文章编号:1674-2869(2025)02-0181-06

# 磷石膏中可溶磷、可溶氟的水洗脱除研究

徐思婷[1],梁处芳[1],张瞿天[1],田 梦[1],张立森[1],池汝安[1,2],周 芳*[1]
1.武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074;
2.湖北三峡实验室,湖北 宜昌 443007

**摘 要**:为了将磷化工行业在磷酸生产过程中产生的工业固体废弃物磷石膏中的磷、氟等有害杂质脱除,使其得到更好的资源化再利用,采用水洗法对磷石膏中可溶磷和可溶氟进行脱除,分别探究液固比、水洗时间和水洗温度对可溶磷和可溶氟脱除率的影响,采用SPSS软件设计正交试验,探讨多因素共同作用下的水洗优化工艺条件。正交试验结果表明,液固比2∶1,水洗温度70 ℃,水洗时间5 min时,脱除效果最优,可溶磷脱除率为94.82%,可溶氟脱除率为89.40%,处理后磷石膏中可溶磷和可溶氟的质量分数分别从0.34%和0.84%降为0.089%和0.044%,符合《磷石膏》(GB/T 23456—2018)中一级品的指标要求。

**关键词**:磷石膏;水洗法;正交实验;脱除率
**中图分类号**:TQ177.375 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202304022

# Removal of soluble phosphorus and fluorine from phosphogypsum by water washing

*XU Siting*[1], *LIANG Chufang*[1], *ZHANG Qutian*[1], *TIAN Meng*[1], *ZHANG Lisen*[1], *CHI Ru'an*[1,2], *ZHOU Fang**[1]
1. School of Resources Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang 443007, China

**Abstract**: Phosphogypsum is an industrial solid waste produced by the phosphorus chemical industry in the process of phosphoric acid production. Removal of phosphorus, fluorine and other harmful impurities from phosphogypsum can enable better resource utilization. In this study, the effects of liquid-to-solid ratio, washing time and washing temperature on the removal rates of soluble phosphorus and soluble fluorine in phosphogypsum were investigated in accordance with the washing process, and orthogonal experiments were designed using the SPSS software to obtain the optimized process conditions under the combined effect of multiple factors. The results showed that under liquid-to-solid ratio of 2∶1, washing temperature of 70 ℃, and washing time of 5 min, the best removal effect was achieved: the removal rates of soluble phosphorus was 94.82% and that of soluble fluorine 89.40%. The mass fraction of soluble phosphorus and soluble fluorine in phosphogypsum was reduced from 0.34% and 0.84% to 0.089% and 0.044%, respectively, meeting the grade one standards of "Phosphogypsum" in GB/T 23456—2018.

**Keywords**: phosphogypsum; water washing; orthogonal experiment; removal rate

我国磷石膏主要来源于磷酸湿法生产工业。我国磷矿资源较为丰富,主要分布在长江流域,磷石膏的大量堆存是导致长江流域总磷污染的重要原因之一[1]。磷石膏既是固废污染物,也是可再

**收稿日期**:2023-04-13
**基金项目**:湖北省技术创新计划项目重点研发专项(2023BCB114);湖北三峡实验室创新基金(SC240001、SC211013);湖北省青年拔尖人才计划项目
**作者简介**:徐思婷,本科生。Email:2807286839@qq.com
***通信作者**:周 芳,博士,教授。Email:18995614810@163.com
**引文格式**:徐思婷,梁处芳,张瞿天,等.磷石膏中可溶磷、可溶氟的水洗脱除研究[J].武汉工程大学学报,2025,47(2):181-186.

次循环利用的资源[2]。湿法生产每1 t磷酸将产生4~6 t的磷石膏副产物[2-4]。据统计,全球的磷石膏的堆存量已超过60亿t,并且以每年2亿t~3亿t的排放量增加,而综合利用率低于40%[5-7]。我国磷石膏年产量约占全球总年产量的40%,堆存量近4亿t,而利用率仅有33%左右[8-9]。大量的磷石膏堆存不仅占用土地资源,而且增大投资及运行成本,磷石膏中可溶磷、氟等有害杂质的长期堆存会污染地下水和土壤,危害生态环境,影响磷化工企业和行业的可持续发展[10-12]。

磷石膏主要成分是$CaSO_4·2H_2O$,具有产量大、成分复杂等特征。磷石膏中的杂质可分为3类:含磷杂质、含氟杂质及有机物杂质。磷石膏中含磷杂质主要是可溶性磷($H_3PO_4$、$H_2PO_4^-$、$HPO_4^{2-}$和$PO_4^{3-}$)、共晶磷($CaSO_4•2H_2O$和$CaHPO_4•2H_2O$)及难溶性磷[$Ca_3(PO_4)_2$];磷石膏中含氟杂质主要是可溶性氟(NaF和KF)和难溶性氟($Na_3AlF_6$、$CaSiF_6$、$CaF_2$)[13-14]。磷、氟杂质中可溶磷和可溶氟对磷石膏的性能影响最大,磷石膏发生水化反应时,可溶磷与钙离子发生反应,生成难溶的$Ca_3(PO_4)_2$,附着在磷石膏的表面,阻止其进一步水化,并且,$Ca_3(PO_4)_2$呈酸性,提高了磷石膏凝结时间,降低了磷石膏强度,使磷石膏结构更疏松。可溶氟会对磷石膏产生促凝作用,当质量分数超过0.3%,材料强度显著降低。磷石膏中的可溶磷和可溶氟会对磷石膏的性能产生较大影响,因此脱除磷石膏中可溶磷、可溶氟是磷石膏资源化利用的前提[15]。

目前,磷石膏净化除杂的预处理方法主要有石灰中和法、水洗法、浮选法、酸浸法、煅烧法、筛分法等,这些除杂净化预处理方法各有利弊[16-17]。水洗法是利用一定量的水反复对磷石膏原料进行水洗处理,以此达到消除可溶性杂质等有害物质对磷石膏的性能影响[18]。李展等[16]采用石灰中和法和酸浸法处理磷石膏,石灰中和法虽然能有效脱除磷石膏中的可溶磷、可溶氟,但其陈化时间(24 h)较长,影响其处理效率。酸浸法能有效脱除磷石膏中的可溶磷、可溶氟以及共晶磷,但操作存在危险性,且投入成本高,产生的氟化氢会污染环境。筛分法仅适用于杂质分布极不均匀的磷石膏,在实际应用中很少采用。煅烧法能有效去除磷石膏中的共晶磷,但是存在氟化氢挥发腐蚀设备、污染环境等问题[18]。国内外已有研究表明,水洗法相对于筛分法和浮选法更有技术优势[19-20]。水洗虽不能除去磷石膏中的共晶磷,但现有研究表明,共晶磷对磷石膏性能影响程度较可溶磷弱,对磷石膏的资源利用不会产生明显限制,水洗是消除有害杂质影响的有效方式[21-22]。传统的水洗工艺水耗量大,易导致二次处理工序,因此,急需优化该工艺,保证可溶磷、可溶氟脱除效果的同时减少用水量及水洗次数,从而提高经济效益。

在前期研究的基础上,本文分别探究液固比、水洗时间、水洗温度等单一因素对磷石膏中可溶磷和可溶氟脱除率的影响。然而单一因素并不能达到较高的脱除率,因此考虑多因素间的相互作用,采用SPSS软件,设计三因素三水平的$L_9(3^3)$正交实验,得到多因素共同作用下的水洗优化工艺条件,优化水洗工艺,提高可溶磷和可溶氟脱除率的同时节约水资源,减少能耗,为研究磷石膏中可溶磷和可溶氟的脱除、磷石膏无害化处理提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 样 品

实验所用磷石膏样品为某化工厂磷石膏堆场现场随机采集,呈灰色,粉末状和块状,经X射线荧光光谱仪测定,其化学成分如表1所示,其主要成分为CaO和$SO_3$,可溶磷、可溶氟和附着水的质量分数分别为0.34%、0.84%、8.61%。经三相分析测试得磷石膏中含有质量分数88.320%的二水石膏、0.902%的半水石膏,不含可溶性无水石膏。对磷石膏样品进行X射线衍射表征分析,结果见图1。由图1可知,磷石膏的主要组成是石膏($CaSO_4·2H_2O$)和石英($SiO_2$)。扫描电子显微镜表征测得磷石膏微观结构如图2所示,由图2可知磷石膏晶体主要呈片状。

表1 磷石膏主要化学组成

Tab. 1 Main chemical composition of phosphogypsum %

| 化学成分 | 质量分数 | 化学成分 | 质量分数 |
|---|---|---|---|
| CaO | 39.33 | $Na_2O$ | 0.34 |
| $Fe_2O_3$ | 0.56 | $P_2O_{5总}$ | 0.97 |
| $Al_2O_3$ | 0.29 | $P_2O_{5水溶}$ | 0.34 |
| $SiO_2$ | 8.01 | $F_{总}$ | 0.87 |
| $SO_3$ | 47.49 | $F_{水溶}$ | 0.84 |
| MgO | 0.12 | 附着水 | 8.61 |

### 1.2 实验方法

1.2.1 单因素实验 准确称取10.0 g磷石膏于锥形瓶中,向锥形瓶中加入蒸馏水,配制成磷石膏水洗原样,将装有磷石膏水洗原样的锥形瓶放在磁力搅拌器上,设定不同的液固比、水洗时间和水洗

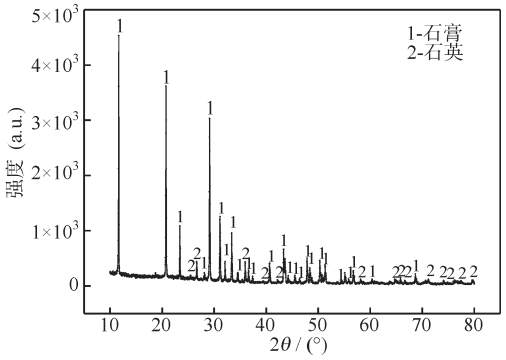


**图1　磷石膏XRD分析**

Fig. 1　XRD analysis of phosphogypsum

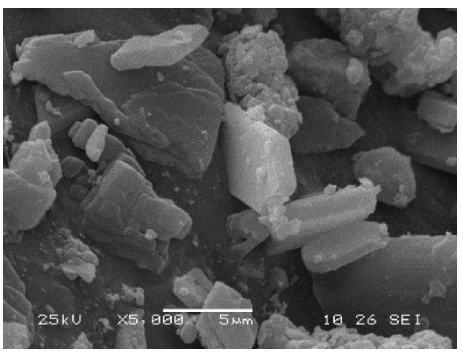


**图2　磷石膏SEM图**

Fig. 2　SEM images of phosphogypsum

温度，进行搅拌，搅拌完成后，采用真空泵抽滤，将抽滤后的磷石膏水洗原样放入真空干燥箱内，在温度为42 ℃的条件下烘干，最后参照《磷石膏中磷、氟的测定方法》(JC/T 2073—2011)对烘干后的磷石膏进行称量、制样，测定水洗后磷石膏中可溶磷、可溶氟的含量并计算可溶磷、可溶氟的脱除率。

1.2.2　正交实验　根据单因素实验结果，以磷石膏中可溶磷、可溶氟的脱除率为考察指标，利用SPSS软件设计$L_9(3^3)$正交实验，优化水洗工艺条件，提高可溶磷、可溶氟脱除率。实验水平设置如表2所示。

**表2　磷石膏可溶磷、可溶氟脱除实验正交因素水平表**

Tab. 2　Orthogonal experimental factor level of removing soluble phosphorus and soluble fluoride from phosphogypsum

| 水平 | 液固比*($A$) | 水洗时间($B$) / min | 水洗温度($C$) / ℃ |
|---|---|---|---|
| 1 | 1∶1 | 5.0 | 30 |
| 2 | 2∶1 | 17.5 | 50 |
| 3 | 3∶1 | 30.0 | 70 |

注：*单位为mL/g，全文同。

### 1.3　分析方法

1.3.1　标准曲线的绘制　参照JC/T 2073—2011中“磷钒钼黄双波长光度法”绘制磷标准曲线，吸光度差$\triangle A_i$为纵坐标，即$y$，以磷含量为横坐标，即$x$，得磷标准曲线方程为：$y = 2.6213 \times 10^{-1}x + 3.44 \times 10^{-3}$($R^2$=99.90%)。

参照JC/T 2073—2011中“离子选择电极法”绘制氟标准曲线，以电位值为纵坐标，即$y$，氟含量为横坐标，即$x$，得氟标准曲线方程为：$y$=−53.707 53$x$+180.220 25($R^2$=99.95%)。

1.3.2　可溶磷、可溶氟脱除率的计算　参照JC/T 2073—2011测定磷石膏中磷、氟杂质含量$x_1$、$x_2$，根据1.3.1所获得磷标准曲线和氟标准曲线分别测试磷石膏中可溶磷、可溶氟含量。经分析，每10 g磷石膏原样中总可溶磷、可溶氟含量分别为0.315 0、1.530 1 g。则可溶磷脱除率$\alpha$、可溶氟脱除率$\beta$可用下述公式计算：

$$\alpha = (0.3150 - x_1)/0.3150 \times 10^{-1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\beta = (1.5301 - x_2)/1.5301 \times 100\% \quad (2)$$

## 2　结果和讨论

### 2.1　水洗工艺对磷石膏可溶磷、可溶氟脱除率的影响

2.1.1　液固比对磷石膏可溶磷、可溶氟脱除率的影响　在水洗温度为室温(约为25 ℃)，水洗时间为10 min，液固比分别为1.0∶1.0、1.5∶1.0、2.0∶1.0、2.5∶1.0、3.0∶1.0的条件下对磷石膏进行水洗，研究液固比对可溶磷和可溶氟脱除率的影响，结果如图3所示。由图3可以看出，磷石膏中可溶磷、可溶氟的脱除率随液固比的增大而稳定提高，增幅均较为稳定，且可溶氟脱除率的增幅明显大于可溶磷脱除率的增幅。液固比从1.0∶1.0增大到3.0∶1.0时，可溶磷脱除率从59.23%提高到74.98%，可溶氟的脱除率从33.74%提高到79.79%。其原因可能是水洗过程中，磷石膏中可溶性磷和可溶性氟因易溶于水而进入水中被除去，理想的水洗脱除可溶磷、可溶氟过程是水洗水类似木塞一样将

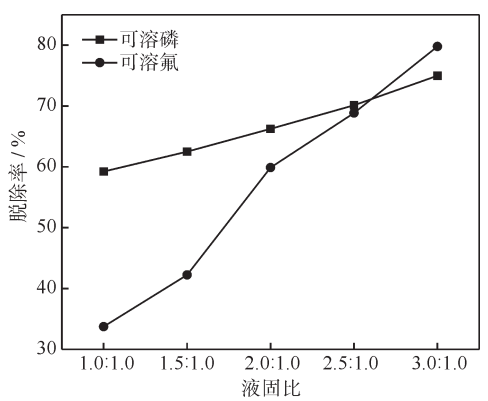


**图3　液固比对脱除率的影响**

Fig. 3　Effect of liquid-solid ratio on removal efficiency

磷石膏中的可溶磷氟全部置换出而不与磷酸混合。理论用水的体积与磷石膏中磷酸体积相等，但实际用水体积大于磷酸体积，其原因是：(1)在水洗过程液固界面处，水与磷酸一定程度地混合；(2)磷石膏表面的磷酸膜层难以被洗涤。所以，为了彻底洗涤出磷石膏中的可溶磷、可溶氟，实际洗涤水量远大于理论洗涤水量，因此合适的液固比洗涤能更有效地去除磷石膏中的可溶磷、可溶氟。

2.1.2 *水洗时间对磷石膏可溶磷、可溶氟脱除率的影响* 在水洗温度为室温(约为25 ℃)，液固比为3.0∶1.0，水洗时间分别为5.0、8.0、12.0、17.5、23.0、30.0 min的条件下对磷石膏进行水洗，研究水洗时间对可溶磷和可溶氟脱除率的影响，结果如图4所示。由图可以看出，随着水洗时间的增加，脱除率也逐渐提高。当水洗时间从5.0 min增加到30.0 min，可溶磷的脱除率由66.25%提高到75.33%，可溶氟的脱除率从61.39%提高到76.92%。当水洗时间小于17.5 min时，可溶磷、可溶氟的脱除率随水洗时间的增加而快速提高，当水洗时间大于17.5 min时，脱除率的增幅开始趋于平缓，表明磷石膏中可溶磷、可溶氟已基本溶于水，考虑到工业上大规模处理磷石膏时的效率，水洗时间选用17.5 min左右合适。

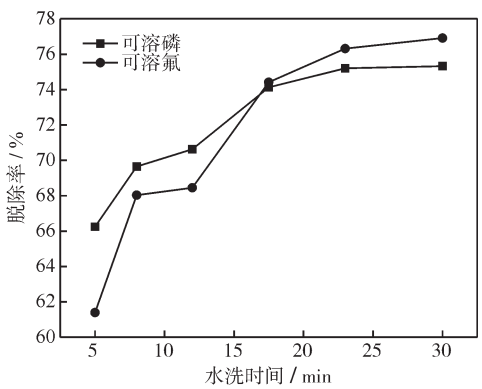


**图4 水洗时间对脱除率的影响**

Fig. 4 Effect of washing time on removal efficiency

2.1.3 *水洗温度对磷石膏可溶磷、可溶氟脱除率的影响* 在水洗时间为17.5 min，液固比为3.0∶1.0，水洗温度分别为30、40、50、60、70、80 ℃的条件下对磷石膏进行水洗，研究水洗温度对可溶磷和可溶氟脱除率的影响，结果如图5所示。由图5可以看出，可溶磷、可溶氟脱除率随水洗温度的升高而提高，当水洗温度由30 ℃增加到80 ℃时，可溶磷的脱除率从67.84%提高到91.46%，可溶氟的脱除率从67.06%提高到87.66%。其原因可能是，随着水洗温度的提高，与水接触的磷酸的温度也相应提高，可降低其黏度，使洗涤水能更高效地与之发生置换反应；并且，随着水洗温度的升高，可溶磷、可溶氟的溶解度也在提高，脱除率也更高。因此，磷石膏中可溶磷、可溶氟含量随水洗温度的提高而降低，磷石膏中可溶磷、可溶氟脱除率随水洗温度的提高而提高。

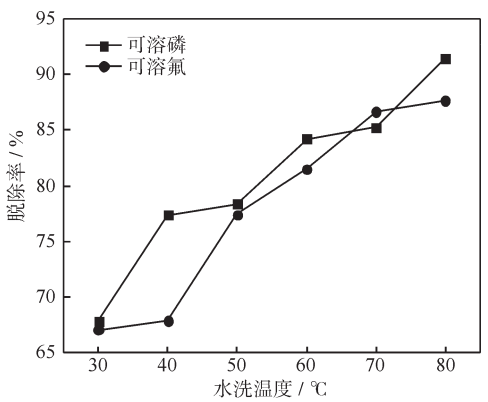


**图5 水洗温度对脱除率的影响**

Fig. 5 Effect of washing temperature on removal efficiency

## 2.2 正交实验结果与分析

在单因素实验基础上，采用$L_9(3^3)$正交实验设计研究液固比、水洗时间、水洗温度3个因素对水洗法脱除磷石膏中可溶磷、可溶氟脱除率的影响。考虑增大液固比带来的经济损耗、水资源损耗和后续废水处理，选用液固比1.0∶1.0、2.0∶1.0、3.0∶1.0进行正交实验，选用水洗时间5.0、17.5、30.0 min。考虑到提高温度所带来的经济能耗及脱除率提高的程度，选用水洗温度30、50、70 ℃。

正交实验结果见表3，实验结果的极差分析见表4，方差分析见表5。表4中极差$R$与表5中显著性所包含$P$值的波动幅度代表了实验因素对脱除率的影响程度，$R$值越大、$P$值越小代表因素对脱除率的影响越大。因此，实验因素对可溶磷脱除率的影响为水洗温度>液固比>水洗时间；实验因素对可溶氟脱除率的影响为液固比>水洗温度>水洗时间。综上可知，对水洗法脱除磷石膏中可溶性有害杂质效果影响较大的是液固比和水洗温度，影响最小的是水洗时间。经$k$值分析得到水洗法处理磷石膏的优化工艺条件为：液固比$k_2$、水洗时间$k_1$、水洗温度$k_3$，即液固比2.0∶1.0，水洗时间5.0 min，水洗温度70 ℃。

在正交实验得出的优化工艺条件下，重复3次实验，实验结果如表6所示，由3次实验结果可看出优化工艺具有一定的稳定性，正交实验结果具有重现性。由验证实验得出可溶磷的脱除率可达到94.82%，可溶氟的脱除率可达到89.40%。

表3　正交实验结果

Tab. 3　Orthogonal experiment results

| 实验号 | A | B | C | 可溶磷脱除率α/% | 可溶氟脱除率β/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 67.11 | 62.05 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 77.14 | 65.91 |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 64.92 | 62.54 |
| 4 | 2 | 1 | 3 | 83.33 | 81.27 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 74.11 | 71.52 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 72.85 | 70.79 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 74.31 | 71.50 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 76.12 | 69.90 |
| 9 | 3 | 3 | 3 | 94.73 | 89.52 |

表4　正交实验极差分析

Tab. 4　Range analysis of orthogonal

| 因素 | 可溶磷脱除率α | | | 可溶氟脱除率β | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | A | B | C |
| $K_1$ | 209.17 | 224.75 | 216.08 | 190.5 | 214.82 | 202.74 |
| $K_2$ | 230.29 | 227.37 | 213.34 | 223.58 | 207.33 | 205.56 |
| $K_3$ | 245.16 | 232.50 | 255.20 | 230.92 | 222.85 | 236.70 |
| $k_1$ | 69.72 | 74.92 | 72.03 | 63.50 | 71.61 | 67.58 |
| $k_2$ | 76.76 | 75.79 | 71.11 | 74.53 | 69.11 | 68.52 |
| $k_3$ | 81.72 | 77.50 | 85.07 | 76.97 | 74.28 | 78.90 |
| $R$ | 12.00 | 2.58 | 13.95 | 13.47 | 5.17 | 11.32 |
| 水平主次 | 3>2>1 | 3>2>1 | 3>1>2 | 3>2>1 | 3>1>2 | 3>2>1 |

注:$K_1$、$K_2$、$K_3$为每个因素在不同水平下的指标总和。

表5　正交实验方差分析

Tab. 5　Variance analysis of orthogonal

| 因素 | 可溶磷脱除率α | | | 可溶氟脱除率β | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | A | B | C |
| 平方和 | 218.05 | 10.36 | 365.571 | 309.104 | 40.161 | 236.77 |
| 均方 | 109.025 | 5.18 | 182.786 | 154.552 | 20.081 | 118.385 |
| $F$ | 7.273 | 0.346 | 12.194 | 8.181 | 1.063 | 6.266 |
| $P$ | 0.121 | 0.743 | 0.076 | 0.109 | 0.485 | 0.138 |

表6　正交验证实验结果

Tab. 6　Results of the orthogonal validation experiment　%

| 类别 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| 可溶磷脱除率α | 93.35 | 94.82 | 92.87 |
| 可溶氟脱除率β | 88.22 | 89.40 | 89.12 |

## 3　结　论

(1)通过单因素实验和正交实验,研究了液固比、水洗时间、水洗温度对水洗法处理磷石膏中可溶磷、可溶氟脱除率的影响。结果表明,液固比和水洗温度对水洗法脱除磷石膏中可溶磷、可溶氟影响较大,水洗时间影响较小。

(2)水洗法脱除磷石膏可溶磷、可溶氟的优化工艺条件为:液固比2.0∶1.0,水洗温度70 ℃,水洗时间5 min,该条件下可溶磷的脱除率为94.82%,可溶氟的脱除率为89.40%。经检测,水洗处理后磷石膏中可溶磷和可溶氟的质量分数分别由0.34%和0.84%降为0.089%和0.044%,达到了GB/T 23456—2018中一级品的指标要求,满足石膏建材的使用要求。

**参考文献**


[1] 崔荣政, 白海丹, 高永峰, 等. 磷石膏综合利用现状及“十四五”发展趋势[J]. 无机盐工业,2022,54(4):1-4.

[2] 石聪聪. 国内磷石膏产业现状及热点专利分析[J]. 河南科技, 2022, 41(22):147-150.

[3] 张峻, 解维闵, 董雄波, 等. 磷石膏材料化综合利用研究进展[J]. 材料导报, 2023,37(16):220101110.

[4] LIU Y K, ZHANG Q L, CHEN Q S, et al. Utilisation of water-washing pre-treated phosphogypsum for cemented paste backfill[J]. Minerals, 2019, 9(3):175.

[5] CONTRERAS M, TEIXEIRA S, SANTOS G, et al. Influence of the addition of phosphogypsum on some properties of ceramic tiles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 175:588-600.

[6] 樊璐洋, 金子豪, 苏英, 等. 基于响应面法的半水磷石膏复合胶凝材料优化设计及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2):626-636.

[7] 唐湘平, 李超, 黄云阶, 等. 四川某地磷石膏开发利用试验[J]. 矿产综合利用, 2019, 40(5):28-31.

[8] 廖莹. 论磷石膏的综合利用现状及发展方向[J]. 化工设计, 2018, 28(4):27-29,1.

[9] 叶学东. 2019年我国磷石膏利用现状及形势分析[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(7):1-3.

[10] 何东升,张泽强,张汉泉,等. 磷石膏制取硫酸铵及其溶析结晶[J]. 武汉工程大学学报,2011(3):12-15.

[11] CONTRERAS M, PÉREZ L R, GÁZQUEZ M J, et al. Fractionation and fluxes of metals and radionuclides during the recycling process of phosphogypsum wastes applied to mineral $CO_2$ sequestration [J]. Waste Management, 2015, 45:412-419.

[12] YIN L L, GUO Q, WANG X, et al. Environmental filling materials based on phosphogypsum powder with municipal solid waste incineration ash [J]. Scientific Reports, 2023, 13:478.

[13] DU M X, WANG J M, DONG F Q, et al. The study on the effect of flotation purification on the performance of α-hemihydrate gypsum prepared from

phosphogypsum[J]. Scientific Reports,2022,12:95.
[14] 张婧,孟醒,唐永波,等.磷石膏杂质处理及综合利用研究进展[J].磷肥与复肥,2021,36(9):25-28.
[15] 杨敏,钱觉时,王智,等.杂质对磷石膏应用性能的影响[J].材料导报,2007(6):104-106.
[16] 李展,陈江,张覃,等.磷石膏中磷、氟杂质的脱除研究[J].矿物学报,2020,40(5):639-646.
[17] 徐威,董兵海,李静,等.磷石膏制备混凝土膨胀剂[J].化学与生物工程,2017,34(7):55-60.
[18] 张利珍,张永兴,吴照洋,等.脱除磷石膏中水溶磷、水溶氟的实验研究[J].无机盐工业,2022,54(4):40-45.
[19] 宋小霞,唐绍林,季强,等.磷石膏杂质的处理方法研究[J].中国环保产业,2018(10):68-70.
[20] LIU Y K,ZHANG Q L,CHEN Q S,et al. Utilisation of water-washing pre-treated phosphogypsum for cemented paste backfill[J]. Minerals,2019,9(3):175.
[21] ZHOU Y N,LI X B,SHI Y,et al. Reuse of phosphogypsum pretreated with water washing as aggregate for cemented backfill[J]. Scientific Reports,2022,12:16091.
[22] 刘猛,王庆,朱晨,等.水洗和粉磨预处理前后煅烧磷石膏的性能变化及应用[J].材料导报,2022,36(增刊1):22020111.

本文编辑:张 瑞

☆

(上接第126页)

[49] KYONG-CHOL K,NAM-IL K,TAO J,et al. Boron recovery from salt lake brine,seawater,and wastewater-a review[J]. Hydrometallurgy,2023,218:106062.
[50] NISHIHAMA S,SUMIYOSHI Y,OOKUBO T,et al. Adsorption of boron using glucamine-based chelate adsorbents[J]. Desalination,2013,310:81-86.
[51] 程怀德,张全有,李海民.卤水资源开发利用技术述评[J].盐湖研究,2003(3):51-64.
[52] LIN J Y,MAHASTI N N N,HUANG Y H. Recent advances in adsorption and coagulation for boron removal from wastewater:a comprehensive review[J]. Journal of Hazardous Materials,2021,407:124401.
[53] JAMIS P,MUHR H,PLASARI E. Boron removal from waste solutions using a multiophase co-precipitation process[J]. Chemical Engineering Transactions,2002,1:671-676.
[54] IRAWAN C,KUO Y L,LIU J C. Treatment of boron-containing optoelectronic wastewater by precipitation process[J]. Desalination,2011,280(1/2/3):146-151.
[55] TSAI H C,LO S L,KUO J. Using pretreated waste oyster and clam shells and microwave hydrothermal treatment to recover boron from concentrated wastewater[J]. Bioresource Technology,2011,102(17):7802-7806.
[56] 韩井伟.从提锂后盐湖卤水中萃取提硼的新工艺研究[D].西宁:中国科学院研究生院(青海盐湖研究所),2007.
[57] 施春辉,王立林,吕品,等.我国硼酸生产现状及发展建议[J].当代化工,2018,47(9):1948-1951.
[58] 张生宝,姜维帮,李顺营.盐湖卤水提硼技术[J].河南化工,2010,27(20):20-21.

本文编辑:张 瑞