

改质钢渣酸浸液浓缩时元素变化规律的研究

姜晓媛, 方佑东, 程木易, 王家凤, 苏畅, 吕宁宁
(安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

[摘要] 钢渣富含多种植物所需的营养元素,如钙、铁、磷等,可作为肥料的生产原料。钢渣经过改质处理后,浸出液中营养元素浓度常低于植物生长所需的标准,还需通过浓缩处理进一步富集。本文首先利用硝酸-柠檬酸混合溶液对采用大豆秸秆改质前后的钢渣进行浸出,之后利用草酸脱除浸出液中的钙元素,最后对浸出液进行蒸发浓缩,探究不同浓缩倍数下各元素浓度的变化规律及胶体生成机制。结果表明:改质处理可促进钢渣中Ca、P元素的浸出,对Mg、Mn、Fe的影响不大,P和K元素的浸出率分别为72.13%和63.61%;随着草酸浓度的增大,浸出液中钙的去除率不断升高,Mg、Fe、Mn、K、P的浓度变化不显著;浸出液中元素浓度随浓缩倍数成比例增长,pH值则呈相反趋势,浓缩4倍后易产生二氧化硅胶体。

[关键词] 钢渣浸出; 秸秆改质; 草酸沉淀法; 浓缩; 营养元素

[中图分类号] X757 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)05-0040-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.007

0 引言

随着钢铁产量的迅猛增长,大量钢铁废料、废水及废渣不断堆积,对环境造成了严重污染。钢渣作为钢铁生产过程中的主要固体废弃物^[1-2],同时也是一种具有较高利用价值的副产品^[3]。近年来,随着资源循环利用理念的深入人心,钢渣的有效利用对促进钢铁行业的可持续发展显得愈发重要^[4-6]。

钢渣富含多种植物所需的营养元素,如钙、铁、磷等,且大部分钢渣有毒有害元素含量较低,可作为肥料的生产原料,从而实现其高附加值利用^[7-10]。有关研究表明^[11],钢渣经过改质处理后,部分有价

元素可被浸出^[12-14],然而浸出液中营养元素浓度常低于植物生长所需的标准,还需通过浓缩处理进一步富集。常用的浓缩技术主要有蒸发浓缩和膜分离等,其中,蒸发浓缩是通过加热蒸发水分来提高元素浓度,具有操作简便、工艺参数易于控制等优势,已被广泛用于湿法浸出工艺^[15]。Tian等^[16]通过改进微波闪蒸系统,有效解决了废硫酸回收过程中设备腐蚀、产品污染等问题,同时提高了能源利用效率。李腾蛟等^[17]研究了氧化时间、酸度、钡浓度等参数对含钡料液蒸发浓缩过程中钡价态变化的影响,并阐明了亚硝酸的作用机制。陈海杰等^[18]在旋转喷雾蒸发中试平台上进行脱硫酸水浓缩液喷雾蒸发试验,系统分析不同工况及浓缩比例下废水雾化液滴群蒸发特性,并对产物进行微观形貌、组分表征及吸湿性测试,揭示了其形成机制。对钢渣而言,目前大部分研究多集中在探讨其浸出行为方面,而对浓缩过程中浸出液各元素的变化规律及影响机制的研究还较少。改质钢渣酸浸液在浓缩过程中,主要营养元素和微量元素的浓度随浓缩倍数显著提升,但伴随的pH值急剧下降和胶体沉淀生成,可能影响其作为植物营养液的稳定性和后续资源化利用。特别是胶体生成机制、微量元素迁移行为及其环境风险尚未得到充分揭示,制约了钢渣浸出液的高效利用。

本文首先利用大豆秸秆对钢渣进行改质,然后利用硝酸-柠檬酸混合溶液对改质前后的钢渣进行浸出处理,之后利用草酸对浸出液中钙元素进行脱

[收稿日期] 2025-04-03

[基金项目] 国家自然科学基金(52074004),安徽省自然科学基金项目(2508085Y032)。

[作者简介] 姜晓媛(1999—),女,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为冶金固废资源化利用。

[通信作者] 吕宁宁(1985—),男,山东济南人,教授,博士,主要研究方向为冶金固废资源化利用。

[引用格式] 姜晓媛,方佑东,程木易,等.改质钢渣酸浸液浓缩时元素变化规律的研究[J].绿色矿冶,2025,41(5):40-45,73.

JIANG Xiaoyuan, FANG Youdong, CHENG Muyi, et al. Study on the change rule of elements in the concentration of acid leach solution of modified steel slag[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 40-45, 73.

除,最后对浸出液进行蒸发浓缩,并确定改质钢渣浸出液的最佳浓缩比例,研究结果可为促进钢渣中有价组分的循环利用提供理论依据。

1 实验

1.1 改质钢渣的制备

选用某钢厂的转炉钢渣以及农业所产的大豆秸秆为原料。首先对大豆秸秆进行预处理,将其置于电阻炉中,升温至 1 173 K 保温 60 min 后,随炉冷却至室温。之后对转炉钢渣进行破碎处理,并加入 15% 预处理后的大豆灰渣,充分混合均匀。将混合物料装入氧化镁坩埚中,再外套一个石墨坩埚,置于竖式 MoSiO₂ 电阻炉中,升温至 1 773 K 保温 60 min 后随炉冷却,获得改质钢渣样品。原料及改质后钢渣的化学成分见表 1。

表 1 不同样品的化学成分 %

类型	CaO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO	K ₂ O
大豆灰渣	31.75	3.86	0.60	12.82	3.29	0.17	42.84
钢渣	49.48	2.61	24.61	3.63	13.46	2.10	—
改质钢渣	46.79	2.98	22.36	4.06	13.04	1.76	4.67

1.2 仪器及试剂

仪器:JA303P 型电子天平,CJ-1 型密封式制样粉碎机,XD-1600VCB 型立式 MoSiO₂ 电阻炉,HJ-4S 型四联电动搅拌水浴锅,SHZ-D(Ⅲ) 台式循环水多用真空泵,JEM-6480 型扫描电子显微镜,D8ADVANCE 型 X-射线衍射仪,ICPS-7510PLUS 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪,CAAM-2001 型原子吸收光谱仪,FD-1500W 电炉。

试剂:硝酸、柠檬酸、草酸,均为分析纯;去离子水。

1.3 实验原理及方法

1.3.1 钢渣浸出实验

选取硝酸-柠檬酸混合溶液作为浸出剂,对改质前后的钢渣进行浸出实验。首先,取 10 g 原钢渣和改质钢渣分别放入盛有 200 mL 混合酸溶液的烧杯中,并将烧杯放置于电动搅拌水浴锅装置中,根据表 2 所列的实验参数设置进行实验,反应一定时间后过滤分离得到浸出液,最后利用原子吸收光谱仪(AAS)及电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定浸出液中各元素浓度,通过式(1)计算钢渣中各元素的浸出率。

$$r_A = \frac{\rho_A V}{m \omega_A} \times 100\% \quad (1)$$

式中: r_A 为钢渣中某一元素浸出率,%; V 为浸出液

体积,L; ρ_A 为浸出液中该元素的质量浓度,mg/L; m 为钢渣质量,mg; ω_A 为钢渣中某一元素的质量分数,%。

表 2 浸出实验参数

浸出实验参数	数值
酸浓度/mol·L ⁻¹	0.5 mol/L 硝酸 + 0.052 mol/L 柠檬酸
钢渣平均粒度/μm	65
反应温度/K	298
反应时间/min	60
搅拌速率/r·min ⁻¹	800
液固比	20:1

1.3.2 浸出液除钙实验

为避免浸出液中的 Fe²⁺ 与草酸根离子反应生成草酸亚铁沉淀,影响 Ca²⁺ 的去除效果及沉淀的回收利用,需先向改质钢渣浸出液中加入一定量的双氧水溶液(nH_2O_2 : $nFe = 0.5$)进行预处理。然后在室温条件下以恒定转速搅拌 10 min 后,向浸出液中加入不同浓度的草酸溶液,设置草酸浓度梯度为 0.04 mol/L、0.10 mol/L、0.20 mol/L、0.30 mol/L、0.40 mol/L,继续搅拌 30 min,待沉淀反应完全后,对溶液进行固液分离,并利用 AAS 及 ICP-OES 对溶液中各元素浓度进行定量分析。

1.3.3 浸出液浓缩实验

利用加热法对除钙处理后的钢渣浸出液进行蒸发浓缩实验,分别量取 10 mL、20 mL、30 mL、40 mL、80 mL、100 mL 的浸出液置于烧杯中,之后将烧杯置于电炉上,加热蒸发浸出液至 10 mL,对应浓缩倍数分别为 1、2、3、4、8、10 倍,浓缩实验完成后,利用 AAS 及 ICP-OES 对浓缩液中各元素浓度进行检测。整体实验流程如图 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 钢渣浸出的实验结果

原钢渣和改质钢渣酸浸后浸出液中各元素的浸出率对比如图 2 所示。改质钢渣浸出液化学元素浓度变化见图 2 和表 3。

表 3 改质钢渣浸出液的主要元素浓度 mg/L

元素	Ca	Fe	K	P	Mg	Mn
浓度	13 679	1 296	1 324	428	663	236

由图 2 可知,经过改质处理后,除 Fe 和 Mn 元素的浸出率基本保持不变外,其余元素的浸出率均

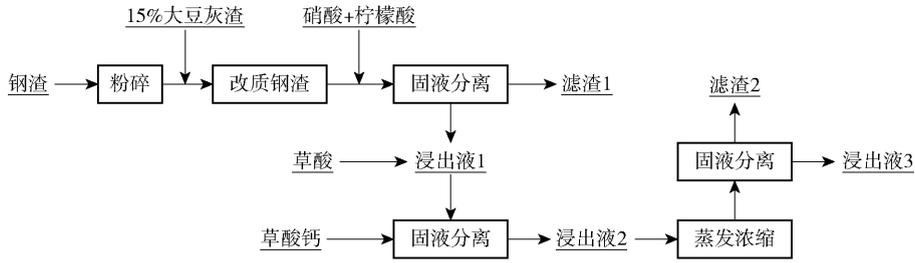


图1 实验流程图

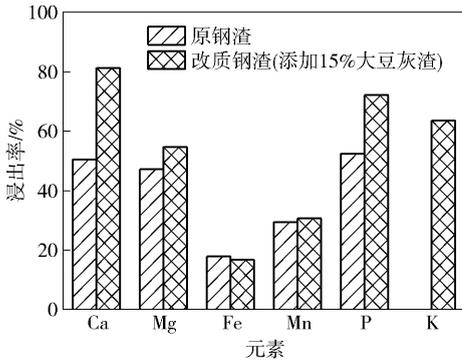


图2 改质处理对钢渣中各元素浸出率的影响

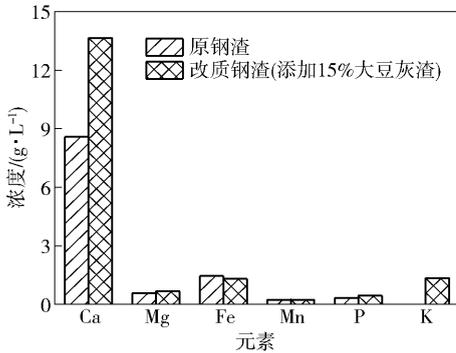
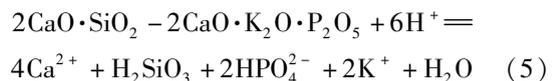
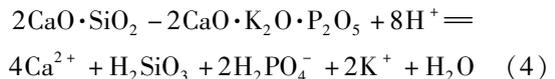
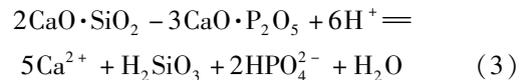
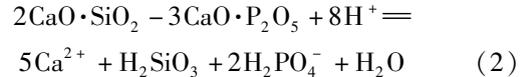


图3 改质处理对钢渣中各元素浸出浓度的影响

呈现不同程度的提升。其中,Ca 元素的浸出率显著提高了约 30%,Mg 元素的浸出率小幅增加了约 7%,而 Fe 元素的浸出率则略有下降。值得注意的是,P 元素的浸出率提升了约 20%,P 和 K 元素的浸出率分别提升至 72.13% 和 63.61%。这一现象与大豆灰渣的添加有关,大豆灰渣中的 K_2O (42.84%) 和 P_2O_5 (3.86%) 在高温改质过程中与钢渣中的 CaO 和 SiO_2 发生反应,形成更易被酸浸出的化合物,如 $2CaO \cdot SiO_2 - 2CaO \cdot K_2O \cdot P_2O_5$ 。这种固溶体相在酸性环境中更易被 H^+ 攻击,导致 Ca^{2+} 、 K^+ 和 PO_4^{3-} 的释放。此外,改质过程中大豆灰渣中的 K_2O 与钢渣中的 CaO 反应生成钾钙硅酸盐,进一步促进了 K 元素的浸出。Fe 和 Mn 元素的浸出率变化不大是因为镁铁相在酸性环境中的稳定性较高,不易被 H^+ 攻击。

由图 3 可知,与原钢渣相比,经过改质处理后的钢渣中 Ca、P、K 及 Mg 元素浓度均呈现不同程度的增长趋势。其中,Ca 和 K 元素浓度的增长幅度较为显著,改质钢渣浸出液中检测到了植物生长所需的 K 元素。在浸出过程中,浸出液中的 H^+ 优先与 $C_2S - C_3P$ 固溶体反应,消耗大量 H^+ ,剩余的 H^+ 则与镁铁相反应。原钢渣浸出液中 P 元素的反应原理如式(2)~(3)所示,改质钢渣浸出液中 P、K 元素的反应原理如式(4)~(5)所示。基于上述实验结果,本研究选择改质钢渣浸出液进行后续除钙和浓缩实验,并在表 3 中列出了该浸出液中主要元素的浓度。



2.2 浸出液除钙实验结果

图 4 显示了草酸浓度对钙离子去除效果的影响规律。由图 4 可知,随着草酸浓度的增大,溶液中 Ca 的浓度呈现显著下降趋势;当草酸浓度超过 0.3 mol/L 后,Ca 去除率达 94.08%,之后趋于稳定。

除钙过程中其余各元素的浓度变化规律如图 5 所示。由图 5 可知,随着草酸浓度的增大,Fe、K、P 元素浓度变化不大;当草酸浓度超过 0.3 mol/L 后,Mg、Mn 元素的浓度有所降低。这说明草酸中的 $C_2O_4^{2-}$ 优先与浸出液中 Ca^{2+} 反应,Ca 浓度大幅度降低后才陆续与 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 反应,其反应原理如式(6)~(8)所示。这种选择性沉淀机制主要归因于草酸钙的溶度积 ($K_{sp} = 2.3 \times 10^{-9}$) 远低于草酸镁 ($K_{sp} = 8.6 \times 10^{-5}$) 和草酸锰 ($K_{sp} = 1.7 \times 10^{-7}$)。此外, Fe^{2+} 的浓度在除钙过程中保持稳定,这是由于双

氧水预处理将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} , 避免了草酸亚铁沉淀的生成, 从而确保了 Ca^{2+} 的有效去除。这一机制不仅实现了 Ca^{2+} 的选择性去除, 还最大限度地保留了浸出液中的其他营养元素 (如 K、P) 和微量元素。

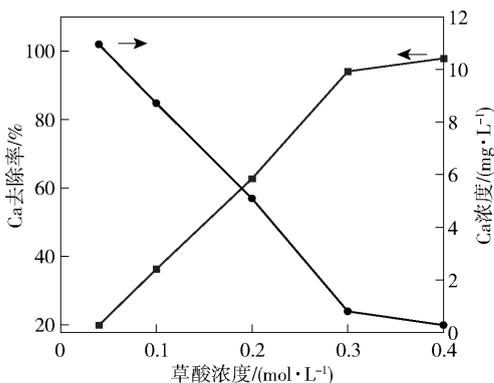
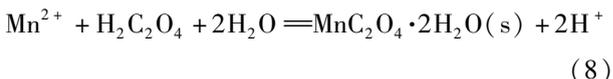
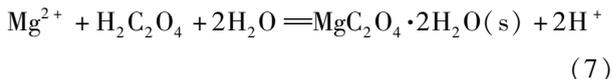
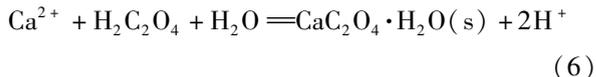


图 4 草酸浓度对 Ca 去除率的影响

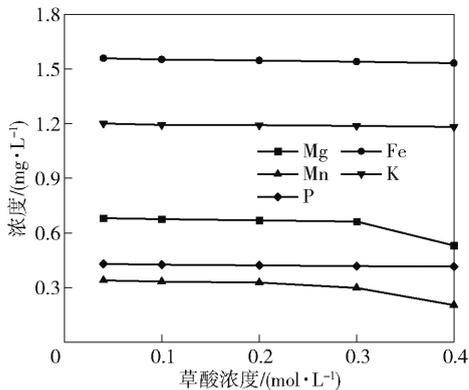
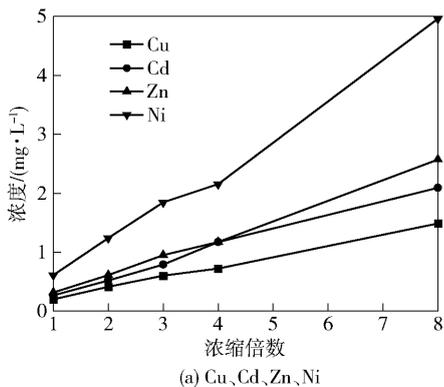


图 5 除钙过程其他元素的浓度变化规律



(a) Cu、Cd、Zn、Ni

2.3 浓缩处理对各元素浓度的影响

不同浓缩倍数对浸出液中主要元素浓度的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 随着浓缩倍数的增大, 钢渣浸出液中的主要营养元素浓度与浓缩倍数呈正比的增长趋势, 浓缩 8 倍后, P 和 K 元素的浓度可分别提升至 3.4 g/L、11.4 g/L。这是由于蒸发浓缩过程中, 水分被大量去除, 而浸出液中各元素并未随水挥发, 使元素在剩余溶液中的浓度相对增大。因此, 钢渣浓缩浸出液中各元素浓度显著提高。

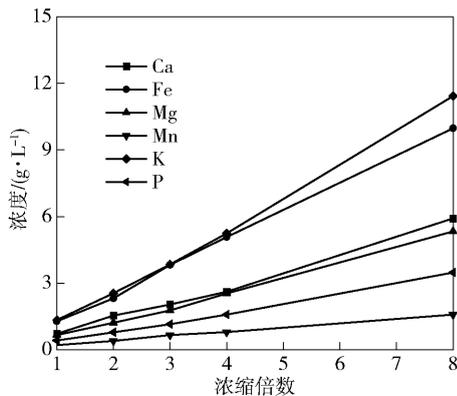
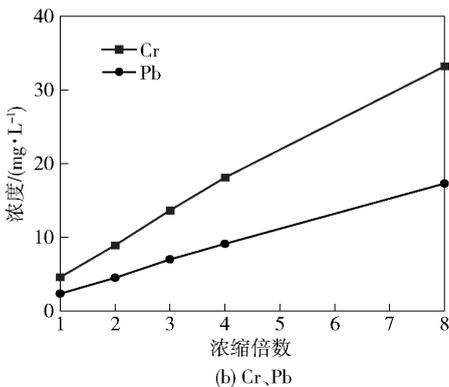


图 6 浓缩倍数对主要元素浓度变化的影响

浓缩倍数对微量元素浓度的影响规律如图 7 所示。由图 7 可知, 随着浓缩倍数的增大, 钢渣浸出液中各微量元素浓度呈现倍数增长趋势; 浓缩 8 倍后, Cr、Pb 元素含量较高, 分别是 33.22 mg/L 和 17.29 mg/L, Cu、Cd、Zn、Ni 元素浓度均低于 5 mg/L。

浸出液在不同浓缩倍数下的 pH 值变化情况如图 8 所示。由图 8 可知, 随着浓缩倍数的增大, 钢渣浸出液的 pH 值呈下降趋势, 未浓缩时 pH 值为 0.78, 浓缩 8 倍时 pH 值减小至 0, 此时浸出液中 H^+ 浓度过高, 形成了强酸性环境, 可能会对后续处理造成不利影响, 因此, 在实际应用中需严格控制浓缩倍数以避免 H^+ 浓度过高。不同浓缩倍数下浸出液的



(b) Cr、Pb

图 7 浓缩倍数对微量元素浓度变化的影响

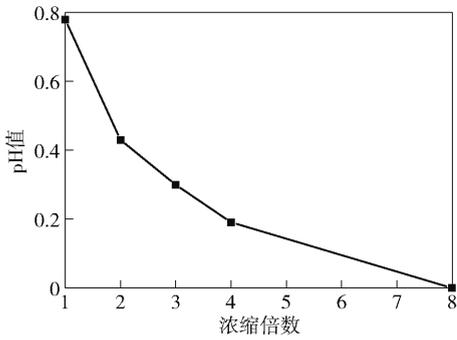


图8 浓缩倍数对 pH 值变化的影响

物理状态变化如图9所示。由图9可知,1倍浓缩液和3倍浓缩液保持澄清状态,4倍浓缩液中形成了少量胶状沉淀,而8倍浓缩液和10倍浓缩液基本呈现胶体状态。

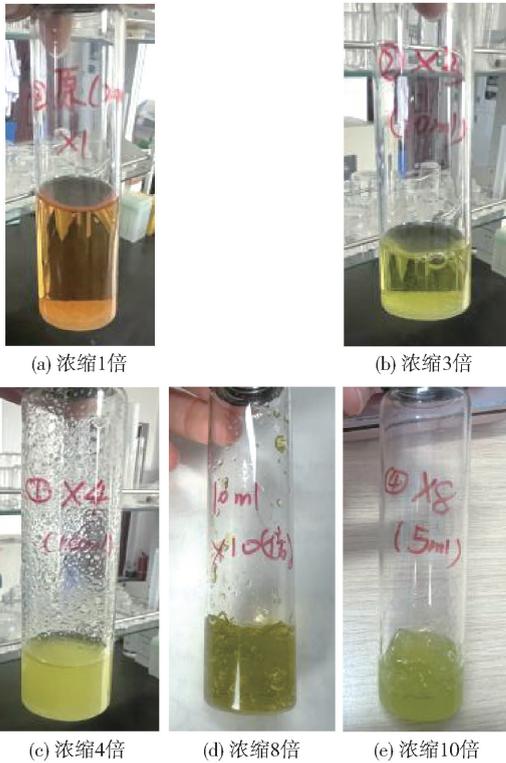


图9 不同浓缩倍数下浸出液的物理状态

为了明晰胶体的化学成分和矿物相组成,取8倍浓缩液中的胶体,将其烘干研磨,并利用X射线荧光光谱仪(XRF)及X射线衍射仪(XRD)对其化学组成及物相进行了分析,结果如表4和图10所示。

表4 8倍浓缩液中胶体的化学成分 %

类型	CaO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO	K ₂ O
胶体	26.98	6.19	17.76	4.53	25.13	3.57	11.59

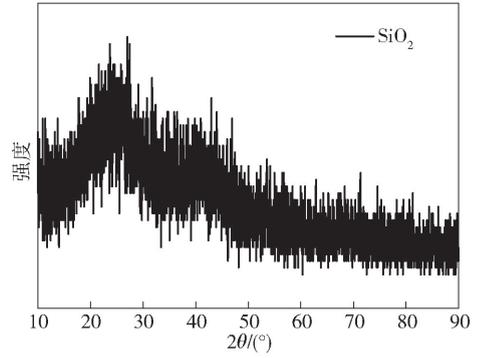
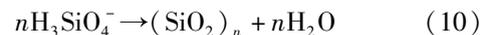
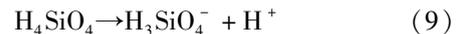


图10 8倍浓缩液中胶体的XRD图谱

由表4可知,胶体中主要含有钙、硅、铁、钾等元素,二氧化硅的含量较高。由图10可知,该胶体没有明显的晶体衍射峰,主要物相为二氧化硅,表明该物质是无定型态的二氧化硅胶体。二氧化硅的溶解度与浸出液 pH 值密切相关。在 pH 值较低、浸出液中酸浓度过高时,二氧化硅的溶解度显著降低,这是由于氢离子浓度的增加抑制了硅酸的解离,促使正硅酸分子发生聚合反应。在浓缩反应的初始阶段,正硅酸以单分子形式存在于溶液中,随着反应时间的延长和温度的升高,正硅酸分子逐渐聚合形成更大的分子团簇,最终转变为凝胶状物质,具体反应过程如式(9)~(10)所示。胶体主要由无定形二氧化硅组成,且含有较高的 CaO (26.98%) 和 K₂O (11.59%),这表明其生成不仅与硅酸的聚合有关,还可能受到浸出液中 Ca²⁺ 和 K⁺ 的影响。Ca²⁺ 和 K⁺ 通过离子交联加速了硅酸分子的聚合,进一步促进了胶体的形成。此外,胶体中 Fe₂O₃ (17.76%) 的含量较高,可能与低 pH 条件下 Fe³⁺ 与硅酸的共沉淀有关。胶体的生成不仅降低了浸出液的稳定性,还可能引发管道堵塞和设备腐蚀,因此在浓缩过程中需严格控制 pH 值和浓缩倍数。



综上所述,钢渣浸出液中的 H⁺ 浓度随浓缩倍数的增加而增大,酸浓度过高时,二氧化硅更易以胶体形式析出,在浓缩倍数为4倍时开始出现二氧化硅胶体,这可能会影响营养液的稳定性及植物对营养元素的吸收效率,因此,将浓缩倍数确定为3倍较为合适。

3 结论

1) 相比于原钢渣,添加大豆灰渣改质后的钢渣

浸出液中 Ca、P 浓度呈升高趋势,同时检测到了 K 元素,Mg、Mn、Fe 的浓度变化不大,营养元素 P 和 K 的浸出率可达 72.13% 和 63.61%。

2) 浸出液除钙过程中,随着草酸浓度的增大,溶液中 Ca^{2+} 迅速减少,Mg、Fe、Mn、K、P 浓度变化不大。

3) 浸出液浓缩过程中,元素浓度随浓缩倍数增加成比例增长,pH 值则呈相反趋势。浓缩 8 倍时 pH 值为 0,浓缩 4 倍时开始产生二氧化硅胶体,对浸出液的后续利用将产生不利影响。在混合酸组合为 0.5 mol/L 硝酸 + 0.052 mol/L 柠檬酸、钢渣平均粒度为 65 μm 、温度为 298 K、时间为 60 min、搅拌速率为 800 r/min、液固比为 20:1、草酸浓度为 0.3 mol/L、体积由 30 mL 蒸发至 10 mL、浓缩倍数为 3 倍时,达到理想元素富集且避免胶体的浓缩最佳效果。

【参考文献】

[1] 伍秀群,王阳. 浅谈钢渣的综合利用现状[J]. 低碳世界,2021,11(3):10-11.

[2] GAO W H, ZHOU W T, LYU X J, et al. Comprehensive utilization of steel slag: A review[J]. Powder Technology, 2023, 422:118449.

[3] 崔心宇,那贤昭. 钢渣资源化技术及展望[J]. 中国冶金,2024,34(10):16-25.

[4] 朱隆奇,吴建,方赋君,等. 生物质改质钢渣促进磷元素浸出的研究[J]. 绿色矿冶,2025,41(1):9-17.

[5] 彭伟,苏正,王振杰. 钢渣综合利用研究现状[J]. 现代矿业,2024,40(2):157-161,166.

[6] 陈振中. 钢渣利用现状及回收工艺研究[J]. 四川冶金,2022,44(3):33-35,40.

[7] 王吉凤,付恒毅,闫晓彤,等. 钢渣综合利用研究现状[J]. 中国有色冶金,2021,50(6):77-82.

[8] JAMES O, TUYEN B T N, TOM H, et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 419:126478.

[9] FAN C L, WEI R F, CHENG T, et al. The positive contributions of steel slag in reducing carbon dioxide emissions in the steel industry: Waste heat recovery, carbon sequestration, and resource utilization[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 498:155379.

[10] GOSWAMI V, DEEPIKA S, SHARMA P, et al. Recycling steel slag as fertiliser proxy in agriculture is good circular economy but disrupts plant microbial symbioses in the soil[J]. The Science of the Total Environment, 2024, 954:176750.

[11] 吴建,王家凤,王逸飞,等. 混合酸浸出转炉钢渣中各元素的试验研究[J]. 湿法冶金,2024,43(1):34-38.

[12] YU Y H, DU C M, JIANG J L, et al. FePO_4 preparation and residue recycling by co-processing of steelmaking slag and steel pickling waste liquor: Comprehensive utilization of metallurgical wastes[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 478:147491.

[13] 林玲,陈成洋,杜宇琦,等. 草木灰改质钢渣的溶出行为及肥效[J]. 材料与冶金学报,2024,23(5):449-455.

[14] YU Y H, DU C H, WANG J G, et al. Phosphorus removal from steelmaking slag by selective leaching in the steel pickling waste liquor[J]. Minerals Engineering, 2024, 218:109051.

[15] 鲁艳秋,周娜,郜培,等. 玉米浸泡液深度浓缩增值技术开发与应用[J]. 粮食与饲料工业,2024,(5):34-35.

[16] TIAN S H, GUO L, JU S H, et al. Case study for enhancing concentration of waste dilute sulfuric acid by microwave flash evaporation: modelling, heat transfer, energy consumption and process optimization[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 318:123930.

[17] 李腾蛟,苏哲,袁洁琼,等. 含钡料液蒸发浓缩过程中钡的价态变化研究[J]. 广东化工,2025,52(1):28-33.

[18] 陈海杰,麻晓越,魏新,等. 脱硫废水浓缩液旋转喷雾蒸发及其产物特性研究[J]. 动力工程学报,2024,44(10):1656-1662.

(下转第 73 页)

- [40] 林哲毅,薄慧云,魏肇男,等. 超纯钨金属电子束熔炼技术开发研究[J]. 铸造工程学报, 2018, 44(2):15-22.
- [41] PARK H K, NA T W, YANG S M, et al. Thermodynam-

ic analysis of oxygen refining during electron-beam additive manufacturing of pure titanium products[J]. Materials Letters, 2019, 236:106-108.

Progress in Technology, Equipment and Application of Electron Beam Melting for High Purity Metal

LIU Suning¹, ZHU Jun²

(1. Bohai University, Jinzhou 121000, China; 2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: High-purity metals are the key materials for manufacturing various of sputtering targets. The types and contents of impurities in high purity metals affect the performance of down stream products. Electron beam melting and refining (EBMR) is an effective method for metal purification. The principle, equipment and main process parameters of the technology were briefly described in this paper. The application of EBMR technology in the purification of copper, tantalum, titanium and other metals was introduced. Finally, the development tendency of EBMR technology and equipment in the future was prospected.

Key words: high purity metal; sputtering targets; Electron Beam Melting and Refining; high-purity titanium; metal purifying

(上接第 45 页)

Study on the Change Rule of Elements in the Concentration of Acid Leach Solution of Modified Steel Slag

JIANG Xiaoyuan, FANG Youdong, CHENG Muyi, WANG Jiafeng, SU Chang, LV Ningning

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Steel slag is rich in nutrients required by a variety of plants, such as calcium, iron, phosphorus, etc., which can be used as raw materials for fertilizer production. After the steel slag is modified, the concentration of nutrient elements in the leaching solution is often lower than the standard required for plant growth, and it needs to be further enriched by concentration treatment. In this paper, the steel slag before and after modification was leached by nitric acid-citric acid mixed solution, and then the calcium element in the leaching solution was removed by oxalic acid. Finally, the leaching solution was evaporated and concentrated, and the variation of the concentration of each element under different concentration multiples and the mechanism of colloid formation were explored. The results show that the modification treatment can promote the leaching of Ca and P elements in steel slag, but has little effect on Mg, Mn and Fe. The leaching rates of P and K elements are 72.13% and 63.61%, respectively. With the increase of oxalic acid concentration, the removal rate of calcium in the leaching solution increased continuously, and the concentration of Mg, Fe, Mn, K and P do not change significantly. The concentration of elements in the leaching solution increases proportionally with the concentration multiple, while the pH value shows the opposite trend. Silica colloid is easy to be produced after 4 times of concentration.

Key words: steel slag leaching; soybean straw modification; oxalic acid precipitation; concentration; nutrients elements