 XRD pattern of phosphogypsum sample**

### 1.2 试验方法

1.2.1 可溶性磷固化试验

称取一定量磷石膏，与设定用量的七水硫酸亚铁和碳酸钙混合，加入适量去离子水，置于烧杯中。将烧杯置于磁力搅拌器上，在一定温度下反应3 h，随后进行陈化处理。通过调整七水硫酸亚铁与碳酸钙的用量、反应温度及陈化时间，探究其对磷石膏中可溶性磷固化率的影响。反应结束后，将所得固体于40 ℃下烘干，并进行XRD物相分析。

1.2.2 可溶性磷浸出试验

称取固化后的磷石膏样品，经恒温干燥后测定含水率。按固液比1∶10加入去离子水，置于烧杯中，于室温条件下以150 $r \cdot min^{-1}$振荡8 h，随后静置16 h。收集滤液，依据GB/T 11893—1989《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》，采用紫外分光光度计测定浸出液中磷的浓度，并同步测定浸出液的pH值。

1.2.3 单因素条件试验

取30 g磷石膏与30 mL去离子水调成浆体，投加Fe-Ca固磷剂，在磁力搅拌器上搅拌反应后进行陈化。分别考察七水硫酸亚铁用量（0、2%、4%、6%、8%、10%）、碳酸钙用量（0、1.5%、3%、4%、6%、8%）、陈化时间（0、6、12、24、48、72 h）以及反应温度（20、30、40、50、60、70 ℃）对磷石膏中可溶性磷含量的影响。

1.2.4 正交优化试验

在固定陈化时间为24 h的条件下，设计三因素三水平正交试验，以优化固化工艺。七水硫酸亚铁用量：2%、4%、6%，碳酸钙用量：2%、4%、6%，反应温度：30、50、70 ℃。

1.2.5 $\beta$-半水石膏制备

分别称取2 kg固化前与固化后的磷石膏，置于高温烘箱中，在170 ℃下煅烧2 h，制备$\beta$-半水石膏粉。将石膏粉与适量水混合，使用水泥砂浆搅拌机搅拌均匀，形成浆体。随后将浆体注入40 mm × 40 mm × 160 mm的矩形模具中，在实验室环境中静置24 h后脱模。脱模后的试块置于20±2 ℃、湿度90%±5%的条件下养护72 h。最后，使用YAW-300C型自动压力试验机（济南永邦试验仪器有限公司）测试试块的力学强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 药剂对比试验

对比了石灰、碳酸钙、七水硫酸亚铁及Fe-Ca复配药剂（用量均为4%）对磷石膏中可溶磷固化效果及体系pH值的影响，结果如图2所示。传统固化剂石灰表现出较高的磷固化效率（>98%），固化后磷石膏pH值为8.1。单独使用七水硫酸亚铁或碳酸钙时，磷固化效率均较低，无法满足固化要求。而七水硫酸亚铁与碳酸钙复配使用后，磷固化效率显著提高（>99%），固化后磷石膏pH值为5.1，这表明Fe-Ca复配具有协同作用，能够实现磷石膏中可溶磷的高效固化。

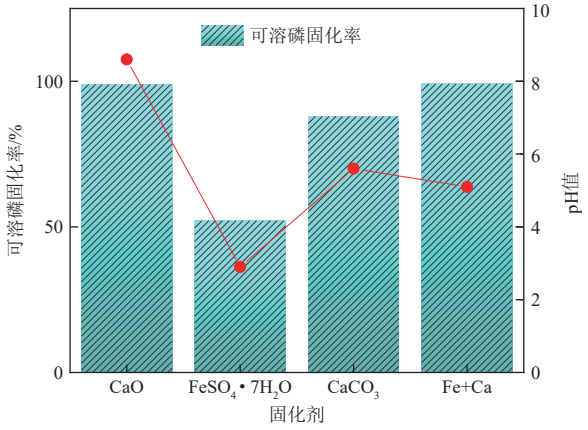



**图2 固化药剂对磷石膏可溶磷固化率和pH值的影响**

**Fig. 2 Effects of solidification agents on the solidification rate and pH of soluble phosphorus in phosphogypsum**

### 2.2 单因素条件试验

磷石膏的磷固化过程受七水硫酸亚铁用量、碳酸钙用量、反应温度和陈化时间等因素影响，因此对上述条件进行单因素优化试验。图3展示了各因素对可溶磷固化率及pH值的影响（(a)：七水硫酸亚铁用量；(b)：碳酸钙用量；(c)：陈化时间；(d)：反应温度）。单因素试验的基准条件为：七水硫酸亚铁用量4%、碳酸钙用量3%、反应温度50 ℃、陈化时间24 h。

从图3(a)可以看出，随着七水硫酸亚铁用量的增

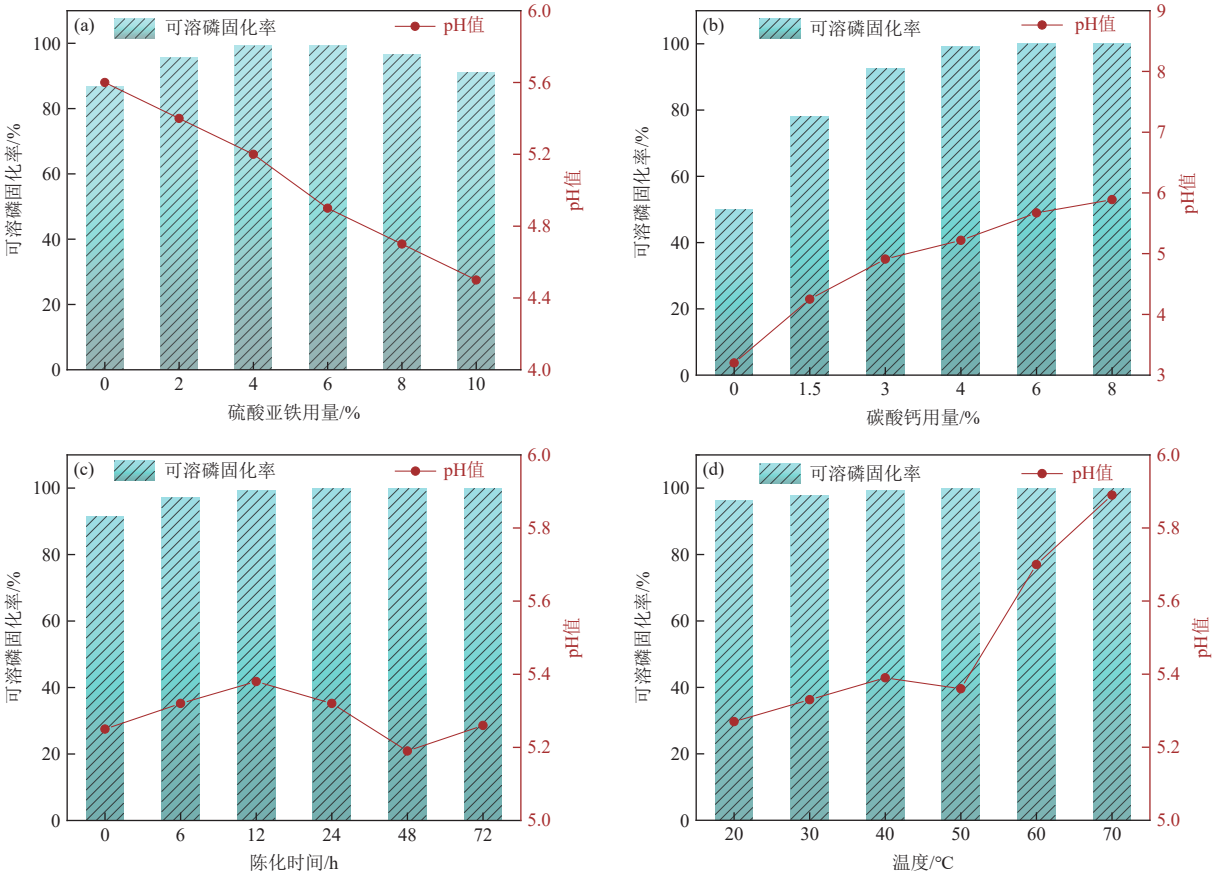



**图3 工艺参数对磷石膏可溶磷固化率及pH值的影响**

**Fig. 3 Effects of process parameters on the solidification rate and pH of soluble phosphorus in phosphogypsum**

加，磷固化率逐渐提高。七水硫酸亚铁用量从0增至4%时，磷固化率从93.5%升至99.9%；继续增加七水硫酸亚铁用量，磷固化率缓慢下降。同时，pH值随七水硫酸亚铁用量增加而降低，这是由于$Fe^{2+}/Fe^{3+}$水解产生$H^+$，过量酸性条件反而会抑制磷的固化。图3(b)表明，碳酸钙的添加对磷固化效果影响显著：未添加碳酸钙时磷固化效率较低；碳酸钙用量从1.5%增至4%，固化率从94.5%提高到99.1%；继续增加至8%，固化率可达99.9%。陈化时间对固化效果影响明显（图3(c)）。未陈化时磷固化率仅为90%，陈化24 h后可达99.9%，说明搅拌生成的磷酸铁前驱体需经充分陈化才能转化为稳定产物，这与文献报道的“碳酸钙表面沉淀的铁氧化物需长时间反应才能有效固定磷”结论一致[9]。反应温度的影响如图3(d)所示。较高温度有利于磷铁复合物的生成，促进固化反应。原始磷石膏pH值约为2.8，碳酸钙可中和残余酸，使体系pH值升至5以上。该pH值条件的溶液可直接用于新一批磷石膏的调浆固化，实现工艺废水零排放。

### 2.3 正交优化试验

正交试验结果见表2~3。极差分析表明，各因素对固化率影响的显著程度依次为：碳酸钙用量>七水硫酸亚铁用量>陈化时间>反应温度。由此确定最优条件为：七水硫酸亚铁用量4%、碳酸钙用量4%、陈化时间24 h、反应温度50 ℃。

**表2 正交优化试验表**

**Table 2 Orthogonal optimization experiment table**

| 编号 | 七水硫酸亚铁/% | 碳酸钙/% | 陈化时间/h | 反应温度/℃ | pH值 | 可溶磷含量/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 1 | 12 | 40 | 4.26 | 0.66 |
| 2 | 2 | 2.5 | 36 | 50 | 5.88 | 0.46 |
| 3 | 2 | 4 | 24 | 60 | 6.25 | 0.12 |
| 4 | 4 | 1 | 36 | 60 | 4.93 | 0.19 |
| 5 | 4 | 2.5 | 24 | 40 | 5.55 | 0.06 |
| 6 | 4 | 4 | 12 | 50 | 5.42 | 0.06 |
| 7 | 6 | 1 | 24 | 50 | 4.01 | 0.53 |
| 8 | 6 | 2.5 | 12 | 60 | 4.14 | 0.46 |
| 9 | 6 | 4 | 36 | 40 | 5.23 | 0.12 |

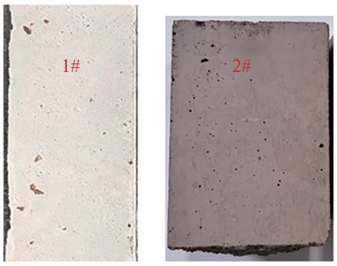
### 2.4 $\beta$-半水石膏制备及性能

将固化前后的磷石膏在170 ℃下焙烧2 h，制备$\beta$-半水石膏粉，按国家标准方法成型并测试其力学性能，实物样块如图4所示。未加固化剂的样块呈灰白色，而添加固化剂的样块因七水硫酸亚铁氧化呈现暗棕色。

**表3 正交试验极差分析表**

**Table 3 Range analysis table of orthogonal experiments**

| 项目 | 七水硫酸亚铁 | 碳酸钙 | 陈化时间 | 反应温度 |
|---|---|---|---|---|
| $K_1$ | 1.25 | 1.39 | 1.2 | 0.85 |
| $K_2$ | 0.32 | 0.99 | 0.72 | 0.59 |
| $K_3$ | 0.84 | 0.31 | 0.77 | 0.78 |
| $\overline{K_1}$ | 0.42 | 0.46 | 0.40 | 0.28 |
| $\overline{K_2}$ | 0.11 | 0.33 | 0.24 | 0.20 |
| $\overline{K_3}$ | 0.37 | 0.10 | 0.26 | 0.26 |
| $R$ | 0.31 | 0.36 | 0.16 | 0.08 |
| 因素每水平试验重复数 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 因素最佳水平 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 因素主次顺序 | 碳酸钙-七水硫酸亚铁-陈化时间-反应温度 | | | |




(a)未固化磷石膏 (b)固化磷石膏

**图4 石膏固化前后实物照片**

**Fig. 4 Physical photographs of gypsum before and after solidification**

表4给出了磷石膏可溶磷固化对磷石膏制备建筑石膏性能的影响。由表4可知，磷石膏可溶磷固化后，标准稠度用水量增加了1%，初凝和终凝时间有所增加，抗压和抗折强度明显提升，抗压强度由6.5 MPa升高至8.6 MPa，抗折强度由3.9 MPa升高至5.4 MPa，表明磷石膏可溶磷固化后显著提升了磷石膏制备建筑石膏产品的性能。

**表4 磷石膏磷固化对建筑石膏产品性能的影响**

**Table 4 Effect of phosphorus solidification in phosphogypsum on the performance of construction gypsum products**

| 材料 | 标准稠度用水量/% | 凝结时间/min | | 3 d强度/MPa | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 初凝时间 | 终凝时间 | 抗折 | 抗压 |
| 原始磷石膏 | 59 | 4.03 | 4.90 | 3.90 | 6.50 |
| 固化磷石膏 | 60 | 5.45 | 6.40 | 5.40 | 8.60 |

## 2.5 固化机理分析

根据试验结果和已有的参考文献[9,10]，可对磷固化机理做如下的分析。磷石膏可溶磷的固化过程始于$CaCO_3$的缓慢溶解（式（1））和碳酸根离子$CO_3^{2-}$的水解作用（式（2））。硫酸亚铁水解产生Fe(Ⅱ)氢氧化物的沉淀随之产生，这是由于方程式（2）中生成的$OH^-$与Fe(Ⅱ)结合的结果（式（3））。在此过程中，Fe(Ⅱ)会被水中溶解氧氧化成Fe(Ⅲ)（式（4）），总反应过程见方程式（5）。新生成的$Fe^{3+}$沉淀易水解释放$Fe^{3+}$（式（6）），进而与$PO_4^{3-}$结合形成稳定磷酸铁沉淀（式（7））。此外，也可能存在$Fe^{2+}$或$Ca^{2+}$与$PO_4^{3-}$直接沉淀的路径。

$$CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+}+CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$CO_3^{2-}+H_2O \rightarrow OH^-+HCO_3^- \quad (2)$$

$$Fe^{2+}+2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

$$Fe(OH)_2+1/2O_2+1/2H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 \quad (4)$$

$$CaCO_3+Fe^{2+}+1/2O_2+1/2H_2O \rightarrow Ca^{2+}+Fe(OH)_3+OH^-+2CO_2 \quad (5)$$

$$Fe(OH)_3 \rightarrow Fe^{3+}+OH^- \quad (6)$$

$$Fe^{3+}+PO_4^{3-} \rightarrow FePO_4 \quad (7)$$

固化后磷石膏的XRD图谱如图5所示。由图5可知，固化后磷石膏的主要物相为$CaSO_4 \cdot 2H_2O$和$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$，表明复合固化剂实现了可溶磷的高效固定。碳酸钙中和残余酸（式（8）），促使$H_2PO_4^-$逐步转化为$HPO_4^{2-}$（式（9）），并与$Ca^{2+}$形成难溶的磷酸氢钙（式（10））。体系pH值升高有利于磷酸钙盐的生成[11]。未检出明显磷酸铁结晶峰，可能因其含量低或以非晶态形式存在，说明磷主要以磷酸氢钙和非晶态磷酸铁形式被固定。

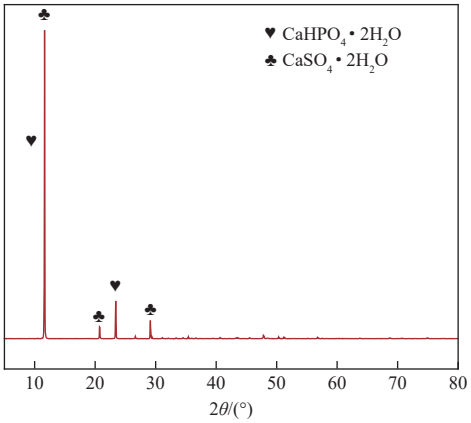



**图5 固化后磷石膏的XRD图谱**

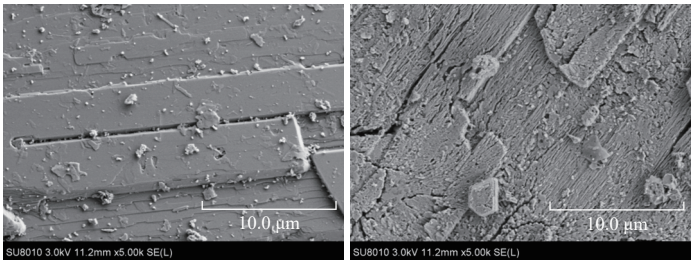
**Fig. 5 XRD pattern of solidified phosphogypsum**

$$CaCO_3+2H^+ \rightarrow Ca^{2+}+CO_2+H_2O \quad (8)$$

$$H_2PO_4^- \rightarrow H^++HPO_4^{2-} \quad (9)$$

$$HPO_4^{2-}+Ca^{2+} \rightarrow CaHPO_4 \quad (10)$$

图6为磷石膏固化前后的SEM照片。从图6可以看出，固化前石膏表面较平整、晶粒较大；固化后表面出现明显裂缝，晶粒崩解为细小颗粒。焙烧后，固化磷石膏所得粉体粒径更小，水化后石膏结构更致密，从而提升了制品力学性能。




(a)固化前 (b)固化后

**图6 磷石膏可溶磷固化前后的SEM图像**

**Fig. 6 SEM images of phosphogypsum before and after soluble phosphorus solidification**

## 3 结论

1）Fe-Ca复合固化法，在实现磷石膏中可溶磷高效固定的同时，显著提升了其资源化利用价值，为磷石膏的规模化、无害化与高值化利用提供了理论与技术支撑。

2）优化工艺可实现磷的高效稳定固化。在磷石膏中添加4%七水硫酸亚铁与4%碳酸钙，以50 ℃搅拌反应3 h后陈化24 h，可将其可溶性磷的浸出浓度降至0.02 mg·$L^{-1}$以下，固化率达到99.99%。该工艺条件高效、稳定，为磷石膏的无害化处理提供了可靠的技术方案。固化处理显著提升建筑石膏制品性能。可溶性磷的固化有效改善了磷石膏的胶凝特性。相较于未处理样品，固化后磷石膏制备的$\beta$-半水石膏标准稠度需水量仅增加约1%，但力学性能显著提高，其抗压强度由6.5 MPa提升至8.6 MPa，抗折强度由3.9 MPa提升至5.4 MPa，产品实用性得到增强。

3）固化机理以化学沉淀与非晶态包裹为主。XRD与SEM分析表明，固化过程主要通过生成磷酸氢钙（$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$）与非晶态磷酸铁实现磷的稳定固定。这两种产物的协同作用不仅高效固定了可溶性磷，还细化了石膏晶粒结构，从而提升了最终石膏制品的水化致密性与力学强度。

## 参考文献

[1] 赵荣艳, 李天恩, 李麟. 硝酸浸出—沉淀法梯级提取磷精矿中的磷和稀土[J]. 矿冶, 2023, 32(2): 113-116.
ZHAO R Y, LI T E, LI L. Step extraction of rare earth and phosphorus from phosphorus concentrate by nitric acid leaching-precipitation method[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(2): 113-116.

[2] 张华, 杨稳权, 李海兵, 等. 云南某磷酸工业副产石膏提纯试验[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 27-32.
ZHANG H, YANG W Q, LI H B, et al. Experimental on purification of gypsum, a by-product of phosphoric acid industry in Yunnan[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 27-32.

[3] 周武, 李杨, 冯伟光, 等. 磷石膏的综合利用及其在建筑材料领域的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 534-542.
ZHOU W, LI Y, FENG W G, et al. Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum and its application in the field of building materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(2): 534-542.

[4] 陈家灵, 谢海云, 张培, 等. 磷石膏治理重金属废水的研究进展[J]. 矿冶, 2022, 31(5): 80-87.
CHEN J L, XIE H Y, ZHANG P, et al. Research progress on the treatment of heavy metal wastewater by phosphogypsum[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(5): 80-87.

[5] CAI Q, JIANG J, MA B, et al. Efficient removal of phosphate impurities in waste phosphogypsum for the production of cement[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: 146600.

[6] JOSE S, ANDRAD N, JESSICA D B, et al. Influence of phosphogypsum purification with lime on the properties of cementitious matrices with and without plasticizer[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 123935.

[7] BIANCA R S C, ANTONIO G M, PALOMA P, et al. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: limits and potential in eco-efficient construction[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102506.

[8] CHEN X, WANG Q, DING Y, et al. Influence mechanism of alkaline environment on the hydration of hemihydrate phosphogypsum: a comparative study of various alkali[J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129070.

[9] LI Y, HE X, HU H, et al. Enhanced phosphate removal from wastewater by using in situ generated fresh trivalent Fe composition through the interaction of Fe(Ⅱ) on $CaCO_3$[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 221: 38-44.

[10] WU F, HE M, QU G, et al. Highly targeted stabilization and release behavior of hazardous substances in phosphogypsum[J]. Minerals Engineering, 2022, 189: 107866.

[11] WU F, CHEN B, QU G, et al. Harmless treatment technology of phosphogypsum: directional stabilization of toxic and harmful substances[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 311: 114827.