

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.06.013

# 甲基磺酸盐镀铅锡体系成分检测及废液处理方法研究进展

王军, 刘超男, 王振卫\*, 郭国才\*

(上海应用技术大学 化学与环境工程学院, 上海 201418)

**摘要:** 铅锡合金具有广泛的用途, 甲基磺酸盐(MSA)镀铅锡体系具有镀液稳定、腐蚀性低、毒性低、废水易处理等优点。本文综述了有关MSA镀铅锡体系成分检测和废液处理方法, 并对甲基磺酸盐镀液体系的发展方向进行了展望。

**关键词:** 甲基磺酸盐镀液; 电镀铅锡; 成分检测; 废液处理

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

## Research Progress on Composition Detection and Waste Solution Treatment Method for Methyl Sulfonate Lead-Tin Plating Solution System

WANG Jun, LIU Chaonan, WANG Zhenwei\*, GUO Guocai\*

(School of Chemical and Environmental Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**Abstract:** Lead-tin alloy has a wide range of uses. Methyl sulfonate (MSA) lead-tin plating system has the advantages of stable plating solution, low corrosion, low toxicity and easy treatment of wastewater. In this paper, the methods of composition detection and waste solution treatment of the MSA lead-tin plating system were reviewed, and the development direction of methyl sulfonate plating solution system was prospected.

**Keywords:** methyl sulfonate plating solution; lead-tin plating; component testing; liquid waste processing

铅锡合金在工业上应用广泛, 它的结晶比单金属的铅或锡都要细腻, 且具有优良的抗腐蚀性、可焊性以及润滑减摩性能。铅的标准电极电位为 $-0.126\text{ V}$ , 锡的标准电极电位为 $-0.136\text{ V}$ , 电位相差 $10\text{ mV}$ , 所以铅与锡的共沉积很容易实现。通过控制镀液中铅和锡的比例, 可得到铅锡含量不同的合金镀层, 成分不同其用途也不同<sup>[1-2]</sup>。近些年来, 电镀铅锡合金工艺在电子工业领域快速发展<sup>[3]</sup>。常见的铅锡合金电镀液有氟硼酸体系、酚磺酸体系、氨基磺酸体系、烷基磺酸体系和甲基磺酸体系等<sup>[4-8]</sup>。

现行的电镀污染物排放标准(GB21900-2008)

中规定: 车间或生产设施废水排放口中总铅的排放浓度限值为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、企业废水总排放口中氟化物的排放浓度限值为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。传统的氟硼酸体系中铅离子和氟化物难以达到标准, 而甲基磺酸盐镀液体系(MSA镀液体系)不仅毒性小而且在废液处理方面具有显著优势, 研究MSA镀液体系中污染物成分检测及相应的处理方法具有重要意义。

### 1 甲基磺酸盐镀液体系

MSA镀液体系在工业上的应用较为广泛, 镀液中 $\text{Sn}^{2+}$ 氧化速率只有 $0.07\text{ g}\cdot(\text{dm}^3\cdot\text{h})^{-1}$ , 可操作的电

收稿日期: 2021-03-23

修回日期: 2021-05-15

通信作者: 王振卫(1976—), 男, 博士, 副教授, email: wangzhenwei@sit.edu.cn; 郭国才(1963—), 男, 学士, 讲师, email: ggc@sit.edu.cn

流密度范围达  $2 \sim 40 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ , 可保持较高的离子浓度 ( $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>[9-10]</sup>。相比于氟硼酸盐镀液体系, MSA 镀液体系在不同的 pH 溶液中都稳定, 引起溶液中各种金属离子氧化的几率小。同时它毒性小、能生物降解生成硫酸盐和二氧化碳、废水易处理, 表 1 列出了几种 MSA 镀液体系的工艺实例<sup>[1, 11-12]</sup>。

表 1 MSA 镀液体系工艺实例<sup>[1, 11-12]</sup>

Tab.1 Process example of MSA plating bath system<sup>[1, 11-12]</sup>

参数	工艺实例		
	1	2	3
$\text{Sn}^{2+}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	20 ~ 30	20 ~ 26	18 ~ 23
$\text{Pb}^{2+}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	10 ~ 20	8 ~ 13	7 ~ 11
游离 $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	100 ~ 140	220 ~ 250	150 ~ 200
允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	18 ~ 35	25	15 ~ 30
阴极电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	2 ~ 4	2	2 ~ 6

## 2 MSA 镀液体系成分检测

### 2.1 铅和铁的检测

镀液中铅离子含量直接影响镀层中铅的含量, 在实际工业生产中为了有效控制镀层成分以及为后续废水处理做准备, 需要检测镀液中铅和铁离子的含量<sup>[13-14]</sup>。有关 MSA 镀液中的铅和铁的分析报道较少, 铅和铁的含量可采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP - AES)同时测定。

ICP-AES<sup>[15]</sup>具有较高的精确度、较好的稳定性和抗干扰水平, 能同时测定多种元素等优点<sup>[16-18]</sup>。根据特征光的波长和强弱进行定性定量分析, 常见的铅分析波长有: 216.999 nm、220.353 nm、261.418 nm 和 283.306 nm; 铁分析波长有: 259.940 nm、238.204 nm、239.562 nm 和 240.488 nm。根据表 2<sup>[14]</sup>中的数据, 用 ICP-AES 法同时测定 MSA 镀液体系中铅和铁含量, 铅的检出限为  $6.30 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 铁的检出限为  $9.60 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相对标准偏差(RSD)均小于 3%, 说明该方法是可靠的, 准确度和精密度都比较高。

### 2.2 甲基磺酸的测定

甲基磺酸能防止锡离子水解, 并能提高阴极极化、导电能力和分散能力。准确测定镀液中甲基磺酸的含量可以监测镀液是否老化以及为后续废液处理做准备<sup>[19-20]</sup>。常采用超高效液相色谱法测定 MSA 镀液中甲基磺酸含量, 见表 3<sup>[20]</sup>。超高效液相色谱法涵盖了低系统体积及快速检测手段等技术, 具有较高的分析通量、灵敏度及色谱峰容量<sup>[21]</sup>。

表 2 ICP - AES 法测定 MSA 镀液中铅和铁含量相关实验数据<sup>[14]</sup>

Tab.2 Determination of lead and iron content in MSA plating solution by ICP - AES method<sup>[14]</sup>

测定元素	分析谱线/nm	检出限/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	测定下限/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	回收率/%	RSD/%
Pb	220.353	$6.30 \times 10^{-5}$	$3.15 \times 10^{-4}$	95.7 ~ 109.6	<3
Fe	259.940	$9.60 \times 10^{-2}$	$4.80 \times 10^{-1}$	95.8 ~ 106.7	<3

表 3 超高效液相色谱法测定甲基磺酸相关数据<sup>[20]</sup>

Tab.3 Determination of methyl sulfonic acid by ultra performance liquid chromatography<sup>[20]</sup>

色谱柱型号	BEH Amind
流动相/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.01 乙酸铵乙腈溶液-0.01 乙酸铵水溶液
流速/ $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	0.4
线性范围/ $(\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	1.00 ~ 10.00
回收率/%	99 ~ 102
RSD/%	0.79 ~ 1.20

### 2.3 甲基磺酸锡的测定

重铬酸钾氧化还原法<sup>[22]</sup>可间接测定二价锡, 其原理是利用二价锡在酸性介质中与硫酸铁铵反应使三价铁还原成二价铁的特性, 在混合酸中, 以二苯胺磺酸钠作指示剂, 用重铬酸钾标准溶液滴定二价铁, 可计算出二价锡的含量, 回收率可达 98%。甲基磺酸锡的质量浓度按式(1)计算得出<sup>[22]</sup>。

$$\rho = \frac{V \times C \times \frac{1}{2} \times 308.9}{V_1 \times \frac{25}{500}} \quad (1)$$

式中:  $V$  为样品消耗的重铬酸钾标准溶液的体积, mL;  $C$  为重铬酸钾标准溶液的浓度,  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 308.9 为甲基磺酸锡的摩尔质量,  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $V_1$  为样品体积, mL。

## 3 废液处理

### 3.1 铅的处理

含铅废水其主要来源有铅酸蓄电池、电镀工业、冶金和机械及涂料工业<sup>[23-24]</sup>。常见的处理方法有化学沉淀法<sup>[25]</sup>、离子交换法<sup>[26]</sup>、吸附法<sup>[27]</sup>、膜处理法<sup>[28]</sup>和电解除铅<sup>[29]</sup>。各种方法优缺点见表 4<sup>[30-31]</sup>。

通常采用化学共沉淀法处理 MSA 镀液体系中的铅离子。镀液中含有  $\text{SO}_4^{2-}$ , 向其中加入一定量的  $\text{Ba}^{2+}$  可达到除铅的效果。选择  $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  作为

除铅剂,当反应时间为 30 min 时,沉淀物粒度最大,除铅率达 95 %<sup>[32]</sup>。钡离子除铅共有两种机理:一是主副沉淀反应,加入钡离子后会形成硫酸钡和氢氧化铅沉淀,但氢氧化铅沉淀受废水 pH 影响较大,生成量少,除铅效果较为微弱;二是硫酸钡沉淀对铅的吸附效果,大部分的铅都是被吸附去除的<sup>[32-34]</sup>。

表 4 常见含铅废水处理方法<sup>[30-31]</sup>

Tab.4 Common treatment methods of lead-containing wastewater<sup>[30-31]</sup>

处理方法	优点	缺点
化学沉淀	处理效果好、可达到国家排放标准	铅盐污泥不易处理、有二次污染、占地面积大
离子交换	占地面积小、铅的脱除率高、无二次污染	一次性投资大、再生问题存在困难
膜处理	可用于工业废水的连续处理、既净化水质又能富集回收金属离子	技术难度大、停留在实验室阶段
吸附	受 pH 影响小、不使用化学试剂、污泥量极少无二次污染、排放水可回用、	国内研究停留在实验室阶段
电解除铅	无需加入过多化学药品、后处理简单、占地面积小、管理方便、污泥量小	电解法处理含铅废水技术难度较大

钡盐法处理含铅废水的沉铅效果主要有以下几点影响因素<sup>[33-34]</sup>:(1)钡盐的加入量:随着钡盐投加量的增加,水中铅离子浓度会迅速下降,但当铅离子浓度降到  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,随着钡盐的增加,铅离子浓度变化比较平缓。(2)反应温度:当温度较低时,铅离子的浓度随着温度的升高而降低,当温度达到  $65^\circ\text{C}$  时,铅离子的浓度不受温度的影响。(3)反应时间:随着反应时间的增加,沉淀物的平均粒径先增大后减小,铅离子浓度先降低后升高。

### 3.2 铁离子的去除

镀液中铁离子主要来源于两个方面:一是电镀前处理工序酸洗槽中带出的铁离子,二是钢铁基体遭酸性镀液腐蚀而产生的铁离子<sup>[14]</sup>。二价铁离子不断积累会使镀层表面粗糙、结晶不细致,镀层孔洞增加,促使二价锡向四价转化,造成镀液混浊<sup>[35]</sup>。离子交换树脂可以同时吸附甲基磺酸盐镀液中的锡离子和铁离子,两种离子沉淀的 pH 不同,通过调节洗脱液的 pH 可以达到除去铁离子并回收锡的目的<sup>[36]</sup>。

选用 HZ016 型离子交换树脂来吸附 MSA 镀液

体系中的锡、铁离子,吸附率分别达到 99.6 %、95.3 %。由于两种离子的沉淀 pH 不同,锡的回收率和铁的残留率会随着 pH 的变化而变化。如图 1<sup>[36]</sup>所示,当调节洗脱液 pH 为 3.8 时,锡的回收率可达到 87.5 %,同时铁离子的残留率仅为 3 % 左右。达到了去除 MSA 镀液体系中的铁并回收锡的目的。

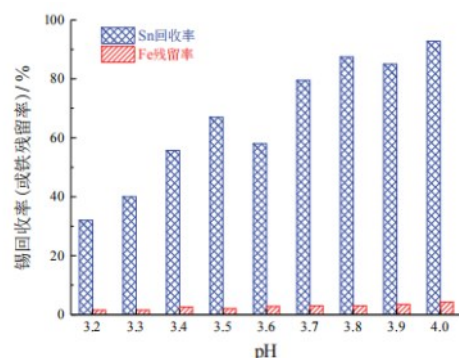


图 1 锡的回收率和铁的残留率随 pH 的变化<sup>[36]</sup>

Fig.1 Variation of recovery rate of tin and residual rate of iron with pH<sup>[36]</sup>

### 3.3 甲基磺酸的去除

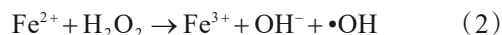
甲基磺酸又称甲磺酸或甲烷磺酸,结构式为  $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ ,是一种有机强酸、非氧化性酸,其金属盐极易溶解。针对 MSA 废液的处理,主要研究其化学降解性能和生物降解性能。MSA 与 PSA (苯酚磺酸) 中化学需氧量(COD)和总有机碳(TOC)相关数据如表 5<sup>[37]</sup>所示。

表 5 MSA 和 PSA 的水质对比<sup>[37]</sup>

Tab.5 Comparison of water quality between MSA and PSA<sup>[37]</sup>

参数	项目	
	MSA	PSA
TOC/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	11.15	98.16
COD/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	8.05	284.00
COD/TOC	0.72	2.89

MSA 废液的化学降解性能可采用 Fenton 氧化工艺<sup>[37-38]</sup>进行探究。Fenton 试剂是由过氧化氢和铁离子构成的氧化体系,它是高级氧化工艺的一种。当亚铁离子遇到过氧化氢时,在  $\text{Fe}^{2+}$  催化剂作用下,产生氧化性较强的氢氧自由基,如式(2)所示。可加快有机物和还原性物质的氧化<sup>[39-41]</sup>。



具体的实验条件如下<sup>[37]</sup>:铁离子浓度为  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 3~4、反应时间 30 min,主要研究  $\text{H}_2\text{O}_2$  这一参数



对废液处理效果的影响。从表6<sup>[37]</sup>中可以看出,  $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量从0升至 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, COD的去除率逐渐升高而TOC去除率基本不变, 当 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量从 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, TOC和COD去除率都比较稳定, 这说明废水中部分COD难以被Fenton试剂氧化, TOC基本无法除去, MSA废水的化学降解性能较差。

表6  $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量对TOC、COD去除率的影响<sup>[37]</sup>

Tab.6 Effect of  $\text{H}_2\text{O}_2$  dosage on TOC and COD removal rate<sup>[37]</sup>

$\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量/ ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	0	1	2	4	6	10
TOC去除率/%	18.7	39.3	20.8	32.6	28.0	31.6
COD去除率/%	25.0	48.0	50.3	74.7	72.0	76.8

探究MSA废水的生物降解性可采用经济合作与发展组织(OCED)对易降解有机物的评价方法<sup>[37]</sup>: 在经营养液稀释后的MSA废水中接种经过处理后的污泥, 在空白营养液中接种相同量的污泥作为对照组。将接种后的样品放入恒温培养箱中, 实验持续28 d, 间隔一定时间对滤液中TOC含量进行测定。MSA样品中的TOC减去对照组中的TOC即为残留MSA的TOC, 废水的降解曲线如图2<sup>[37]</sup>所示。可以看出, 前14 d内水中TOC维持在一定的浓度, 此时处于微生物的适应阶段, 在14~24 d内, 随着微生物的大量繁衍生息, MSA迅速被微生物降解。根据OCED评价标准, MSA具有良好的生物降解性, 属于易生物降解有机物。

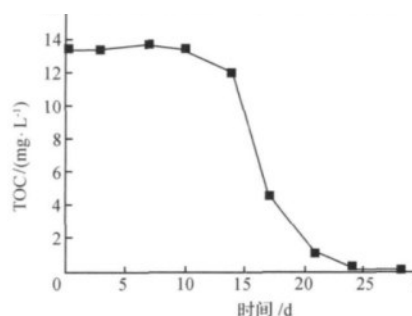


图2 MSA废水28 d内的降解曲线<sup>[37]</sup>

Fig.2 Degradation curve of MSA wastewater within 28 days<sup>[37]</sup>

## 4 总结与展望

甲基磺酸盐镀液体系作为一种具有巨大发展潜

力的电镀铅锡合金工艺, 近些年来受到了极大的关注。在实际的工程应用中, 电镀液的组成大致相同。其中某些成分会影响到镀层的质量, 如: 铁离子会影响到镀层的耐腐蚀性、铅离子决定了镀层的铅含量、甲基磺酸是评价镀液是否老化及生产是否稳定的重要指标、甲基磺酸锡的含量影响着电镀效果。文中综述了有关MSA镀液体系中成分检测的方法及废液处理工艺。随着电镀污染排放标准的提高, 传统的工艺无法满足排放标准, MSA镀液体系毒性低、废水产生量少、镀液稳定等优势逐渐显露出来。所以未来MSA镀液体系中的成分检测方法及废水处理工艺是主要研究方向。

## 参考文献

- [1] 李国斌, 令玉林. 甲基磺酸体系电镀铅锡合金工艺的研究[J]. 材料保护, 2006, 39(3): 29-31+76.
- [2] 郑振, 严俊, 梁杭龙. 甲基磺酸盐电镀锡铅合金[J]. 电镀与环保, 1999, 19(5): 9-11.
- [3] Hwang H, Hong S M, Jung J P, et al. Pb-free solder bumping for flip chip package by electroplating[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2003, 15(2): 10-16.
- [4] Cobley A J, Halut J, Negre P. Ultrasonic agitation in barrel electroplating: Field trial results[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 2015, 93(4): 171-175.
- [5] 李昌树, 安成强, 郝建军. 锡铅合金电镀液研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(9): 25-28.
- [6] 邵奇临. 柠檬酸型电镀光亮铅锡合金工艺与添加剂的改进[J]. 材料保护, 1996, 29(9): 30.
- [7] 吴水清. 镀铅锡合金添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 1999, 28(2): 1-5+49.
- [8] 李成虹. 氟硼酸电镀铅-锡合金镀液中铅测定方法的改进[J]. 电镀与精饰, 2004, 26(1): 37.
- [9] 王亚雄, 黄迎红. 甲基磺酸盐在锡及锡基合金镀层中的应用现状[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(2): 26-29.
- [10] 池建明, 康京冬. 甲磺酸电镀锡铅合金工艺研究[J]. 材料保护, 2001, 34(10): 44-45.
- [11] 陈双扣, 郭莉萍, 朱建芳. 电路板电镀锡铅合金的工艺研究[J]. 材料保护, 2007, 40(4): 25-27+74.
- [12] 付明, 刘永生, 周文勇. 甲基磺酸盐电镀锡铅合金工艺研究[C] //中国机械工程学会表面工程分会、中国表面工程协会转化膜专业委员会. 全国镀膜与表面精饰低碳技术论坛论文集, 2011: 18-22.
- [13] 何志明, 贺萍, 贾小霞. ICP-AES光谱法测定MSA电镀锡溶液中铅含量[J]. 梅山科技, 2012(3): 23-26.

- [14] 刘新院, 李霞, 董礼男, 等. ICP-AES法同时测定甲基磺酸盐电镀锡溶液中的铁和铅[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(21): 1156-1159.
- [15] 郑国经. ICP-AES分析技术的发展及其在冶金分析中的应用[J]. 冶金分析, 2001, 21(1): 36-43.
- [16] Zhang J Y, Wang Y Z, Jin H, et al. Determination of trace elements in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* by ICP-AES[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2247-2249.
- [17] Diao Y, Han H B, Zhang D, et al. Determination of nine microelements in *Nostoc commune vauch* by ICP-AES[J]. Advanced Materials Research, 2012, 518-523: 5020-5023.
- [18] Rahil-khazen R, Henriksen H, Bolann B J, et al. Validation of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry technique (ICP-AES) for multi-element analysis of trace elements in human serum[J]. Scandinavian Journal of Clinical & Laboratory Investigation, 2000, 60(8): 677-686.
- [19] 胡立新, 程骄, 占稳, 等. 甲基磺酸盐电镀锡工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2009, 29(6): 29-32.
- [20] 周桂海, 孙华云, 宋旭飞. 超高效液相色谱法测定甲基磺酸盐电镀液中甲基磺酸[J]. 冶金分析, 2017, 37(6): 33-38.
- [21] 甘宾宾, 蔡卓, 蒋世琼, 等. 超高效液相色谱在现代分析检验中的应用进展[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(5): 955-957.
- [22] 吴孝兰, 梁燕如. 甲基磺酸盐中甲基磺酸盐和游离甲基磺酸的测定[J]. 理化检验(化学分册), 2015, 51(7): 993-994.
- [23] 孙文钊. 含铅废水处理的分析与实验研究[J]. 北方环境, 2012, 24(1): 107-108.
- [24] Tan S Y, Hallett J P, Kelsall G H. Electrodeposition of lead from methanesulfonic acid and methanesulfonate ionic liquid derivatives[J]. Electrochimica Acta, 2020, 353: 136460.
- [25] Tu Y J, Chang C K, You C F, et al. Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 209-210: 379-384.
- [26] Agrawal A, Sahu K K. Separation and recovery of lead from a mixture of some heavy metals using amberlite IRC 718 chelating resin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 133(1-3): 299-303.
- [27] Pan B C, Zhang Q R, Zhang W M, et al. Highly effective removal of heavy metals by polymer-based zirconium phosphate: A case study of lead ion[J]. Colloid and Interface Science, 2007, 310(1): 99-105.
- [28] Zhang Y F, Xu Z L. Study on the treatment of industrial wastewater containing  $Pb^{2+}$  ion using a coupling process of polymer complexation-ultrafiltration[J]. Separation Science and Technology, 2003, 38(7): 1585-1596.
- [29] 张书海, 江峰琴, 任永红. 铁屑微电解法处理蓄电池生产中含铅酸废水[J]. 环境工程, 2009, 27(5): 28-29+40.
- [30] 张少峰, 胡熙恩. 含铅废水处理技术及其展望[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(11): 68-71.
- [31] 古小超, 梅鹏蔚, 张震, 等. 含铅废水处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(12): 14-19.
- [32] 唐薇, 秦宗慧, 潘红良, 等. 硫酸钡共沉淀法除去MSA电镀锡液中的铅[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(21): 1131-1135+1147.
- [33] 张伟超, 穆海玲, 李顺祥. 甲基磺酸盐电镀锡液硫酸钡共沉淀法除铅工艺和装备[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(16): 852-856.
- [34] 李忠国, 李金惠, 段华波. 钡盐共沉淀法处理酸性含铅废水[J]. 环境工程学报, 2007, 1(11): 51-54.
- [35] 王志登, 王洛浩, 王熙禹, 等. 亚铁离子对甲磺酸高速电镀锡溶液电化学行为及其镀层的影响[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(20): 1139-1144.
- [36] 刘厚励, 万一群, 陈建钧, 等. 离子交换法去除甲基磺酸盐电镀锡液中的二价铁离子[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(11): 480-483.
- [37] 侯红娟, 李恩超, 黄邦霖. 甲基磺酸盐电镀液的降解性能评价[J]. 钢铁, 2011, 46(5): 93-96.
- [38] 安立超, 余宗学, 严学亿, 等. 利用芬顿试剂处理硝基苯类生产废水的研究[J]. 环境科学与技术, 2001, (S2): 3-4+17.
- [39] Sun S P, Li C J, Sun J H, et al. Decolorization of an azo dye Orange G in aqueous solution by Fenton oxidation process: Effect of system parameters and kinetic study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3): 1052-1057.
- [40] Hsieh L L, Kang H J, Shyu H L, et al. Optimal degradation of dye wastewater by ultrasound Fenton method in the presence of nanoscale iron[J]. Water Science and Technology, 2009, 60(5): 1295-1301.
- [41] Kasiri M B, Aleboyeh H, Aleboyeh A. Degradation of acid blue 74 using Fe-ZSM5 zeolite as a heterogeneous photo-Fenton catalyst[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 84(1-2): 9-15.