

超声波增强炼钢渣中钙的 浸出用于 CO₂ 矿物封存

刘建平¹, 陈 林^{2,3}, 宇文超^{2,3}, 刘秉国^{2,3*}, 郭胜惠^{2,3}

(1. 云南云铜锌业股份有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 3. 昆明理工大学非常规冶金省部共建教育部重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘 要: 炼钢渣是一种含有大量硅酸钙的碱性废物, 可用于钢铁企业捕获 CO₂ 并合成高附加值的 CaCO₃。在此研究了在乙酸溶液中超声对炼钢渣中 Ca 的浸出率和选择性提取率的影响。试验结果表明, 超声功率、液固比和乙酸溶液的初始浓度与 Ca 的浸出率呈正相关, 但炼钢渣的粒度和温度与 Ca 的浸出率呈负相关。温度和乙酸溶液的初始浓度与 Ca 的选择性提取率呈负相关。此外, 超声功率和固液比对 Ca 的选择性提取率影响不大, 但增加超声功率和固液比会增加非钙杂质元素的浸出率。在 0.5 mol/L 乙酸水溶液中提取 0.96 μm 以下炼钢渣中的钙, 反应 40 min 后 Ca 的选择性提取率高达 96.7%。在浸出过程中, 超声可以有效打破和去除炼钢渣颗粒表面残留的二氧化硅形成的多孔钝化层, 提高 Ca 的浸出率。

关键词: 炼钢渣; CO₂ 矿物碳化; 超声; 钙; 浸出率; 选择性提取率

中图分类号: X757

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0091-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.014

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Enhancement of leaching of Ca from steelmaking slag by ultrasonic for CO₂ mineral sequestration

Liu Jianping¹, Chen Lin^{2,3}, Yuwen Chao^{2,3}, Liu Bingguo^{2,3*}, Guo Shenghui^{2,3}

(1. Yunnan Yuntong Zinc Co., Ltd., Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 3. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: Steelmaking slags containing large amounts of Ca silicate is a potentially alkaline waste that can be used to capture CO₂ to synthesize high-quality CaCO₃. Here, effect of ultrasonic on leaching efficiency and selective leaching rate of Ca in steelmaking slags was studied in acetic acid solution. Experimental results shown that ultrasound could help to strengthen leaching of Ca in acetic acid solution. Ultrasonic power, liquid-solid ratio, and initial acetic acid solution concentration were positively correlated with Ca extraction, but particle size of steelmaking slags and temperature were negatively correlated with Ca extraction. Meanwhile, temperature and initial concentration of acetic acid solution had a negative correlation to selective extraction yield of Ca, which were beneficial for the diffusion of impurity elements. Also, ultrasonic power and solid to liquid ratio were insignificant effect to selective extrac-

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 51961020); 国家重点研发计划 (编号: 2018YFC1900500)。

作者简介: 刘建平 (1982—), 男, 江西广昌人, 博士在读, 高级工程师, 主要从事冶金固废资源的综合利用, E-mail: liujianping312@163.com。* 通讯作者: 刘秉国 (1973—), 男, 甘肃张掖人, 博士, 教授, 主要从事微波冶金新技术和新工艺的研究, E-mail: bingoliu@126.com。

tion yield of Ca, but increase of ultrasonic power and solid to liquid ratio were also helpful to the diffusion of impurity elements. It was worth noting that decreasing grain size of steelmaking slags would raise selective leaching efficiency of Ca and the maximum selective leaching rate upped to 96.7%. During leaching process, ultrasonic could effectively break and remove the porous passivation layer formed by residual silica on surface of steelmaking slags particles, and improved leaching rate of Ca.

Key words: steelmaking slags, CO₂ mineral carbonation, ultrasonic, Ca, leaching rate, selective leaching rate

0 引言

2019 年全球碳排放量达到惊人的 368 亿 t, 减少 CO₂ 排放, 捕获和封存 CO₂ 可以显著改善 CO₂ 排放带来的环境问题。我国作为 CO₂ 气体排放大国, 面临着严重的环境问题和巨大的碳中和压力。由于其他固定 CO₂ 技术的局限性, CO₂ 矿物碳化被认为是一种有前途的缓解工业 CO₂ 排放的方法^[1-4]。该方法可以永久储存 CO₂, 无泄漏, 也不会导致其他负面的环境问题。目前, CO₂ 储存的主要原料是天然矿物, 包括蛇纹石^[5-12]、硅灰石^[13-15]、橄榄石^[16-18]、磷石膏^[19]等。工业固体废物也被考虑用于封存 CO₂, 其中包括炼钢渣^[20-23]、水泥废料^[24-25]、工业盐水^[26]等。由于天然矿物只能在采矿活动中产生, 并面临着一些障碍和挑战, 如大规模的材料消耗, 距离 CO₂ 排放较远。因此工业固体废物被视为捕获和封存 CO₂ 的替代材料^[27-29]。炼钢渣作为炼钢过程的工业副产品, 由于含有较高的 Ca 元素, 适合储存 CO₂。与天然矿石相比, 炼钢渣是一种潜在的碱性废物, 其主要优点是成本效益高, 化学性质不稳定, 而且接近 CO₂ 排放源。此外, 钢铁企业利用炼钢渣储存 CO₂, 不仅可以生产高附加值的 CaCO₃, 产生直接的经济效益, 还可以减少企业的 CO₂ 排放, 满足国家 CO₂ 减排的要求。然而, 目前利用炼钢渣储存 CO₂ 的研究仅集中在传统的浸出和碳化工艺上, 对强化钢渣浸出工艺, 特别是超声波的应用缺乏系统研究。

以前的大量研究表明, CO₂ 可以通过碳化沉淀和储存。Zhang 等人^[30]发现炼钢渣的转化率由于不同的浸出时间和 NH₄Cl 浓度而发生变化, 当 NH₄Cl 浓度为 0.4 mol/L, 浸出 120 min 时, 获得最大的 Ca 浸出率为 68%, Ca 的选择性浸出率为 93%。Hall 等人^[31]进一步研究了硅酸二钙颗粒的岩石结构对炼钢渣中 Ca 浸出的影响, 结果表明, 随着浸出时间的延长, 富硅区的体积会减少。同时, NH₄Cl 溶剂对炼钢渣中 Ca 的选择性浸出率在 95%~97%。Teir

等人^[31]研究了乙酸对炼钢渣中 Ca 的溶解情况, 发现在乙酸体系中炼钢渣中的 Ca 迅速溶解, 而 Si 形成凝胶, 在 70 °C 下容易被机械过滤去除。但是缺乏对乙酸溶液浸出炼钢渣的选择性的研究。此外, 超声波作为冶炼行业的外场强化手段, 可以显著打开矿物包裹层, 提高元素的浸出率^[32]。

在此, 我们研究了在乙酸溶液中用超声波强化不同粒径的炼钢渣中 Ca 的提取效率。此外, 还研究了各种因素对乙酸溶液中超声浸出 Ca 选择性的影响。Ca 的高选择性浸出可以帮助后期矿物碳化生产高纯度的 CaCO₃ 产品。最后, 研究了超声搅拌情况下的溶解行为, 这可以帮助我们了解如何通过超声从炼钢渣中浸出 Ca。

1 试验

1.1 试验原料

试验用炼钢渣由昆明钢铁厂提供。钢渣在鼓风炉中干燥, 在 110 °C 下去除残留的水分, 然后在振动盘式粉碎机中粉碎, 并均匀地筛分成三个粒度等级(即, 粒级 1: 180~380 μm; 粒级 2: 96~180 μm; 粒级 3: 0~96 μm)。

1.2 炼钢渣的浸出试验

试验开始时, 将一定体积的乙酸水溶液加入到 500 mL 的三颈圆底烧瓶中, 并将烧瓶置于控温的水浴中。乙酸水溶液在反应器中用磁力搅拌器以一定速度进行搅拌。超声波探针声纳器插入乙酸介质中约 3 cm 深, 该浸出介质溶液的深度约为 4.5 cm。当溶液处理到设定的温度值时, 将准备好的炼钢渣倒入反应器, 同时快速输入预定功率的超声波, 并记录反应时间。试验中, 用室温的水通过外接的冷凝器将汽化的乙酸快速回流到反应器中, 以避免乙酸水溶液的蒸发损失。试验结束后, 停止搅拌和超声处理, 通过真空泵过滤浸出液, 收集残渣, 用超纯水清洗, 最后在 80 °C 下干燥 24 h。

试验内容: 首先将 10 g 的粒径为 0~96 μm 炼

钢渣 20 ℃ 下溶解在 200 mL 的 0.5 mol/L 的乙酸溶液中浸出 40 min, 讨论了不同超声功率 (0, 100, 200 W) 对炼钢渣中钙浸出率的影响; 在得到最优超声功率后, 依次讨论了不同粒径 (80 ~ 380 μm、96 ~ 180 μm、0 ~ 96 μm)、固液比 (1 : 10、1 : 15、1 : 20)、温度 (20、30、40 ℃)、乙酸初始溶液浓度 (0.25、0.5、1 mol/L)、时间 (2、5、10、20、30、40 min) 对浸出效果的影响。

1.3 炼钢渣中钙的提取效率和选择性

将炼钢渣加入 200 mL 的不同浓度的乙酸溶液中, 持续 40 min, 用 ICP-AES 分析法研究炼钢渣中 Ca 的提取效率和选择性。炼钢渣中 Ca 的浸出率 (η_{Ca}) 可用式(1)计算^[33]。

$$\eta_{Ca} = \frac{v_i \cdot \rho_i \cdot 200}{w_0 \cdot x_i} \times 100\% \quad (1)$$

其中, ρ_i 是 ICP-AES 分析的浸出水溶液中 Ca、Mg、Fe 的质量浓度 (mg/L); v_i 为浸出水溶液的体积 (mL); 200 为浸出水溶液的稀释倍数; w_0 是加入炼钢渣的质量 (g); x_i 是所加炉渣中的 Ca、Mg 和 Fe 元素含量。由于炼钢渣中铝的含量很低, 而且硅元素

可以通过过滤去除^[31], 所以不考虑铝和硅的浸出行为。

选择性提取率的计算公式如下:

$$\eta = \frac{c_{Ca}}{c_{Ca} + c_{Mg} + c_{Fe}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, c_{Ca} 、 c_{Mg} 、 c_{Fe} 分别为溶液中钙、镁、铁的浓度 (mol/L)。

需要指出的是, 浸出液中包含的金属元素乙酸盐主要有乙酸钙、乙酸镁、乙酸铁等, 而其他金属元素含量相对较少, 因此其他金属元素乙酸盐可不予考虑。

2 结果与讨论

2.1 原材料表征

表 1 显示了炼钢渣经过破碎筛分后的 XRF 分析。结果表明, 不同粒径的炼钢渣中的元素含量没有明显差异。炼钢渣含有的高浓度的 Ca (28.64% ~ 28.89 %) 可以用来储存 CO₂ 以产生高价值的 CaCO₃。此外, 炼钢渣中含有大量的铁 (14.33% ~ 15.57%), 少量的 Si (3.87% ~ 3.98%)、Mg (3.32% ~ 3.78%) 和 Mn (3.18% ~ 3.72%), 以及微量的 Ti 和 V。

表 1 炼钢渣的 XRF 分析化学成分^a
Table 1 Chemical composition of the steelmaking slags by XRF-analysis^a

编号	粒度/μm	w/%									
		O	Ca	Fe	Si	Mg	Mn	Ti	C	P	V
试样1	180 ~ 380	39.18	28.89	14.33	3.87	3.32	3.18	2.07	1.94	1.12	1.01
试样2	96 ~ 180	37.20	28.76	15.57	3.98	3.78	3.72	1.91	1.70	1.29	1.03
试样3	0 ~ 96	37.57	28.64	15.45	3.93	3.74	3.67	1.92	1.71	1.28	1.00

^a只显示含量高于1%的元素。

炼钢渣中钙的富集状态与钙的浸出率息息相关。图 1 显示了不同粒径炼钢渣的 XRD 谱。从图 1 可以看出, 不同粒径的炼钢渣样品含有相同的钙化合物, 包括硅酸二钙 (Ca₂SiO₄)、钛酸钙 (CaTiO₃)、石灰 (CaO) 和氧化铁钙 (CaFeO₂), 而炼钢渣中的铁化合物主要是氧化铁钙 (CaFeO₂)。同时, XRD 结果也表明, 该炼钢渣不含铝化合物, 这也与 XRF 分析一致。

2.2 超声强化对炼钢渣中 Ca 浸出的影响

图 2(a) 显示了不同的超声功率对炼钢渣中 Ca 的浸出率的影响。在 20 ℃ 下, 将 10 g 的粒径为 0 ~ 96 μm 炼钢渣溶解在 200 mL 的 0.5 mol/L 的乙酸溶液中。结果表明溶液中 Ca 的质量浓度与超声功率呈正相关。200 W 时, 在 40 min 内, 溶液中 Ca 的质

量浓度比不使用超声波的情况下增加了 50.96%, Ca 的浸出率可达 43.9%。同时, ICP-AES 分析结果表明, 机械搅拌只能浸出 29.1% 的 Ca。结果表明, 使用超声可以提高乙酸溶液中 Ca 的浸出率。这可能由于超声波打开了包裹, 也强化了钝化层的去除, 提高了 Ca 的提取率^[33]。

图 2(b) 显示了不同粒度的炼钢渣在乙酸溶液中的 Ca 浸出效率。具体的试验过程是: 在 200 W 的超声功率和 20 ℃ 的恒温条件下, 将 10 g 不同粒度的炼钢渣溶解在 200 mL 的 0.5 mol/L 乙酸溶液中。结果表明, 不同粒度的炼钢渣对 Ca 的提取有明显影响。Ca 的最大提取量与粒径呈负相关。此外, 对于小粒径的炼钢渣而言, 30 min 后的 Ca 质量

浓度比 30 min 前有所下降。综上所述,炼钢渣的粒径越小,其表面积越大,传质率越高,从而导致钙的提取效率的提高。

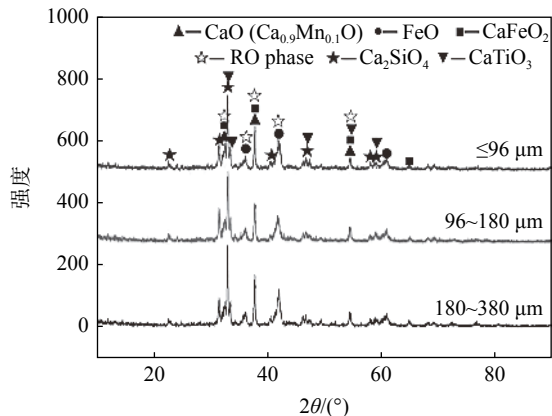


图1 不同粒径钢渣的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of steel slag with different particle sizes

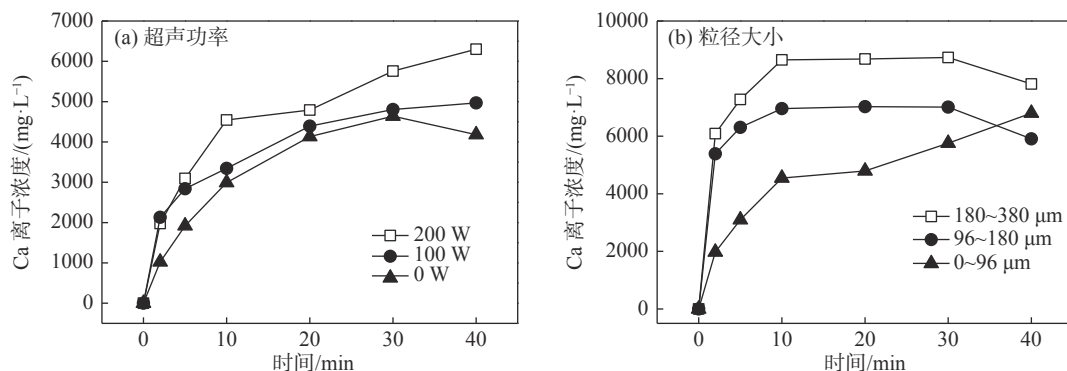


图2 不同因素对钢渣中钙浸出的影响

Fig. 2 Effect of different factors on calcium leaching in steel slag

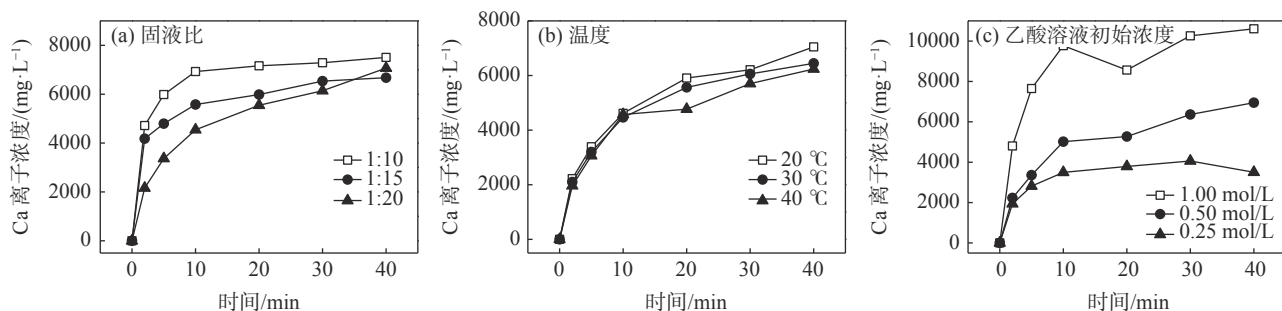


图3 不同因素对钢渣中钙浸出的影响

Fig. 3 Effect of different factors on calcium leaching in steel slag

图3(b)显示了体系温度对超声波浸出炼钢渣中Ca提取率的影响。在200 W的超声功率下,将10 g的炼钢渣溶解在200 mL的0.5 mol/L的乙酸溶液中,体系的反应温度分别保持在20、30、40℃左右,并记录不同时间体系中的Ca浓度。结果表明,温度对炼钢渣中的Ca提取没有明显的影响。

图3(a)展示了不同固液比的炼钢渣在乙酸溶液中的Ca浸出效果,具体的试验过程是:在200 W的超声功率和20℃的恒温条件下,将10 g的0~96 μm的炼钢渣溶解在200 mL的0.5 mol/L乙酸溶液中,当固液比为1:10和1:15时,由于超声波加强了浸出过程中的质量传递,开始阶段浸出较快,10 min后Ca的提取量变化较小,最终Ca的浸出率并不高,仅有26.14%。相反,固液比为1:20的Ca提取效率比固液比为1:10或1:15的要好一些,而且10 min后Ca的浸出率明显增加。这说明超声波可以有效地去除炼钢渣表面的钝化层,充分提取炼钢渣中的Ca。但在固液比为1:10和1:15时,溶液中的乙酸量不足以完全浸出炼钢渣中的Ca。为了充分研究超声波对炼钢渣中Ca提取的影响,后续研究采用1:20的固液比。

在试验初期用超声波加强Ca的浸出时,温度的提高并没有加速Ca的浸出过程。10 min后,40℃时Ca的浸出量略低于30℃和20℃时。这表明,炼钢渣的溶解度随着温度的升高而有一定程度的下降,这是由于钢渣中的硅被浸出时形成硅胶,当温度升高后,溶液中硅容易吸附在钢渣表面,阻止浸出反应

进一步进行^[32]。

图 3(c)显示了不同初始浓度的乙酸溶液对炼钢渣中 Ca 浸出效果的影响。在 200 W 的超声功率下, 将 10 g 的炼钢渣加入 200 mL 不同浓度的乙酸溶液中, 在不同时间记录体系中的 Ca 浓度。结果表明, 乙酸溶液的初始浓度对 Ca 的浸出有很大影响。在 0.25 mol/L 乙酸溶液中停留 40 min 后, Ca 浸出只有 3 501 mg/L, 而在使用 1.0 mol/L 乙酸溶液时, 40 min 后, Ca 浸出为 10 609 mg/L。这表明, 使用更高浓度的乙酸水溶液是提高 Ca 提取效率的一种有效的方法。

2.3 不同的试验因素对炼钢渣中 Ca 选择性提取的影响

笔者研究了超声强化浸出过程中不同因素对 Ca 提取的影响。从炼钢渣中浸出 Ca 的过程中, 其他非钙杂质不可避免地会进入溶液, 如 Fe、Mg、Al、Si 等。因此, 系统中不同金属元素的溶解行为可以用来评估 Ca 的选择性提取率。Al 元素在原料中比较少见, Si 元素在浸出过程中可以通过过滤去除, 因此, 在研究 Ca 的选择性浸出率时没有考虑它们。图 4 显示了各种因素对 Ca、Fe 和 Mg 提取率的关系。

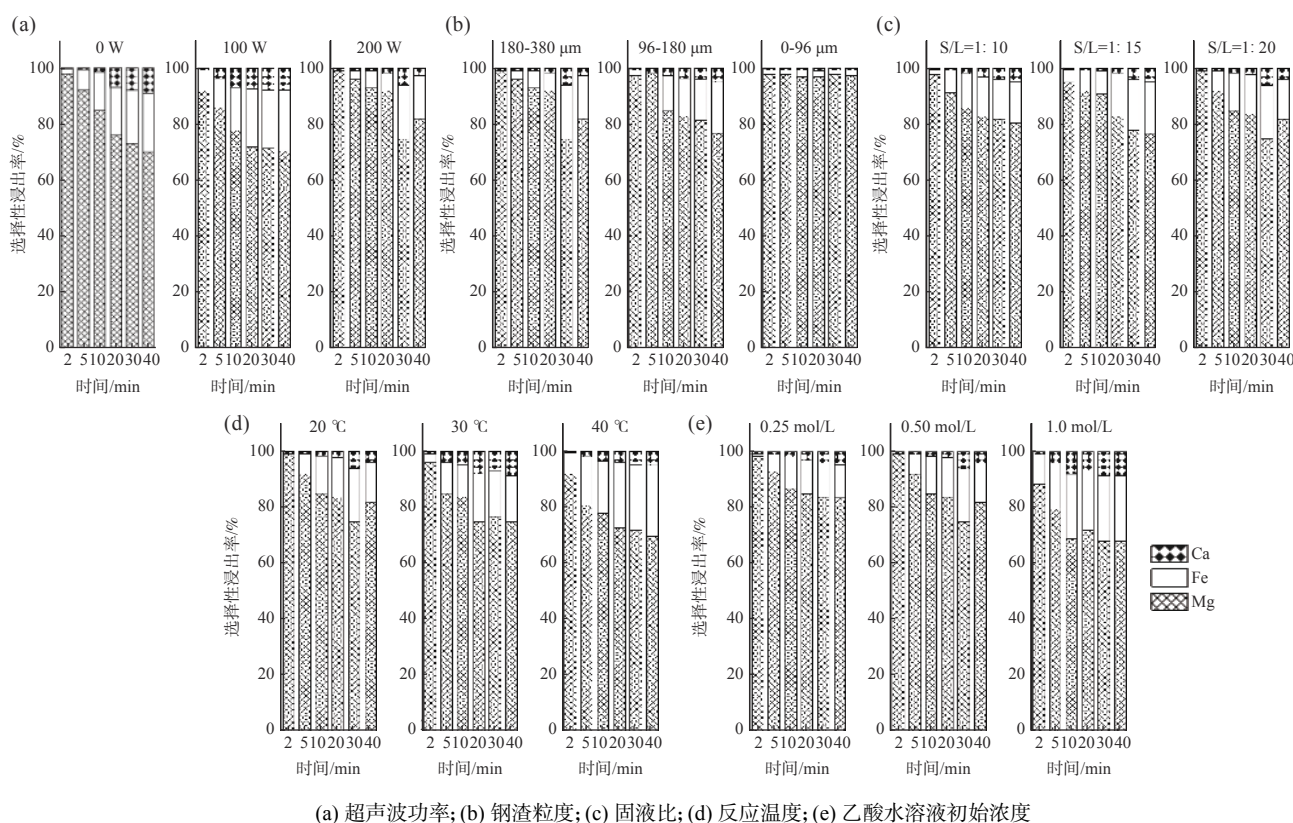


图 4 不同因素对钢渣乙酸水溶液中钙、铁、镁选择性浸出率的影响

Fig. 4 Effect of different factors on selective leaching rate of calcium, iron and magnesium in acetic acid aqueous solution of steel slag

如图 4 所示, 对于不同的因素, Ca 的选择性提取率随着时间的推移逐渐下降。相反, 随着浸出过程的进行, Fe 和 Mg 的选择性提取率逐渐增加。有趣的是, 超声功率和固液比对 Ca 的选择性提取率影响不大, 但超声功率和固液比的增加有助于金属元素的扩散。更重要的是, 炼钢渣的粒度对 Ca 的选择性提取率有显著影响, 当炼钢渣的粒度降低时, 会提高 Ca 的选择性提取率。特别是在 0.5 mol/L 乙酸水溶液中提取 0.96 μm 粒径的炼钢渣中的钙,

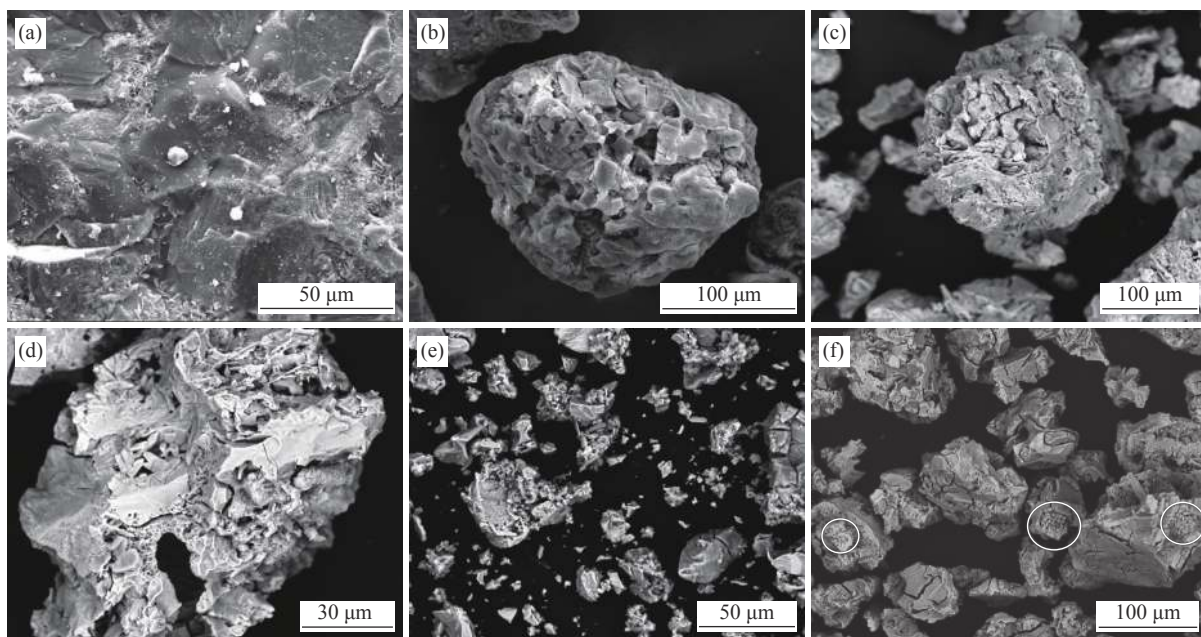
反应 40 min 后 Ca 的选择性提取率高达 96.7%。此外温度(图 4(d))和乙酸初始浓度(图 4(e))与 Ca 的选择性提取率呈负相关, 这可能是由于较高的温度和乙酸水溶液的初始浓度有利于杂质元素的扩散, 浸出液中杂质元素的浓度随着温度和乙酸水溶液初始浓度的增加而增加^[31]。

2.4 超声波对炼钢渣中钙浸出行为的影响

用扫描电镜观察了原炼钢渣样品的微观结构和溶解残留物, 初始乙酸浓度为 0.5 mol/L, 温度 40 °C,

时间 40 min, 不同条件下浸出渣的 SEM 形貌如图 5 所示。图 5(a)显示了未反应的炼钢渣的 SEM 形貌; 图 5(b)为机械搅拌下 180 ~ 380 μm 粒径的溶解残留物的 SEM 形貌; 图 5(c)和 5(d)显示了使用不同的超声波功率时, 180 ~ 380 μm 粒径钢渣的溶解残留物的 SEM 形貌; 图 5(e)和 5(f)显示了当超声波功率保持不变时不同粒度的溶解残留物的 SEM 形貌。可以看出, 原始炼钢渣表面几乎没有孔隙, 而浸出处理后的残留固体表面的孔隙数量明显

增加, 但是只有少数区域的炼钢渣颗粒显示出由于机械搅拌而导致的溶解特征, 结果显示炼钢渣表面有明显的硅胶覆盖, 这是由于常规浸出后硅与溶液的反应所致^[34]。超声处理后的颗粒表面显示出较高的腐蚀性, 此外, 在图 5(c)和 5(d)中也没有观察到颗粒表面被细小的二氧化硅覆盖, 这表明超声的空化作用可以打开硅胶包裹氧化铁和氧化钙等金属氧化物形成的钝化层, 在炼钢渣表面形成多孔结构, 从而提高钙的浸出率。



初始乙酸浓度=0.5 mol/L, 温度=40 $^{\circ}\text{C}$, 时间=40 min

(a)原料(粒度=180 ~ 380 μm); (b)机械搅拌(粒度=180 ~ 380 μm); (c)超声(超声功率=100 W, 粒度=180 ~ 380 μm); (d)超声(超声功率=200 W, 粒度=180 ~ 380 μm); (e)超声(超声功率=200 W, 粒度=0 ~ 96 μm); (f)超声(超声功率=200 W, 粒度=96 ~ 180 μm)

图 5 不同条件浸出渣的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of leaching residue under different conditions

在前面的研究结果中, 可以明显发现 Ca 的选择性提取率随着炼钢渣粒度的减小而提高。从图 5(e)和 5(f)可以看出, 超声波对小粒径的炼钢渣有很强的破碎作用, 同时也容易导致腐蚀坑和不规则表面的颗粒溶解(圆圈标记), 进一步形成了较小的炼钢渣颗粒。较小的炼钢渣具有较大的表面积和较好的传质率, 进一步导致了较高的提取效率。此外, 由于超声强化浸出, Ca 优先溶解在乙酸溶液中, 并降低了 Fe 和 Al 的溶解效率。对于大粒径的炼钢渣, 溶解过程主要是乙酸对炼钢渣表面的不断侵蚀。超声波不断去除表面钝化层, 产生新的界面。然而, 与小颗粒炼钢渣的溶解过程相比, 乙酸侵蚀过程的反应速度很慢。

3 结论

研究了超声波对炼钢渣中 Ca 浸出率的影响, 发现超声波可以显著提高乙酸溶液中 Ca 的浸出率。不同的因素对 Ca 的提取率有很大影响。超声功率、液固比和乙酸溶液的初始浓度与 Ca 的浸出率呈正相关, 而炼钢渣的颗粒大小和温度与 Ca 的浸出率呈负相关关系。温度和乙酸溶液的初始浓度与 Ca 的选择性提取率呈负相关, 较高的温度和乙酸浓度有利于杂质元素的扩散。超声功率和固液比对 Ca 的选择性提取率影响不大, 但增加超声功率和固液比会导致非钙杂质大量进入溶液。值得注意的是, 降低炼钢渣的粒度会提高 Ca 的选择性提取率, 最高值可达 96.7%。通过对超声处理后部分炼钢渣浸

出残渣进行了 SEM 扫描, 发现浸出过程中剩余的二氧化硅很容易在炼钢渣颗粒表面形成多孔钝化层, 这些钝化层可以被超声波有效地破碎和去除, 因此超声波可以显著提高炼钢渣中 Ca 的提取率。同时,

超声波对小粒径的炼钢渣有较强的破碎作用。总之, 超声波强化了炼钢渣中钙的浸出以及提高了钙的选择性浸出, 为下一步 CO₂ 的捕集并生成高纯度碳酸钙奠定了基础。

参考文献

- [1] Metz B, Davidson O, Coninck H, *et al.* Special report on carbon dioxide capture and storage[R]. UK: Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [2] Lackner K S. Carbonate chemistry for sequestering fossil carbon[J]. Social Science Electronic Publishing, 2002, 27(1): 193–232.
- [3] Huijgen W J J, Comans R N J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation, literature review[R]. Energy Research Centre of the Netherlands ECN. 2003.
- [4] Huijgen W J J, Comans R N J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: literature review update 2003–2004[R]. Energy Research Centre of the Netherlands ECN. 2005.
- [5] Wang X, Maroto-Valer M M. Integration of CO₂ capture and mineral carbonation by using recyclable ammonium salts[J]. *Chem. Sus. Chem.*, 2011, 4(9): 1291–1300.
- [6] Werner M, Verduyn M, Mossel G, *et al.* Direct flue gas CO₂ mineralization using activated serpentine: Exploring the reaction kinetics by experiments and population balance modelling[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2043–2049.
- [7] Teir S, Kettle J, Harlin A, *et al.* Production of silica and calcium carbonate particles from silica minerals for inkjet paper coating and filler purposes[C]//ACEME10. 2010: 63–74.
- [8] Teir S, Eloneva S, Fogelholm C J, *et al.* Fixation of carbon dioxide by producing hydromagnesite from serpentinite[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(2): 214–218.
- [9] Krevor S C, Lackner K S. Enhancing process kinetics for mineral carbon sequestration[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 4867–4871.
- [10] Zevenhoven R, Teir S, Eloneva S. Heat optimisation of a staged gas–solid mineral carbonation process for long-term CO₂ storage[J]. *Energy*, 2008, 33(2): 362–370.
- [11] Boschi C, Dini A, Dallai L, *et al.* Enhanced CO₂ mineral sequestration by cyclic hydraulic fracturing and Si-rich infiltration into serpentinites at Malenrata[J]. *Chem. Geol.*, 2009, 265(1–2): 209–226.
- [12] Fagerlund J, Teir S, Nduagu E, *et al.* Carbonation of magnesium silicate mineral using a pressurised gas/solid process[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 4907–4914.
- [13] Daval D, Martinez I, Corvisier J, *et al.* Carbonation of Ca-bearing silicates, the case of wollastonite: experimental investigations and kinetic modelling[J]. *Chem. Geol.*, 2009, 265(1–2): 63–78.
- [14] Baldyga J, Henczka M, Sokolnicka K. Utilization of carbon dioxide by chemically accelerated mineral carbonation[J]. *Mater. Lett.*, 2010, 64(6): 702–704.
- [15] Ghoorah M, Dlugogorski B Z, Balucan R D, *et al.* Selection of acid for weak acid processing of wollastonite for mineralization of CO₂[J]. *Fuel*, 2014, 122: 277–286.
- [16] Machenbach I, Brandvoll O, Wihle J, *et al.* Development of an industrial process concept for CO₂ sequestration by mineral carbonation[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering. 2008: 459–461.
- [17] Dufaud F, Martinez I, Shilobreeva S. Experimental study of Mg-rich silicates carbonation at 400 and 500 °C and 1 kbar[J]. *Chemical Geology*, 2009, 265(1–2): 79–87.
- [18] Haug T A, Johansen H, Brandvoll O. The way forward for mineral carbonation—importance of collaboration, experiments and modelling[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering. 2010: 113–119.
- [19] Zhao H, Li Bao, Wang W, *et al.* Experimental study of enhanced phosphogypsum carbonation with ammonia under increased CO₂ pressure[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2015, 11: 10–19.
- [20] Said A, Mattila H P, Järvinen M, *et al.* Production of precipitated calcium carbonate (PCC) from steelmaking slag for fixation of CO₂[J]. *Applied Energy*, 2013, 112(4): 765–771.
- [21] Hall C, Large D J, Adderley B, *et al.* Calcium leaching from waste steelmaking slag: Significance of leachate chemistry and effects on slag grain mineralogy[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 65(6): 156–162.
- [22] Revathy T D R, Palanivelu K, Ramachandran A. Direct mineral carbonation of steelmaking slag for CO₂ sequestration at

- room temperature[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(8): 7349–7359.
- [23] Sun Y, Yao M S, Zhang J P, *et al.* Indirect CO₂ mineral sequestration by steelmaking slag with NH₄Cl as leaching solution[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 173(2): 437–445.
- [24] Gunning P J, Hills C D, Carey P J. Accelerated carbonation treatment of industrial wastes[J]. *Waste Management*, 2010, 30(6): 1081–1090.
- [25] Chiang Y W, Santos R, Elsen J, *et al.* Two-way valorization of blast furnace slag into precipitated calcium carbonate and sorbent materials[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering. 2013: 357–367.
- [26] Nyambura M G, Mugeru G W, Felicia P L, *et al.* Carbonation of brine impacted fractionated coal fly ash: Implications for CO₂ sequestration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 655–664.
- [27] Teir S. Fixation of carbon dioxide by producing carbonations from minerals and steelmaking slags[M]. Finland: Espoo, Teknillinen Korkeakoulu, 2008.
- [28] Uibu M, Uus M, Kuusik R. CO₂ mineral sequestration in oil-shale wastes from Estonian power production[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1253–1260.
- [29] Sanna A, Dri M, Hall M R, *et al.* Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) – A UK perspective[J]. *Applied Energy*, 2012, 99(2): 545–554.
- [30] Zhang H N, Xu A J, He D F, *et al.* Alkaline extraction characteristics of steelmaking slag batch in NH₄Cl solution under environmental pressure[J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(6): 1482–1489.
- [31] Teir S, Eloneva S, Fogelholm C J, *et al.* Dissolution of steelmaking slags in acetic acid for precipitated calcium carbonate production[J]. *Energy*, 2007, 32(4): 528–539.
- [32] Hagenson L C, Doraiswamy L K. Comparison of the effects of ultrasound and mechanical agitation on a reacting solid-liquid system[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(1): 131–148.
- [33] Santos R M, François D, Mertens G, *et al.* Ultrasound-intensified mineral carbonation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 57(1-2): 154–163.
- [34] Sanna A, Lacinska A, Styles M, *et al.* Silicate rock dissolution by ammonium bisulphate for pH swing mineral CO₂ sequestration[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 120(4): 128–135.

编辑 杨冬梅

(上接第 18 页)

- [3] Xiao Jun. A brief analysis of the industrial development of titanium dioxide by sulfuric acid method and Panzhihua titanium slag[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2019, (5): 31–35.
(肖军. 硫酸法钛白与攀枝花钛渣产业发展浅析[J]. *中国有色冶金*, 2019, (5): 31–35.)
- [4] Zhang Shuli, Cheng Xiaozhe, Hu Hongfei. Study on digestion technology of acid-dissolved titanium slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2003, 24(1): 39–45.
(张树立, 程晓哲, 胡鸿飞. 酸溶性钛渣酸解工艺研究[J]. *钢铁钒钛*, 2003, 24(1): 39–45.)
- [5] Zou Jianxin, Wang Rongkai. Study on acid digesting titania slag during titanium dioxide production[J]. *Modern Chemical Industry*, 2003, 26: 273–276.
(邹建新, 王荣凯. 钛渣替代钛矿制备钛白酸解试验研究[J]. *现代化工*, 2003, 26: 273–276.)
- [6] Wang Bin, Cheng Xiaozhe, Han Kexi, *et al.* Research of acidolysis performance of acid-soluble titanium slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2009, 30(2): 6–11.
(王斌, 程晓哲, 韩可喜, 等. 酸溶性钛渣酸解性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2009, 30(2): 6–11.)
- [7] Shui Bigang, Ma Weiping, Cheng Xiaozhe, *et al.* Study on continuous acidolysis technology of titanium slag[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2013, 45(9): 31–34.
(税必刚, 马维平, 程晓哲, 等. 钛渣连续酸解工艺技术研究[J]. *无机盐工业*, 2013, 45(9): 31–34.)
- [8] Li Liang. Research on the acidolysis technology of Panzhihua vanadic titanomagnetite deeply reducing slag[J]. *Light Metals*, 2010, (5): 50–55.
(李亮. 熔分渣酸解性能研究[J]. *轻金属*, 2010, (5): 50–55.)

编辑 邓淑惠