

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.11.008

## 电镀污泥中有价金属综合回收技术研究现状

高天锐<sup>1</sup>, 蓝卓越<sup>1,2</sup>, 吕晋芳<sup>1,2\*</sup>, 全英聪<sup>1</sup>, 魏民<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 随着我国经济的快速发展, 电镀行业取得了巨大的进步, 但同时也伴随着大量电镀废水的产生。电镀废水在处理过程中产生了大量固体危险废物—电镀污泥。该类污泥如果处理不当, 则会引起二次环境污染, 并对人体健康造成严重威胁。此外, 由于污泥中含有大量有价金属, 具有一定的回收价值, 因此高效回收污泥中有价金属已成为目前的研究热点。本文全面阐述了电镀污泥中的有价金属的回收技术的研究现状, 旨在为研究污泥资源化利用的企业和学者提供参考, 结合自身实际生产和研究情况, 提高污泥中有价金属的综合利用率。

**关键词:** 电镀污泥; 有价金属; 综合回收

**中图分类号:** TQ153.2      **文献标识码:** A

## Research Status of Valuable Metals Recovery from Electroplating Sludge

GAO Tianrui<sup>1</sup>, LAN Zhuoyue<sup>1,2</sup>, LYU Jinfang<sup>1,2\*</sup>, QUAN Yingcong<sup>1</sup>, WEI Min<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** With the rapid development of China's economy, electroplating industries have also made great progress. But it is also accompanied by a large number of electroplating wastewater. Electroplating wastewater produces a lot of solid hazardous waste-electroplating sludge in the treatment process. If not handled properly, it is going to cause secondary pollution and serious harm to human health. In addition, the reason why efficient recovery of valuable metals in sludge has become the focus of scholars is the sludge contains a large number of valuable metals and has a certain recovery value. In this paper, the research status of the recovery technologies of valuable metals in electroplating sludge is summarized. The purpose is to provide reference for the companies and scholars who study the resource utilization of sludge and to improve the comprehensive utilization ratio of valuable metals in sludge combined with their own actual production situation.

**Keywords:** electroplating sludge; valuable metal; comprehensive recovery

目前, 电镀行业的发展是工业发展必不可少的环节, 它在经济发展和工业建设中有着举足轻重的

作用和地位<sup>[1]</sup>。电镀污泥是电镀废水经过酸碱中和沉淀或絮凝沉淀的产物, 是电镀废水处理之后的终

收稿日期: 2020-12-13

修回日期: 2021-01-16

\*通信作者: 吕晋芳, jflv2017@126.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(No.51904129); 云南省教育厅科学研究基金项目(No.2019J0037); 云南省基础研究专项(202001AU070028); 昆明理工大学分析测试基金(No.2020T20180033, No. 2020M20192201119)

极产物,属于固体危险废物<sup>[2-6]</sup>。我国的《国家危险废物名录》记录了 49 类危险废物,电镀污泥占据了其中的 7 种,分别是 HW17、HW20-23、HW26、HW33 以及 HW46<sup>[7]</sup>。由于电镀厂电镀工艺的复杂,造成电镀污泥中的组分不同<sup>[8]</sup>。然而,电镀污泥中一般含有铜、镍、锌、铬、铁等有色金属,具有较好的开发利用价值。随着我国资源的不断开采,固体废物资源再利用已迫在眉睫。所以,如何回收电镀污泥中的有色金属成为了当下电镀行业和环境行业的重要研究方向<sup>[9]</sup>。目前,电镀污泥的回收方法主要包括为湿法回收、火法回收、生物法三大类<sup>[10]</sup>,其中湿法为最常用的方法,但是火法以及生物处理法的发展也十分迅速。

## 1 湿法处理

湿法回收处理主要包括酸浸法回收<sup>[11-12]</sup>、氨浸法回收<sup>[13-14]</sup>和焙烧-浸出法<sup>[15-17]</sup>。

### 1.1 酸浸法回收铜、铁、锌、镍、铬

酸浸法主要是以盐酸、硝酸、硫酸等无机酸为浸取剂,从电镀污泥中浸出提取可溶性金属离子的一种方法<sup>[18, 19]</sup>。易龙生等<sup>[20]</sup>利用硫酸浸出法处理含铜 4.648% 的电镀污泥。在硫酸浓度 1 mol/L、液固比 15:1 的条件下,污泥中铜的浸出率达到 90%。然后对浸出液进行萃取-反萃取,最终铜的回收率达到 85%。Ruijing 等<sup>[21]</sup>利用盐酸浸出法回收电镀污泥中的铜和铁。在盐酸浓度为 1.5 mol/L、浸出温度 40 °C、液固比为 10:1 的条件下,铜和铁的浸出率分别达到 80.6% 和 40%。王伍等<sup>[22]</sup>对采用酸浸法处理铜、锌、镍含量分别为 2.17%、0.61%、0.6% 的电镀污泥。在液固比 1:1、反应时间 0.5 h、温度 30 °C 的条件下,通过 2 mol/L 硫酸浸出,铜、锌、镍的浸出率分别达到 95%、99%、99% 以上。李强等<sup>[23]</sup>利用硫酸浸出电镀污泥,然后利用 Lix984N 萃取铜、氧化沉铁、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  沉锌、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  沉镍、沉淀剂沉铬。最终,铜、铁、锌、镍和铬的回收率均大于 96%。

虽然,酸浸法处理电镀污泥有色金属回收率较高,但过程中会产生废酸以及含有价金属污染废水等,这些产物容易引起二次环境污染。此外,浸出液中含有复杂的有色金属,分离提纯困难,而且对设备腐蚀较严重,操作环境差,不利于工业化实施<sup>[10]</sup>。

### 1.2 氨浸法回收铜、镍

氨浸法是以氨、氨+铵盐等作为浸取剂,从电镀

污泥中浸出提取可与氨形成配合物的金属离子的方法。易龙生等<sup>[24]</sup>利用还原氨浸工艺回收电镀污泥的铜和镍。以质量分数 20% 的氨水为浸出剂,在固液比 1:15、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  浓度分别为 0.3 mol/L 和 0.4 mol/L、浸出温度 70 °C、浸出时间 3 h 条件下浸出,铜和镍的浸出率分别为 95.84% 和 90.12%。刘伟<sup>[15]</sup>等利用氨浸法回收电镀污泥中的铜和镍。浸出前电镀污泥中铜和镍的含量分别达到 1.45% 和 3.01%。将电镀污泥在浸出时间 1.5 h、室温、液固比 3:1 条件下浸出,铜和镍的浸出率为 89.6% 和 86.3% 左右。王吉华等<sup>[25]</sup>通过氨浸法和离子交换相结合的方法回收电镀污泥中的铜。在固液比 1:3、浸出时间 50 min、浸出温度 35 °C 条件下,采用浓度为 12% 的氨水浸出,铜的浸出率达到 95% 以上。

氨浸法处理电镀污泥,具有铜和镍回收率高、选择性好、腐蚀性弱等优点;但是氨挥发性强、操作环境差等缺点阻碍了其在工业上的应用与发展<sup>[26]</sup>。

### 1.3 焙烧-浸出法回收铬、锌、铜、镍、铁

焙烧-浸出法是指将电镀污泥进行高温焙烧,去除其中的杂质,然后将其中的有色金属进行浸出<sup>[27]</sup>。因为电镀污泥含量的不同及浸出工艺不同,所以电镀污泥的焙烧预处理的目的不同<sup>[28]</sup>。

郑智等<sup>[29]</sup>对铬和锌的含量分别为 3.55% 和 3.18% 的电镀污泥采用焙烧-浸取法回收。将电镀污泥置于 600 °C 条件下进行焙烧,然后将焙烧后的物料在液固比 10:1、搅拌时间 70 min、浸出温度 30 °C 条件下通过 3 mol/L 的 NaOH 浸出,铬和锌的浸出率分别达到 95.10% 和 93.23%。周雪等<sup>[30]</sup>利用焙烧-浸出法处理含铬和锌分别为 6.75% 和 10.90% 的电镀污泥。电镀污泥与 1.0~1.1 倍的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  均匀混合,在焙烧温度 700 °C、焙烧时间 1.5 h 的条件下进行焙烧,然后通过水浸出灰渣。铬和锌的浸出率均为 50% 左右。党晓娥等<sup>[31]</sup>利用钠化焙烧回收电镀污泥中的铬和锌。以  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaO}$  作为添加剂,将电镀污泥与等量  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和 CaO 均匀混合,在焙烧温度 950 °C、焙烧时间 1 h 条件下进行焙烧,然后将焙烧后的物料水浸,铬和锌的浸出率分别为 83.24% 和 67.90%。郑顺等<sup>[32]</sup>利用氯化焙烧-弱酸浸出实现对电镀污泥中的铜、镍、铁的回收。以氯化铵为氯化剂,先将电镀污泥置于 400 °C 条件下焙烧。然后在浸出时间为 45 min、浸出温度为 45 °C、液固比为 4:1 条件下经过酸度为 1 mol/L 盐酸浸出,铜和镍的浸出

率分别为 97.48% 和 87.65%。另外,该电镀污泥中铁的物相分析指出铁不会被氯化,所以铁的浸出率只有 26.83%。陈炯等<sup>[33]</sup>通过还原焙烧-酸浸对电镀污泥中的铜、锌、镍进行回收。焙烧之前电镀污泥中铜、镍、铁的质量分数分别为 10.05%、3.42%、0.45%。先按电镀污泥:煤粉:CaCO<sub>3</sub> 质量比 200:20:1 均匀混合,将混合后的物料置于 700 °C 下焙烧,然后将焙烧后的物料在浸出时间 80 min、液固比 10:1、常温条件下通过 10% 的硫酸溶液浸出,铜、锌、镍的浸出率分别达到 95.69%、41.68%、15.34%。

与酸浸法和氨浸法相比,焙烧-浸出法能减少浸出过程中浸出剂的用量<sup>[34]</sup>。但是在实际应用中,焙烧-浸出法需要对电镀污泥进行焙烧,整个焙烧过程大量的热能被浪费,且生产成本较高,因此该方法的应用与推广受到了限制<sup>[27]</sup>。

## 2 火法处理

火法回收处理包括熔炼法回收<sup>[35, 36]</sup>和焚烧法回收<sup>[5, 37]</sup>。

### 2.1 熔炼法回收铜、锌、镍

熔炼法是以煤炭、焦炭等作为燃料,同时添加白云石、石灰石、铜矿石等作为还原物质,用来回收电镀污泥中铜、锌、镍等金属的一种方法<sup>[27]</sup>。前人研究发现添加剂的种类与用量等因素对工艺存在较大影响<sup>[38]</sup>。王静等<sup>[39]</sup>利用高温熔炼技术回收电镀污泥中的铜。熔炼前的铜含量为 9%~15%,通过烘干-制砖-粗炼-精炼等工艺组成的高温熔炼技术对电镀污泥进行熔炼,最后铜的回收率达到 95% 以上。阳伦庄等<sup>[40]</sup>采用密闭还原熔炼工艺回收电镀污泥中的铜和锌。处理的电镀污泥中铜和锌含量分别为 6.14% 和 4.55%。将电镀污泥与炭精、还原煤、石英石一起放入密闭熔炼炉进行还原熔炼,最终,铜的回收率为 90%~95%,锌的回收率为 60%~70%。吴艳新等<sup>[41]</sup>发明了一种采用低吹熔池熔炼工艺处理电镀污泥的方法。将铜、镍含量分别为 2.5% 和 3.5% 的电镀污泥先干燥,然后根据电镀污泥:石英石:碎煤:铁矿=100:20:12:72 的质量比进行配料,均匀混合,通过上料系统连续加料,低吹炉底部气体喷枪入炉煤气,压缩空气,且煤气中的碳与压缩空气中的氧气摩尔比为 1:2,控制熔炼温度在 1050~1300 °C,最后成功回收铜镍合金。

熔炼法能够减少污泥体积,有效降低一部分有

毒物质,促进金属物质反应<sup>[2]</sup>。但是由于电镀污泥含水量高,热值低,而且金属含量少而散,所以熔炼法有高能耗、金属回收单一、烟气难以达标排放等缺点<sup>[18]</sup>。因此,如何无害化处理烟气是熔炼法当前急需解决的关键技术。

### 2.2 焚烧法回收铜、镍、锌、铬

焚烧法是对电镀污泥进行焚烧,通过减少电镀污泥的质量、体积及成分,增加金属在电镀污泥中的占比,然后对其进行回收的一种方法<sup>[42]</sup>。严建华等<sup>[43]</sup>利用焚烧法回收电镀污泥中的铜、镍、锌。在 900 °C 下对铜、镍和锌含量分别为 1.91%、0.25% 和 0.4% 的电镀污泥进行焚烧,铜、镍和锌的析出率分别为 36.6%、40.1% 和 59.6%。蒋旭光等<sup>[44]</sup>利用焚烧法回收了电镀污泥中的铜、锌和铬。将铜、锌和铬含量分别为 2.58%、0.1% 和 2.88% 的电镀污泥在 900 °C 条件下进行焚烧,铜、锌和铬的析出率分别为 68.95%、21.05% 和 3.10%。

焚烧法具备操作简便,节约成本的优点,但是回收率低、容易造成空气污染等问题限制了焚烧法的发展。

## 3 生物处理

生物处理<sup>[45, 46]</sup>是通过微生物来分解固体废物中可降解的物质,使固体废物达到资源化及其无害化的一种处理方法;生物处理法主要有生物吸附法和生物浸出法两种<sup>[47]</sup>。

### 3.1 生物吸附法回收铬

生物吸附法是一种新兴的技术,指利用藻类和微生物菌体对电镀污泥中的有价金属进行吸附,特别是那些不易被吸附的金属,从而达到回收的目的<sup>[48]</sup>。李福德等<sup>[49]</sup>采用硫细菌等对红光实业股份有限公司电镀废水微生物治理工程产生的污泥中的铬进行提取,对铬的提取率达 84%。

### 3.2 生物浸出法回收铜、锌、镍、铬

生物浸出法是指将电镀污泥经过特定微生物浸出,把有价金属变成可溶性的金属离子,然后采取合适的方法将金属离子进行分离回收<sup>[50]</sup>。张在海等<sup>[51]</sup>利用超高温古细菌回收电镀污泥的铜、锌、镍。电镀污泥经过超高温古细菌浸出,采取固液分离,滤液进行硫化物沉铜,然后利用沉铜滤液进行硫化沉锌镍,将得到的硫化铜精矿和硫化锌镍精矿再次经过超高温古细菌浸出,然后采取萃取以及旋流电积等方法



即可制得金属铜、金属锌、金属镍,且回收率分别达到 98.4%、99.8% 和 99.8%。毕文龙等<sup>[52]</sup>通过生物浸出法处理电镀污泥。利用 *A. ferroxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 对含固率为 3% 的电镀污泥进行为期 15 天的沥浸处理,最终,铬、铜、镍的浸出率分别达到 85.1%、96.8% 和 92.9%。

生物处理法具备吸附金属性能强、操作过程简便、回收效率高等优势;但是也有培养菌种耗时较长,菌种反应效率还有待提高等缺点,从而阻碍了生物处理法的产业化应用。

#### 4 总结与展望

目前电镀污泥中有价金属回收的方法包括湿法、火法和生物法,其中湿法应用较为广泛。湿法处理电镀污泥具有重金属回收率高的优点,但是处理过程中产生的废水易对环境造成二次污染。火法操作简便、投资较低,但是重金属的回收单一、回收率偏低,并且会产生大量的尾气和飞灰;生物法处理电镀污泥,重金属回收率高、操作简单,无二次污染产生,但是选择和培养合适菌种的周期较长。为降低电镀污泥在处理过程中产生的二次污染,目前生物法已成为学者们研究的热点,但是需要缩短菌种的培养和对处理污泥的周期,并有效降低污泥的处理成本。

#### 参考文献

- [1] 张丰如,陈志云,蔡惠玲,等. 电镀污泥萃取处理技术[J]. 山东化工, 2019, 48(12):197.  
Zhang F R, Chen Z Y, Cai H L, et al. Extraction technology of electroplating sludge [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(12):197 (in Chinese).
- [2] 俞绍贺. 电镀污泥中重金属的回收及固化处置[J]. 资源再生, 2019, 6:44-45,49.  
Yu S H. Recovery and solidification of heavy metals from electroplating sludge [J]. Resource Regeneration, 2019, 6:44-45,49(in Chinese).
- [3] Magalhaes J, Silva J, Castro F, et al. Physical and chemical characterisation of metal finishing industrial wastes [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 75(2): 157-166.
- [4] Espinosa D C R, Tenorio J A S. Thermal behavior of chromium electroplating sludge[J]. Waste Management, 2001, 21(4):405-410.
- [5] Barquilha C E R, Cossich E S, Célia R G T, et al. Biosorption of nickel and copper ions from synthetic solution and electroplating effluent using fixed bed column of immobilized brown algae[J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 32:100904.
- [6] 易龙生,冯泽平,汪洲,等. 电镀污泥资源化处理技术综述[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(12):16-20.  
Yi L S, Feng Z P Wang Z, et al. Review of electroplating sludge resource treatment technology [J]. Electroplating & Finishing, 2014, 36(12):16-20.(in Chinese)
- [7] 张仲仪. 电镀工业园区危险废物的回收与处置[J]. 电镀与精饰, 2009, 8:44-46.  
Zhang Z Y. Recycling and disposal of hazardous waste in electroplating industrial park [J]. Electroplating & Finishing, 2009, 8:44-46.(in Chinese)
- [8] Feng Y, Yang S, Xia L, et al. In-situ ion exchange electrocatalysis biological coupling (i-IEEBC) for simultaneously enhanced degradation of organic pollutants and heavy metals in electroplating wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 364:562-570.
- [9] 刘智峰,田文瑞. 湿法回收电镀污泥中重金属的研究现状[J]. 电镀与精饰, 2012, 7:14-19.  
Liu Z F, Tian W R. Research status of heavy metals recovery from electroplating sludge by wet process [J]. Electroplating & Finishing, 2012, 7:14-19.(in Chinese)
- [10] 张海亮,梁冬云,刘勇. 电镀污泥处理现状及进展[J]. 再生资源与循环经济, 2017, 10(7): 25-30.  
Zhang H L, Liang D Y, Liu Y. Current situation and progress of electroplating sludge treatment[J]. Renewable Resources and Circular Economy, 2017, 10(7): 25-30(in Chinese).
- [11] Li C, Xie F, Ma Y, et al. Multiple heavy metals extraction and recovery from hazardous electroplating sludge waste via ultrasonically enhanced two-stage acid leaching[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1-3): 823-833.
- [12] Huyen P T, Dang T D, Tung M T, et al. Electrochemical copper recovery from galvanic sludge[J]. Hydrometallurgy, 2016, 164:295-303.
- [13] 岳琦,刘三军,姚文明,等. 风化电镀污泥回收利用工艺研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(4): 86-88.  
Yue Q, Liu S J, Wen M Y, et al. Study on the recycling technology of weathered electroplating sludge[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2017, 37(4): 86-88(in Chinese).
- [14] 彭庆康,刘定富,郑智,等. 电镀污泥中锌的浸出工艺研究[J]. 山东化工, 2015, 44(17): 177-179, 182.  
Peng Q K, Liu D F, Zheng Z, et al. Study on leaching process of zinc from electroplating sludge[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(17): 177-179, 182(in Chinese).

- [15] 刘伟, 朱昊辰, 徐伟, 等. 氨浸法选择性回收电镀污泥中铜、镍的研究[C]//上海市化学化工学会, 2013.  
Liu W, Zhu H C, Wei X, et al. Study on selective recovery of copper and nickel from electroplating sludge by ammonia leaching [C]// Shanghai Institute of Chemistry and Chemical Engineering, 2013(in Chinese).
- [16] Cüneyt A, Arslan F. Recovery of copper, cobalt, and zinc from copper smelter and converter slags[J]. Hydrometallurgy, 2002, 67(1-3):1-7.
- [17] Fábio A D A, Andréa M B, Viviane S D S, et al. Metals recovery from galvanic sludge by sulfate roasting and thiosulfate leaching[J]. Minerals Engineering, 2014, 60: 1-7.
- [18] 姚虹. 电镀污泥处置及资源化方法探究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(10):78-80+106.  
Yao H. research on electroplating sludge disposal and resource utilization methods[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2019, 37(10): 76-80+106(in Chinese).
- [19] 宁江. 电镀污泥酸浸无害化资源化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [20] 易龙生, 赵立华, 许元洪, 等. 电镀污泥中铜的浸出和溶剂萃取回收研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4): 115-118, 122.  
Yi L S, Zhao L H, Xu Y H, et al. Study on leaching and solvent extraction recovery of copper from electroplating sludge[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2019, 39 (4): 115-118, 122(in Chinese).
- [21] Su R, Liang B, Guan J. Leaching effects of metal from electroplating sludge under phosphate participation in hydrochloric acid medium[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 31:361-365.
- [22] 王伍, 查正炯, 黄智源. 某电镀污泥硫酸浸出研究[J]. 广东化工, 2018, 45(22):24-25.  
Wang W, Cha Z J, Huang Z Y. Study on sulfuric acid leaching of electroplating sludge[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(22):24-25(in Chinese).
- [23] 李强, 赵峰, 杨卜, 等. 电镀污泥多金属资源化利用研究[J]. 有色金属:冶炼部分, 2016, 4:63-65.  
Li Q, Zhao F, Yang B, et al. Study on multi-metal resource utilization of electroplating sludge[J]. Nonferrous Metals: Smelting Section, 2016, 4:63-65(in Chinese).
- [24] 易龙生, 刘苗, 赵立华, 等. 电镀污泥氨浸渣中铬的回收[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(3): 334-338.  
Yi L S, Liu M, Zhao L H, et al. Recovery of chromium from ammonia leaching residue of electroplating sludge [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2020, 42 (3): 334-338(in Chinese).
- [25] 池利昆, 王吉华. 氨浸法从含铜污泥中回收铜的研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2012, 32(6): 67-70.  
Chi L K, Wang J H. Study on copper recovery from copper-containing sludge by ammonia leaching[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition), 2012, 32(6): 67-70(in Chinese).
- [26] 王晓丹. 氨浸工艺在危险废物处理中的应用[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(2):39-41,45.  
Wang X D. Application of ammonia leaching process in hazardous waste treatment[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019, 48(2):39-41,45(in Chinese).
- [27] 蓝子栋. 电镀污泥中重金属的回收与固化处理[J]. 企业技术开发, 2018, 37(11):96-98.  
Lan Z D. Recovery and solidification of heavy metals in electroplating sludge[J]. Enterprise Technology Development, 2018, 37(11):96-98(in Chinese).
- [28] Macchi G, Pagano M, Pettine M, et al. A bench study on chromium recovery from tannery sludge[J]. Water Research, 1991, 25(8):1019-1026.
- [29] 郑智. 多金属电镀污泥中铬的回收利用[D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
- [30] 周雪. 电镀污泥的焙烧浸出实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [31] 党晓娥, 刘安全, 吕军. 电镀污泥钠钙化焙烧过程金属的矿相转化及平衡分布[J]. 环境工程学报, 2018, 12 (10): 2944-2951.  
Dang X E, Liu A Q, Lv J. Mineral phase transformation and equilibrium distribution of metals during sodium calcification roasting of electroplating sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(10): 2944-2951(in Chinese).
- [32] 郑顺. 氯盐体系电镀污泥中有价金属选择性提取工艺研究[D]. 江西理工大学, 2015.
- [33] 陈炯, 程洁红, 周全法, 等. 火法-湿法联合工艺回收电镀污泥中的铜[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 68-71.  
Chen X, Cheng J H, Zhou Q F, et al. Recovery of copper from electroplating sludge by combined process of fire and wet process[J]. Environmental Engineering, 2012, 30 (2): 68-71(in Chinese).
- [34] 樊锐, 李才, 邵敏, 等. 电镀污泥处置方法现状及发展趋势[J]. 天津化工, 2019, 33(1):4-6.  
Fan R, Li C, Shao M, et al. Current situation and development trend of electroplating sludge disposal methods [J]. Tianjin Chemical Industry, 2019, 33(1):4-6. (in Chinese)
- [35] Yue Y, Zhang J, Sun F, et al. Heavy metal leaching and distribution in glass products from the co-melting treatment of electroplating sludge and MSWI fly ash[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232(15): 226-235.
- [36] 宋珍珍. 含铜污泥的处理及综合利用方法[J]. 有色冶

- 金节能, 2018, 34(6): 53-56.
- Song Z Z. Treatment and comprehensive utilization of copper-containing sludge[J]. Energy Saving in Nonferrous Metallurgy, 2018, 34(6): 53-56(in Chinese).
- [37] 廖昌华, 孙水裕, 张志. 焚烧温度对电镀污泥后续处理影响研究[J]. 再生资源研究, 2002, 5: 34-36.
- Liao C H, Sun S Y, Zhang Z. Influence of incineration temperature on subsequent treatment of electroplating sludge[J]. Research on Renewable Resources, 2002, 5: 34-36(in Chinese).
- [38] 彭桂群, 敖子强. 电镀污泥处理技术的研究进展[J]. 电镀与环保, 2018, 38(5):62-64.
- Peng G Q, Ao Z Q. Research progress of electroplating sludge treatment technology[J]. Electroplating and Environmental Protection, 2018, 38(5):62-64(in Chinese).
- [39] 王静, 叶海明. 含铜电镀污泥中铜的资源化回收技术[J]. 化学工程与装备, 2010, 163(8): 197-199, 205.
- Wang J, Ye H M. Recycling technology of copper from electroplating sludge containing copper[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2010, 163(8): 197-199, 205(in Chinese).
- [40] 阳伦庄, 王邕舟. 密闭还原炉处理含铜电镀污泥的工艺设计[J]. 世界有色金属, 2019, 522(6):180-181.
- Yang L Z, Wang Y Z. Process design of treating copper-containing electroplating sludge in closed reduction furnace[J]. World Nonferrous Metals, 2019, 522(6): 180-181 (in Chinese).
- [41] 济源豫光有色冶金设计研究院有限公司. 一种采用底吹熔池熔炼工艺处理电镀污泥的方法: CN201911312615. 7[P]. 2020-04-21.
- Jiyuan Yuguang Nonferrous Metallurgy Design and Research Institute Co. Ltd. The invention relates to a method of treating electroplating sludge by bottom blowing melting pool smelting process: CN201911312615. 7[P]. 2020-04-21(in Chinese).
- [42] 王春花. 电镀污泥资源化利用的研究进展[J]. 化工环保, 2012, 32(1):25-29.
- Wang C H. Research progress of electroplating sludge resource utilization[J]. Chemical Environmental Protection, 2012, 32(1):25-29(in Chinese).
- [43] 谭中欣, 严建华, 蒋旭光, 等. 电镀污泥焚烧过程中的热分析以及重金属的迁移规律[J]. 环境科学, 2006, 5: 998-1002.
- Tan Z X, Yan J H, Jiang X G, et al. Thermal analysis and heavy metal migration during electroplating sludge incineration[J]. Environmental Science, 2006, 5: 998-1002(in Chinese).
- [44] 刘刚, 蒋旭光, 池涌, 等. 危险废物电镀污泥热处置特性研究[J]. 环境科学学报, 2005, 10:1355-1360.
- Liu G, Jiang X G, Chi Y, et al. Study on thermal treatment characteristics of hazardous waste electroplating sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2005, 10:1355-1360(in Chinese).
- [45] Rastegar S O, Mousavi S M, Shojaosadati S A. Cr and Ni recovery during bioleaching of dewatered metal-plating sludge using acidithiobacillus ferrooxidans[J]. Biore-source Technology, 2014, 167:61-68.
- [46] 施燕, 张太平, 李木桂, 等. 利用硫杆菌淋滤电镀污泥中的重金属[J]. 生态环境, 2008, 17(5):1787-1791.
- Shi Y, Zhang T P, Li M G, et al. Leaching heavy metals from electroplating sludge by thiobacillus[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1787-1791(in Chinese).
- [47] 黎明. 固体废物污染控制与资源化[A]. 云南铜业(集团)有限公司、云南省有色金属学会. 第七届冶炼技术论文发布会论文集[C]. 云南铜业(集团)有限公司、云南省有色金属学会:云南省科学技术协会, 2015:10.
- Leon L M. Solid Waste Pollution Control and Recycling [A]. Yunnan Copper (Group) Co., Ltd., Yunnan Nonferrous Metals Society. Proceedings of the Seventh Smelting Technology Paper Conference [C]. Yunnan Copper (Group) Co., Ltd., Yunnan Nonferrous Metals Society: Yunnan Science and Technology Association, 2015:10(in Chinese).
- [48] Ye J, Yin H, Mai B, et al. Biosorption of chromium from aqueous solution and electroplating wastewater using mixture of *Candida lipolytica* and dewatered sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(11):3893-3902.
- [49] 李福德. 微生物治理电镀废水方法[J]. 电镀与精饰, 2002, 24(2):35-37.
- Li F D. Microbial treatment of electroplating wastewater [J]. Electroplating and Finishing, 2002, 24(2): 35-37(in Chinese).
- [50] 钟雪虎, 焦芬, 覃文庆, 等. 电镀污泥处理与处置方法概述[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(17): 948-953.
- Zhong X H, Jiao F, Qin W Q, et al. Overview of electroplating sludge treatment and disposal methods[J]. Electroplating and Finishing, 2017, 36(17): 948-953(in Chinese).
- [51] 张在海, 张双龙. 电镀污泥超高温古细菌清洁资源化处理工业应用[J]. 矿产综合利用, 2019, 220(6): 123-128.
- Zhang Z H, Zhang S L. Industrial application of ultra-high temperature archaea clean resource treatment of electroplating sludge[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2019, 220(6): 123-128(in Chinese).
- [52] 毕文龙. 嗜酸性硫杆菌和黑曲霉处理回收电镀污泥重金属的研究[D]. 南京农业大学, 2014.