

LK-C2 从废线路板酸性浸出液中萃取回收铜

张小娟¹, 李鑫钢^{1,2}, 曹宏斌³, 张 懿³

(1. 天津大学 化工学院, 天津 300072;

2. 天津大学 精馏技术国家工程研究中心, 天津 300072;

3. 中国科学院 过程工程研究所, 绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 以 LK-C2 为萃取剂, 从废弃线路板酸性浸出液中选择性萃取回收铜, 分别研究杂质阳离子、阴离子、pH 值、萃取时间、萃取剂浓度和相比(O/A)对萃取效果的影响。结果表明: 采用 LK-C2 从废线路板酸性浸出液中可选择性萃取分离铜, 铜/铁分离系数超过 2 000, 溶液中锌和锡几乎不被萃取; 随萃取平衡 pH 值的增大, 铜的萃取率升高; 随萃取剂在有机相中浓度增加和相比增加, 铜回收率增大; 阴离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 对萃取无明显影响。萃取剂每从溶液中萃取 1 mol 铜, 将置换 2 mol 氢离子。室温下 LK-C2 萃取铜的最佳工艺条件: LK-C2 体积分浓度为 15%, 相比 O/A 为 1:1, 水相初始 pH 为 2.00, 萃取时间为 10 min。在优化条件下, 一级萃取率达 99.78%; 用 2.00 mol/L 硫酸溶液对负载有机相进行反萃, 经三级逆流反萃, 铜的反萃率达到 97.51%。

关键词: LK-C2; 萃取; 铜; 废线路板

中图分类号: TF 804.2; X705; X 76

文献标识码: A

Selective solvent extraction of copper from acid leaching solution of PCBs with LK-C2

ZHANG Xiao-juan¹, LI Xin-gang^{1,2}, CAO Hong-bin³, ZHANG Yi³

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National Engineering Research Center of Distillation Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Copper was extracted with LK-C2 from acid leaching solution of waste printed circuit boards. The effects of pH of aqueous solution, reaction time, concentration of LK-C2 and phase ratio (O/A) on the extraction rate were investigated. The effects of the concentration of NO_3^- and SO_4^{2-} on the extraction rate of Cu, Fe, Zn and Sn were also studied. The results show that the extraction reaches equilibrium quickly, and with increasing equilibrium pH of the aqueous solution, the copper extraction rate greatly increases. The copper extraction rate also increases with increasing concentration of LK-C2 and O/A ratio. The optimum conditions are determined that the concentration of LK-C2 in the organic phase is 15%, the phase ratio (O/A) is 1:1, the pH value of the aqueous solution is 2.00 and the reaction time is 10 min. The concentrations of NO_3^- , SO_4^{2-} and Cl^- have no significant effects on the extraction rate of Cu, Fe, Zn and Sn. Under the optimized operating conditions, copper can be extracted effectively and the extraction rate reaches 99.78% at one stage. Using sulfuric acid solution (2.00 mol/L) as stripping agent, the stripping rate of copper reaches 97.51% after

three series of countercurrent extracting.

Key words: LK-C2; extraction; copper; printed circuit boards

随着电子设备更新换代速度的加快, 电子废弃物产生量大大增加, 其中废印刷电路板(PCBs)是电子废弃物的重要组成部分^[1]。印刷电路板是几乎所有电子电气产品的基础元件, 种类繁多, 数量巨大。PCBs 中包含元素周期中的几乎所有元素, 其中的 Cu、Ag、Pd、Au 和 Ta 等都具有很高的价值, 对这些材料的回收和利用可作为制造业的重要原材料来源^[2-3]。但是, 由于目前缺乏高效、环保的资源回收工艺, 导致大量电子废弃物随意丢弃, 不仅造成了资源的浪费, 而且对环境造成了严重的破坏。因此, 开发电子废弃物中回收金属的清洁工艺对于金属资源再生利用和减少重金属元素对环境的污染具有非常实际的意义^[4]。

由于湿法冶金中常用的化学沉淀净化工艺造成有价金属流失较多, 且污染环境, 因此, 在电子废弃物的回收流程中不宜采用。若采用无渣操作的萃取技术, 可有效地回收有价金属又不造成二次污染^[5]。自 20 世纪 80 年代以来, 新型高效萃取剂 Lix984 的开发成功^[6]使铜的浸出一萃取一电积技术得到了长足发展, 该技术具有流程简单、投资少、成本低、产品质量高等优点, 而在这一系列的过程中, 萃取技术是最核心的部分, 它直接关系到最终生成的铜的质量^[7]。本研究中所使用的萃取剂 LK-C2 是一种新型铜萃取剂, 与 Lix984 和 BK992 具有相似的结构与性能, 是羟酮肟和羟醛肟的复配物^[8-11]。具有萃取能力强、萃取速度快、无毒、萃取铜/铁选择性高、价格较便宜(比 Lix984 便宜 1/3)及生产合成工艺清洁等优点^[9-12]。

在湿法炼铜工艺中, LK-C2 主要用于从低品位氧化矿和硫化矿的湿法浸出液中萃取与富集有价金属铜, 实现铜与铁等贱金属的分离, 溶液中其它金属离子浓度较低。郭华军等^[13]研究了 LK-C2 萃取除铜以净化硫酸镍钴溶液, 铜为低含量组分, 取得了理想的效果, 一级萃铜率达 93.06%。本研究中待处理液中的铜为高含量组分, 溶液中主要离子为与之难分离的铁。因此, 本文作者针对 PCBs 中含量最高的金属元素铜, 使用 LK-C2 把铜从废线路板的酸性浸出液中选择性萃取出来, 实现铜与铁、锌、锡等几种线路板中常见金属的有效分离, 达到回收铜的目的。对萃取的工艺参数进行研究和优化, 并考察体系中常见阴离子的浓度对萃取率的影响。

1 实验

1.1 原料和试剂

用破碎机将废线路板碎成小片(10 mm×20 mm×2 mm), 加入一定量的硝酸浸出, 过滤得浸出液, 其主要成分列于表 1。用稀 HNO₃ 和稀 NaOH 调节原料液 pH 值, 用 NaNO₃、Na₂SO₄ 和 NaCl 调节料液中 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 的浓度。

表 1 原料液组成

Table 1 Composition of leaching solution (g/L)

Cu ²⁺	Fe ³⁺	Zn ²⁺	Sn ²⁺	NO ₃ ⁻
5.126	0.633	0.158	0.393	13.682

实验所用萃取剂为实验室研制 LK-C2, 稀释剂为实验室自制的磺化煤油, 按一定比例配制成有机萃取液。所有试剂均为分析纯, 实验用水为去离子水。

1.2 实验方法

以 LK-C2 为萃取剂, 磺化煤油作为稀释剂, 按一定比例配制成有机萃取液, 然后以一定的有机相与水相体积比(相比, O/A)置于分液漏斗中, 充分振荡, 静置分层, 分液, 取样测定萃余液中铜、铁、锌和锡的含量, 用差减法求出其在有机相中的含量。

以 2.00 mol/L H₂SO₄ 为反萃剂, 与负载有机相按一定比例置于分液漏斗中, 充分振荡, 静置分层, 分液, 取样测定反萃液中铜、铁、锌和锡的含量。

水相中铜、铁、锌和锡的含量均采用 ICP-OES(美国 Perkin Elmer 公司, Optimal 5300DV)测定, 阴离子浓度采用离子色谱(美国 Dionex 公司, DX500)测定。实验在 25 °C 下进行。

2 结果与讨论

2.1 萃取工艺条件对铜萃取率的影响

2.1.1 初始 pH 值的影响

以 20% LK-C2-煤油作为有机相, O/A 为 1:1, 萃取时间为 20 min, 调节料液初始 pH 值, 测定初始 pH 值对铜、铁、锌和锡萃取率的影响, 实验结果如图 1 所示。

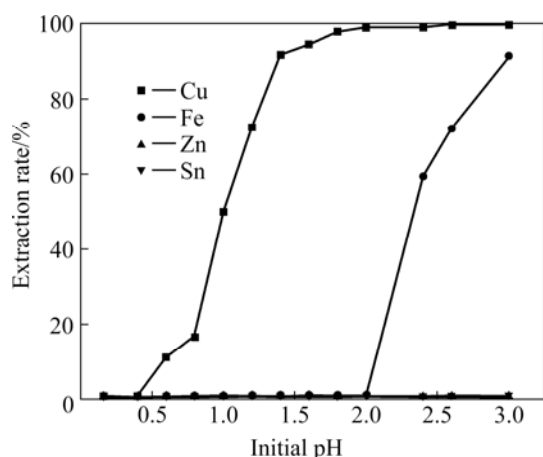


图 1 初始 pH 值对多种金属萃取率的影响

Fig.1 Effect of initial pH values on extraction rates of Cu, Fe, Zn and Sn with 20% LK-C2

若水相 pH 值过高, 则金属离子发生水解, 水相变混浊, 因此用 H_2SO_4 和 NaOH 调节水相初始 pH 值范围为 0.16~3.00(平衡 pH 值范围为 0.20~1.96)。由图 1 可看出, pH 值为 0.16~0.60 时, 各种金属离子的萃取率均很小, 但是当 pH 值大于 0.60 时, 铜的萃取率增加很快; 当 pH 值为 2.00 时, 铜的萃取率达到 99.00% 以上。当 pH 值为 0.16~2.00 时, 铁的萃取率基本不变, 萃取率在 2.00% 左右, 但当 pH 值大于 2.00 时, LK-C2 对铁的萃取能力增强, 当 pH 值为 3.00 时, 铁的萃取率达到 90.00% 以上。pH 值对锌和锡的萃取率没有影响, 均低于 0.50%。

图 2 所示为 $\lg D_{\text{Cu}}$ 与平衡 pH 值的关系, 其线性拟合斜率大约为 2.00, 表明用 LK-C2 萃取 1 mol 铜离子时释放出 2 mol 的氢离子^[14]。

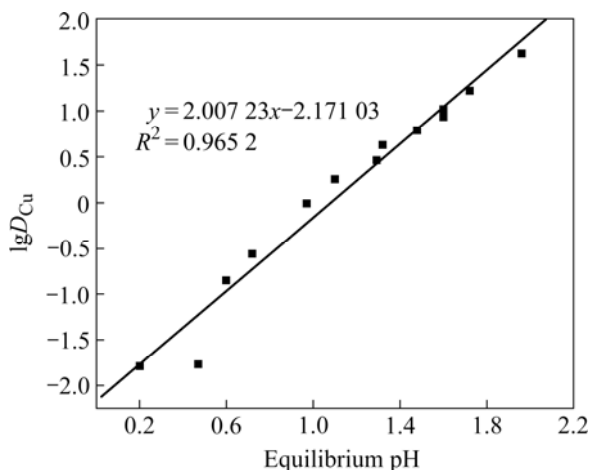
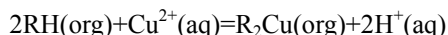


图 2 平衡 pH 值与 $\lg D_{\text{Cu}}$ 的关系

Fig.2 Relationship between $\lg D_{\text{Cu}}$ and equilibrium pH

LK-C2 是一种羟酮肟和羟醛肟的复配物, 其萃铜机理为阳离子交换机理^[15]:



在萃取过程中, 铜离子与 LK-C2 形成络合物进入有机相, LK-C2 中的氢进入水相, 对应的反应平衡常数(K)与铜的分配比(D)分别为

$$K = \frac{a(\text{R}_2\text{Cu})_{\text{org}} \cdot a(\text{H}^+)_{\text{aq}}}{a(\text{RH})_{\text{org}} \cdot a(\text{Cu}^{2+})_{\text{aq}}} \quad (1)$$

$$D = \frac{a(\text{R}_2\text{Cu})_{\text{org}}}{a(\text{Cu}^{2+})_{\text{aq}}} \quad (2)$$

$$\text{则 } \lg D = \lg K + 2 \lg a(\text{RH})_{\text{org}} + 2\text{pH} \quad (3)$$

随着 pH 值的增大, 铜的分配比增大, 有利于萃取过程的进行, 萃余液中铜含量降低, 萃取率增大。

料液中铁离子是主要共存离子, 且易被萃取。铜/铁分离系数是衡量铜萃取剂很重要的一个参数^[15]。计算铜/铁的分离系数($\beta = D_{\text{Cu}}/D_{\text{Fe}}$), 结果如图 3 所示。由图可见, 当平衡 pH 值为 0.20~0.97 之间时, β 值很低; 随着平衡 pH 值的增加逐渐升高, 当平衡 pH 值为 1.96 时, β 值达到最高值 2 154.33, 然后随着平衡 pH 值的增大, β 值迅速下降。LK-C2 在本体系下萃取铜, 铜/铁的分离系数高, 分离效果好。

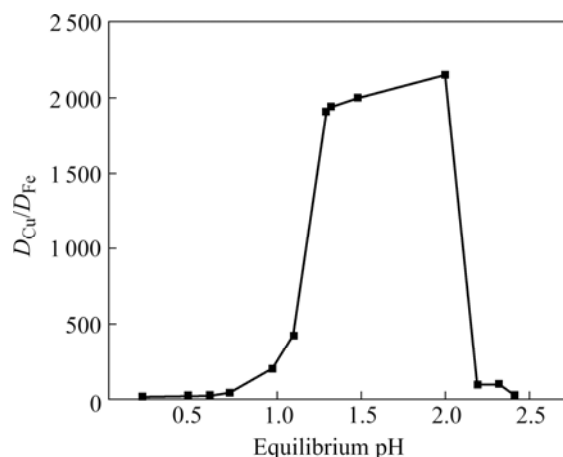


图 3 平衡 pH 值对分离系数($D_{\text{Cu}}/D_{\text{Fe}}$)的影响

Fig.3 Effect of equilibrium pH on separation factor ($D_{\text{Cu}}/D_{\text{Fe}}$)

在萃取分离时, 一方面, 希望铜尽可能被萃取进入有机相; 另一方面, 又要避免其它金属离子进入有机相, 因此, 在综合考虑铜分离效果的同时又要防止铁进入有机相, 萃取过程中应控制水相初始 pH=2.00。

2.1.2 萃取剂体积浓度对铜萃取率的影响

实验测定了萃取剂浓度对铜萃取率的影响。实验条件为: O/A=1:1, pH=2.00, 振荡时间 10 min, 结果如图 4 所示。

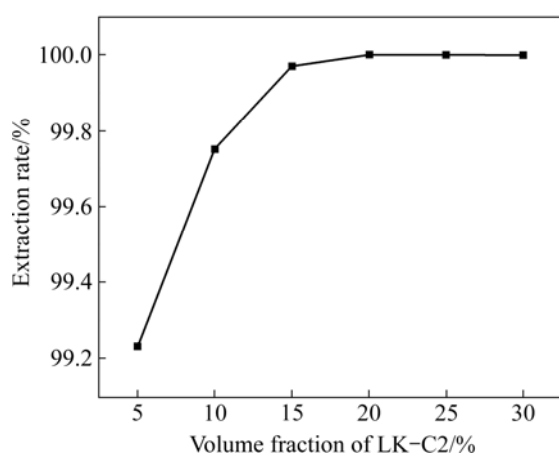


图 4 萃取剂体积分数对萃取率的影响

Fig.4 Effect of content of LK-C2 on Cu extraction rate

由图 4 可看出, 随着 LK-C2 体积分数的升高, 铜萃取率显著增加; 当 LK-C2 体积分数为 15% 时, 铜的萃取率达到 99.97%; 进一步提高萃取剂体积分数, 铜的萃取率变化不明显。综合考虑萃取剂的用量、成本和分离效率, 本实验选择萃取剂在有机相中的体积分数为 15%。

2.1.3 相比对铜萃取率的影响

实验测定了相比对铜萃取率的影响。实验条件为: pH=2.00, 振荡时间 10 min, 萃取剂的体积分数为 15%。实验结果如图 5 所示。

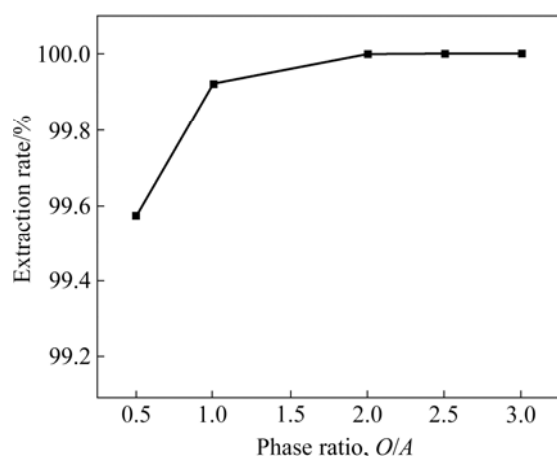


图 5 相比对萃取率的影响

Fig.5 Effect of phase ratio on Cu extraction rate

由图 5 可看出, 相比越大, 铜的萃取率越高, 萃取分离效果也相应提高。从理论上分析, 萃取率 r 与相比 $R(O/A)$ 存在如下关系:

$$r = \frac{D}{(D + 1/R)} \times 100\% \quad (4)$$

式中 D 为分配比, 在温度、pH 值、有机萃取剂体积

分数等体系条件一定的情况下, D 保持不变, 因此, R 增大, r 相应增大。

当相比为 1:1 时, 萃取率达到 99.95%。综合考虑萃取分离效果及经济性, 本实验选择相比 $O/A=1:1$ 。同郭军华等^[13]的研究结果比较, 本研究萃取过程中采用的相比是由于本研究体系中铜为高含量组分, 并且所用萃取剂浓度较小。

根据以上实验结果, 得到 LK-C2 萃铜的优化条件, 结果列于表 2。在废线路板酸浸体系中, LK-C2 萃铜的最佳 pH 值为 2.00, 时间为 10 min, 萃取剂体积分数为 15%, 相比为 1:1。

表 2 LK-C2 萃铜的优化条件

Table 2 Optimum conditions of copper extraction by LK-C2

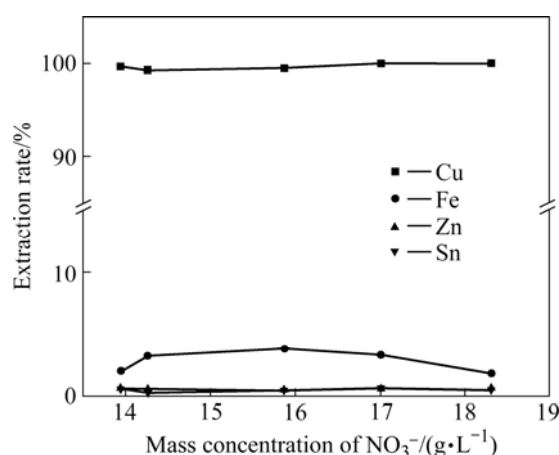
pH	Time/min	$\varphi(\text{LK-C2})/\%$	O/A
2.00	10	15	1:1

2.2 体系中常见阴离子质量浓度对萃取率的影响

2.2.1 NO_3^- 的质量浓度对萃取率的影响

本研究用 NaNO_3 调节料液中 NO_3^- 的质量浓度范围为 13.94~18.31 g/L, 在以上优化的实验条件下, 对料液进行萃取, 以考察 NO_3^- 的质量浓度对萃取率的影响。

图 6 所示为料液中 NO_3^- 的质量浓度对铜、铁、锌、锡萃取率的影响。由图 6 可看出, NO_3^- 对体系中各种金属离子的萃取率影响很小, 其中, 铜的萃取率在 99.27%~100.00% 之间, 铁的萃取率低于 4%, 锌和锡的萃取率均低于 0.50%。

图 6 NO_3^- 的质量浓度对萃取率的影响Fig.6 Effect of mass concentration of NO_3^- on extraction rates of Cu, Fe, Zn and Sn

2.2.2 SO_4^{2-} 的质量浓度对萃取率的影响

本研究用 Na_2SO_4 调节料液中 SO_4^{2-} 的质量浓度

范围为: 2.17~6.96 g/L, 在以上优化的实验条件下, 对料液进行萃取, 以考察 SO_4^{2-} 的质量浓度对萃取率的影响。

图 7 所示为料液中 SO_4^{2-} 的质量浓度对铜、铁、锌和锡萃取率的影响。由图 7 可看出, SO_4^{2-} 对体系中各种金属离子的萃取率基本没有影响, 铜的萃取率在 99.26%~99.98% 之间, 铁的萃取率低于 5.00%, 锌和锡的萃取率均低于 0.50%。

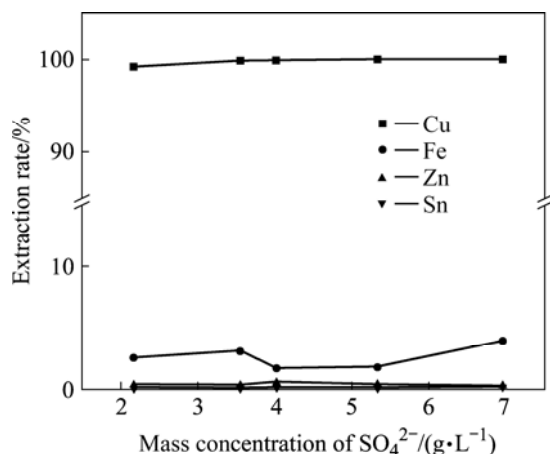


图 7 SO_4^{2-} 质量浓度对萃取率的影响

Fig.7 Effect of mass concentration of SO_4^{2-} on extraction rates of Cu, Fe, Zn and Sn

2.2.3 Cl^- 的质量浓度对萃取率的影响

本研究用 NaCl 调节料液中 Cl^- 的质量浓度范围为: 1.12~7.39 g/L, 在以上优化的实验条件下, 对料液进行萃取, 以考察 Cl^- 的浓度对萃取率的影响。

图 8 所示为料液中 Cl^- 的质量浓度对铜、铁、锌、锡萃取率的影响。由图 8 可看出, Cl^- 对体系中各种金

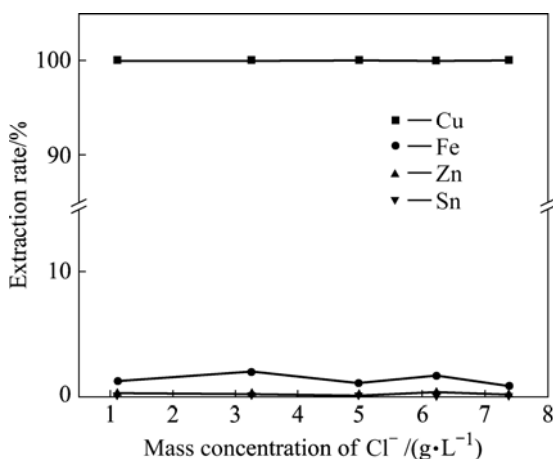


图 8 Cl^- 浓度对萃取率的影响

Fig.8 Effect of concentration of Cl^- on extraction rates of Cu, Fe, Zn and Sn

属离子的萃取率基本没有影响, 铜的萃取率在 99.94%~100.00% 之间, 铁的萃取率低于 3.00%, 锌和锡的萃取率均低于 0.50%。

2.3 模拟逆流萃取与反萃

2.3.1 萃取级数的确定

为了获得在选定相比条件下从浸出液中萃取铜的萃取级数, 进行萃取等温线实验。将原料液和体积分数 15% 的萃取剂在不同相比(1:5~5:1)下混合接触 10 min, 保持两相总体积不变, 相分离后分析水相中铜和铁的含量。根据 McCabe-Thiele 图解法^[15]得到如图 9 所示的萃取级数。

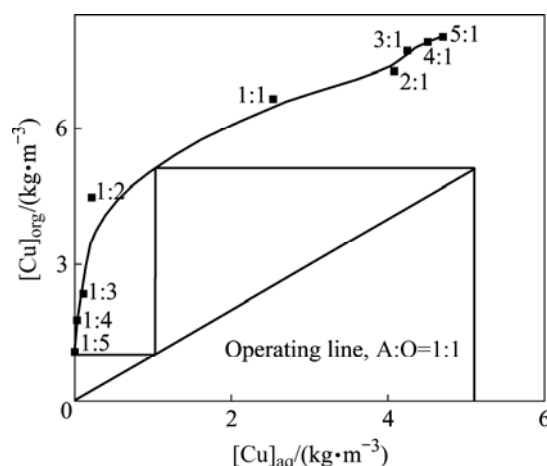


图 9 McCabe-Thiele 图解萃取铜

Fig.9 McCabe-Thiele plot for extraction of Cu

由图 9 可知, 相比为 1:1 时, 欲达到较好萃取效果, 理论上采用一级萃取即可, 在优化条件下铜的萃取率可达 99.78%, 铁的萃取率为 4.96%。在此条件下, 制备足够量的负载有机相进行反萃实验。

2.3.2 反萃级数的确定

负载有机相含铜 5.115 g/L, 铁 0.031 g/L。用 2.00 mol/L 硫酸作为反萃剂^[13], 在选定相比条件下, 为了获得从负载有机相中反萃铜的反萃级数, 进行反萃等温线实验。将负载有机相与 2.00 mol/L 硫酸在不同相比(1:5~5:1)下混合接触 10 min, 保持两相总体积不变, 相分离后分析水相中铜和铁的含量。根据 McCabe-Thiele 图解法得到如图 10 所示的反萃级数。

由图 10 可知, 相比为 1:1 时, 欲达到较好的反萃效果, 理论上至少需要三级逆流反萃。本研究模拟了三级逆流萃取过程, 结果列于表 3。由表 3 可知, 经过模拟三级逆流萃取过程, 铜的反萃率达到 97.51%, 反萃液中铜的浓度达到 4.749 g/L, 而铁的浓度可以忽

表 3 负载有机相的反萃取

Table 3 Stripping of loaded organic solution

Stripping number of stages	c(Cu) in loaded organic solution/(g·L ⁻¹)	c(Cu) in stripped solution/(g·L ⁻¹)	Stripping rate of Cu/%	c(Fe) in loaded organic solution/(g·L ⁻¹)	c(Fe) in stripped solution/(g·L ⁻¹)
1	5.115	3.523	68.876	0.031	0.000 2
2	5.115	4.100	80.160	0.031	0.000 2
3	5.115	4.988	97.510	0.031	0.000 3

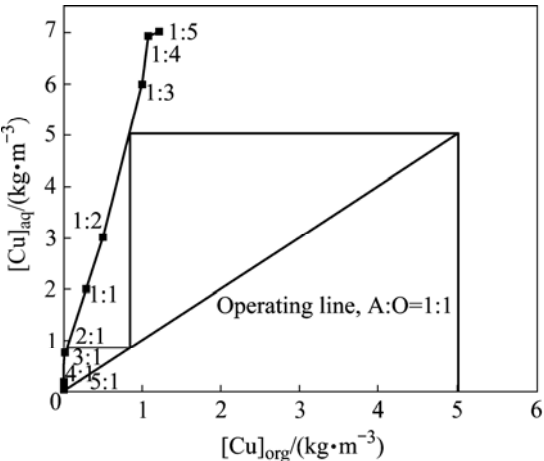


图 10 McCabe-Thiele 图解反萃取

Fig.10 McCabe-Thiele plot for stripping of Cu

略, 因此, 反萃液可以直接电积产铜。用 LK-C2 萃取回收废线路板酸性浸出液中的铜是可行的。

3 结论

- 1) LK-C2 在废线路板酸性浸出液体系中萃铜的优化条件: pH 值为 2.00, LK-C2 浓度为 15%, O/A 为 1:1, 萃取时间为 10 min。铁的萃取率低于 2.00%, 锌和锡基本不被萃取, 且干扰铜的萃取。
- 2) 铜与铁的分系数($\beta=D_{Cu}/D_{Fe}$)在平衡 pH 值为 1.96 时达到最高值 2 154.33。
- 3) 溶液中 NO₃⁻、SO₄²⁻和 Cl⁻的质量浓度对铜、铁、锌、锡的萃取无显著影响;
- 4) 在优化条件下, 高铜酸性体系直接萃取铜, 经一级萃取后, 铜的萃取率可达 99.78%;
- 5) 相比 1:1 条件下, 2.00 mol/L 硫酸对负载有机相反萃铜, 经三级模拟逆流反萃, 铜的反萃率可达 97.51%, 达到选择性回收铜的目的。

REFERENCES

[1] 洪大剑, 张德华, 邓杰. 废印刷电路板的回收处理技术[J].

云南化工, 2006, 33(1): 31-34.
HONG Da-jian, ZHANG De-hua, DENG Jie. Reclamation of PCB scrap[J]. Yunnan Chemical Technology, 2006, 33(1): 31-34.
[2] MUKHERJEE A B, ZEVENHOVEN R, BRODERSEN J, HYLANDER L D, BHATTACHARYA P. Mercury in waste in the European Union: Sources, disposal methods and risks[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2004, 42: 155-182.
[3] 牛冬杰, 聂永丰. 废电池的环境污染及资源化价值分析[J]. 上海环境科学, 2000, 19(10): 461-463.
NIU Dong-jie, NIE Yong-feng. Analysis on pollution and recycling value of waste battery[J]. Shanghai Environmental Science, 2000, 19(10): 461-463.
[4] 陈庆邦, 聂晓军, 刘宏. 从废金钯电子镀件中回收金和钯[J]. 稀有金属, 2000, 24(1): 74-77.
CHEN Qing-bang, NIE Xiao-jun, LIU Hong. Recovery of gold and paladium from waste electroplated articles[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(1): 74-77.
[5] 周学玺, 朱屯. 季铵萃取分离钴镍的研究[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(3): 34-38.
ZHOU Xue-xi, ZHU Tun. Separation of cobalt and nickel by solvent extraction with quaternary ammonium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(3): 34-38.
[6] 汪炳瑞, 郎书玲, 刘璞. 铜萃取剂的合成方法[J]. 有色金属(冶炼部分), 1995, 47(1): 18-21.
WANG Bing-rui, LANG Shu-ling, LIU Pu. Synthesis of copper extractant[J]. Nonferrous Metals(Smelting), 1995, 47(1): 18-21.
[7] 汪胜东, 蒋训雄, 尹才砢. 用 LIX84 从富钴结壳硫酸浸出液中选择性萃取铜[J]. 有色金属(冶炼部分), 2000, 54(2): 6-9.
WANG Sheng-dong, JIANG Xun-xiong, YIN Cai-qiao. Selective solvent extraction of copper from the acid leaching solution of ocean cobalt-rich crust with LIX84[J]. Nonferrous Metals(Smelting), 2000, 54(2): 6-9.
[8] AMINIAN H, BAZIN C. Solvent extraction equilibria in copper(II)-iron(III)-LIX984 system[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(6): 667-672.
[9] 彭钦华, 陈述一, 李绍民, 阳光. 铜萃取剂 BK992 和 LIX984 的性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2000, 54(5): 18-20.
PENG Qin-hua, CHEN Shu-yi, LI Shao-min, YANG Guang.

- Properties study on copper extractant BK992 and LIX984[J]. Nonferrous Metals(Smelting), 2000, 54(5): 18-20.
- [10] 彭钦华, 李绍民, 陈述一, 宋庆福. 铜萃取剂 BK992 在湿法冶金中的应用[J]. 有色金属, 2001, 53(4): 41-43.
- PENG Qin-hua, LI Shao-min, CHEN Shu-yi, SONG Qing-fu. Application of copper extractant BK992 in hydrometallurgy[J]. Nonferrous Metals, 2001, 53(4): 41-43.
- [11] 彭钦华, 李绍民, 陈述一, 宋庆福, 王春云, 张培文. 铜萃取剂 BK992 的研制[J]. 有色金属(冶炼部分), 2001, 53(6): 2-5.
- PENG Qin-hua, LI Shao-min, CHEN Shu-yi, SONG Qing-fu, WANG Chun-yun, ZHANG Pei-wen. Development of copper extractant BK992[J]. Nonferrous Metals(Smelting), 2001, 53(6): 2-5.
- [12] 马倩玲. 从环保角度看 BK992 铜萃取剂的应用前景[J]. 矿冶, 2003, 12(3): 83-85.
- MA Qian-ling. Application prospect of copper extractant BK992 as viewed from environmental protection[J]. Mining & Metallurgy, 2003, 12(3): 83-85.
- [13] 郭华军, 王晓琼, 李新海, 张新明, 王志兴, 彭文杰, 许声飞. BK992 萃取除铜净化硫酸镍钴溶液[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 806-812.
- GUO Hua-jun, WANG Xiao-qiong, LI Xin-hai, ZHANG Xin-ming, WANG Zhi-xing, PENG Wen-jie, XU Sheng-fei. Extraction of copper from nickel and cobalt sulfate solution with BK992[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 806-812.
- [14] PARHI P K, PANIGRAHI S, SARANGI K, NATHSARMA K C. Separation of cobalt and nickel from ammoniacal sulphate solution using Cyanex 272[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 59(3): 310-317.
- [15] 朱 屯. 萃取与离子交换[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 216-217.
- ZHU Tun. Extraction and Ion-exchange[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 216-217.

(编辑 何学锋)