

# TC-348在湿法磷酸工艺中的除镉研究

王彦军<sup>1\*</sup>, 张旗<sup>1</sup>, 韩敬瑞<sup>1</sup>, 何晓波<sup>2</sup>, 肖文革<sup>2</sup>, 尹万里<sup>2</sup>, 卢嘉<sup>2</sup>, 赵俊学<sup>2</sup>

(1.沈阳有色金属研究院有限公司, 辽宁沈阳110141;

2.铁岭选矿药剂有限公司, 辽宁铁岭112000)

**摘要:**以高镉磷矿石为原料,制备湿法磷酸工艺需采取净化措施,将磷酸中的Cd等重金属脱除。对TC-348黑药类螯合捕集剂脱除磷酸中Cd的方法进行了研究。实验结果表明,在反应温度为30℃、反应时间为1h、药剂用量为目标金属Cd理论量的125%时,Cd的脱除率最佳,达到98%,净化后磷酸中,Cd含量相对P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>降至1.995 mg/kg;在镉、铜、锌3种金属共存时,TC-348的优先脱除顺序为Cu<sup>2+</sup>>Cd<sup>2+</sup>>Zn<sup>2+</sup>;TC-348对磷酸质量无影响,但有少量酸的消耗;制备1t磷酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的质量分数为61.58%)的TC-348消耗量为7.544 kg。

**关键词:**湿法磷酸;镉;TC-348;螯合捕集剂;脱除率

中图分类号:TQ126.35

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0395-03

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.068

## Experimental study on performance of TC-348 for removing cadmium in wet phosphoric acid process

WANG Yan-jun<sup>1\*</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>, HAN Jing-rui<sup>1</sup>, HE Xiao-bo<sup>2</sup>, XIAO Wen-ge<sup>2</sup>,  
YIN Wan-li<sup>2</sup>, LU Jia<sup>2</sup>, ZHAO Jun-xue<sup>2</sup>

(1.Shenyang Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Shenyang 110141, China;

2.Tieling Flotation Reagent Co., Ltd., Tieling 112000, China)

**Abstract:**Ca and other heavy metals in phosphoric acid, which is produced via wet process with high cadmium phosphate ore as raw material, shall be removed through taking purification measures. The method that uses TC-348 chelating collector to remove cadmium from phosphoric acid is studied. Experimental results show that the removal rate of cadmium is the optimal, reaching 98% when the reaction temperature is 30℃, reaction time is 1 h, and the dosage of TC-348 is 1.25 times the theoretical amount of target metal cadmium. In the purified phosphoric acid, the content of cadmium drops to 1.995 mg per kg of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. As cadmium, copper, and zinc coexist, TC-348 prioritizes their removal in the order of Cu<sup>2+</sup>>Cd<sup>2+</sup>>Zn<sup>2+</sup>. TC-348 has not impact on the quality of phosphoric acid, but may consume a small amount of phosphoric acid. The consumption of TC-348 is 7.544 kg for the preparation of 1 ton of phosphoric acid that has a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mass fraction of 61.58%.

**Key words:** wet-process phosphoric acid; Cd; TC-348; chelating collector; removal rate

磷矿石中大多含有镉等重金属,在非洲、美洲等地的磷矿石中镉含量普遍较高<sup>[1]</sup>,以其作原料,在湿法制备磷酸的过程中,磷矿石中的镉等重金属会以离子状态进入磷酸中,需采取必要措施加以脱除,保障后续产品如磷肥、磷酸盐等产品质量达标。通常脱除磷酸中镉等金属的方法主要有化学沉淀法<sup>[2]</sup>、离子交换法<sup>[3]</sup>、吸附法<sup>[4]</sup>、溶剂萃取法<sup>[5-6]</sup>、膜分离法<sup>[7]</sup>等,这些方法各有优劣,其中,化学沉淀法因其工艺成熟且价格低廉,广泛用于脱除磷酸溶液中的重金属离子,通常采用FeS、Na<sub>2</sub>S、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S等作为沉淀剂与磷酸溶液中的重金属离子结合形成沉淀物,以达到除杂的目的<sup>[2,8]</sup>。近年来,螯合沉淀剂作为一类新型高效的重金属捕集剂逐渐被关注,其主要依靠分子结构中的活性基团与重金属离子发生配位,使溶解状态下的重金属离子转化为不溶态的

螯合沉淀物,该方法具有重金属脱除率高、沉淀物结构稳定等优点<sup>[9]</sup>。

本文采用TC-348即一种典型的黑药类金属螯合剂作捕集剂,对湿法磷酸溶液中的镉等重金属离子进行脱除实验研究。TC-348与通常化学沉淀法所形成的不稳定沉淀物相比,由于其与不同价态轨道的金属离子能形成张力较小的空间构型,使其结合形成的螯合物有更高的稳定性,且无有毒气体生成,具有脱除率高、工艺简单等优势。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器设备与原料试剂

实验仪器:DF-101S型集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;AL204型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DHS-

收稿日期:2025-03-12;修回日期:2025-07-08

作者简介:王彦军(1972-),男,本科,教授级高级工程师,研究方向为矿用药剂开发与应用,通讯联系人,wyj\_asdf@sina.com。

9246 A 型真空干燥箱,上海福玛实验设备有限公司;SHZ-D(III)(四氟)型循环水真空泵,上海力辰邦西仪器科技有限公司;ICP-6300 型电感耦合等离子发射光谱仪(ICP),赛默飞世尔有限公司;Nicolet iS20 型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR),赛默飞世尔科技公司。

主要原料试剂:磷矿石,国外磷矿加工企业;硫酸,纯度 $\geq 98\%$ ,国药集团化学试剂有限公司;TC-348,纯度 52.50%,铁岭选矿药剂有限公司;磷酸,纯度 $\geq 85\%$ ,国药集团化学试剂有限公司;溴化钾,纯度 $\geq 99\%$ ,国药集团化学试剂有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 粗磷酸的制备

将磷矿石进行破碎、磨细,使其颗粒粒度 $\leq 30$ 目筛。称取一定量磷矿石粉,在搅拌状态下,将磷矿粉加入稀磷酸溶液中进行预分解反应,滴加一定量的 98% 浓硫酸,进行酸解反应,75~80℃ 条件下反应 3 h,将反应后的物料真空抽滤,并用水冲洗滤渣,滤液与冲洗液合并后得到粗磷酸溶液,检测粗磷酸中  $P_2O_5$  与金属含量。

### 1.2.2 TC-348 捕集剂脱除磷酸中 Cd 等金属

按照配比,将 TC-348 捕集剂加入到粗磷酸中,在搅拌状态下,保持一定反应温度,TC-348 与粗磷酸中的镉等金属进行螯合反应。反应结束后,过滤反应溶液,检测滤后粗磷酸中 Cd 等金属含量,计算其脱除率。

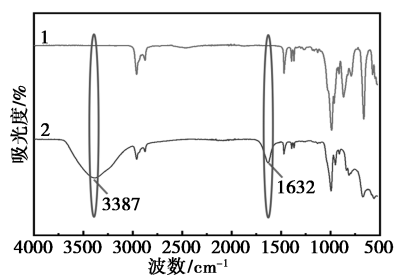
### 1.2.3 分析方法

采用 ICP 对处理前后的磷酸样品中的金属离子含量进行测定。采用 FT-IR 衰减全反射法(ATR)对磷酸处理前后的 TC-348 进行官能团结构对比分析。采用酸碱滴定法检测 TC-348 的耗酸量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TC-348 在磷酸中稳定性验证

将试剂磷酸与蒸馏水配制质量分数为 45% 的磷酸溶液,与 TC-348 充分混合,静置后两相分离,下层为磷酸溶液,取上层有机相做 FT-IR 检测,并与 TC-348 红外光谱图进行对比分析,如图 1 所示。TC-348 在磷酸介质中发生反应并以有有机物  $(RO)_2P(S)SH$  形式存在, $(RO)_2P(S)SH$  不溶于水和磷酸溶液,而 TC-348 中含有大量水,红外光谱在  $3387\text{ cm}^{-1}$  与  $1632\text{ cm}^{-1}$  两处呈现 O—H 强吸收峰。实验结果表明,TC-348 的特征结构在磷酸介质中未被破坏,其相应功能也会保持稳定。



1—磷酸处理后的 TC-348;2—TC-348

图 1 磷酸处理前后 TC-348 红外光谱图

### 2.2 反应温度对 $Cd^{2+}$ 脱除效果的影响

经 ICP 检测,粗磷酸中 Cd 含量为 26.88 mg/L, Cu 含量为 66.25 mg/L, Zn 含量为 206.00 mg/L。TC-348 加入量为粗磷酸中  $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  3 种金属离子理论消耗量总和,反应时间为 0.5 h,考察反应温度分别为 20、30、40、50℃ 时  $Cd^{2+}$  脱除效果,实验结果如图 2 所示。

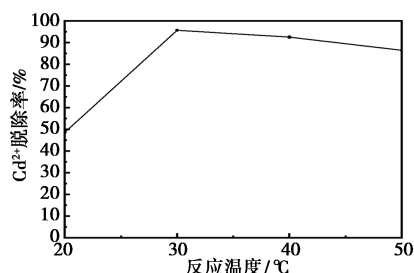


图 2  $Cd^{2+}$  脱除率与反应温度的关系

实验结果表明,当反应温度由 20℃ 升至 30℃ 时,脱除率有明显的提高, $Cd^{2+}$  的脱除率达到 95.71%。随着温度继续升高,TC-348 可能存在一定程度分解或螯合物的解析,导致  $Cd^{2+}$  的脱除率略有下降。由此可知 TC-348 在脱除磷酸介质中  $Cd^{2+}$  过程中最佳反应温度为 30℃。

### 2.3 反应时间对 $Cd^{2+}$ 脱除效果的影响

TC-348 加入量为粗磷酸中  $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  3 种金属离子理论消耗量总和,反应温度为 30℃,考察反应时间分别为 0.25、0.5、1、2 h 时  $Cd^{2+}$  的脱除效果,实验结果如图 3 所示。

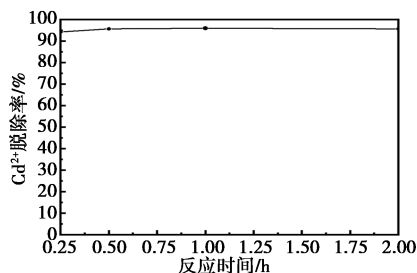


图 3  $Cd^{2+}$  脱除率与反应时间的关系

实验结果表明,反应时间对脱除效果有一定影响,当反应时间从0.25 h延长至2 h时,脱除率变化不大,反应时间1 h时最高,为96.00%,可在满足脱除指标的情况下,适当缩短反应时间,提升工艺处理能力。

#### 2.4 TC-348 捕集剂用量对 $\text{Cd}^{2+}$ 脱除效果的影响

反应温度为  $30^\circ\text{C}$ ,反应时间为 1 h,考察 TC-348 用量分别为粗磷酸中  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  3 种金属理论消耗量总和的 50%、75%、100%、125%、150% 时  $\text{Cd}^{2+}$  的脱除效果,实验结果如图 4 所示。

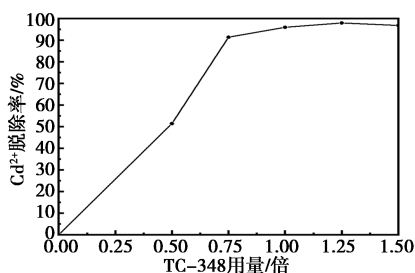
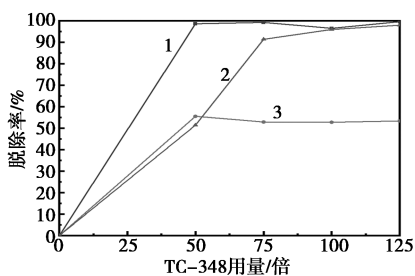


图4  $\text{Cd}^{2+}$  脱除率与 TC-348 用量的关系

实验结果表明,随着 TC-348 用量的增加, $\text{Cd}^{2+}$  脱除率有较快提升,当 TC-348 用量为 1.25 倍时, $\text{Cd}^{2+}$  脱除率达到最高,为 98.00%。继续增加 TC-348 用量, $\text{Cd}^{2+}$  的脱除率变化不明显。

#### 2.5 TC-348 用量对 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 脱除率的影响

反应温度为  $30^\circ\text{C}$ ,反应时间为 1 h,考察 TC-348 用量分别为粗磷酸中  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  3 种金属理论消耗量总和的 50%、75%、100%、125%、150% 时 3 种金属的脱除效果,实验结果如图 5 所示。



1— $\text{Cu}^{2+}$  脱除率;2— $\text{Cd}^{2+}$  脱除率;3— $\text{Zn}^{2+}$  脱除率

图5  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  脱除率与 TC-348 用量的关系

实验结果表明,TC-348 对磷酸中的  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  具有较好的脱除效果,对  $\text{Zn}^{2+}$  的脱除效果较差。当 TC-348 用量为 50% 时,磷酸中  $\text{Cu}^{2+}$  脱除率为 98.68%,几乎完全脱除;当 TC-348 用量为 125% 时, $\text{Cd}^{2+}$  脱除效果最好, $\text{Cd}^{2+}$  脱除率为 98.00%;当 TC-348 用量为 50% 时, $\text{Zn}^{2+}$  脱除率为 55.58%,但随着药剂用量增加, $\text{Zn}^{2+}$  脱除率变化不大。可见,TC-

348 对 3 种金属离子的脱除效果存在明显差异,在磷酸中多金属共存状态下,多种金属对 TC-348 呈现竞争关系,脱除效果从高到低顺序为: $\text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ 。 $\text{Zn}^{2+}$  脱除率偏低可能是因为粗磷酸中存在其他种类金属离子与其竞争消耗,但不影响  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的脱除。

#### 2.6 TC-348 对磷酸产品质量与工艺的影响

##### 2.6.1 TC-348 对磷酸质量的影响分析

前述 TC-348 在磷酸中稳定性实验结果已表明,TC-348 在磷酸溶液中是以有机物  $(\text{RO})_2\text{P}(\text{S})\text{SH}$  的形式稳定存在,并且不溶于磷酸溶液,很容易析出。另外,探索实验结果也表明,湿法磷酸中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  等易与 TC-348 反应外,其他金属离子如  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  等也能够与 TC-348 反应生成螯合物沉淀,并通过过滤除去。在磷酸中有金属剩余时,TC-348 基本无残留。

##### 2.6.2 TC-348 对酸消耗影响

TC-348 是一种强碱弱酸盐,且溶液中有游离碱存在,其用于磷酸净化工艺势必发生酸的消耗。采用酸碱滴定法测得 HCl 消耗量为 0.592 7 mmol/mL TC-348,相对应消耗 0.197 5 mmol  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,则 1 kg TC-348 将消耗 0.175 9 mol  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,即 0.017 kg。实际上,在多金属存在的磷酸溶液中,TC-348 会与金属形成螯合沉淀物析出,磷酸的消耗主要取决于游离碱的量,可见 TC-348 在脱除磷酸中镉等金属时,酸的消耗并不大。

##### 2.6.3 TC-348 脱除磷酸中 $\text{Cd}^{2+}$ 的药剂消耗

粗磷酸中  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 21.63%,Cd 含量为 26.88 mg/L,50 g 粗磷酸中  $\text{Cd}^{2+}$  脱除率为 98.00% 时消耗 0.132 5 g TC-348,净化后磷酸中 Cd 含量为 0.537 6 mg/L,Cd 含量相对  $\text{P}_2\text{O}_5$  降至 1.995 mg/kg。则制备 1 t 磷酸( $\text{P}_2\text{O}_5$  的质量分数为 61.58%)的 TC-348 消耗量为 7.544 kg。

## 3 结论

采用 TC-348 脱除湿法磷酸中  $\text{Cd}^{2+}$  的方法是可行的,结论如下。

(1) 当 TC-348 用量为实验制备的粗磷酸中  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  3 种金属离子全部脱除所需理论量的 125%,反应温度为  $30^\circ\text{C}$ ,反应时间为 1 h 时,净化后粗磷酸中 Cd 含量相对  $\text{P}_2\text{O}_5$  降至 1.995 mg/kg, $\text{Cd}^{2+}$  脱除率达到 98.00%,则制备 1 t 磷酸( $\text{P}_2\text{O}_5$  的质量分数为 61.58%)的 TC-348 消耗量为 7.544 kg。

(下转第 403 页)

- [3] Dokiya M. SOFC system and technology [J]. *Solid State Ionics*, 2002, 152: 383–392.
- [4] Fan H P, Liu Z J, Wu Y, *et al.* Electrochemical performance of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$  composite cathode for IT-SOFCs [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024, 21 (1): 289–298.
- [5] Li Q, Fan Y, Zhao H, *et al.* Preparation and electrochemical properties of cathode materials  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  for IT-SOFC [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2006, 22 (11): 2025–2030.
- [6] Zheng M Z, Liu X M, Su W H. Preparation and performance of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_{3-\delta}$  as cathode material in IT-SOFCs [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 395 (1/2): 300–303.
- [7] Lim T, Jo K, Lee H. Oxygen vacancy and valence band structure of  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Fe}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{3-\delta}$  ( $x=0-0.15$ ) with enhanced ORR activity for IT-SOFCs [J]. *Materials*, 2023, 16 (8).
- [8] Dhongde V, Velpandian M, Haider M A. A  $\text{Sr}_2\text{CoNbO}_{6-\delta}$ @  $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{2-\delta}$  nanofiber composite as cathode accelerates oxygen reduction reaction for IT-SOFC [J]. *ECS Transactions*, 2023, (6): 111.
- [9] 薛良美. Fe 基双钙钛矿氧化物作为 IT-SOFC 阴极材料的制备与性能研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [10] Savaniu C, Irvine S T J. Reduction studies and evaluation of surface modified A-site deficient La-doped  $\text{SrTiO}_3$  as anode material for IT-SOFCs [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, 19 (43): 8119–8128.
- [11] 李强, 范勇, 赵辉, 等. 中温固体氧化物燃料电池 (ITSOFC) 阴极材料  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  的制备及性能研究 [J]. *无机化学学报*, 2006, 22 (11): 2025–2030.
- [12] Du Z H, Zhao H L, Zhou X, *et al.* Electrical conductivity and cell performance of  $\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{3-\delta}$  perovskite oxides used as anode and interconnect material for SOFCs [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38 (2): 1068–1073.
- [13] Tsiapis E V, Kharton V V. Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: A brief review [J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2008, 12: 1039–1060.
- [14] Wei B, Lv Z, Huang X, *et al.* Synthesis, electrical and electrochemical properties of  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$  perovskite oxide for IT-SOFC cathode [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 176 (1): 1–8.
- [15] Hibino T, Mizutani K, Yajima T, *et al.* Evaluation of proton conductivity in  $\text{SrCeO}_3$ ,  $\text{BaCeO}_3$ ,  $\text{CaZrO}_3$  and  $\text{SrZrO}_3$  by temperature programmed desorption method [J]. *Solid State Ionics*, 1992, 57 (3/4): 303–306.
- [16] Hirabayashi D, Tomita A, Teranishi S, *et al.* Improvement of a reduction-resistant  $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$  electrolyte by optimizing a thin  $\text{BaCe}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}_{3-\delta}$  layer for intermediate-temperature SOFCs [J]. *Solid State Ionics*, 2005, 176 (9/10): 881–887.
- [17] Matsumoto H, Kawasaki Y, Ito N, *et al.* Relation between electrical conductivity and chemical stability of  $\text{BaCeO}_3$ -Based proton conductors with different trivalent dopants [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2007, 10 (4): 77–80.
- [18] Baek S S, Park K Y, Lee T H, *et al.* PdO-doped  $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte for intermediate-temperature protonic ceramic fuel cells [J]. *Acta Materialia*, 2014, 66: 273–283.
- [19] Bose S, Kuila T, Nguyen T X H, *et al.* Polymer membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell: Recent advances and challenges [J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36 (6): 813–843.
- [20] Chen Y, Bu Y F, Zhao B T, *et al.* A durable, high-performance hollow-nanofiber cathode for intermediate-temperature fuel cells [J]. *Nano Energy*, 2016, 26: 90–99.
- [21] Park S, Choi S, Shin J, *et al.* Electrochemical investigation of strontium doping effect on high performance  $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$  ( $x=0.1, 0.3, 0.5, \text{ and } 0.7$ ) cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 210 (3): 172–177.
- [22] Parbey J, Xu M, Lei J L, *et al.* Electrospun fabrication of nanofibers as high-performance cathodes of solid oxide fuel cells [J]. *Ceramics International*, 2020, 46 (5): 6969–6972.
- [23] Lee K R, Tseng C J, Chang J K, *et al.* Nano-fibrous  $\text{SrCe}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ -Ni anode functional layer for proton-conducting solid oxide fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 436: 226863.
- [24] Shao Z P, Haile S M. A high-performance cathode for the next generation of solid-oxide fuel cells [J]. *Nature*, 2004, 431 (7005): 170–173. ■

(上接第 397 页)

(2) 在磷酸中多种金属离子共存状态下, 各金属离子对 TC-348 呈现竞争关系, 形成相对优先脱除顺序, 从高到低顺序为:  $\text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ 。

(3) 采用 TC-348 脱除湿法磷酸中  $\text{Cd}^{2+}$  的方法具有脱除率高、工艺操作简单、固体沉淀物更稳定、无有毒气体产生等优势。

### 参考文献

- [1] 王江平. 入世后高浓度磷肥中镉的问题 [J]. *磷肥与复肥*, 2002, 17 (5): 11–15.
- [2] 赵瑞祥. 从湿法磷酸中去除重金属镉的工业技术综述 [J]. *化肥设计*, 2020, 58 (5): 13–18.
- [3] Nalan K, Mustafa D, Hakan E, *et al.* Removal of metal pollutants ( $\text{Cd}(\text{II})$  and  $\text{Cr}(\text{III})$ ) from phosphoric acid solutions by chelating resins containing phosphonic or diphosphonic groups [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37: 2541–2547.
- [4] Lotfi M, Mohamed B, Mohamed K. Purification of wet phosphoric acid using modified activated Carbon [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 1999, 38: 267–271.
- [5] 黄美英. 溶剂萃取法净化湿法磷酸工艺研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [6] Skorovarov J I, Ruzin L I, Lomonosov A V, *et al.* Solvent extraction for cleaning phosphoric acid in fertilizer production [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1998, 229 (1/2): 111–116.
- [7] Inmaculada O, Ana I, Ana M, *et al.* An integrated process for the removal of Cd and U from wet phosphoric acid [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1999, 38: 2450–2459.
- [8] Ennaassia Et, El Kacemi K, Kossir A, *et al.* Study of the removal of  $\text{Cd}(\text{II})$  from phosphoric acid solutions by precipitation of  $\text{CdS}$  with  $\text{Na}_2\text{S}$  [J]. *Hydrometallurgy*, 2002, 64: 101–109.
- [9] Bessiere J, Bruant M, Jdid E A, *et al.* Flottation ionique du cadmium et de l'arsenic par un dithiophosphate dans les solutions concentrees en acide phosphorique [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1986, 16: 63–74. ■