

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.03.012

水洗—酸浸两步法回收黄磷电尘灰中的镓及浸出动力学

闫时雨^{1,2}, 纪文涛^{1,2}, 谢克强^{1,2}, 黄海艺^{1,2}, 袁晓磊^{1,2}

1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
2. 昆明理工大学 真空冶金国家工程实验室, 昆明 650093)

摘要:黄磷电尘灰作为黄磷生产过程中产生的固体废弃物,是一种回收镓的潜在资源。采用水洗—酸浸两步法回收电尘灰中的镓,首先通过水洗去除电尘灰中 KH_2PO_4 等水溶性物质,以达到富集镓的目的,其次,通过探究水洗后电尘灰酸浸过程中硫酸浓度、液固比、温度、时间等因素对镓浸出率的影响,确定回收镓的最优工艺参数,推导出酸浸过程的动力学模型。结果表明:在水洗最优条件下,电尘灰的失重率为 26.40%,镓的损失率仅为 4.65%,镓富集了约 1.3 倍;在硫酸浓度 3 mol/L、液固比 8:1、温度 80 °C、时间 120 min 的酸浸最优条件下,镓浸出率可达 95.28%;水洗后电尘灰的酸浸过程可以用收缩性未反应核模型描述,服从表面化学反应控制,表观活化能为 47.54 kJ/mol。

关键词:黄磷电尘灰;镓;酸浸;动力学;资源综合利用

中图分类号:TF843.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1744(2022)03-0086-10

Recovery of Gallium from Yellow Phosphorus Flue Dust by Water Washing-Acid Leaching and Its Leaching Kinetics

YAN Shiyu^{1,2}, JI Wentao^{1,2}, XIE Keqiang^{1,2}, HUANG Haiyi^{1,2}, YUAN Xiaolei^{1,2}

1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. National Engineering Laboratory of Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: As a solid waste generated during production of yellow phosphorus, yellow phosphorus flue dust (YFPD) is a potential resource for recovery of Ga. A two-step process of water washing and acid leaching was used to recover Ga from YFPD. First, water washing is used to remove KH_2PO_4 and other water-soluble substances in YFPD, so as to achieve the purpose of enriching Ga. Then, via exploring the effects of sulfuric acid concentration, ratio of liquid to solid, temperature and time on leaching rate of Ga in acid leaching process of water washed YFPD, the optimal process parameters for recovering Ga are determined, and the kinetic model of acid leaching process is deduced. The results show that under the optimal washing conditions, the weight loss rate of the dust is 26.40%, the loss rate of Ga is only 4.65%, and Ga is enriched about 1.3 times. Under the optimal conditions of sulfuric acid concentration of 3 mol/L, ratio of liquid to solid of 8:1, temperature of 80 °C and time of 120 min, the leaching rate

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51764033)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51764033)

作者简介: 闫时雨(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿法冶金, 镓的回收利用。

通信作者: 谢克强(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为湿法冶金, 硅冶金与硅材料、资源综合利用。

引用格式: 闫时雨, 纪文涛, 谢克强, 等. 水洗—酸浸两步法回收黄磷电尘灰中的镓及其浸出动力学[J]. 有色金属工程, 2022, 12(3): 86-95.

YAN Shiyu, JI Wentao, XIE Keqiang, et al. Recovery of Gallium from Yellow Phosphorus Flue Dust by Water Washing-Acid Leaching and Its Leaching Kinetics[J]. Nonferrous Metals Engineering, 20xx, 12(3): 86-95.

of gallium can reach 95.28%. The acid leaching process of YPFD after washing is consistent with the shrinking unreacted nuclear model, which obeys the surface chemical reaction control, and the apparent activation energy is 47.54 kJ/mol.

Key words: yellow phosphorus flue dust; gallium; acid leaching; kinetics; comprehensive utilization of resources

稀有金属镓及其化合物在半导体行业中的独特应用而受到广泛关注。许多半导体器件,如LED、高功率开关和射频集成电路等^[1]都由镓基化合物构成。目前,这些器件在高科技领域中发挥着不可替代的作用,包括5G通信、太阳能电池、低温合金、新能源^[2-5]等。因此,随着科学技术的发展,全球对镓的需求也越来越大,预计到2030年对镓的总需求将是2012年产量(175 t)的20倍^[6]。然而,镓在地壳中的丰度仅为0.0015%,几乎不存在镓的独立矿床^[7]。由于镓的化学性质和晶体结构与铝、锌相似,自然界中的镓主要与含铝或含锌矿物共存^[8]。铝土矿和闪锌矿中镓的含量分别约为0.0107%和0.005%^[9-10],由于镓含量过低,直接从这些矿物中提取镓是不经济的。因此,镓主要从不同的二次资源中提取,这些二次资源包括氧化铝生产过程中拜耳法循环母液^[11]、湿法炼锌渣^[12]、粉煤灰^[13]等。目前,大约90%的镓是从铝工业副产品中回收,其余主要从锌冶炼厂的残留物中回收^[14-15]。为了满足全球对镓日益增长的需求,寻找新的含镓资源,探索更多的提取方法至关重要。

黄磷电尘灰是电炉法生产黄磷过程中产生的一种固体废弃物,由于其富集了约0.05%的镓^[16],使其成为回收镓的潜在二次资源,而受到研究人员的广泛关注。XU等^[17]利用钛白废酸从黄磷电尘灰中提取镓和磷;贺山明等^[18]对黄磷电尘灰进行加压酸浸研究;JI等^[19-21]采用真空碳热还原法从黄磷电尘灰中提取镓,并回收其中的有价金属,如Zn、Pb。本文提出水洗—酸浸两步法浸出工艺,首先通过水洗去除黄磷电尘灰中的水溶性物质,初步富集镓,然后采用硫酸浸出水洗后电尘灰中的镓,并探究了硫酸浓度、时间、温度、液固比等因素对镓浸出率的影响,通过正交实验确定最

优工艺参数,优化从黄磷电尘灰中提取镓的工艺,并确定了其酸浸过程的动力学模型,为从黄磷电尘灰中提取镓提供理论依据。

1 试验

1.1 原料性质

本实验所用黄磷电尘灰来自云南某黄磷厂,经研磨后其粒度分析如表1所示,其中约97%的粒度 $<27.63\ \mu\text{m}$,满足实验要求。采用X射线衍射(XRD)、X射线荧光光谱(XRF)对该原料进行成分组成和物相分析,结果如表2、图1所示。由分析结果可知,黄磷电尘灰中P、Si的含量较高,其中 Ga_2O_3 含量仅为0.06%,其主要物相为 KH_2PO_4 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{KAlSi}_3\text{PO}_8$ 等,由于Ga的含量较低,未发现其衍射峰。对黄磷电尘灰原料进行扫描电镜和能谱分析(SEM-EDS),结果如图2所示,可见电尘灰呈大小不一的颗粒状,结合点1、点2、点3的能谱分析可知,电尘灰主要由O、P、K等元素组成,并含有少量的Al、Zn、Mg、Pb等金属,与XRD分析结果一致。

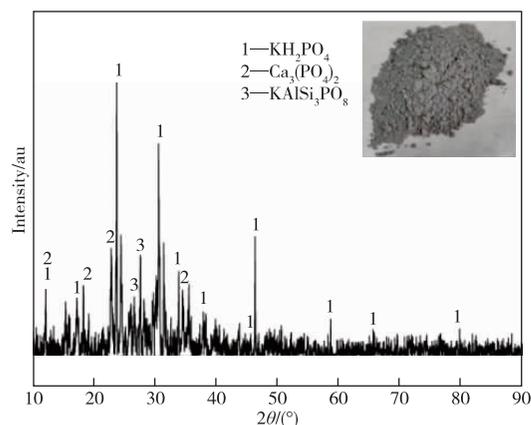


图1 黄磷电尘灰的XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of YPFD

表1 黄磷电尘灰粒度分析

Table 1 Particle sizes analysis of YPFD

Particle sizes/ μm	<10.48	$10.48-15.45$	$15.45-22.76$	$22.76-27.63$	>27.63
Ratio/%	68.72	7.46	14.89	5.97	2.96

表2 黄磷电尘灰的主要化学成分

Table 2 The main chemical composition of YPFD

Compositions	P_2O_5	SiO_2	K_2O	CaO	ZnO	Al_2O_3	Na_2O	PbO	MgO	Fe_2O_3	Ga_2O_3
Contents	48.25	15.16	13.75	7.80	3.50	3.35	2.11	1.92	1.45	0.82	0.06

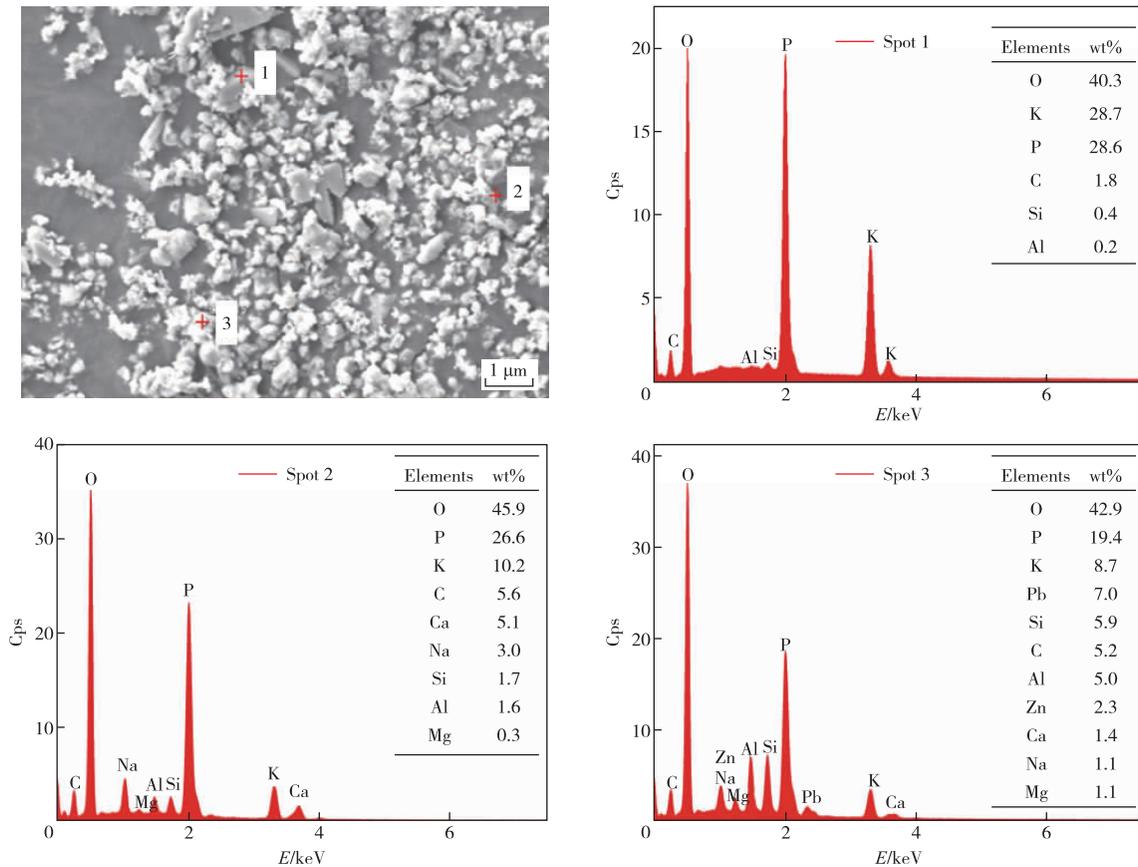


图 2 黄磷电尘灰的 SEM 图像及 EDS 分析

Fig. 2 SEM image and EDS analysis of YPFD

1.2 试验方法

采用水洗—酸浸两步法浸出工艺,流程图如图 3 所示。第一段水洗是按照一定的液固比(L/S)将原料与计量的水加入 500 mL 的烧杯中,将烧杯置于恒温加热磁力搅拌器中预热,到达设定温度开始搅拌并计时。水洗过程结束后,将溶液过滤并将滤渣在干燥箱中干燥 24 h。

酸浸过程是以水洗后经过滤、干燥、研磨的电尘

灰为原料,将硫酸按照一定的液固比放入 250 mL 烧杯中,在恒温加热磁力搅拌器中搅拌预热,达到设定温度后,加入电尘灰,连续搅拌,在磁力搅拌器中恒定温度下保温一定时间,使硫酸与电尘灰充分反应,实验结束后过滤得到镓的浸出液。实验主要研究了硫酸浓度、时间、温度和液固比等因素对镓浸出率的影响。实验所用化学试剂均为分析级,所用溶剂为去离子水。

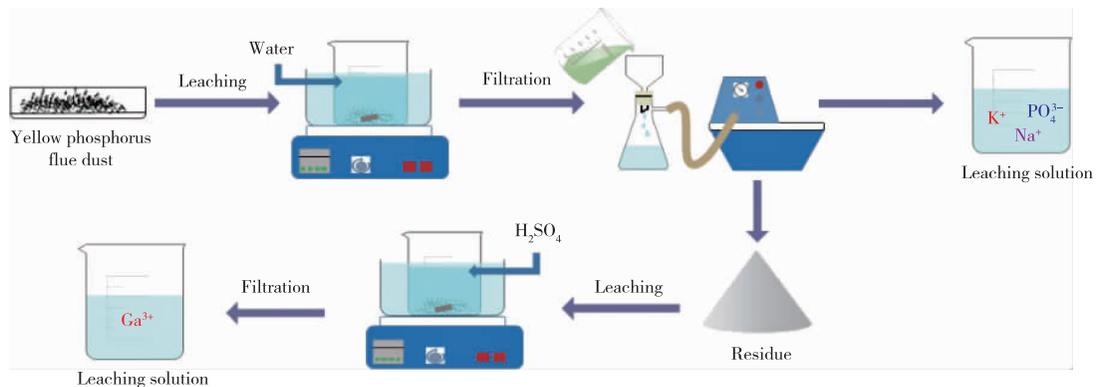


图 3 实验流程图

Fig. 3 Experimental flow chart

1.3 分析方法

采用 Winner 2000 粒度分析仪对电尘灰进行粒度分析,分别用 X 射线衍射仪(XRD)和 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析电尘灰的物相、元素含量及组成,用扫描电子显微镜(SEM)观察其形貌,并用配套的能谱分析系统(EDS)对特定形貌的样品颗粒进行化学组成及含量的测定,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析浸出液中镓的浓度。

电尘灰水洗后失重率:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

镓的浸出率:

$$x = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \times 100\% \quad (2)$$

其中: m_1 —水洗前电尘灰的质量, g; m_2 —水洗后电尘灰的质量, g; ω_1 —水洗后电尘灰中镓的含量, %; ω_2 —酸浸出渣中镓的含量, %。

2 结果与讨论

2.1 水洗

通过电尘灰 XRD 分析结果可知,其主要物相为 KH_2PO_4 , 该物质易溶于水,可以通过水洗将电尘

灰中 K、P 等水溶性物质去除,提高镓的富集效果,减少后续酸浸过程中的酸耗,同时浸出液中的 K、P 等物质可回收用作肥料^[22]。为了减少水洗过程中 Ga 的损失,前期研究表明^[23],水洗的最优工艺参数为液固比 8 : 1、浸出时间 80 min、温度 40 °C。在此条件下,以 600 g 电尘灰为原料,进行扩大实验。对水洗后电尘灰进行 XRD、SEM-EDS 分析,结果分别如图 4、图 5 所示。水洗前后各金属的含量及浸出率如表 3 所示。

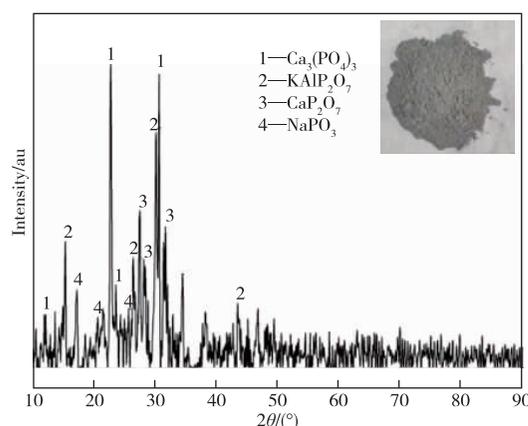


图 4 水洗后黄磷电尘灰的 XRD 谱

Fig. 4 XRD pattern of YPFD after washing

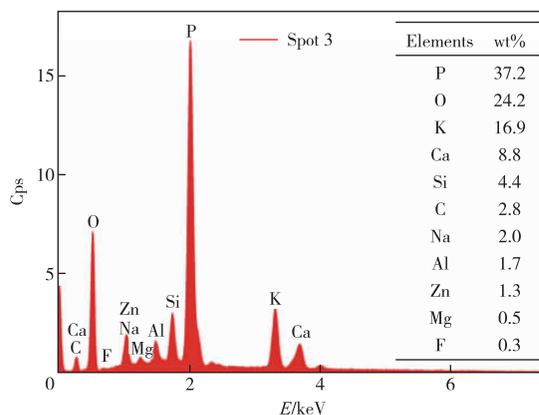
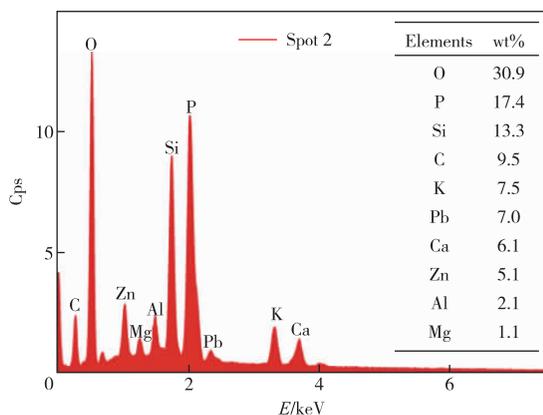
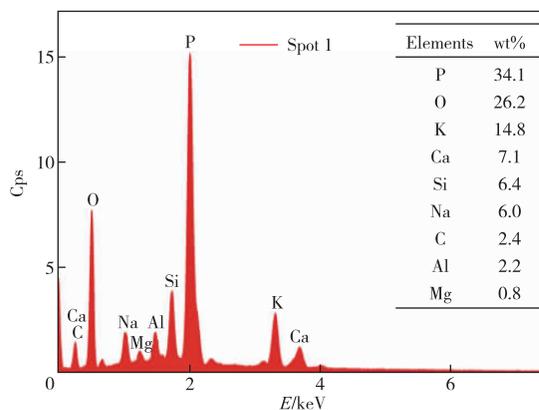
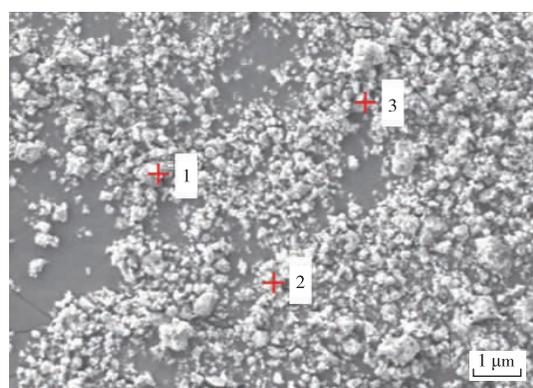


图 5 水洗后黄磷电尘灰的 SEM 图像及 EDS 分析

Fig. 5 SEM image and EDS analysis of YPFD after washing

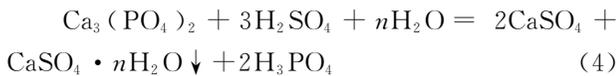
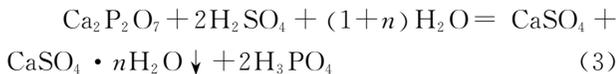
表3 水洗前后黄磷电尘灰中各元素的含量及浸出率

Elements	Before leaching	After leaching	Leaching rate /%
Na	1.564	1.097	48.374
K	11.413	9.246	40.372
P	21.057	17.990	37.118
Si	7.084	8.370	13.035
Ca	5.574	6.943	8.319
Zn	2.810	3.367	11.807
Pb	1.781	2.350	2.882
Al	1.773	2.253	6.470
Mg	0.872	0.816	31.123
Fe	0.572	1.033	~0
Ga	0.044	0.057	4.650

结合水洗后电尘灰的物相组成及 SEM-EDS 分析结果可知,水洗后电尘灰的主要物相为 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3$ 、 KAlP_2O_7 等,电尘灰呈细小的颗粒状,在不同的颗粒中均检测到 P、Si、K、Pb、Ca、Zn、Al、Mg 等元素,水洗前后电尘灰中 Na、K、P 的浸出率分别为 48.374%、40.372%、37.118%,表明水洗能够起到较好的去除 K、Na、P 等水溶性物质的效果。水洗电尘灰的失重率为 26.40%,镓的富集比为 1.3,镓的损失率仅为 4.650%。

2.2 酸浸

水洗后电尘灰中的主要物相为磷酸钙盐,在酸浸过程中主要发生的反应如下:



式中, n 根据不同的反应温度和反应产物所处的环境可能为 2、0.5 或 0,分别代表二水、半水或无水硫酸钙。

水洗后电尘灰中的镓主要以 Ga_2O_3 的形式存在,在酸浸过程中发生如下反应:



从上述反应可以看出,水洗后电尘灰中的磷酸钙盐等物质均会与硫酸反应生成硫酸钙沉淀,其中的镓以 $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$ 的形式进入到溶液中。该阶段主要探究硫酸浓度、液固比、温度、时间等因素对镓浸出率的影响,并通过正交实验优化酸浸过程的实验参数。

2.2.1 硫酸浓度的影响

在温度 80 ℃、液固比 6:1、浸出时间 120 min 的条件下,探究硫酸浓度对镓浸出率的影响。镓浸出率随硫酸浓度的变化如图 6 所示。可知,随着硫

酸浓度增大,镓的浸出率先升高后降低,当硫酸浓度为 4 mol/L,镓的浸出率达到最高,为 92.07%。这是因为,硫酸浓度增加,有利于电尘灰中的镓发生酸溶反应,转化为水溶性的 $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$,使镓的浸出率增大。但酸的浓度过高会使电尘灰中各类硅酸盐溶解形成硅酸,进而形成硅胶,将 Ga_2O_3 酸溶产生的 Ga^{3+} 包裹起来,使镓的浸出率降低。为探究最优条件参数,正交实验中硫酸浓度选择 3、4、5 mol/L 三个水平。

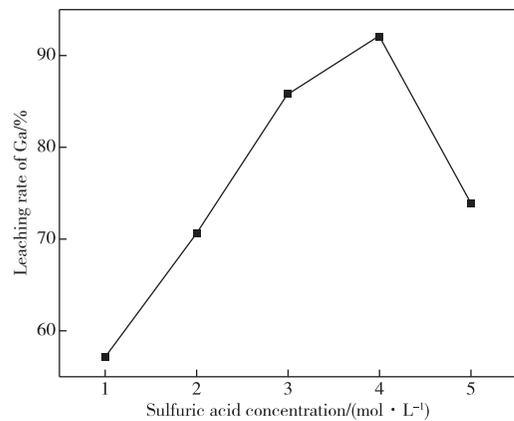


图6 硫酸浓度对黄磷电尘灰中镓浸出率的影响

Fig. 6 Effects of sulfuric acid concentration on gallium leaching rate in YPFD

2.2.2 液固比的影响

在硫酸浓度 4 mol/L、温度 80 ℃、浸出时间 120 min 的条件下探究液固比对镓浸出率的影响,结果如图 7 所示。镓的浸出率随液固比的增大而升高,液固比为 5:1~8:1 时,镓的浸出率变化较为显著,在液固比为 8:1 时达到 95.18%,液固比再增大,镓的浸出率变化较小。这是因为,硫酸的量随着液固比的增加而增加,向体系提供足够的 H^+ ,最大限度的将电尘灰中的镓浸出,液固比

的进一步增大对镓的浸出率影响很小。为探究最优条件参数,正交实验中液固比选择 6:1、7:1、8:1 三个水平。

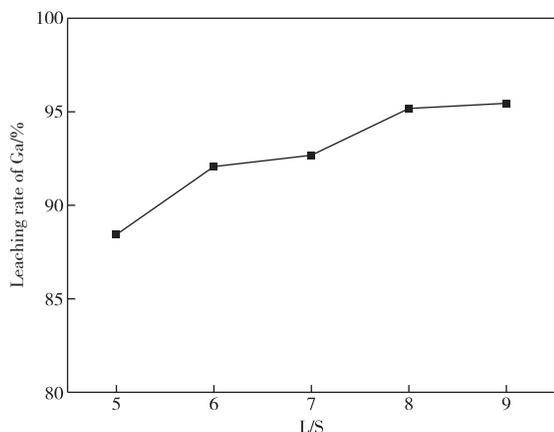


图7 液固比对黄磷电尘灰中镓浸出率的影响

Fig. 7 Effects of L/S on gallium leaching rate in YPFD

2.2.3 温度的影响

在硫酸浓度 4 mol/L、液固比 8:1、浸出时间 120 min 的条件下探究温度对镓浸出率的影响,结果如图 8 所示。由图 8 可知,镓的浸出率随温度的升高而增大,在 80 °C 时达到 96.29%,这是因为,温度的升高会增大反应速率,使镓的浸出率增大。当温度高于 80 °C 时,镓的浸出率变化不明显。为探究最优条件参数,正交实验中温度选择 60、70、80 °C 三

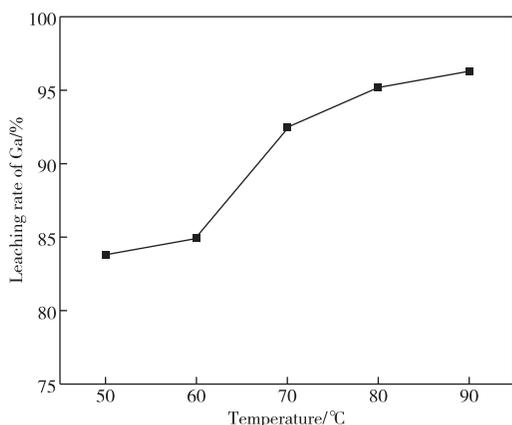


图8 温度对黄磷电尘灰中镓浸出率的影响

Fig. 8 Effects of temperature on gallium leaching rate in YPFD

个水平。

2.2.4 时间的影响

在硫酸浓度 4 mol/L、液固比 8:1、温度 80 °C 的条件下,探究时间对镓浸出率的影响,结果如图 9 所示。随着时间延长,电尘灰与硫酸反应越来越充分,当时间为 80 min 时,镓的浸出率最高为 95.74%。当时间大于 80 min 后,镓的浸出率变化不大。为探究最优条件参数,正交实验中时间选择 80、100、120 min 三个水平。

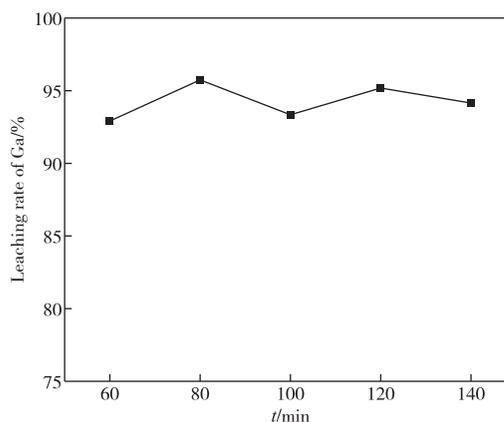


图9 时间对黄磷电尘灰中镓浸出率的影响

Fig. 9 Effects of time on gallium leaching rate in yellow phosphorus dust

2.2.5 正交实验

在单因素实验基础上,进行正交实验,考察因素为硫酸浓度、温度、液固比、时间,评价指标为镓的浸出率。在单因素实验中 5 个水平的基础上选择较优的 3 个水平,做四因素三水平正交实验,实验因素水平编码表及正交实验结果分析如表 4 和表 5 所示。

由表 5 可知,上述考察因素对镓的浸出率的影响程度从大到小依次为温度>硫酸浓度>时间>液固比,在硫酸浓度 5 mol/L、液固比 7:1、温度 80 °C 的条件下浸出 80 min,镓的浸出率最高,为 96.38%;相比之下,当硫酸浓度 3 mol/L、液固比 8:1、温度 80 °C、时间 120 min 时,镓的浸出率可达到 95.28%,从降低成本角度考虑,确定后者为最佳酸浸条件。

表4 实验因素水平编码表

Table 4 Experimental factor level coding table

Levels	A(Sulfuric acid concentration)/(mol · L ⁻¹)	B(Temperature)/°C	C(L/S)	D(Time)/min
1	3	60	6	80
2	4	70	7	100
3	5	80	8	120

表5 正交实验结果

Table 5 Orthogonal experiment results

No.	A	B	C	D	Ga leaching rate/%
1	1	1	1	1	73.80
2	1	2	2	2	86.30
3	1	3	3	3	95.28
4	2	1	2	3	83.77
5	2	2	3	1	88.31
6	2	3	1	2	93.06
7	3	1	3	2	86.64
8	3	2	1	3	92.54
9	3	3	2	1	96.38
K_1	85.127	81.403	86.467	86.163	
K_2	88.380	89.050	88.817	88.667	
K_3	91.853	94.907	90.077	90.530	
R	6.726	13.504	3.610	4.367	

结合已有研究^[23]和上述实验探究结果,得出该两步法浸出工艺的最佳工艺参数。水洗最佳条件:温度 40 ℃、时间 80 min、液固比 8 : 1;酸浸最佳条件:硫酸浓度 3 mol/L、液固比 8 : 1、温度 80 ℃、时间 120 min。并对最优条件进行验证实验,3次验证

实验镓的浸出率分别为 94.84%、94.74%、95.11%,可知,水洗电尘灰在最优条件下镓的浸出率在 95%左右。对酸浸后的电尘灰进行 XRD 和 SEM-EDS 分析,结果如图 10 和图 11 所示,可见酸浸后电尘灰的主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,这与上述分析结果相吻合。

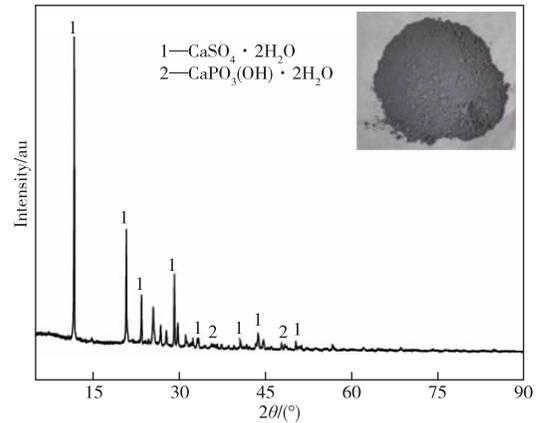


图10 酸浸后黄磷电尘灰的 XRD 谱

Fig. 10 XRD pattern of YPFD after acid leaching

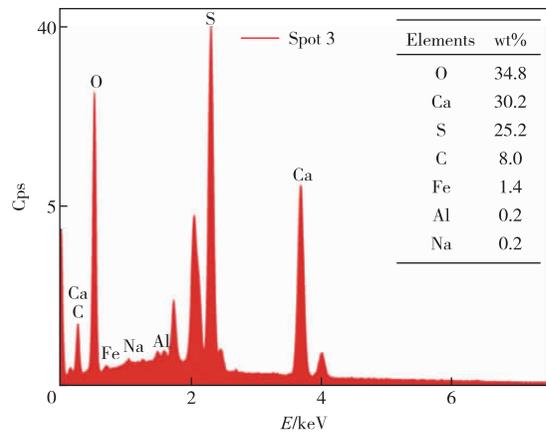
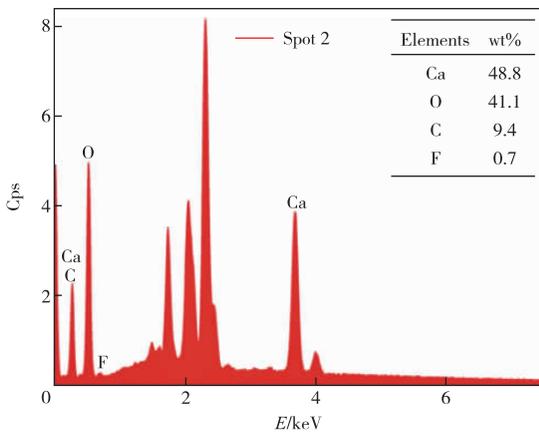
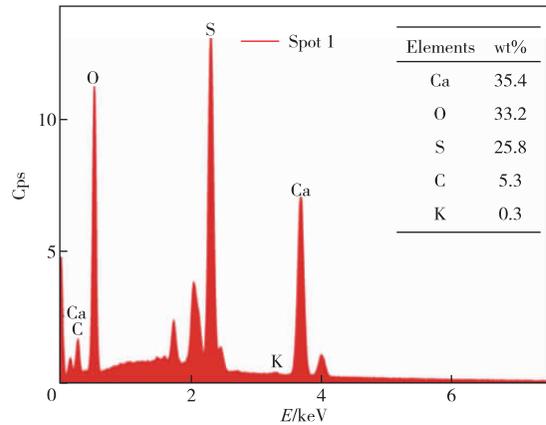
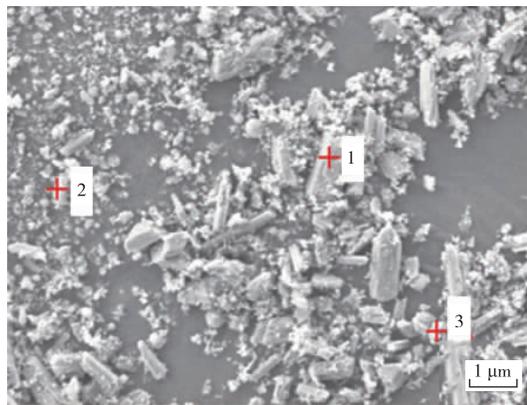


图11 酸浸后黄磷电尘灰的 SEM 图像及 EDS 分析

Fig. 11 SEM image and EDS analysis of YPFD after acid leaching

3 酸浸过程浸出动力学分析

水洗后电尘灰酸浸过程的动力学主要从动力学方程和活化能两方面进行分析,该浸出过程属于液-固反应,水洗后的电尘灰可视为球形颗粒,浸出过程有固体产物 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成,可按照收缩性未反应核模型进行分析^[24]。浸出反应分为扩散控制和界面化学反应控制,反应式分别为式(6)、式(7)所示。

$$1 - 2x/3 - (1-x)^{2/3} = k_1 t \quad (6)$$

$$1 - (1-x)^{1/3} = k_2 t \quad (7)$$

式中, k_1 、 k_2 分别为不同控制步骤的速率常数; x 为镓的浸出率, %; t 为浸出时间, min。

采用硫酸浓度 4 mol/L, 液固比 8 : 1, 选取浸出温度分别为 60、70、80、90 °C, 浸出时间分别为 60、80、100、120、140 min, 对黄磷电尘灰酸浸过程中镓的浸出过程进行模拟, 探究其所受的控制模型。不

同温度下镓的浸出率与时间的变化趋势如图 12 所示。将实验数据分别代入上式, 拟合结果如图 13 及表 6 所示。

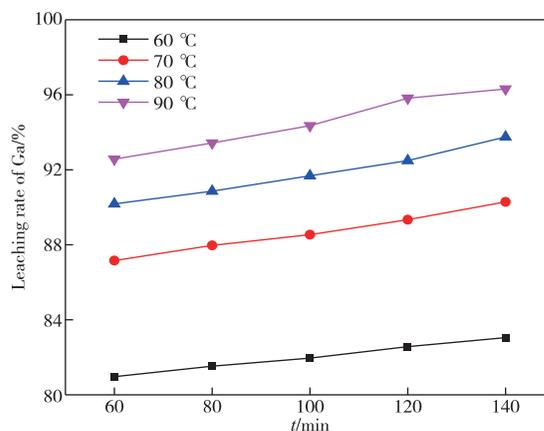


图 12 不同温度下镓浸出率与浸出时间的关系曲线
Fig. 12 Relationship between gallium leaching rate and leaching time under different temperature

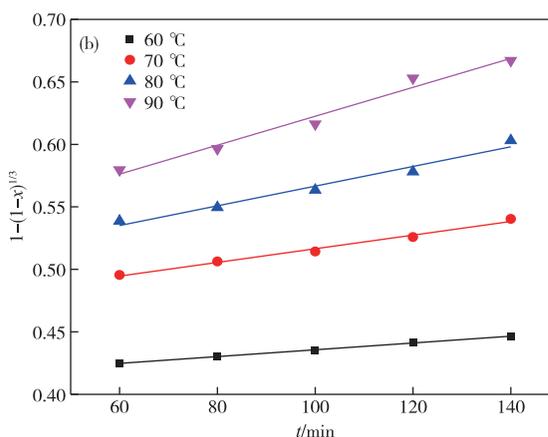
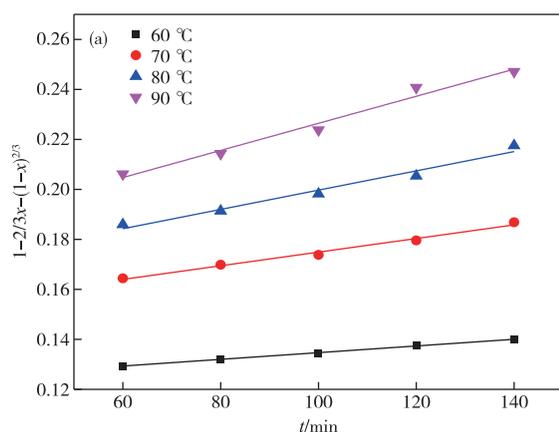


图 13 不同控制模型与浸出时间的拟合曲线: (a)扩散控制 (b)界面化学反应控制

Fig. 13 Fitting curves of different control models and leaching time: (a) Diffusion control; (b) Chemical reaction control

表 6 酸浸过程动力学模型拟合结果

Table 6 Fitting results of kinetic model of acid leaching process

Temperature/°C	Diffusion control		Chemical reaction control	
	R^2	$q/10^{-4}$	R^2	$q/10^{-4}$
60	0.996 95	1.338	0.997 02	2.722
70	0.986 01	2.726	0.985 76	5.461
80	0.966 93	3.858	0.964 55	7.878
90	0.973 46	5.419	0.972 04	11.600

由拟合结果可知, 两种控制模型与 t 之间的拟合效果均较好, 相关系数 R^2 均大于 0.95。表 6 中拟合曲线的斜率 q 代表该温度下的浸出速率, 从表 6 可以看出, 随着温度的升高, 镓的浸出速率逐渐增大。此外, 还可根据活化能确定浸出过程的控制步骤^[25]。

根据式(8)-Arrhenius 公式可以计算浸出反应的活化能。将两种控制模型拟合的斜率 q 带入式(8), 以 $\ln q$ 对 $1/T$ 作图, 如图 14 所示。

$$q = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (8)$$

其中, A 为指前因子; E_a 为表观活化能, kJ/mol; R 为通用气体常数; T 为热力学温度, K。

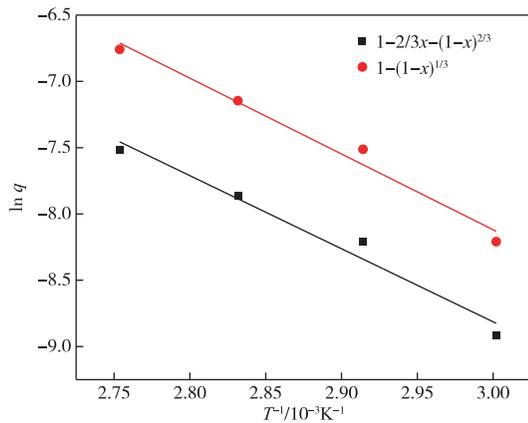


图14 黄磷电尘灰中的镓酸浸过程中 $\ln q$ 与 $1/T$ 关系曲线
Fig. 14 Relationship between $\ln q$ and $1/T$ during Ga acid leaching of YPFD

由活化能拟合结果可知,两种控制模型的 $\ln q$ 与 $1/T$ 拟合的相关系数分别为 0.950 64 和 0.971 03, 表明 $1-(1-x)^{1/3}$ 的拟合效果较好,即该浸出过程受界面化学反应控制。近似求得浸出反应的表观活化能约为 47.54 kJ/mol,指前因子为 8 380,动力学方程式为:

$$1 - (1-x)^{1/3} = 8380e^{-47540/RT}t$$

4 结论

1)水洗最佳条件为:液固比 8:1、温度 40 °C、时间 80 min,在该条件下,电尘灰的失重率达到 26.40%,镓的富集比为 1.3,镓的损失率仅为 4.65%,水洗后的浸出液中含有 P、K 等物质,可回收用作肥料;酸浸最佳条件为:硫酸浓度 3 mol/L、液固比 8:1、温度 80 °C、时间 120 min,镓的浸出率可达 95.28%。

2)正交实验结果表明,酸浸过程中液固比、硫酸浓度、温度、时间对镓浸出率的影响程度从大到小依次为温度>硫酸浓度>时间>液固比,温度和硫酸浓度是酸浸过程中最重要的工艺参数。最优条件下的验证实验结果表明,镓的浸出率均在 95%左右,表明采用水洗-酸浸两步法富集并浸出黄磷电尘灰中的镓的效果较好。

3)水洗后电尘灰中镓的酸浸过程符合收缩性未反应核模型,表观活化能约为 47.54 kJ/mol,动力学方程式为

$$1 - (1-x)^{1/3} = 8380 \times 10^3 e^{-47540/RT}t$$

参考文献:

[1] MISHRA U K, PARIKH P, WU Y F. AlGaIn/GaN

HEMTs: An overview of device operation and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(6):1022-1031.

- [2] YOUSOUF A S, HABAEBI M H, HASBULLAH N F. The radiation effect on low noise amplifier implemented in the space-aerial-terrestrial integrated 5G networks[J]. IEEE Access, 2021, 9:46641-46651.
- [3] ISABELA C B, LAMEIRINHAS R, TORRES J, et al. Comparative study of copper indium gallium selenide (CIGS) solar cell with other solar technologies [J]. Sustainable Energy & Fuels, 2021, 5(8):2273-2283.
- [4] MERHEBI S, MOHAMMAD M, MAYYAS M, et al. Post-transition metal/polymer composites for the separation and sensing of alkali metal ions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9. DOI: 10.1039/D1TA02664J.
- [5] 刘延红, 郭昭华, 池君洲, 等. 镓在新能源领域的应用[J]. 有色金属工程, 2014, 4(6):78-80.
LIU Yanhong, GUO Zhaohua, CHI Junzhou, et al. Application of gallium in the new field of energy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(6):78-80.
- [6] LU F, XIAO T, LIN J, et al. Resources and extraction of gallium: A review[J]. Hydrometallurgy, 2017, 174:105-115.
- [7] REDLINGER M, EGGERT R, WOODHOUSE M. Evaluating the availability of gallium, indium, and tellurium from recycled photovoltaic modules[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 138:58-71.
- [8] TORMA A E, JIANG H. Extraction processes for gallium and germanium [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1991, 7(3/4):235-258.
- [9] PATRI B C, RONAN C, HEALY M G, et al. An evaluation of the general composition and critical raw material content of bauxite residue in a storage area over a twelve-year period [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208:393-401.
- [10] MOSKALYK R R. Gallium: The backbone of the electronics industry [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(10):921-929.
- [11] ZHANG H, PENG X S, SHI G D, et al. Uniform macroporous amidoximated polyacrylonitrile monoliths for gallium recovery from Bayer liquor[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 138(5):49764. DOI: 10.1002/app.49764.
- [12] RAO S, LIU Z Q, WANG D X, et al. Hydrometallurgical process for recovery of Zn, Pb, Ga and Ge from Zn refinery residues [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2):555-564.
- [13] ZHAO Z S, CUI L, GUO Y X, et al. A stepwise

- separation process for selective recovery of gallium from hydrochloric acid leach liquor of coal fly ash[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 265: 118455. DOI:10.1016/j.seppur.2021.118455.
- [14] ZHAO Z, YANG Y X, XIAO Y P, et al. Recovery of gallium from Bayer liquor: A review[J]. Hydrometallurgy, 2012, 125-126: 115-124.
- [15] UEBERSCHARR M, OTTO S J, ROTTER V S. Challenges for critical raw material recovery from WEEE-The case study of gallium [J]. Waste Management, 2017, 60: 534-545.
- [16] XU K, DENG T, DAI Y. Recovery of gallium from phosphorus industry flue[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(6): 1199-1203.
- [17] XU K, DENG T, LIU J T, et al. Study on the recovery of gallium from phosphorus flue dust by leaching with spent sulfuric acid solution and precipitation [J]. Hydrometallurgy, 2007, 86(3/4): 172-177.
- [18] 贺山明, 徐志峰, 汪金良, 等. 黄磷电尘灰中镓的加压酸浸试验[J]. 有色金属工程, 2017, 7(1): 40-43.
HE Shanming, XU Zhifeng, WANG Jinliang, et al. Pressure acid leaching of gallium extraction from phosphorus electric dust [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(1): 40-43.
- [19] JI W T, XIE K Q, HUANG H Y, et al. Recovery of gallium from yellow phosphorus flue dust by vacuum carbothermal reduction [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124706. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124706.
- [20] JI W T, XIE K Q, YAN S Y, et al. A new method of recycling gallium from yellow phosphorus flue dust by vacuum thermal reduction process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400: 123234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123234.
- [21] JI W T, XIE K Q, YAN S Y. Separation and recovery of heavy metals zinc and lead from phosphorus flue dust by vacuum metallurgy [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294: 113001. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113001.
- [22] 刘振英. 应用磷酸二氢钾做甜菜根外追肥的试验报告[J]. 内蒙古农业科技, 1983(4): 28-32.
LIU Zhenying. Test report of applying potassium dihydrogen phosphate as top dressing of beet root[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 1983(4): 28-32.
- [23] 陈浩林, 谢克强, 黄海艺, 等. 水浸法富集黄磷电尘灰中镓的预处理研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 9-15.
CHEN Haolin, XIE Keqiang, HUANG Haiyi, et al. Pretreatment of phosphorus flue dust for gallium enrichment by water leaching method [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(2): 9-15.
- [24] 石美莲, 华骏, 颜文斌, 等. 含钒黏土矿直接酸浸提钒及其动力学研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 94-97.
SHI Meilian, HUA Jun, YAN Wenbin, et al. A kinetics study for recovery of vanadium from vanadium-bearing clay ore using direct acid leaching [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(1): 94-97.
- [25] 张汉泉, 蔡祥, 陈官华, 等. 含铜硫酸渣中铜的浸出及浸出动力学分析[J]. 有色金属工程, 2020, 10(4): 44-50, 56.
ZHANG Hanquan, CAI Xiang, CHEN Guanhua, et al. Leaching and its kinetics of copper from Cu-bearing sulfuric acid slag [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(4): 44-50, 56.

(编辑 金开生)