

# 从粉煤灰浸出液中电化学沉积铁试验研究

王存权, 史志铭

(内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**研究了采用 HCl 浸出与电化学沉积法从粉煤灰中回收提取铁元素。通过 SEM-EDS、XRF、ICP 及 XRD 手段系统分析了粉煤灰的微观形貌及元素组成, 考察了浸出过程中的关键因素及其影响, 以及电化学沉积阶段 pH、电流密度和 Fe 离子浓度的动态变化规律, 并深入探讨了所得铁的相组成特性。结果表明: 在浸出阶段, 随 HCl 浓度升高、液固体积质量比增大、温度升高及浸出时间延长, 铁浸出率呈升高趋势; 而在电化学沉积阶段, pH 逐渐上升, 电流密度和 Fe 离子浓度则呈下降趋势; 最佳浸出工艺参数为 HCl 浓度 6 mol/L, 液固体积质量比(HCl 溶液与粉煤灰) 8:1, 反应温度 90 °C, 反应时间 90 min; 对于电化学沉积过程, 电压为 3 V, 最适宜的 pH 范围在 0.5~1.9 之间, 最终沉积物为纯铁单质。

**关键词:** HCl; 浸出; 电化学沉积; 铁; 粉煤灰

**中图分类号:** TF803.21; TF803.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2617(2025)02-0230-08

**DOI:** 10.13355/j.cnki.sfyj.2025.02.012

随着煤炭需求的持续攀升, 粉煤灰作为火力发电厂燃煤过程中的必然副产物, 其产生量呈逐年递增趋势<sup>[1]</sup>。针对粉煤灰的综合利用, 已进行了多方面探索, 主要应用于土壤改良<sup>[2]</sup>、混凝土制造<sup>[3]</sup>、粉煤灰水泥生产<sup>[4]</sup>、新型建筑材料开发<sup>[5]</sup>、道路建设<sup>[6]</sup>及沸石合成<sup>[7]</sup>等多个领域。但这些传统的应用方式大多都未能充分发掘粉煤灰的高附加值潜力。

近年来, 研究从粉煤灰中高效提取单一物质的方法逐渐成为了热点, 特别是聚焦于酸法<sup>[8-11]</sup>、碱法<sup>[12-14]</sup>及酸碱联合法<sup>[15-16]</sup>等, 旨在以氧化铝和氧化硅形式回收 Al、Si 元素。而针对粉煤灰中富含的 Fe 元素, 却鲜见相关分离方法的研究报道, 这主要是浸出液中 Al<sup>3+</sup> 与 Fe<sup>3+</sup> 分离难度极大导致的。虽有研究人员通过采用酸碱联合法, 在高温(100 °C)下对铝铁沉淀物进行脱水处理得到了铁铝氧化物混合粉<sup>[17]</sup>, 但后续无法实现 Al 与 Fe 两种金属氧化物的有效分离, 且该法在铁的提取方面也存在一定局限性, 同时还伴随酸碱的大量消耗, 以及残渣、废液的二次处理问题。

近些年, 电化学沉积法在酸性浸出液处理中优势逐渐显现, 并已发展成为一种新型的处理方法。基于不同元素在粉煤灰浸出液中的沉淀平衡常数差异, 通过调节 pH, 可以实现元素在阴极上的选择性沉积。具体而言, 当粉煤灰与 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 反应后得到的浸出液可通过电化学沉积分离出多种铁的化合物, 如 Fe(OH)<sub>2</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 FeOOH 等<sup>[18]</sup>; 此外, 将 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 与粉煤灰混合焙烧, 并用去离子水溶解所得的含高浓度铝离子溶液, 通过电化学沉积法可将铝离子以 Al(OH)<sub>3</sub> 形式沉积于阴极附近<sup>[19]</sup>; 另外, 在 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液中, 通过电化学沉积法还能在阴极上形成均匀、连续且多孔的 Mg(OH)<sub>2</sub> 薄膜<sup>[20]</sup>。上述研究充分证明电化学沉积法在粉煤灰浸出液中金属化合物提取方面的可行性。

试验探索了一种用 HCl 溶解与电化学沉积相结合的新方法从粉煤灰中直接分离 Fe 元素, 而非以化合物的形式沉积, 从而提高 Fe 浸出率。在电化学沉积过程中, 阳极产生氯气, 阴极产生氢气, 这 2 种气体通过后续的化学反应重新生成

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 内蒙古自治区高校基本科研业务费项目(ZTY2024003)。

第一作者简介: 王存权(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为粉煤灰高值化利用。

通信作者简介: 史志铭(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为粉煤灰分离提取高纯物质。E-mail: shizm@imut.edu.cn。

HCl,从而实现酸的循环利用。研究了浸出过程中 HCl 浓度、液固体积质量比、浸出温度、浸出时间对 Fe 浸出率的影响,以及电化学沉积过程中溶液 pH、电流密度、Fe 离子浓度随时间的变化规律,并对产物的形貌和物相进行了表征,以期为粉煤灰的高值化利用提供一种新的思路,同时也为其他矿物中元素的提取提供有益的参考与借鉴。

### 1 试验部分

#### 1.1 试验原料

粉煤灰:采自内蒙古霍林郭勒热电厂,用 XRF 分析其化学成分,结果见表 1,主要由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成,质量分数分别为 49.51%、38.72%及 6.5%。粉煤灰的粒径分布范围及占比见表 2,粒径范围为 0.2~215.4 μm 之间,平均粒径为 16.35 μm。

试剂:盐酸,37%,中国医药化学试剂有限公司;还原铁粉,分析纯;水为去离子水。

表 1 粉煤灰的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of fly ash

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
49.51	38.72	6.5	0.29	3.1	0.63	1.25

表 2 粉煤灰的粒径分布范围及占比

Table 2 Particle size distribution range and proportion of fly ash

粒径范围/μm	占比/%
0.2~10.0	43.20
10.0~51.8	40.55
51.8~100.0	13.22
100.0~138.9	2.85
138.9~193.0	1.21
193.0~215.4	1.03
合计	100.00

#### 1.2 试验流程

试验流程如图 1 所示。每次试验取粉煤灰 10 g。将粉煤灰与 HCl 溶液放入聚四氟乙烯罐中,待集热磁力搅拌装置温度达到目标温度后开始计时。酸浸完成后,用抽滤装置将聚四氟乙烯罐中的物质进行固液分离,得到滤液。在滤液中加入少量还原铁粉,搅拌 5 min,待溶液颜色由黄色变为绿色后放入烧杯中进行电

化学沉积。电化学沉积通直流电源,电压设置为 3 V,阳极和阴极均用石墨片电极,电极横截面积为 4 cm<sup>2</sup>。取电化学沉积后阴极片上沉积物,干燥后进行测试。



图 1 试验流程示意

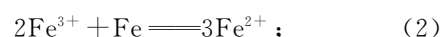
Fig. 1 Schematic of experimental flow

#### 1.3 试验原理

HCl 溶解过程中,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 H<sup>+</sup> 反应后以 Fe<sup>3+</sup> 形式存在于溶液中,主要发生的化学反应见式(1):



加入还原铁粉后,溶液中 Fe<sup>3+</sup> 被还原成 Fe<sup>2+</sup>,发生的化学反应见式(2):



电化学沉积过程如图 2 所示。电化学沉积过程中,溶液中的 Cl<sup>-</sup> 在阳极失去电子生成 Cl<sub>2</sub>,化学反应见式(3):

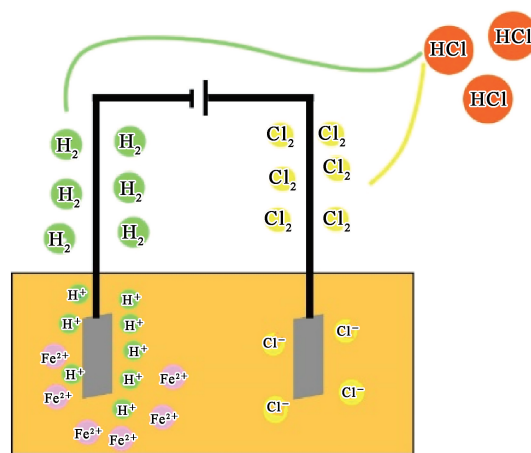
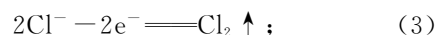
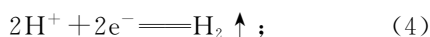


图 2 电化学沉积原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of electrolysis principle

在电化学沉积过程中,阴极附近的 H<sup>+</sup> 得到电子生成 H<sub>2</sub>,Fe<sup>2+</sup> 得到电子生成单质 Fe,反应见式(4)、(5):



对阳极产生的  $\text{H}_2$  和阴极产生的  $\text{Cl}_2$  进行收集,反应后获得  $\text{HCl}$ ,在浸出过程中重复利用。

电流密度  $J$  的计算公式如下:

$$J = \frac{I}{A}. \quad (6)$$

式中: $J$ —电流密度,  $\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $I$ —电流,  $\text{A}$ ;  $A$ —电极横截面积,  $\text{cm}^2$ 。

### 1.4 分析方法

采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF, ZSX Primus IV, 50 kV, 60 mA, 积分时间 40 s) 检测粉煤灰原料的主要元素的氧化物组成。利用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS, OPTIMA7000DV, USA) 测定酸浸液中 Fe 元素含量。采用扫描电镜 (SEM, FEI QUANTA 650 FEG) 对粉煤灰形貌进行分析表征。采用 X 射线衍射仪 (XRD, D/MAX-2500/PC; 40 kV, 40 mA,  $2\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$ , 扫描速率为  $3^\circ/\text{min}$ ) 对粉煤灰及试验过程中电化学沉积产物组成进行表征, XRD 谱图通过 Jade6.5 软件进行定性和半定量分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 粉煤灰的特性分析

图 3(a) 为粉煤灰的 XRD 图谱。可知,粉煤灰主要由莫来石、刚玉及玻璃相构成,其中莫来石相占比高达 73%,刚玉相占 4%,玻璃相占 23%。图 3(b) 为粉煤灰的 SEM 照片。可清晰地观察到,粉煤灰由球状颗粒与不规则块状颗粒两大类别构成,这些球状颗粒粒径差异较大,且存在多个颗粒间相互联结现象。

对图 3(b) 中的 A 点进行 EDS 分析,结果见表 3。可知:A 点处 Al、Si、O 质量百分比分别为 33.29%、12.91% 和 46.77%,这与莫来石中 Al、Si、O 的理论质量比为 81:28:104 相近,因此推断,球状颗粒主要以莫来石相为主,且其表面被玻璃相所包裹;该玻璃相中还含有多种微量元素,其中 Fe 质量百分比为 6.45%;至于不规则块状颗粒,通过对图 3(b) 中 B 点的 EDS 分析得知,其对应的 Al、O 质量百分比分别为 52% 和 48%,这与刚玉 ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) 的 Al、O 元素质量比 9:8 接近,因此推断,不规则块状颗粒主要为刚玉相。

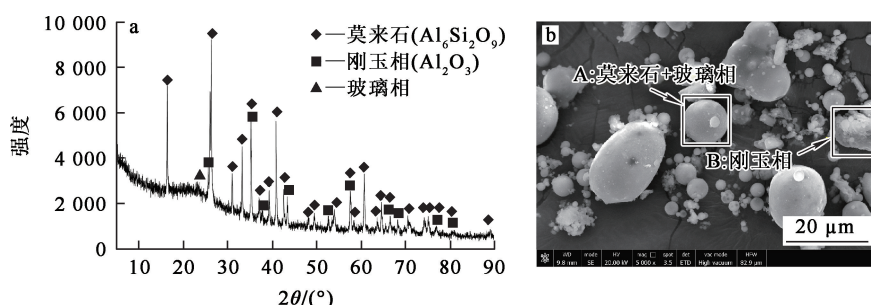


图 3 粉煤灰的 XRD(a) 和 SEM(b) 分析结果

Fig. 3 XRD (a) and SEM (b) analysis results of fly ash

表 3 粉煤灰的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of fly ash		%						
样点	Al	Si	O	Mg	Ca	K	Ti	Fe
A 点	33.29	12.91	46.77	0.05	0.19	0.31	0.03	6.45
B 点	52	0	48	0	0	0	0	0

### 2.2 粉煤灰中 Fe 的存在形式分析

在粉煤灰颗粒形成过程中,随碳粉燃烧后温度急剧下降,金属离子会倾向于在玻璃相中富集,粉煤灰中的玻璃相主要存在于粉煤灰颗粒表面层<sup>[21]</sup>。

非晶态的铝硅酸盐相结构模型主要以无规网络模型为主流,如图 4 所示,以多个硅氧四面体为基础框架结构,氧原子连接多个硅氧四面体形成链状或闭环状的三维框架。碱金属离子占据了非晶态铝硅酸盐结构中的随机位置,形成短程无序的氧化物结构,并保持局部电中性<sup>[22]</sup>。

玻璃相中主要存在的元素有 Al、Fe、Si、Mg、Ca、K。各元素在非晶相中的存在形式各不相同。其中, Si 原子以硅氧四面体形式存在于形成的框

架中;K、Ca、Mg 原子作为框架修饰体,主要以金属氧化物形式存在于硅氧四面体网络框架间隙中;Al、Fe 则以中间体形式存在,Fe<sup>3+</sup> 离子以[FeO<sub>4</sub><sup>3-</sup>]四面体的形式进入框架网络,以[FeO<sub>6</sub><sup>3-</sup>]八面体的形式进入玻璃网络外的空位。

玻璃相网络框架中铁氧四面体中的铁和氧以共价键连接,铁氧八面体可能和玻璃相网络框架以共同氧原子为顶点进行连接,还可以通过金属离子与氧离子之间的离子键连接。而化合物之间的化合键决定非晶相框架中短程结构的稳定性,其中化合键稳定性排序为:共价键>离子键>金属键>分子键。因此,在玻璃相中 Fe 浸出所需能量并不相同<sup>[23]</sup>。

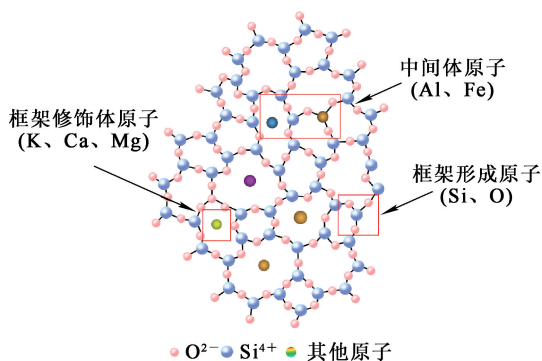


图 4 玻璃相结构

Fig. 4 Structure of glassy phase structure

## 2.3 各因素对 Fe 浸出的影响

### 2.3.1 HCl 浓度对 Fe 浸出率的影响

图 5 为 HCl 浓度对粉煤灰中 Fe 浸出率的影响。试验条件为:液固体积质量比 8 : 1, 浸出温度 90 °C, 浸出时间 90 min。

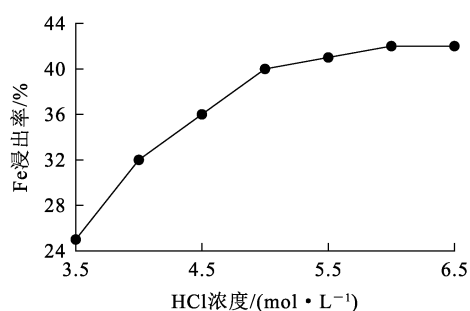


图 5 HCl 浓度对 Fe 浸出率的影响

Fig. 5 Effect of HCl concentration on leaching rate of Fe

由图 5 看出:Fe 浸出率随盐酸浓度增加呈先快后缓的上升趋势,盐酸浓度增至 6 mol/L 时,Fe 浸出率达 42%。这一结果与文献[10]结论吻合;但进一步增加 HCl 浓度,并未能继续提升 Fe 浸出率。因此,确定盐酸浓度以 6 mol/L 为宜。从有效碰撞理论的角度来看,并非所有分子的相互碰撞都能触发化学反应,仅当极少数能量较高且处于适当方向的活化分子发生有效碰撞时,化学反应才会发生。增加 HCl 浓度实际上增加了溶液中氢离子(H<sup>+</sup>)数量,进而增大了反应过程中活化分子间有效碰撞的概率,从而促进了 H<sup>+</sup>与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>之间的反应。

### 2.3.2 液固体积质量比对 Fe 浸出率的影响

图 6 为液固体积质量比对粉煤灰中 Fe 浸出率的影响。试验条件为:盐酸浓度 6 mol/L, 浸出温度 90 °C, 浸出时间 90 min。

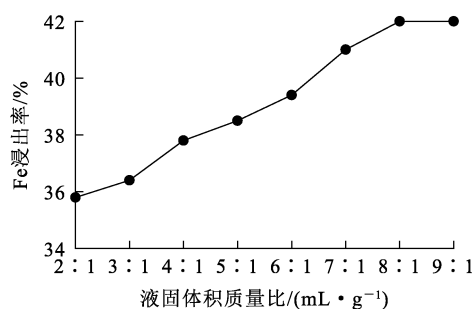


图 6 液固体积质量比对 Fe 浸出率的影响

Fig. 6 Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching rate of Fe

由图 6 看出:随液固体积质量比增大,Fe 浸出率不断升高,当液固体积质量比增至 8 : 1 时,Fe 浸出率达最高,为 41%,这一结果与文献[24]最佳液固体积质量比一致;继续增大液固体积质量比,对 Fe 浸出率的提升效果并不明显。因此,确定液固体积质量比以 8 : 1 为宜。在酸溶液浓度保持恒定的条件下,增大液固体积质量比,溶液中氢离子浓度增大,从而使活化分子间有效碰撞概率增加。同时,这也增大了粉煤灰表面玻璃相与酸溶液的接触面积,为反应的进行提供了更为有利的条件,从而促进了 Fe 的有效浸出。

### 2.3.3 浸出温度对 Fe 浸出率的影响

图 7 为浸出温度对 Fe 浸出率的影响。试验

条件为: 盐酸浓度 6 mol/L, 液固体积质量比 8 : 1, 浸出时间 90 min。

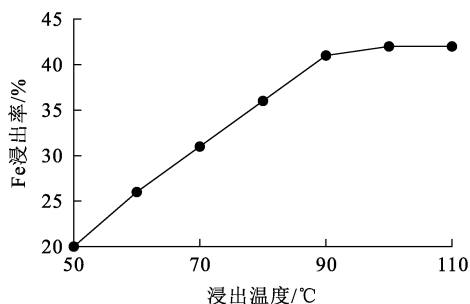


图 7 浸出温度对 Fe 浸出率的影响

Fig. 7 Effect of leaching temperature on leaching rate of Fe

由图 7 看出: 随浸出温度升高, Fe 浸出率呈升高趋势。当温度升至 90 °C 时, Fe 浸出率达 41%; 继续升高温度, Fe 浸出率并未出现明显变化。因此, 将浸出温度设定为 90 °C 较为适宜。浸出温度的升高, 一方面促进了反应产物 FeCl<sub>3</sub> 溶解度的提升, 另一方面也使得单位体积内的活化分子数量增多, 进而使活化分子浓度增大。这种变化有效提高了分子间有效碰撞的概率, 从而加速了化学反应速率。

### 2.3.4 浸出时间对 Fe 浸出率的影响

图 8 为浸出时间对 Fe 浸出率的影响。试验条件为: 盐酸浓度 6 mol/L, 液固体积质量比 8 : 1, 浸出温度 90 °C。

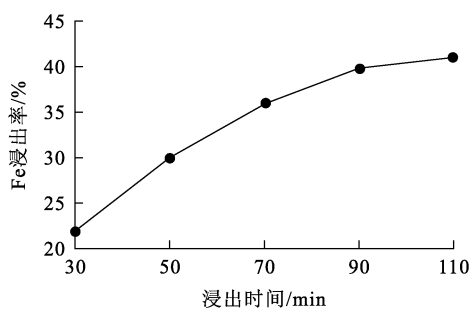


图 8 浸出时间对 Fe 浸出率的影响

Fig. 8 Effect of leaching time on leaching rate of Fe

由图 8 看出: Fe 浸出率随浸出时间延长呈先升高后趋于平稳趋势。综合考虑 HCl 浓度、液固体积质量比、浸出温度、浸出时间, 确定最佳浸出条件为: HCl 浓度 6 mol/L, 液固体积质量比 8 : 1, 浸出温度 90 °C, 浸出时间 90 min。在该条件下, Fe 浸出率为 41%。

## 2.4 电化学沉积过程

### 2.4.1 pH 随时间的变化

图 9 为溶液 pH 随电化学沉积时间的变化曲线, 电压为 3 V。可以看出: 溶液 pH 随电化学沉积时间延长逐渐升高, 这主要由于电化学沉积过程中阴极产生氢气, 氢离子被大量消耗所致; 在 0~75 min 内, 溶液 pH 从 -0.5 升至 0 缓慢, 而从 0 升至 1.9 速度较快, 这主要是因为 pH 高于 0 时, 溶液中氢离子浓度降至 1 mol/L 以下, 从而使 pH 升高速度加快。

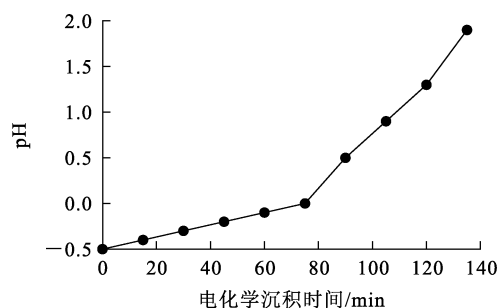


图 9 溶液 pH 随电化学沉积时间的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of solution pH with electrochemical deposition time

### 2.4.2 电流密度随时间的变化

图 10 为电流密度随电化学沉积时间的变化曲线, 电压为 3 V。可以看出: 电流密度随电化学沉积时间延长呈下降趋势, 这主要因为溶液中离子浓度逐渐降低, 导致自由移动的离子数量相应减少, 从而使电流变小; 在 0~60 min 内, 电流密度下降较为迅速, 主要因为溶液中 H<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 浓度均高于 1 mol/L, 离子浓度相对较高; 在 60~135 min 时, 电流密度下降速度则相对较慢, 主要是随电化学沉积进行, H<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 被大量消耗, 使电流减弱, 从而导致溶液导电率下降。

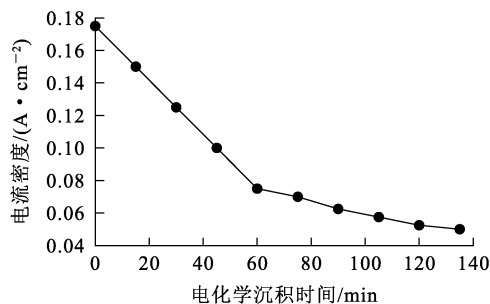


图 10 电流密度随电化学沉积时间的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of current density with electrochemical deposition time

### 2.4.3 Fe<sup>2+</sup> 质量浓度随时间的变化

图 11 为 Fe<sup>2+</sup> 质量浓度随电化学沉积时间的变化曲线,电压为 3 V。

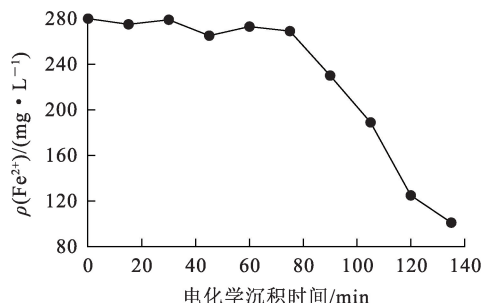


图 11 Fe<sup>2+</sup> 质量浓度随电化学沉积时间的变化曲线

Fig. 11 Variation curve of ferrous ion mass concentration with teleological deposition time

由图 11 看出:在 0~75 min 内,Fe<sup>2+</sup> 质量浓度变化并不明显,上下波动可能是测定结果误差;在 75~135 min 内,Fe<sup>2+</sup> 质量浓度快速下降,阴极有明显的沉积物生成,对应的电化学沉积 pH 在 0.5~1.9 范围内,此时溶液中的 Fe<sup>2+</sup> 在阴极区域富集并析出,从而导致溶液中 Fe<sup>2+</sup> 浓度急剧降低。

### 2.5 产物表征

图 12 为电化学沉积后阴极片上沉积物质的 XRD 分析结果。可以看出,沉积物质为铁。图 13 为阴极片上铁的形貌。可以看出:在电极片的中心区域,沉积物呈现紧凑且连续的薄膜状结构,其表面较为平滑,未观察到任何明显的裂纹或孔隙;电极片边缘部分沉积的铁则呈树枝状,这是因为铁在电极上的生长方式为岛状生长,且随电化学沉积时间延长,择优取向越来越明显,择优方向为 <111>,因此铁在电极表面生长过程中会以树枝状生长<sup>[25]</sup>;电极片中心区域与边缘的铁沉积形貌不同,可能是由于电流密度不同所致;值得注意的是,无论是在电极片的中心还是边缘,沉积出的铁均呈黑色。

沉积物质量与 pH 和时间之间的关系如图 14 所示。可以看出:随电化学沉积时间延长,溶液 pH 逐渐升高,试验中发现溶液 pH 升至 0.5 时,铁单质开始在阴极石墨片上沉积;pH 升至 1.2 时,铁沉积质量增幅逐渐减小,升至 1.9 时,不再变化,电化学沉积过程结束。电化学沉积反应虽能将滤液中部分铁元素以铁单质形式沉积在阴

极上,但随 H<sup>+</sup> 消耗,pH 逐渐升高,Fe 离子在溶液中以 Fe(OH)<sub>3</sub> 胶体形式存在,当溶液 pH 升至一定值时,电化学沉积过程结束。

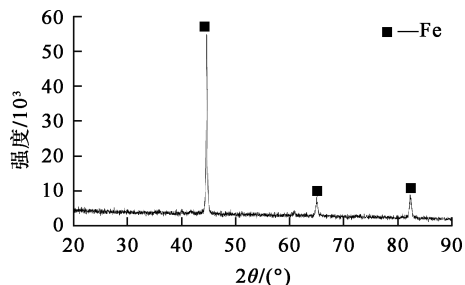


图 12 阴极片上沉积物质的 XRD 图谱

Fig. 12 XRD pattern of sediment on cathode



图 13 铁在阴极片上的形貌

Fig. 13 Morphology of Fe on cathode

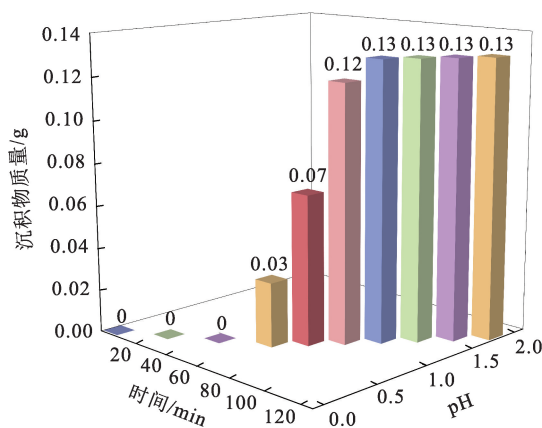


图 14 沉积物质量与 pH 和时间之间的关系

Fig. 14 Relationship of sediment quality to pH and time

## 3 结论

通过 HCl 浸出与电化学沉积法从粉煤灰中

回收提取 Fe 是可行的。浸出过程的最佳工艺条件为: HCl 浓度 6 mol/L, 液固体积质量比 8 : 1, 浸出温度 90 °C, 浸出时间 90 min。在该条件下, 铁浸出率为 41%。在 pH 为 0.5~1.9 时, 可通过电化学沉积法完成单质铁的电沉积。

该法可为多种矿物中 Fe 的提取提供参考与借鉴, 但溶液中的 Fe 元素不能通过电化学沉积过程实现完全提取, 还有待进一步优化工艺。

#### 参考文献:

- [1] LIANG Y, CHEN S, ZHONG J, et al. Acid-etched coal fly ash/TiO<sub>2</sub> nanocomposites with high photocatalytic degradation efficiency: a high value-added application of coal fly ash [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2022, 103(1): 185-194.
- [2] RAM L C, MASTO R E. Fly ash for soil amelioration: a review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 128: 52-74.
- [3] HEMALATHA T, RAMASWAMY A. A review on fly ash characteristics; towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 546-559.
- [4] SAKAI E, MIYAHARA S, OHSAWA S, et al. Hydration of fly ash cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1135-1140.
- [5] BUI P T, OGAWA Y, KAWAI K. Effect of sodium sulfate activator on compressive strength and hydration of fly-ash cement pastes [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(6). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003195.
- [6] MULDER E. A mixture of fly ashes as road base construction material [J]. *Waste Management*, 1996, 16(1/2/3): 15-20.
- [7] ALDAHRI T, BEHIN J, KAZEMIAN H, et al. Synthesis of zeolite Na-P from coal fly ash by thermo-sonochemical treatment [J]. *Fuel*, 2016, 182: 494-501.
- [8] 金一鸣, 杨西坚, 郑晏辰, 等. 高铝粉煤灰盐酸法制备氧化铝的除杂工艺 [J]. *材料与冶金学报*, 2023, 22(2): 133-140.  
JIN Yiming, YANG Youjian, ZHENG Yanchen, et al. Process for impurities removal of alumina production by hydrochloric acid method from high-alumina fly ash [J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2023, 22(2): 133-140.
- [9] 王志明. 粉煤灰盐酸法提取氧化铝分离除杂技术综述 [J]. *化工管理*, 2023(7): 78-80.  
WANG Zhiming. Review on separation and purification technology of alumina: a extracted from coal ash by hydrochloric acid method [J]. *Chemical Management*, 2023(7): 78-80.
- [10] 周小平, 王莎莎, 魏建成, 等. 从粉煤灰中酸浸铝铁镓的试验研究 [J]. *非金属矿*, 2022, 45(4): 65-67.  
ZHOU Xiaoping, WANG Shasha, WEI Jiancheng, et al. Experimental study on acid leaching of aluminum, iron and gallium from fly ash [J]. *Nonmetallic Ore*, 2022, 45(4): 65-67.
- [11] 王宏宾, 杜艳霞, 高桂梅, 等. 粉煤灰中稀土元素的酸溶特性 [J]. *稀土*, 2023, 44(2): 130-138.  
WANG Hongbin, DU Yanxia, GAO Guimei, et al. The acid-soluble stripping characteristics of rare earth in the fly ash [J]. *Chinese Rare Earths*, 2023, 44(2): 130-138.
- [12] 刘宸嘉, 赵爱春, 李旭, 等. 粉煤灰提取氧化铝研究进展 [J]. *中国有色冶金*, 2023, 52(1): 75-83.  
LIU Chenjia, ZHAO Aichun, LI Xu, et al. Research development on extracting alumina from fly ash [J]. *China Non-ferrous Metallurgy*, 2023, 52(1): 75-83.
- [13] 朱士飞, 吴蒙, 张谷春, 等. 粉煤灰提取氧化铝研究进展 [J]. *中国煤炭地质*, 2021, 33(12): 83-86.  
ZHU Shifei, WU Meng, ZHANG Guchun, et al. Progress in alumina extraction from fly ash research [J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(12): 83-86.
- [14] 张宇娟, 张永锋, 孙俊民, 等. 高铝粉煤灰提取氧化铝工艺研究进展 [J]. *现代化工*, 2022, 42(1): 66-70.  
ZHANG Yujuan, ZHANG Yongfeng, SUN Junmin, et al. Research progress on extraction of alumina from high-aluminum fly ash [J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(1): 66-70.
- [15] 闫光, 刘伟峰, 孙淑英, 等. 粉煤灰酸碱介质中锂资源提取研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2021, 40(5): 366-373.  
YAN Guang, LIU Weifeng, SUN Shuying, et al. Research progress on lithium extraction from acid/alkali mediums of fly ash [J]. *Materials China*, 2021, 40(5): 366-373.
- [16] 汤梦成. 碱熔-酸浸提取粉煤灰中稀土元素研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [17] SINGH R, SINGH L, SINGH S V. Beneficiation of iron and aluminium oxides from fly ash at lab scale [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 145: 32-37.
- [18] SHI Y, JIANG K X, ZHANG T A, et al. Electrolysis designed for clean production of selective iron products from coal fly ash leachate [J]. *Hydrometallurgy*, 2021. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105617.
- [19] SHI Y, JIANG K X, ZHANG T A. Cleaner extraction of alumina from coal fly ash: baking-electrolysis method [J]. *Fuel*, 2020, 273. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117697.
- [20] ZOU G, LIU R, CHEN W. Highly textural lamellar meso-structured magnesium hydroxide via a cathodic electro-deposition process [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(10): 1990-1993.
- [21] CZECH T. Morphology and chemical composition of magnetic particles separated from coal fly ash [J]. *Materials*, 2022, 15(2). DOI: 10.3390/ma15020528.
- [22] LIU J L, YU Z M, ZHENG J, et al. Red mud/silica sand tailing-derived glasses and glass-ceramics for architectural decoration [J]. *Nonmetallic Ore*, 2022, 45(4): 65-67.

- tion; crystallization, structure, properties and immobilization of heavy metals [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132873.
- [23] WANG W B, SONG J W, SHI Z M, et al. Crystallization behavior and properties of quartz glass-ceramics synthesized from desert sand[J]. *Ceramics International*, 2024, 50 (1): 370-383.
- [24] 吴艳, 翟玉春, 牟文宁. 粉煤灰提铝渣的除铁工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2007(6): 37-39.
- WU Yan, ZHAI Yuchun, MU Wenning. Technical study on iron removal from fly ash residues by acid-leaching[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2007(6): 37-39.
- [25] 王振宇, 丁国, 李岩, 等. 不同电极排列方式下纯铁薄膜晶粒的生长行为[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(2): 111-118.
- WANG Zhenyu, DING Guo, LI Yan, et al. Grain growth behavior of pure iron film under different electrode arrangements[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33 (2): 111-118.

## Electrodeposition of Iron from Fly Ash Leaching Solution

WANG Cunquan, SHI Zhiming

(*School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China*)

**Abstract:** The extraction of iron from fly ash by HCl leaching and electrochemical deposition was studied. The micro-morphology and elemental composition of fly ash were systematically analyzed by SEM-EDS, XRF, ICP and XRD, and the key factors in the leaching process and their effects were investigated. The dynamic changes of pH, current density and Fe ion concentration during electrochemical deposition were also discussed. The results show that the iron leaching rate increased with the increase of HCl concentration, liquid volume to solid mass ratio, leaching temperature and leaching time. In the electrochemical deposition stage, pH increases gradually, while current density and Fe ion concentration decrease. The optimal leaching parameters are HCl concentration of 6 mol/L, liquid volume to solid mass ratio (HCl solution to fly ash) of 8 : 1, reaction temperature of 90 °C, reaction time of 90 min. For the electrochemical deposition process, the voltage is 3 V, the optimal pH range is between 0.5 and 1.9, and the final sediment is pure iron.

**Key words:** HCl; leaching; electrochemical deposition; iron; fly ash