乳酸介质中冶金尘泥的选择性浸锌行为与机制研究

牛福生[1,2],徐成龙[1],张晋霞[1,2]

(1.华北理工大学 矿业工程学院,河北 唐山 063210;
2.河北省矿业开发与安全技术重点实验室,河北 唐山 063210)

摘要:以乳酸溶液为浸出剂,研究了从山西某钢铁厂冶金尘泥中选择性浸出锌,考察了浸出时间、浸出温度、液固体积质量比、乳酸浓度等条件对浸出效果的影响,并探究了浸出机制。结果表明:在乳酸浓度 3%、浸出温度 20 ℃、浸出时间 5 min、液固体积质量比 10 mL/1 g 最佳浸出条件下,锌、铁浸出率分别为 91.56%和 4.69%,可实现对锌的选择性浸出;浸出液中的锌主要以 $Zn[CH_3CH(OH)COO]^+$ 和 Zn^{2+} 两种形式存在,浸出渣中锌元素主要以铁酸锌形式存在,而浸出体系的弱酸环境能有效抑制铁元素溶解。

关键词:二次锌资源;冶金尘泥;乳酸;选择性浸出

中图分类号:TF803.21;TF813 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-2617(2026)01-0018-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.01.003

钢铁冶金尘泥是是钢铁行业的大宗废弃物,产量占粗钢产量的 5%~10%[1]。钢铁冶金含锌尘泥中的主要物相为铁、碱金属和碱土、碳,以及锌、铅、铟等有色金属和稀有金属[2]。钢铁冶金尘泥若以堆积方式处置会占用大量空间,且易污染环境,危害人体健康[3];此外,其中含有多种金属元素,具有重要回收价值,是宝贵的二次资源。根据国际锌协会的统计数据,全球生产的锌约有 70%来自矿石开采及冶炼,剩余 30%则通过回收二次资源中的锌获得[4]。《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中明确指出,包括冶金尘泥在内的固体废物环境污染防治要坚持减量化、资源化和无害化的原则[5]。因此,对冶金尘泥的处置和资源化回收已成为钢铁企业亟需解决的重大问题,其产生的经济效益正逐步成为钢铁企业经营中的重要组成部分。

冶金尘泥中有价金属的传统回收工艺包括火法和湿法。火法工艺能耗较高,同时会产生有害气体,需进一步处理。湿法工艺通常需使用强酸[6-9],而强酸浸出选择性较差,且不适合非硫化氧化物矿石[7];相较而言,强碱和氨与铵盐浸出法选择性较强,适用于处理低品位复杂含锌资源[10-13],但存在试剂消耗量大、浸出率较低等缺点。

冶金尘泥的资源化回收研究可为低品位氧化物型锌矿开发提供关键技术参考[14]。相较于传统浸出工艺,乳酸浸出因具有易于生物降解、试剂可循环、反应条件温和、浸出率较高、选择性强等优势而备受关注。如用乳酸与机械活化相结合的方法浸出碳酸型铅锌混合矿,锌浸出率为90.1%,相较无机酸有大幅提高[15];对于含锌11.0%~13.0%的冶金污泥,用不同的酸浸出锌,相比之下,浓度为 80%乳酸是最有效的浸出剂之一[16];在 pH=4 条件下,1 mol/L 乳酸对污泥中锌的浸出率为 24.2%,表现优于盐酸[17];针对土耳其开塞利地区菱锌矿,通过乳酸法选择性浸出锌,锌浸出率可达 99.8%[18]。目前,有关用乳酸浸出含锌尘泥的相关研究较少,因此,针对冶金尘泥中有价金属回收效率较低的现状及传统回收工艺存在的问题,研究了用乳酸选择性浸出冶金尘泥中的锌,以期为冶金尘泥固废资源化利用提供一种新的路径,为高效利用钢铁行业固体废弃物提供技术参考。

收稿日期:2025-05-26;**修订日期**:2025-09-28

基金项目:河北省教育厅重点项目(ZD2022059)。

第一作者简介:牛福生(1974—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为矿物加工。

通信作者简介:张晋霞(1979—),女,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为复杂难选矿高效分选。E-mail:kyky@ncst.edu.cn。

1　试验部分

1.1　试验原料

冶金尘泥：来源于山西某钢厂，用 XRF 和碳硫分析仪分析其主要化学成分，结果见表 1；XRD 图谱如图 1 所示，粒度分布如图 2 所示，SEM-EDS 分析结果如图 3、表 2 所示。

表 1　冶金尘泥的主要化学成分

Table 1　Main chemical components of metallurgical dust and sludge　%

∑Fe	C	Zn	CaO	SO_2	SiO_2	Pb	K_2O
28.67	22.85	8.18	2.50	2.21	1.77	0.99	0.67

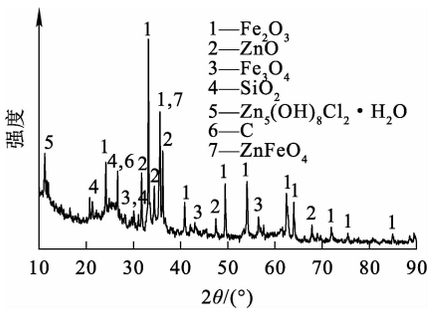


图 1　冶金尘泥的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of metallurgical dust and sludge

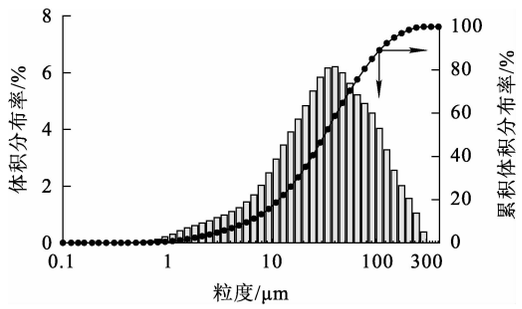
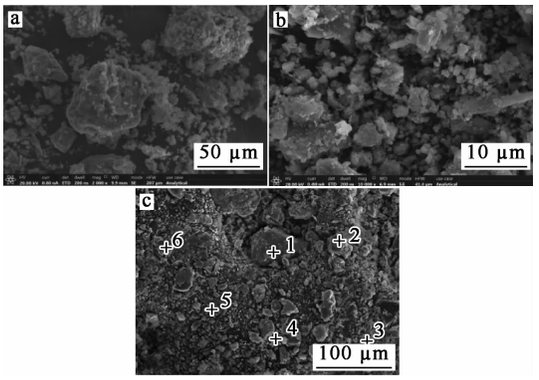


图 2　冶金尘泥的粒度分布

Fig. 2　Particle size distribution of metallurgical dust and sludge

由表 1 可知，冶金尘泥中铁、锌质量分数分别为 28.67%、8.18%，并含有 22.85%的碳元素。由图 1 可知，主要锌物相为氧化锌（ZnO）、碱式氯化锌[$Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$]与铁酸锌（$ZnFe_2O_4$），主要铁物相为赤铁矿（$Fe_2O_3$）和磁铁矿（$Fe_3O_4$），还含有少量石英、石墨、等矿物。由图 2 可知，样品颗粒粒径主要分布在 170 μm 以下，其中粒径小于 100 μm 的颗粒占 87.58%，体积加权平均粒径为 47.43 μm。



a—冶金尘泥的 SEM 形貌（2 000×）；b—冶金尘泥的 SEM 形貌（10 000×）；c—EDS 选点

图 3　冶金尘泥的 SEM 形貌和 EDS 选点

Fig. 3　SEM morphologies and selection of analysis points for EDS analysis of metallurgical dust and sludge

表 2　冶金尘泥的能谱（EDS）化学成分分析

Table 2　EDS chemical composition analysis of metallurgical dust and sludge　%

选点	C	O	Si	Fe	Zn	Cl	Ca	S
点 1	—	11.84	3.03	55.02	17.86	6.40	—	0.69
点 2	31.59	23.99	8.21	7.44	11.29	5.85	—	1.96
点 3	—	33.58	7.12	24.01	15.39	5.85	1.46	1.82
点 4	—	27.98	1.50	10.17	44.47	10.68	1.14	1.04
点 5	—	29.46	5.23	15.84	31.44	6.58	1.26	3.77
点 6	—	50.75	0.93	1.25	0.81	0.95	25.87	18.32

由图 3 看出，冶金尘泥矿物颗粒呈团状和块状，表面有许多小颗粒矿物附着，颗粒表面粗糙不规则，放大到 10 000 倍时发现颗粒之间有絮状物存在。由表 2 看出：碳、硫与钙元素分布较为集中，点 1 铁、锌、氧含量较高，从其元素占比推测铁酸锌含量较高；点 2 可能含有氧化铁、氧化锌和碱式氯化锌；点 3 与点 5 中氧、铁、锌元素含量较高，为氧化铁与氧化锌的混合物，以及一定量碱式氯化锌；点 4 中碱式氯化锌和氧化锌含量较高，同时也含有一定量铁化合物；点 6 中铁、锌含量均较低，可能为钙盐和硫酸盐。

1.2　主要仪器与试剂

仪器：Niton XL2 Plus 型 X 射线荧光光谱仪；Empyrean 型小角 X 射线衍射仪（XRD）；Scios 型聚焦离子束场发射扫描电子显微镜（SEM-EDS）；NKT6100-D 激光粒度仪；美国 Leco CS230 碳硫分析仪；HJ-6B 恒温磁力搅拌器；CP214 型分析天平；赛德利斯 3AB 恒温鼓风干燥箱。

试剂：乳酸，85%～90%，分析纯（AR），天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.3 试验原理及方法

试验以乳酸($CH_3CH(OH)COOH$)溶液为浸出剂,选择性浸出冶金尘泥中的锌元素,主要反应式如下:

$$2CH_3CH(OH)COOH+ZnO\longrightarrow Zn[CH_3CH(OH)COO]_2+H_2O \quad (1)$$

$$8CH_3CH(OH)COOH+Zn_5(OH)_8Cl_2\cdot H_2O\longrightarrow 4Zn[CH_3CH(OH)COO]_2+9H_2O+ZnCl_2 \quad (2)$$

$$6CH_3CH(OH)COOH+Fe_2O_3\longrightarrow 2Fe[CH_3CH(OH)COO]_3+3H_2O \quad (3)$$

$$8CH_3CH(OH)COOH+Fe_3O_4\longrightarrow 2Fe[CH_3CH(OH)COO]_3+4H_2O+Fe[CH_3CH(OH)COO]_2 \quad (4)$$

$$Fe^{3+}+3OH^-\longrightarrow Fe(OH)_3 \quad (5)$$

$$ZnO+H_2O\longrightarrow Zn^{2+}+2OH^- \quad (6)$$

$$ZnFe_2O_4+8H^+\longrightarrow Zn^{2+}+2Fe^{3+}+4H_2O \quad (7)$$

乳酸溶解锌元素过程中,主要发生反应(1)、(2),浸出机制包括双重作用,一方面主要依靠 H^+ 的溶解作用,另一方面依靠乳酸根离子与 Zn^{2+} 的配合作用实现目标金属离子的提取。利用乳酸的弱酸性特征抑制铁的浸出反应(3)、(4),使溶液中的铁离子浓度保持在较低水平。因部分有机酸对锌的溶解优先度均高于铁[19],而溶液中的铁离子在弱酸性环境下易发生反应(5),生成氢氧化铁沉淀并进入滤渣中,从而实现锌与铁的分离。

ZnO 的水解反应见式(6),OH^- 会在 ZnO 表面聚集,并与溶液中扩散的 H^+ 中和。铁酸锌与酸的反应见式(7),通常采用热酸浸出法浸出铁酸锌[20],由于浸出温度低且浸出剂酸性较弱,铁酸锌难以溶解,会留在浸出渣中。

试验方法:将乳酸($pK_a=3.86$)用去离子水稀释至试验所需浓度,再向 150 mL 锥形瓶中加入 5.00 g/10.00 g 冶金尘泥;按一定液固体积质量比加入乳酸溶液;将锥形瓶放置在水浴锅中,待预热至所需温度后倒入锥形瓶中,磁力搅拌装置的搅拌速度设定为 600 r/min;反应一定时间后,过滤,滤渣烘干称重,检测其中锌、铁含量,计算锌/铁浸出率,计算公式如下:

$$x=(1-\frac{m_1w_1}{mw})\times 100\% \quad (8)$$

式中:m_1—滤渣质量,g;w_1—滤渣中铁/锌质量分数,%;m—原矿质量,g;w—原矿中铁/锌质量分数,%。

2 试验结果与讨论

2.1 选择性浸出含锌冶金尘泥

通过单因素试验,分别研究确定乳酸溶液浸出过程的 4 个影响因素(液固体积质量比、乳酸浓度、浸出温度、浸出时间)的最优参数,并测定浸出渣中元素含量,计算浸出率。

2.1.1 液固体积质量比对浸出率的影响

在浸出温度 20 ℃、浸出时间 10 min、乳酸浓度 3%条件下,液固体积质量比对含锌冶金尘泥浸出的影响如图 4 所示。

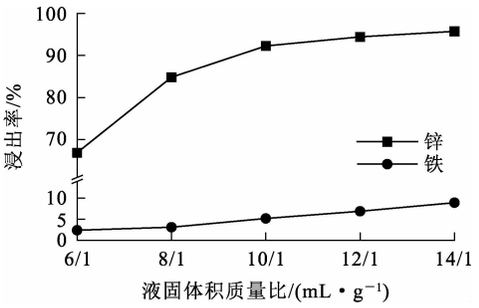


图 4 液固体积质量比对浸出率的影响

Fig. 4 Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching rate

由图 4 可知:锌浸出率随液固体积质量比增大呈升高趋势,液固体积质量比增至 10 mL/1 g 后趋于平缓;铁浸出率随液固体积质量比增大呈缓慢升高趋势。综上可知,选择乳酸浓度液固体积质量比 10 mL/1 g 为宜,此条件下对锌浸出的选择性较佳,同时浸出剂消耗量较少,锌、铁浸出率分别为 92.26%、5.17%。

2.1.2 乳酸浓度对浸出率的影响

在浸出温度 20 ℃、浸出时间 10 min、液固体积质量比10 mL/1 g条件下,乳酸浓度对含锌冶金尘泥浸出的影响如图 5 所示。

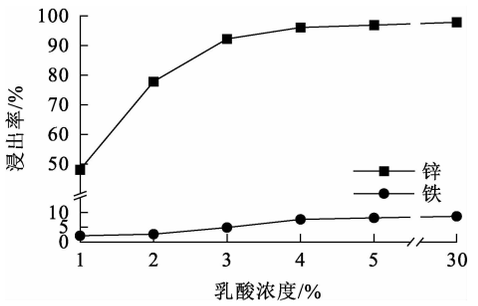


图 5 乳酸浓度对浸出率的影响

Fig. 5 Effect of lactic acid concentration on leaching rate

由图 5 可知：随乳酸浓度升高，锌浸出率呈明显上升趋势，而铁浸出率仅有较小幅度升高；乳酸浓度增至 3%时，锌浸出率达 92.25%，铁浸出率为4.87%；乳酸浓度增至 4%时，锌浸出率为 96.09%，铁浸出率为 7.62%。乳酸浓度由 3%增至 4%时，锌浸出率仅增加 3.84 个百分点，而乳酸用量增加 1/3，同时铁浸出率略微提高。综合考虑浸出剂用量、锌浸出率与选择性，选择浓度为 3%乳酸溶液作为浸出剂。

2.1.3　浸出温度对浸出率的影响

在乳酸浓度 3%、液固体积质量比 10 mL/1 g、浸出时间 10 min 条件下，浸出温度对含锌冶金尘泥浸出的影响如图 6 所示。

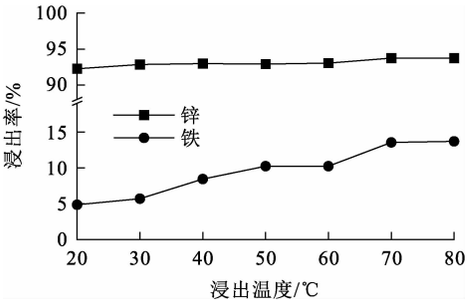


图 6　浸出温度对浸出率的影响

Fig. 6　Effects of leaching temperature on leaching rate

由图 6 可知：随温度升高，锌浸出率略微升高后趋于稳定，铁浸出率逐渐提高。这是因为较高的温度可促进乳酸中的乳酸酐发生水解反应生成新的乳酸；同时温度升高还能增强乳酸的电离作用、铁与乳酸根离子的配合作用，促进含铁化合物溶解，使铁浸出率升高；易于溶解的锌化合物在 20 ℃时已基本溶解完全，而难溶的锌化合物在温度升至 80 ℃后仅有部分溶解。由于升高温度对锌浸出率提升效果有限，温度过高反而会造成对锌的选择性浸出效果变差，因此综合考虑，确定 20 ℃为最佳浸出温度。

2.1.4　浸出时间对浸出率的影响

在浸出温度 20 ℃、液固体积质量比 10 mL/1 g、乳酸浓度 3%条件下，浸出时间对含锌冶金尘泥浸出的影响如图 7 所示。可知：浸出 1 min时，锌浸出率为85.44%；随浸出时间延长，锌浸出率升高，并在浸出 5 min 时达 91.56%；之后继续浸出，锌浸出率变化较小，趋于稳定；随浸出时间延长，铁浸出率从 1 min 时的 4.16%升至 40 min 时的 10.63%。浸出 5 min 时，冶金尘泥中锌化合物已接近反应完全，说明乳酸与冶金尘泥中锌化合物反应速率较快。综合考虑锌浸出率与选择性和生产效率，选择 5 min 为最佳浸出时间。

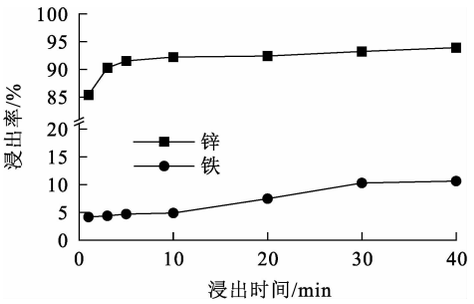


图 7　浸出时间对浸出率的影响

Fig. 7　Effects of leaching time on leaching rate

2.2　浸出渣的表征

在上述最佳浸出条件下，锌、铁浸出率分别为 91.56%、4.69%，所得浸出渣的 XRD 分析结果如图 8 所示，SEM-EDS 分析结果如图 9 和表 3 所示。

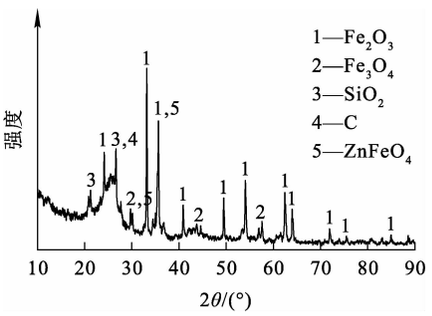
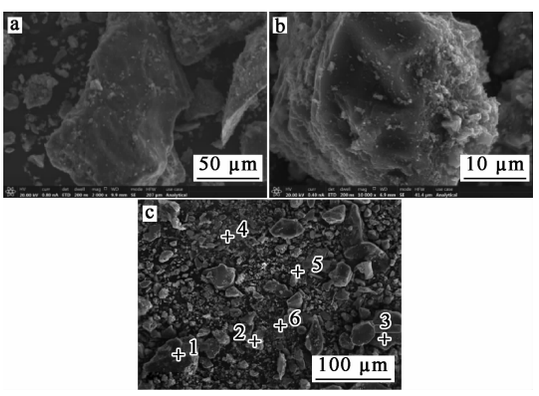


图 8　浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 8　XRD pattern of leaching residue



a—浸出渣的 SEM 形貌(2000×)；b—浸出渣的 SEM 形貌(10 000×)；c—EDS 选点

图 9　浸出渣的 SEM 形貌和 EDS 选点

Fig. 9　SEM morphologies of leaching residue and selection of analysis points for EDS analysis

对比图 1、8 可知：氧化锌和碱式氯化锌的主峰均大幅度减弱，表明原料中大部分锌进入浸出液中；浸出渣中赤铁矿与磁铁矿主峰仅稍有减弱，表明铁的溶解较少；赤铁矿与铁酸锌共用峰的减弱幅度低于赤铁矿主峰的减弱幅度，表明铁酸锌溶解也较少。

表 3 浸出渣的 EDS 能谱化学成分分析

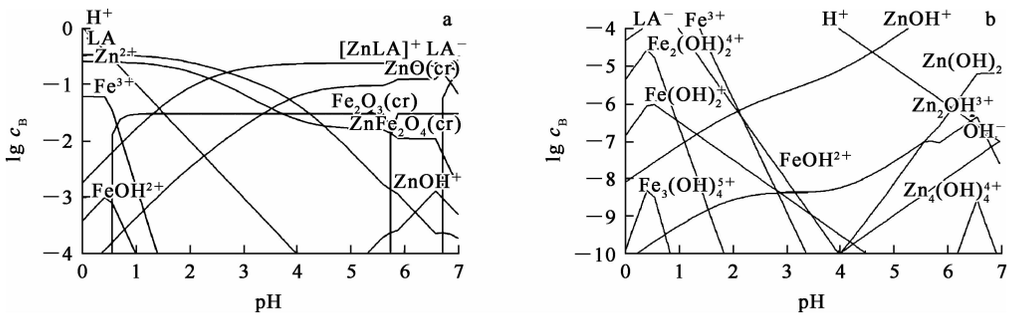
Table 3 EDS chemical composition analysis of leaching residue %

选点	C	O	Si	Fe	Zn	Cl	Ca	S
点 1	51.03	32.78	2.06	9.28	0.6	1.69	—	—
点 2	22.95	11.42	6.22	44.25	2.9	3.11	0.09	0.29
点 3	75.21	—	10.98	2.96	—	3.1	—	—
点 4	16.47	10.84	11.83	42.99	4.59	3.97	0.87	0.84
点 5	22.46	33.40	3.1	35.36	0.89	0.93	—	0.61
点 6	22.94	25.38	10.98	31.71	1.65	1.93	0.28	—

从图 9(a)、(b)看出，冶金尘泥经浸出后表面光滑，大颗粒物质表面小颗粒矿物附着明显减少，部分浸出渣表面可以观察到明显的沟壑。对比表 2、3 并结合图 9 可知：各选点的锌、氯、钙元素含量明显降低，说明锌得到有效浸出；留在浸出渣中的锌主要存在于小颗粒矿物中，大颗粒物质表面附着的小颗粒矿物溶解较多；碳、铁元素含量有明显提升，大颗粒矿物中碳含量较高，而碳元素在含锌尘泥样品的 EDS 检测中仅在一个选点有检出，推测冶金尘泥样品中小颗粒矿物的附着作用干扰了对碳元素的检测；相比于含锌尘泥样品，浸出渣中氧、硅、硫元素含量变化不大。

2.3 反应机制分析

为探讨乳酸对锌的选择性浸出机制，用Medusa软件进行浸出液的化学模拟，结果如图 10 所示，输入各组分浓度为：$[CH_3CH(OH)COO^-]=0.33$ mol/L，$[Fe^{3+}]=0.06$ mol/L，$[Zn^{2+}]=0.12$ mol/L。



a—$-4<\lg c_B<0$；b—$-10<\lg c_B<-4$

图 10 25 ℃下酸性环境中浸出液成分的 lg c_B-pH 关系模拟

Fig. 10 Relationship simulation graph of lg c_B-pH in leachate components with pH in acidic environment at 25 ℃

经检测，浸出液 pH 约为 4。由图 10 可知：浸出液主要成分为 $Zn[CH_3CH(OH)COO]^+$、$[CH_3CH(OH)COO]^-$、乳酸分子、非晶态固体 Fe_2O_3 和 Zn^{2+} 五种物质；锌元素首先以 Zn^{2+} 形式溶解于溶液中，随后 Zn^{2+} 与 $[CH_3CH(OH)COO]^-$ 发生配合反应生成配合物 $Zn[CH_3CH(OH)COO]^+$；pH=4 时，Fe^{3+} 生成 Fe_2O_3 的非晶态固体，同时 Zn^{2+} 与 OH^- 反应生成少量 $ZnOH^+$，而在 pH<4 条件下，Fe^{3+}、$FeOH^{2+}$、$Fe(OH)_2^+$、$Fe_2(OH)_2^{4+}$ 四种含铁离子浓度随 pH 升高而逐渐降低，当 pH 升至 4 时，仅有微量存在，这表明可通过调控反应体系 pH 实现锌的选择性浸出；同时可以看到在 pH 约为 5.7 处，非晶态固体氧化铁将转化为铁酸锌的非晶态固体。

3 结论

采用乳酸选择性浸出冶金尘泥中的锌是可行的。锌浸出率受乳酸浓度的影响较大，浸出时间次之，液固体积质量比、浸出温度的影响较小；4 种反应因素均会影响铁的浸出率，其中乳酸浓度的影响最大。在乳酸浓度 3%、浸出时间 5 min、液固体积质量比 10 mL/1 g、浸出温度 20 ℃最佳条件下，锌、铁浸出率分别为91.56%和4.69%，可实现锌的选择性分离。浸出液的主要成分为 $Zn[CH_3CH(OH)COO]^+$、$[CH_3CH(OH)COO]^-$、乳酸分子、非晶态固体 Fe_2O_3 和 Zn^{2+}。冶金尘泥中的铁酸锌难以溶解，浸出渣中锌元素主要以铁酸锌形式存

在。该工艺是利用乳酸的弱酸性使反应体系维持弱酸环境，减少了铁的溶解，从而使锌得到高效浸出。

参考文献：

[1] 李强，陈铁军，李奇勇，等. 钢铁行业含锌冶金尘泥资源化利用现状与研究进展[J]. 中国冶金，2023，33(7)：1-9.
LI Qiang，CHEN Tiejun，LI Qiyong，et al. Situation and research development on resource utilization of metallurgical dust containing zinc in iron and steel industry[J]. China Metallurgy，2023，33(7)：1-9.

[2] 曾冠武. 高炉瓦斯泥综合利用技术述评[J]. 化工环保，2015，35(3)：279-283.
ZENG Guangwu.Review on utilization technologies of blast-furnace gas sludge[J]. Environmental Protection of Chemical Industry，2015，35(3)：279-283.

[3] 吕为建，王龙，张浩，等. 钢铁冶金尘泥提锌工艺的研究进展[J]. 钢铁，2024，59(1)：157-167.
LYU Weijian，WANG Long，ZHANG Hao，et al. Research on progress of zinc extraction process from iron and steel metallurgical sludge[J].Iron & Steel，2024，59(1)：157-167.

[4] LARBA R，BOUKERCHE I，ALANE N，et al. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution[J]. Hydrometallurgy，2013，134/135：117-123.

[5] 王玉晶，田祎，刘婉蓉，等. 新修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》术语和定义解析[J]. 环境与可持续发展，2020，45(5)：34-37.
WANG Yujing，TIAN Yi，LIU Wanrong，et al. Explanation and analysis of terms and definitions in the Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste[J]. Environment and Sustainable Development，2020，45(5)：34-37.

[6] 龙开琳，黄毅，刘风坤，等. 影响赤泥中浸出锌铜钒铬的主要因素探讨[J]. 冶金分析，2022，42(11)：62-68.
LONG Kailin，HUANG Yi，LIU Fengkun，et al. Discussion on main factors affecting the leaching of zinc，copper，vanadium and chromium in red mud[J]. Metallurgical Analysis，2022，42(11)：62-68.

[7] 王红军，刘志宏，张文海，等. 炼锌窑渣铁精矿 HCl 浸出过程中硅的行为研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2016，47(12)：3982-3988.
WANG Hongjun，LIU Zhihong，ZHANG Wenhai，et al. Study on silicon behaviors in HCl leaching of iron concentrate recovered from zinc kiln slag[J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2016，47(12)：3982-3988.

[8] 郭拴全，郭梅，康敏，等. 某浮选铅尾矿硫酸浸出提锌工艺研究[J]. 矿冶工程，2025，45(1)：129-132.
GUO Shuanquan，GUO Mei，KANG Min，et al. Extraction of zinc from lead flotation tailings by sulfuric acid leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(1)：129-132.

[9] 郭艳华，杨俊龙，马立成，等. 废电解液在湿法炼锌渣中回收金、银、锌的应用研究[J]. 湿法冶金，2024，43(5)：524-530.
GUO Yanhua，YANG Junlong，MA Licheng，et al. Application of waste electrolyte to recover gold，silver and zinc from wet zinc smelting slag[J]. Hydrometallurgy of China，2024，43(5)：524-530.

[10] AIYUANG M，XUEMEI Z，SONG L，et al. Zinc recovery from metallurgical slag and dust by coordination leaching in NH_3-CH_3 $COONH_4$-H_2O system[J]. Royal Society Open Science，2018，5(7). DOI：10.1098/rsos.180660.

[11] MA A，ZHANG L，PENG J，et al. Extraction of zinc from blast furnace dust in ammonia leaching system[J]. Green Processing and Synthesis，2016，5(1)：23-30.

[12] ORHAN G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium[J]. Hydrometallurgy，2005，78(3/4)：236-245.

[13] CHENGLONG Z，YOUCAI Z，CUIXIANG G，et al. Leaching of zinc sulfide in alkaline solution via chemical conversion with lead carbonate[J]. Hydrometallurgy，2008，90(1)：19-25.

[14] 牛福生，倪文，张晋霞，等. 中国钢铁冶金尘泥资源化利用现状及发展方向[J]. 钢铁，2016，51(8)：1-5.
NIU Fusheng，NI Wen，ZHANG Jinxia，et al. Current situation and development of comprehensive utilization of metallurgical dusts and slimes in China[J]. Iron & Steel，2016，51(8)：1-5.

[15] DENG H，PAN X，CHEN F，et al. Enhanced Recovery of Zn from carbonate-type mixed oxidized ore (CMO) by combining organic acid leaching with mechanical activation[J]. Metals，2023，13(6). DOI：10.3390/MET13061021.

[16] RADZYMINSKA-LENARCIK E，SULEWSKI M，URBANIAK W. Recovery of zinc from metallurgic waste sludges[J]. Polish Journal of Environmental Studies，2015，24(3)：1277-1282.

[17] JUNG I S，LOVITT R W. Leaching techniques to remove metals and potentially hazardous nutrients from trout farm sludge[J]. Water Research，2011，45(18)：5977-5986.

[18] ILHAN S S，DEMIR F，LACIN O，et al. Zinc leaching from smithsonite ore in lactic acid solution：studies on parametric optimization，kinetic and mechanism[J]. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia，2023，37(3)：735-744.

[19] HUSSAINI S，KURSUNOGLU S，TOP S，et al. Testing of 17-different leaching agents for the recovery of zinc from a carbonate-type Pb-Zn ore flotation tailing[J]. Minerals Engineering，2021，168. DOI：10.1016/j.mineng.2021.106935.

[20] 罗永健，王云燕，徐慧，等. 铁酸锌基固废处理技术现状与发展前景[J]. 有色金属(冶炼部分)，2025(4)：53-63.
LUO Yongjian，WANG Yunyan，XU Hui，et al. Current status and development prospects of zinc ferrite-based solid waste treatment technology[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2025(4)：53-63.

Selective Leaching Behavior and Mechanism of Zinc from Metallurgical Dust Sludge in Lactic Acid Medium

NIU Fusheng[1,2], XU Chenglong[1], ZHANG Jinxia[1,2]

(1. *School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *China*;
2. *Hebei Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology, Tangshan* 063210, *China*)

Abstract: Using lactic acid solution as the leaching agent, selective leaching of zinc from metallurgical dust collected from a steel plant in Shanxi was investigated. The effects of leaching time, leaching temperature, liquid volume to solid mass ratio and lactic acid concentration on the leaching effect were investigated, and the leaching mechanism was explored. The results show that under the optimal leaching conditions of lactic acid concentration of 3%, leaching temperature of 20 ℃, leaching time of 5 min, and liquid volume to solid mass ratio of 10 mL/1 g, the leaching rates of zinc and iron are 91.56% and 4.69%, respectively, achieving selective leaching of zinc. In the leaching solution, zinc primarily exist in the forms of $Zn[CH_3CH(OH)COO]^+$ and Zn^{2+}, while in the leach residue, zinc is mainly present as zinc ferrite. The weak acidic environment of the leaching system can effectively suppress the dissolution of iron.

Key words: secondary zinc resources; metallurgical dust and sludge; lactic acid; selective leaching

本刊声明

本刊已加入《中国期刊全文数据库》(中国知网)、《中文科技期刊数据库》(维普网)、《中国核心期刊(遴选)数据库》(万方网)、《超星期刊数据库》(超星移动“域出版”平台)、钛学术智慧平台、中邮阅读网、博看网、美国化学文摘(CAS)、EBSCO 数据库(EBSCO Information Services),许可在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、发行、信息网络传播本刊全文。本刊所付稿酬包括上述各项目。作者向本刊投稿即视为同意我刊上述声明,如有异议请在投稿时声明。