用硝酸浸出污泥焚烧灰中磷的动力学研究

程木易,王家凤,方佑东,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:污泥焚烧灰中磷含量较高,加以提取回收能有效缓解磷的供需矛盾。研究了用硝酸从污泥焚烧灰中浸出磷,考察了硝酸浓度、浸出温度、浸出时间、液固体积质量比对磷浸出率的影响,并确定了磷浸出的限制性环节,建立了动力学方程。结果表明:在硝酸浓度 1 mol/L、浸出温度 298 K、浸出时间 60 min、搅拌速度 500 r/min、液固体积质量比 40 mL/1 g 条件下,磷浸出率达 91.36%;内部扩散控制是磷浸出过程的限制环节,浸出反应活化能为 2.11 kJ/mol。该法磷提取效率较高,是一种从污泥焚烧灰中回收磷的高效、可行技术,能为缓解磷资源供需矛盾提供一种重要的技术途径。

关键词:污泥焚烧灰;硝酸;浸出;磷;动力学

中图分类号:TF803.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2025)05-0660-06

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2025.05.011

磷作为生命体所必需的营养元素,在生态系统中发挥着不可替代的作用[1]。据统计,2024 年全球磷矿石开采量约为 2.35 亿 t,但磷矿资源可采年限缩减趋势明显[2-3]。在农业领域,全球化肥需求与磷矿供给矛盾日益突出,由于磷资源的短缺,磷肥价格也持续居高不下[4]。因此,对低品位磷矿的开发及含磷固废中磷的回收利用已迫在眉睫,从含磷固废中提取磷资源符合绿色可持续发展理念,具有较好的环境和经济效益[5]。

污泥焚烧灰是污水处理过程中产生的剩余污泥经脱水、干燥、高温焚烧处理后所形成的固态残留物,因其中磷含量较高,被视为磷矿的可替代资源之一。近年来,关于从污泥焚烧灰中提取磷的研究已有很多,如利用锆改性酸浸渣与生物炭复合吸附技术从污泥焚烧灰中提取磷,回收率可达 90%以上,但受限于锆基材料的高昂成本,难以推广[6-7];用草酸溶解污泥焚烧灰,并结合水热碳化可获得高纯度鸟粪石,但高温处理会导致磷总回收率下降[8];相比之下,在污泥焚烧灰中加入 CaO 进行改质,可大幅提高磷浸出率,浸出产物可用作缓释磷肥,实现资源的二次利用[9];此外,采用酸浸和碱浸相结合的方法处理污泥焚烧灰,不仅能浸出磷,还能将铝留在溶液中,进一步回收可作为沉淀剂,实现工艺闭环[10]。目前,从污泥焚烧灰中分离磷的主要方法有沉淀法、选择性吸附法、阳离子交换膜法,分离出的磷大部分以蓝铁矿、鸟粪石、磷酸盐等形式存在[11-13]。沉淀法在分离阶段需持续外加 Fe^{2+} 或 Mg^{2+},虽然工艺成熟、成本低、操作简单,但选择性差,磷与重金属易共沉淀且产物纯度低,后续资源化利用受限[14];选择性吸附法是利用改性吸附剂选择性吸附磷,该法对磷的选择性较高,但吸附剂成本也较高,再生难度较大[15];阳离子交换膜法是通过电场驱动离子迁移,再利用膜的选择性截留重金属,释放磷,该法分离效率较高,但膜污染问题突出,寿命短,需及时更换,成本高[16]。目前,有关污泥焚烧灰中磷提取的研究多集中在酸浸剂筛选与工艺参数优化方面,而对磷浸出动力学机制的研究较少。

因此,试验研究了用硝酸浸出污泥焚烧灰中的磷,考察了各因素对磷浸出的影响,并建立了磷浸出的动力学模型,以期为促进污泥焚烧灰的高值化利用提供理论依据和技术支撑。

收稿日期:2025-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074004)。

第一作者简介:程木易(2002—),男,硕士研究生,主要研究方向为冶金固废资源化利用。

通信作者简介:吕宁宁(1985—),男,博士,教授,主要研究方向为冶金固废资源化利用。E-mail:lvning198565@163.com。

1　试验部分

1.1　试验原料

试验以某污水处理厂的污泥为原料，将其放入马弗炉中，在 1 373 K 下煅烧 30 min，其化学成分见表 1。可知，污泥焚烧灰中所含的化学成分包括 Al_2O_3、SiO_2、P_2O_5、CaO、Fe_2O_3、MgO、K_2O 等，其中 Al_2O_3 和 SiO_2 含量较高，P_2O_5 质量分数为 8.96%。

表 1　污泥焚烧灰的化学成分

Table 1　Chemical composition of sludge incineration ash %

P_2O_5	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	SiO_2
8.96	29.43	3.56	9.3	1.27	2.38	42.42

1.2　试验仪器及试剂

仪器：FA2002N 型电子天平，HJ-4S 型四联电动搅拌水浴锅，SHZ-D(Ⅲ)型台式循环水多用真空泵，D8ADVANCE 型 X-射线衍射仪，ICPS-7510 PLUS 型电感耦合等离子体光谱仪，CAAM-2001 型原子吸收光谱仪。

试剂：硝酸，分析纯；水为去离子水。

1.3　试验原理及方法

污泥中含有 Ca-P、Al-P、Fe-P 等成分，采用硝酸浸出时，这些成分会与酸电离产生的 H^+ 发生反应，使污泥焚烧灰中的磷灰石无机磷和非磷灰石无机磷有效浸出。主要反应方程式[4]如下：

$$AlPO_4+3H^+ \rightleftharpoons Al^{3+}+H_3PO_4; \quad (1)$$

$$FePO_4+3H^+ \rightleftharpoons Fe^{3+}+H_3PO_4; \quad (2)$$

$$Ca_3(PO_4)_2+6H^+ \rightleftharpoons 3Ca^{2+}+2H_3PO_4; \quad (3)$$

$$Fe_3(PO_4)_2+6H^+ \rightleftharpoons 3Fe^{2}++2H_3PO_4。 \quad (4)$$

为探究酸浓度、时间、温度、液固体积质量比对污泥焚烧灰中磷浸出率的影响，设置硝酸浓度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、1 和 1.2 mol/L；反应时间为 10、30、50、60、80 和 90 min；水浴搅拌温度为 298、313、328、343 和 353 K；液固体积质量比为 10、20、30、40、50 和 60 mL/1 g；搅拌速度 500 r/min。反应完成后取 5 mL 滤液，用原子吸收光谱仪(AAS)及电感耦合等离子体光谱仪(ICP)测定滤液中磷元素浓度，并按照式(5)计算污泥焚烧灰中磷元素浸出率。

$$x=\frac{\rho V}{mw}\times 100\% 。 \quad (5)$$

式中：x—磷浸出率，%；ρ—滤液中磷元素质量浓度，mg/L；V—滤液体积，L；m—污泥焚烧灰质量，g；w—污泥焚烧灰中磷质量分数，%。

2　试验结果与讨论

2.1　酸浓度对磷浸出效果的影响

在液固体积质量比 40 mL/1 g、浸出温度 298 K、浸出时间 60 min 条件下，硝酸浓度对污泥焚烧灰中磷浸出率的影响如图 1 所示。

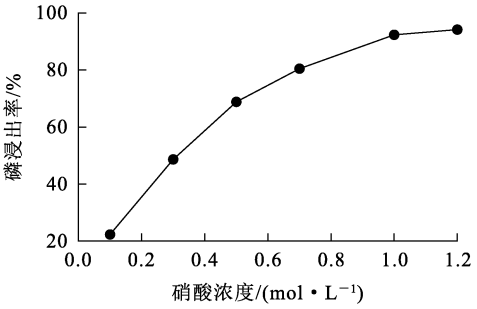


图 1　硝酸浓度对磷浸出率的影响

Fig. 1　Effect of nitric acid concentration on phosphorus leaching rate

由图 1 可知：磷浸出率随硝酸浓度增大而升高；硝酸浓度超过 1 mol/L 后，反应趋近于平衡，磷浸出率升幅不大。这是因为随硝酸浓度增大，溶液中 H^+ 浓度增大，促进污泥焚烧灰中金属氧化物(如 Fe_2O_3、Al_2O_3)的溶解，释放被包裹的磷；此外，因硝酸具有强氧化性，能将部分有机磷转化为无机磷酸盐，进一步提高磷浸出率。考虑到过量的硝酸在浸出磷的过程中还会同时浸出其他杂质金属元素，对下一步除杂工序造成不利影响，因此，确定选择硝酸浓度为 1 mol/L 进行后续试验。

2.2　浸出温度对磷浸出效果的影响

在液固体积质量比 40 mL/1 g、硝酸浓度 1 mol/L、浸出时间 60 min 条件下，浸出温度对污泥焚烧灰中磷浸出率的影响如图 2 所示。可知：随温度升高，磷浸出率逐渐升高，但总体上升幅较小，说明浸出温度对磷浸出影响不明显。这是因为磷浸出反应活化能不高，常温下即可顺利进行，因此升高温度加快对反应速率和平衡的推动作用不明显，磷浸出率受其影响也较小。因此，后续试验选择在 298 K 条件下进行即可。

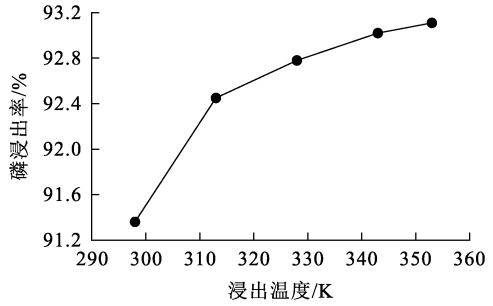


图 2 浸出温度对磷浸出率的影响

Fig. 2 Effect of leaching temperature on phosphorus leaching rate

2.3 浸出时间对磷浸出效果的影响

在液固体积质量比 40 mL/1 g、硝酸浓度 1 mol/L、浸出温度 298 K 条件下，浸出时间对污泥焚烧灰中磷浸出率的影响如图 3 所示。

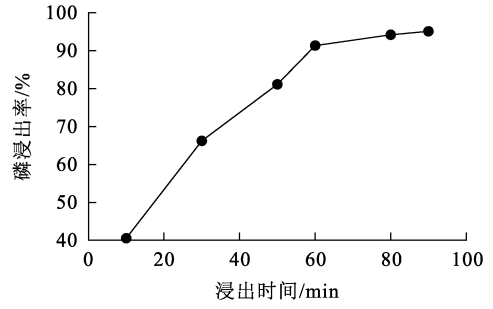


图 3 浸出时间对磷浸出率的影响

Fig. 3 Effect of leaching time on phosphorus leaching rate

由图 3 可知：磷浸出率随浸出时间延长而逐渐升高，在 60 min 时达 91.36%，这是因为延长浸出时间可使更多反应物分子或离子有机会与溶液中 H^+ 发生碰撞并反应；浸出时间延长至 80 min时，磷浸出率升至 94.21%；之后继续延长反应时间，磷浸出率变化不大。综合考虑，确定后续试验浸出时间设为 60 min。

2.4 液固体积质量比对磷浸出效果的影响

在硝酸浓度 1 mol/L、浸出时间 60 min、浸出温度 298 K 条件下、液固体积质量比对污泥焚烧灰中磷浸出率的影响如图 4 所示。可知：随液固体积质量比增大，磷浸出率逐渐升高；液固体积质量比增至 40 mL/1 g 时，磷浸出率达 91.36%；继续增大液固体积质量比，磷浸出率变化不大。这是因为随液固体积质量比增大，反应物之间接触概率增大，可加速反应进行；由于污泥焚烧灰中的磷主要以 $AlPO_4$、$Ca_3(PO_4)_2$ 等稳定矿物相存在，用硝酸作为浸出剂所释放的磷元素主要以可溶性磷酸盐形式存在，而这部分可溶性磷被完全释放时，剩余的磷会以更难溶的包裹态磷的形态存在，因此即使增加液固体积质量比也无法明显提高磷浸出率。为确保磷的浸出效率，降低反应后酸浸渣处理难度，确定适宜的液固体积质量比为 40 mL/1 g。

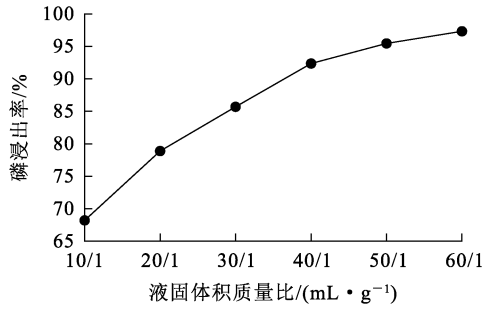


图 4 液固体积质量比对磷浸出率的影响

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

2.5 浸出前后污泥焚烧灰物相的表征

在上述最优浸出条件下（硝酸浓度 1 mol/L、浸出时间 60 min、浸出温度 298 K、液固体积质量比 40 mL/1 g），用硝酸浸出污泥焚烧灰中的磷，浸出前、后污泥焚烧灰的 XRD 分析结果如图 5 所示。可以看出：浸出前污泥焚烧灰的主要物相为 SiO_2、$AlPO_4$、Fe_2O_3、$Ca_3(PO_4)_2$ 和 $Mg_3(PO_4)_2$，其中磷主要存在于 $AlPO_4$、$Ca_3(PO_4)_2$ 和 $Mg_3(PO_4)_2$ 中；浸出后 $AlPO_4$、$Ca_3(PO_4)_2$ 和 $Mg_3(PO_4)_2$ 对应的衍射峰与浸出前相比有所减少，且强度减弱，说明污泥焚烧灰中大部分磷已被浸出，同时，Fe_2O_3 对应的衍射峰消失，说明铁也被大量浸出。

图 6 为浸出前、后污泥焚烧灰的 SEM 分析结果，图 6 中不同位点的能谱分析结果见表 2。可以看出：浸出前污泥焚烧灰颗粒表面光滑平整，并存在一定量具有金属光泽的晶态颗粒；SEM-EDS 微区分析表明，点 1 区域主要成分为 SiO_2 和 $AlPO_4$，而点 2 区域富含 $Ca_3(PO_4)_2$、$Mg_3(PO_4)_2$ 及 Fe_2O_3；浸出后污泥焚烧灰颗粒表面出现大量蜂窝状孔洞结构，结合图 5 中浸出后污泥焚烧灰中磷酸盐特征峰强度明显减弱，说明磷元素的大量浸出是形成孔洞的主要原因；点 1 的磷含量较低，但 SiO_2 含量较高，说明硝酸可浸出大部分磷，而将大部分硅留在渣中。

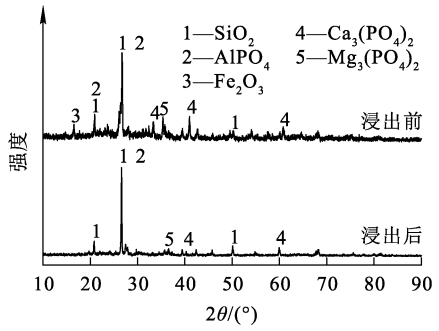


图 5　浸出前、后污泥焚烧灰的 XRD 图谱

Fig. 5　XRD patterns of sludge incineration ash before and after leaching

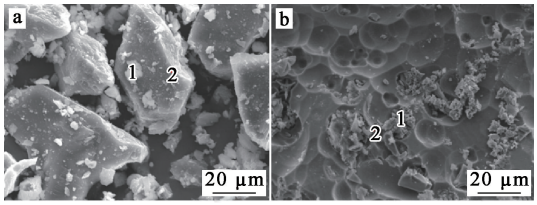


图 6　浸出前(a)、后(b)污泥焚烧灰的微观形貌

Fig. 6　Micro-morphology of sludge incineration ash before (a) and after (b) leaching

表 2　图 6 中不同点位的能谱分析结果

Table 2　Results of energy spectrum analysis for different points in Fig. 6　%

样品	点位	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	CaO	Fe_2O_3
浸出前	点 1	1.71	32.68	49.84	7.43	2.48	5.86
	点 2	1.34	30.55	52.97	5.61	4.76	4.77
浸出后	点 1	0.23	14.94	82.63	0.74	0.49	0.97
	点 2	0.33	12.40	84.81	0.59	1.52	0.35

2.6　磷浸出动力学模型的建立

污泥焚烧灰中磷的浸出是液-固反应，在反应过程中，浸出行为由污泥焚烧灰表面向内进行。随反应进行，污泥焚烧灰的核心逐渐缩小形成一个未反应核，因此浸出反应可用液-固未反应收缩核模型进行描述。

具体的浸出步骤分为：硝酸通过液体层向污泥焚烧灰表面扩散(外扩散)；硝酸进一步通过固膜扩散到达未反应核表面(内扩散)；在固-液界面处，硝酸与未反应的污泥焚烧灰进行化学反应，生成可溶性产物(化学反应)；生成的可溶性产物通过固膜向污泥焚烧灰表面扩散(产物内扩散)；可溶性产物通过边界层进入硝酸溶液中(产物外扩散)[17]。

浸出行为中液-固未反应收缩核模型的速率方程如式(6)～(8)所示[18]：

$$x = k_1 t; \tag{6}$$

$$1-3(1-x)^{\frac{2}{3}}+2(1-x) = k_2 t; \tag{7}$$

$$1-(1-x)^{\frac{1}{3}} = k_3 t。 \tag{8}$$

式中：x—磷浸出率，%；k_1—外扩散的表观速率常数，min^{-1}；k_2—内扩散的表观速率常数，min^{-1}；k_3—化学反应的表观速率常数，min^{-1}；t—浸出时间，min。

反应速率常数随反应温度升高而迅速增大，二者之间的关系可用阿伦尼乌斯公式表示：

$$k = A\exp(-\frac{E_a}{RT})。 \tag{9}$$

式中：k—反应速率常数，min^{-1}；A—表观频率因子，min^{-1}；E_a—表观活化能，kJ/mol；R—理想气体常数，8.314 J/(mol·K)；T—热力学温度，K。

不同温度下磷浸出率随时间的变化曲线如图 7 所示。用式(6)～(8)对图 7 的试验数据进行拟合，拟合参数见表 3。可知，相比于外扩散和化学反应控制，内扩散控制的线性相关系数均大于 0.97，拟合度最高，且反应活化能较低，仅为 2.11 kJ/mol，符合内扩散控制条件，说明磷的浸出过程主要受内扩散控制。

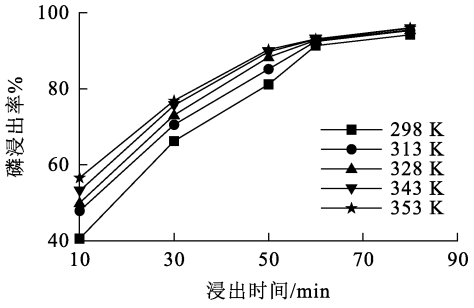


图 7　不同温度下磷浸出率随时间的变化曲线

Fig. 7　Variation curves of phosphorus leaching rate with time at different temperatures

表 3　不同动力学模型的拟合参数

Table 3　Fitting parameters of different dynamic models

温度/K	外扩散控制	化学反应控制	内扩散控制	
	R^2	R^2	R^2	k_2/min^{-1}
298	0.92	0.96	0.97	0.002 63
313	0.92	0.97	0.98	0.002 78
328	0.90	0.96	0.98	0.002 89
343	0.89	0.96	0.98	0.002 96
353	0.89	0.96	0.98	0.003 01

对式(9)两边取对数,可得:

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A。 \tag{10}$$

通过表 3 可计算得出 k_2,再采用线性最小二乘法拟合得到 $\ln k$-1 000/T,并计算斜率得到活化能 E_a,计算截距得到 $\ln A$。磷浸出反应的Arrhenius曲线如图 8 所示。

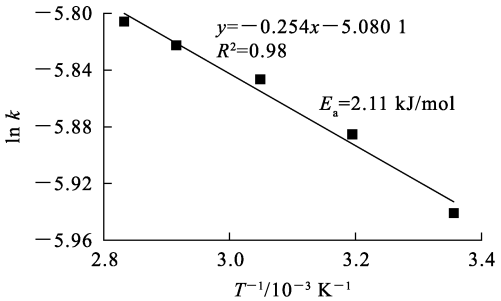


图 8 磷浸出反应的 Arrhenius 曲线

Fig. 8 Arrhenius curve of phosphorus leaching reaction

由图 8 可知,线性拟合的直线斜率为−0.254,表观活化能则为:

$$E_a = -(-0.254 \times 8.314) = 2.11\ \text{kJ/mol}。 \tag{11}$$

内扩散控制的表观活化能一般低于 12 kJ/mol[19-20],因此进一步判断,污泥焚烧灰中磷的浸出受内扩散控制。污泥焚烧灰中磷浸出动力学方程可表示为:

$$1-3(1-x)^{\frac{2}{3}}+2(1-x) = 0.006\exp(-\frac{2.11}{RT})t。 \tag{12}$$

3 结论

用硝酸浸出污泥焚烧灰中磷是可行的。在硝酸浓度 1 mol/L、浸出温度 298 K、液固体积质量比 40 mL/1 g、浸出时间 60 min、搅拌速度 500 r/min最佳条件下,磷浸出率可达 91.36%。浸出反应后,污泥焚烧灰中磷的赋存相 $AlPO_4$、$Ca_3(PO_4)_2$ 和 $Mg_3(PO_4)_2$ 的衍射峰强度减弱,Fe_2O_3 对应的衍射峰消失,说明磷和铁被大量浸出。污泥焚烧灰中磷的浸出过程符合未反应核收缩模型,磷浸出速率的限制环节受内部扩散控制,浸出反应的活化能为2.11 kJ/mol,磷在硝酸溶液中的浸出动力学方程为:

$$1-3(1-x)^{\frac{2}{3}}+2(1-x) = 0.006\exp(-\frac{2.11}{RT})t。$$

参考文献:

[1] LUYCKX L,CANEGHEM J V. Recovery of phosphorus from sewage sludge ash:influence of chemical addition prior to incineration on ash mineralogy and related phosphorus and heavy metal extraction[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2022,10(4). DOI:10.1016/j.seppur.2024.131314.

[2] 胡敏.我国磷化工产业发展现状及趋势[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):1-7.
HU Min. China′s phosphorus chemical industry development status and trends[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering,2025,40(1):1-7.

[3] 王向阳.剩余污泥焚烧灰分与盐卤协同资源化研究[D].北京:北京建筑大学,2024.

[4] 林治宏,唐婧.湿化学法从污泥焚烧灰中回收磷研究进展[J].辽宁化工,2024,53(7):1038-1044.
LIN Zhihong,TANG Jing. Research progress in phosphorus recovery from sludge incineration ash using wet chemical method[J]. Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(7): 1038-1044.

[5] 方佑东,赵帅兵,苏畅,等.钢渣溶出过程中浸出液 pH 值变化规律研究[J].矿业科学学报,2023,8(4):512-518.
FANG Youdong,ZHAO Shuaibing,SU Chang,et al. Variation of pH value of leaching solution during steel slag dissolution[J]. Journal of Mining Science and Technology,2023,8(4):512-518.

[6] HU S G,MA S Q,LI C,et al. Selective recovery of phosphorus from the leachate of incinerated sewage sludge ash using the Zr-modified acid-leaching residue as adsorbent for two-fold resource utilization[J]. Chemical Engineering Journal,2023,477. DOI:10.1016/j.cej.2023.147174.

[7] YUAN Q,DUAN Y T,FAN L,et al. Efficient adsorption and mechanistic analysis of phosphorus in acid leaching solution of incinerated sewage sludge ash by zirconium-modified reed biochar[J]. Separation and Purification Technology,2025,359(2). DOI:10.1016/j.seppur.2024.130535.

[8] WALDMÜLLER W,HERDZIK S,GADERER M. Combined filtration and oxalic acid leaching for recovering phosphorus from hydrothermally carbonized sewage sludge [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2021,9(1). DOI:10.1016/j.jece.2020.104800.

[9] YANG Z H,DU C M,YUAN R Y,et al. Selective leaching and recovery of phosphorus from incinerated sewage sludge ash with CaO addition[J]. Waste Management,2025,193:143-154.

[10] PETZET S,PEPLINSKI B,CORNEL P. On wet chemical phosphorus recovery from sewage sludge ash by acidic or alkaline leaching and an optimized combination of both[J]. Water Research,2012,46(12):3769-3780.

[11] 杨怡君,何品晶,吕凡,等.污泥焚烧灰磷回收制备蓝铁矿[J].中国科学:化学,2022,52(7):1101-1111.
YANG Yijun,HE Pinjing,LYU Fan,et al. Recovery of

phosphorus from incinerated sewage sludge ash and preparation of vivianite[J]. SCIENTIA SINICA Chimica，2022，52(7)：1101-1111.

[12] 曾晓会. 鸟粪石法回收剩余污泥释磷液及污泥焚烧灰酸浸液中磷的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2018.

[13] FRANZ M. Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA)[J]. Waste Management，2008，28(10)：1809-1818.

[14] LIANG S，CHEN H M，ZENG X H，et al. A comparison between sulfuric acid and oxalic acid leaching with subsequent purification and precipitation for phosphorus recovery from sewage sludge incineration ash [J]. Water Research，2019，159：242-251.

[15] BISWAS B K，INOUE K，HARADA H，et al. Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel[J]. Journal of Environmental Sciences，2009，21(12)：1753-1760.

[16] 胡少刚，张婧，杨武霖. 基于湿化学技术从污泥焚烧灰中回收磷的研究进展[J]. 能源环境保护，2023，37(5)：86-98.
HU Shaogang，ZHANG Jing，YANG Wulin. Research progress on phosphorus recovery from incinerated sewage-sludge ash based on wet-chemical techniques[J]. Energy Environmental Protection，2023，37(5)：86-98.

[17] 陈慧方，吴建，吕宁宁，等. 钢渣中磷在盐酸中的浸出动力学研究[J]. 金属材料与冶金工程，2022，50(5)：44-49.
CHEN Huifan，WU Jian，LYU Ningning，et al. Study on kinetics of dephosphorization process of steel slag[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering，2022，50(5)：44-49.

[18] VO T P，ZHANG R C，RINTALA J，et al. Effect of thermochemical treatment of sewage sludge on its phosphorus leaching efficiency：insights into leaching behavior and mechanism[J]. Waste Management，2024，190：24-34.

[19] 蒋盼. 反应萃取分离对映体动力学及其传质特性研究[D]. 湘潭：湘潭大学，2017.

[20] 金会心，李军旗，吴复忠. 含稀土磷矿酸解动力学及稀土浸出机理[J]. 北京科技大学学报，2011，33(9)：1071-1078.
JIN Huixin，LI Junqi，WU Fuzhong. Acidolysis kinetics and RE leaching mechanisms of RE-bearing phosphorite ores[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2011，33(9)：1071-1078.

Kinetics of Leaching Phosphorus from Sludge Incineration Ash with Nitric Acid

CHENG Muyi，WANG Jiafeng，FANG Youdong，SU Chang，LYU Ningning

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

Abstract：The phosphorus content in sludge incineration ash is relatively high. Extracting and recovering it can effectively alleviate the contradiction between the supply and demand of phosphorus. Leaching of phosphorus from sludge incineration ash with nitric acid was studied. The effects of nitric acid concentration，leaching temperature，leaching time and the ratio of liquid volume to solid mass on the leaching rate of phosphorus were investigated. The restrictive links of phosphorus leaching were determined and the kinetic equation was established. The results show that under the conditions of nitric acid concentration of 1 mol/L，temperature of 298 K，leaching time of 60 min，stirring speed of 500 r/min，and liquid volume to solid mass ratio of 40 mL/1 g，the leaching rate of phosphorus reaches 91.36%. Internal diffusion control is the limiting link in the phosphorus leaching process，and the activation energy of the leaching reaction is 2.11 kJ/mol. The method has a relatively high phosphorus extraction efficiency. It is an efficient and feasible technology for recovering phosphorus from sludge incineration ash and can provide an important technical approach to alleviate the contradiction between supply and demand of phosphorus resources.

Key words：sludge incineration ash；nitric acid；leaching；phosphorus；kinetics