

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.11.018

## 电镀污泥中镍的提取回收利用研究进展

韩文静<sup>1</sup>, 张晓光<sup>2</sup>

(1. 永城职业学院机电工程系, 河南 永城 476600; 2. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:** 电镀污泥的成分比较复杂, 其中含有丰富镍的资源。在天然矿产资源枯竭、环保日益普及的背景下, 有效、科学处理电镀污泥的成为研究热点。首先阐述电镀污泥对环境的影响, 然后对电镀污泥处理方法进行归纳。对镍的提取回收利用研究现状进行了综述, 最后探讨了回收处理镍的发展方向。

**关键词:** 电镀污泥; 镍; 回收; 进展

**中图分类号:** X781.1

**文献标识码:** A

## Research Progress on Extraction and Recycling of Nickel from Electroplating Sludge

HAN Wenjing<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoguang<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** The composition of electroplating sludge is complex, and it contains rich nickel resource. Effective and scientific treatment of electroplating sludge is of great significance for the depletion of natural mineral resources and environmental protection. Firstly, the influence of electroplating sludge on the environment is expounded, and then the treatment methods of electroplating sludge are summarized. The research status of nickel extraction and recycling is reviewed, and finally the development direction of nickel recovery and treatment is discussed.

**Keywords:** electroplating sludge; nickel; recovery; progress

### 1 电镀污泥特点及对环境的影响

镍是发展经济、国防和科学技术的重要基础材料, 广泛应用于航空航天电池、电镀、等行业。全球对镍的需求正在飙升。地球Al含量为8.17%, Fe含量为5.22%, 而镍的含量仅为0.008%, 储量较少, 低于需求量。另一方面, 工业生产中的电镀行业伴随着金属资源的浪费<sup>[1]</sup>。到目前为止, 电镀污泥通常

在固化后进行填埋<sup>[2]</sup>。传统的电镀污泥处理方式不仅导致重金属释放缓慢<sup>[3]</sup>, 造成严重的环境污染, 而且造成镍等宝贵金属资源的巨大浪费。中国每年产生超过1000万吨的电镀污泥, 其中含有超过100万吨的镍资源<sup>[2]</sup>。由于大量铜、镍、铁、铬等高浓度重金属元素, 电镀污泥在《国家危险废弃物目录》(2016)中被列为典型危险废物<sup>[4]</sup>。因此, 从电镀污泥中回收镍金属不仅可以缓解环境污染压力, 而且

收稿日期: 2022-04-28

修回日期: 2022-05-10

作者简介: 韩文静(1985—), 女, 硕士, 副教授, email: hanwenjing19850122@126.com。

基金项目: 2021年度河南省高等学校重点科研项目资助计划(21A880017)

能实现废弃资源高值化利用,是一种有前景且可持续发展的策略<sup>[4]</sup>。

电镀厂废水处理过程中产生的固体废物形成电镀污泥。通过污泥压力过滤脱水后,形成电镀污泥。电镀废水的处理中会加入还原剂、酸、碱、氧化剂等药剂,所以电镀污泥是一种混合体系,成分复杂,成分分布不均匀,结晶度低<sup>[5]</sup>。除镍外,它通常还含有许多其他重金属(例如 Cr、Pb、Zn、Mn、As、Cu、Fe 等)<sup>[6]</sup>。不加以妥善处理的直接后果是污泥中重金属在雨水淋溶作用下会引起地表水、土壤、地下水的次生污染,甚至危及生物链,造成严重的环境破坏<sup>[7]</sup>。因此,探索可行且环境友好的技术电镀污泥的高效再利用和循环利用成为越来越热门的

话题。

## 2 电镀污泥处理方法

目前从电镀污泥中回收重金属的方法主要有稳定化/固化技术、热处理技术、熔炼技术和焙烧浸取技术和生物处理技术等<sup>[8]</sup>。例如化学浸出可以实现镍的高效提取,但其他重金属(如 Fe、Mn、Cr、Al 等)也会同时浸出,给镍的选择性回收增加了难度<sup>[9]</sup>。由于电镀污泥中特定重金属的选择性提取难度大,难以实现电镀污泥的高价值利用。因此,高效选择性地回收镍具有重要的意义。结合《电镀污泥处理处置分类》(GB/T 38066—2019),对电镀污泥处理方法进行分类,如表 1 所示。

表 1 电镀污泥处理处置方法分类

Tab.1 Classification of electroplating sludge treatment and disposal methods

处理方式	处理处置方式	特点	备注
填埋与堆放	直接填埋与堆放。	前期工艺简单,整体而言较为经济,但是电镀污泥成分不稳定,堆放过程中重金属易缓慢释放。填埋场占地面积大,其配套设施及建筑的相关标准和要求十分严格,后期防渗、防泄漏等工艺要求高。	符合 GB18598 中危废填埋入场要求填埋。
固化法	将电镀污泥中有害金属元素,以化学物理途径固定在固化体中,从而防止金属元素浸出、迁移。	固化法是一种电镀污泥无害化处理的方法 <sup>[10]</sup> ,是将电镀污泥固定后堆存填埋,没有实现金属资源的回收利用。	固化法主要有水泥固化、熔融固化及石灰固化等,水泥、玻璃和沥青等都是常用的固化剂。
热处理法	热处理主要的方法有焚烧、微波加热及离子电弧等焚烧等。	热处理改变电镀污泥中重金属赋存形式形态,使其从不稳定态转化为稳定态,实现电镀污泥的稳定化预处理。但热处理法存在能耗高,设备要求严格,处理过程易产生气体污染等缺点 <sup>[11]</sup> 。	高温下脱除电镀污泥中的可挥发物质,降低有毒成分,且成分中重金属由非稳定态向稳定态转化的过程 <sup>[12]</sup> 。
重金属综合回收法	酸浸法、氨浸法、熔炼法、微生物处理法。	采用浸出剂将重金属从电镀污泥中转移出来,选择合适的浸出剂浸出。尤其重要的,针对不同金属的浸出可选择相应浸出效果良好的浸出剂 <sup>[13]</sup> 。	目前常用的浸出剂分为酸性浸出剂和氨性浸出剂 <sup>[14]</sup> 。
高值转换法	生产电池材料、轻质骨料、合金、磁性材料原料、催化剂、陶瓷和土砖等。	切合社会经济可持续发展的理念,不仅解决了电镀污泥环境污染问题,同时回收利用废弃污泥中重金属资源,得到高附加值产品。	利用电镀污泥为原料或者辅料,制备高附加值的材料 <sup>[3]</sup> 。

## 3 镍的提取回收利用研究现状

镍是现代工业中非常重要的元素,广泛用于超级电容器、锂离子电池、电镀、催化等<sup>[15]</sup>。因此,镍消费量以惊人的速度增长,全球镍储量从 2008 年的 1.5 亿吨下降到 2018 年的 8900 万吨,年均产量约为 203 万吨<sup>[16]</sup>。污泥中的大部分重金属没有得到有效回收,作为有害物质被丢弃,对环境造成严重污染<sup>[17-21]</sup>。

煅烧电镀污泥 CES 可通过在 500 °C 下煅烧处理获得。在实际含镍废水处理中,原始电镀污泥 RES 对 Ni<sup>2+</sup> 的吸附能力远高于煤基活性炭(CAC)、强酸性阳离子交换树脂(D001)、弱酸性阳离子交换树脂等常用吸附剂。Ni<sup>2+</sup> 在 RES 和 CES 上的吸附机理主要包括离子交换和表面络合。研究 RES 和 CES 是否可用于有效吸附含镍电镀废水中的 Ni<sup>2+</sup>。如果 RES 和 CES 可以用于 Ni<sup>2+</sup> 的去除,吸附量大,则可以直接作为吸附剂,去除电镀废水厂中的重金属,然后

作为废物处理,实现以废处置的概念。Peng 等人<sup>[22]</sup>制备了 CES 煅烧电镀污泥,并研究了镍在 RES 和 CES 上的吸附行为,并与其他传统吸附剂进行了比较。因此,电镀污泥废液是高浓度含镍电镀废水中  $\text{Ni}^{2+}$  去除的有效吸附剂。为电镀污泥在作为危险废物处理之前作为高效吸附剂的利用提供了一种新方法。

Xia 等人<sup>[23]</sup>提出了一种通过陶瓷烧结将镍相转变为稳定晶体结构来稳定镍的策略。收集镍泥,然后用两种陶瓷前体 ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) 在 700 ~ 1400 °C 的温度范围内烧制 5 h。烧结后,对产物进行了物相鉴定,表明  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  和  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$  尖晶石分别是  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  系列中的主要 Ni 主体相。然后,应用 Rietveld 细化法对所有相(包括晶相和非晶相)的重量分数进行量化,量化结果表明  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  或  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$  尖晶石的重量分数可以达到 87.7% 和 83.1% 左右。Ni 的转化率(TR)计算为 99.9% 和 99.7%,因此,表明 Ni 几乎完全结合到尖晶石结构中。通过在烧结产品中形成尖晶石结构,提出了一种有前景的定量方法,可用于有害工业污泥的镍稳定化,这可能为含重金属固体废物的处理和有益利用提供可行的策略。

通过在填埋前用水泥材料封装镍电镀污泥来获得某些类型的稳定固体,在酸性环境中很容易浸出重金属<sup>[24]</sup>。因此,迫切需要开发一种相对较低的烧结体系,将镍电镀污泥转化成陶瓷产品,同时将有害的镍稳定化并结合到尖晶石结构中。当热烧结含金属废料和陶瓷前体的混合物时,细化技术非常有利于跟踪相演化并定量确定所制备陶瓷产品中组分的重量比例。在 TOPAS 5.0 软件的帮助下,通过将实验 XRD 图与已识别晶体结构的相关模型轮廓拟合,可以实现定量相组成,这有助于进一步阐明固体废物中重金属的掺入机制。Roy 等人<sup>[24]</sup>对 Ni 污泥采用添加剂进行热处理。将  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  作为两种典型的陶瓷前驱体。通过多种表征和量化方法对烧结产品中镍的稳定性进行了系统研究,特别是为了探索镍在尖晶石结构中的转变过程和掺入机制。在不同陶瓷前体的陶瓷基体中解释了随着烧结温度升高的相变行为和 Ni 掺入机制。烧结产品中镍的稳定化效率也可以通过不同反应条件下镍的转化比例来量化。此外,将采用浸出程序来评估热处理后镍的稳定化效果,一定的温度范围可获得稳定的镍

电镀污泥。通过在热处理后形成镍尖晶石成功稳定镍,所制备的掺镍陶瓷产品可被视为稳定可靠的镍资源。

Zheng 等<sup>[25]</sup>以尿素为沉淀剂,电镀污泥为原料,采用水热法制备了 Al 和 Fe 共掺杂的片状  $\alpha\text{-Ni}(\text{OH})_2$  和  $\text{Ni}(\text{HCO}_3)_2$  纳米线复合材料。研究了纳米片和纳米线自组装球的相组成、晶体结构、比表面积和电化学性能<sup>[25]</sup>。结果表明,掺杂 Al 和 Fe 增加了  $\alpha\text{-Ni}(\text{OH})_2$  的晶面间距,自组装微球的多级结构增加了材料的比表面积,暴露出更多的活性位点和实现快速离子转移。嵌入纳米线微球中的纳米片增加了孔体积,有利于提高电解质中离子和活性物质的反应效率。比电容高(1 A/g 下的可逆容量为 495.6 C/g),良好的倍率性能(10 A/g 下的电容保持率为 78.77 %),循环寿命长(3500 次循环电容保持率为 55.58 %)。研究将电镀污泥直接转化为镍基电极材料用于超级电容器,为电镀污泥的环保资源化处理提供了新的策略和思路。从电镀污泥中回收重金属是一项重要技术,不仅可以减少环境污染,而且可以作为金属的二次来源。然而,目前的技术限制了其在回收技术中的应用。Hou 等<sup>[16]</sup>在水热条件下通过调整尿素的比例制备了嵌入  $\text{Ni}(\text{HCO}_3)_2$  纳米线组装球中的纳米片。ASC 器件(NN-4//AC)在 0.37 kW/kg 的功率密度下实现了 30.27 Wh/kg 的高能量密度。图 1a 说明了掺杂 Fe 和 Al 的 NN 复合材料的合成过程,图 1b 为其形成机制<sup>[16]</sup>。六方  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  由  $\text{Ni}^{2+}$  与尿素水解产生的  $\text{OH}^-$  反应制备。Ni 的回收率分别为 92.58 %,为环境污染废物的循环利用提供了一种简单、方便、有效的方法,为工业废物的资源化利用提供了新途径。

龚方旭等人<sup>[26]</sup>研究了电镀污泥的酸浸、电解、萃取-反萃取-沉淀和镍回收工艺<sup>[26]</sup>。如图 2 所示,研究分析固液比、浸出温度、浸出时间、pH 值、原料粒度和酸数等因素对浸出率的影响。在 4 mol/L 硫酸溶液、液固比 2:1 (mL:g)、转速 25 r/min 条件下 Ni 的浸出率达到 99% 以上。渗滤液中残留硫酸浓度约为 1 mol/L,满足电解生产工艺要求。电镀污泥处理处置产生的废渣通过工艺技术转化为再生石膏。用再生石膏、粘土、山土和煤矸石的混合物制砖,测定砖的浸出毒性。其浸出浓度为 0.06 mg/L,实现了废渣的无害化和资源化利用。

Wu 等人<sup>[27]</sup>使用亚硫酸铵作为还原剂是提高



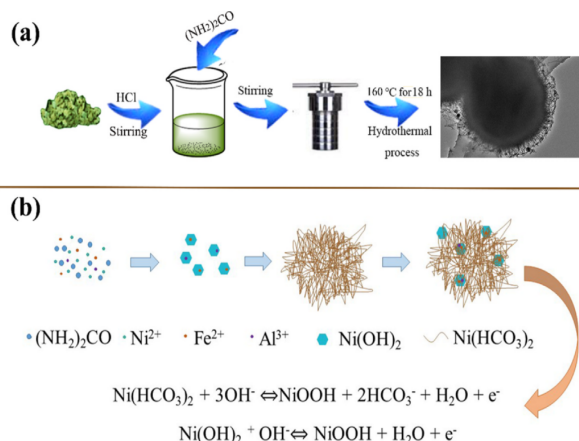


图 1 合成过程示意图(a)和NN复合材料在三电极电池系统中的形成及电化学存储机理(b)<sup>[16]</sup>

Fig.1 Schematic illustration of the synthesis process (a) and formation and electrochemical storage mechanism of NN composites in a three-electrode cell system (b)

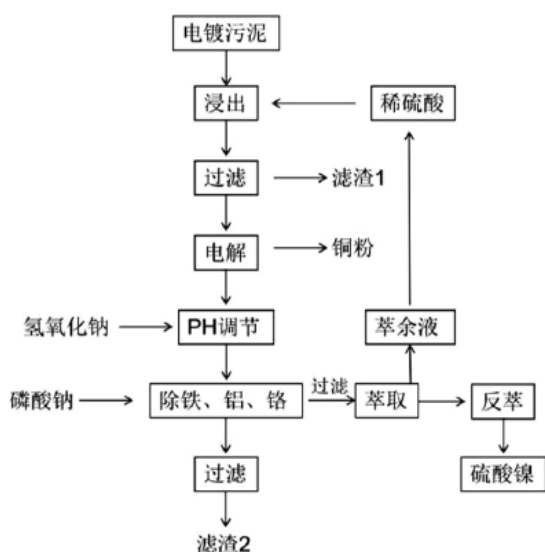


图 2 从电镀污泥中回收镍的工艺流程

Fig. 2 Process flow of nickel recovery from electroplating sludge

锂、镍和钴浸出效率所必需的,碳酸氢铵在氨溶液中充当缓冲剂。Ni几乎可以完全浸出,有利于通过引入萃取剂进一步从浸出溶液中回收有价值的金属<sup>[27]</sup>。使用三元(氨、亚硫酸铵和碳酸氢铵)方案可以从混合电极粉末中选择性浸出Co、Ni和Li。碳酸氢铵可作为三元浸出系统中的pH缓冲剂,最大限度地减少浸出过程中的pH变化。使用有利于可溶性氨络合物离子形成的条件有利于提高Li、Ni和Co

的浸出效率。

多年来,生物浸出已被开发为一种环境友好且具有成本效益的技术,用于从污泥中去除重金属。污水污泥液相和固相再循环的生物浸出对于生物浸出方法本身的发展以及对其对污泥脱水的影响的深入研究具有相当大的意义。Pathak等人<sup>[28]</sup>概述了在不同操作模式下进行的各种生物浸出研究,讨论了各种重要方面,如病原体破坏、气味减少和从酸性渗滤液中回收金属。此外,还对与生物浸出过程相关的各种技术问题进行了详细讨论,这些问题在大规模开发过程中需要解决。Marchenko等<sup>[29]</sup>用模型预测与所进行的实验之间的良好对应关系,以描述阻碍污水污泥脱水的细胞外聚合物等,这为模型的进一步发展奠定了基础。污水污泥在生物浸出过程中的液相和固相再循环以及质量平衡模型为未来利用生物浸出工艺进行污水污泥脱水的研究和开发提供了有用的工具。Zhou等人<sup>[30]</sup>首次开展中度嗜热嗜酸联合体对电镀污泥进行半中试规模生物浸出,群落结构保持相对稳定。在生物浸出过程中,微生物原液可以在几个小时内有效地从搅拌反应器中的电镀污泥中浸出重金属。同时,还研究了pH、温度、活性培养物的量和液固比对生物浸出行为的影响。通过TCLP检测浸出渣中重金属总含量也远低于监管标准。生物浸出渣的XRD分析还证实,中度嗜热联合生物浸出提供了比化学浸出更清洁的工艺去除残留部分金属,这对于电镀污泥的工业处理是可行的和有吸引力的。图3为电镀污泥微生物法的工艺流程<sup>[30]</sup>。电镀重金属半中试规模生物浸出搅拌釜反应器中的污泥使用混合培养的微生物溶液作为浸出剂。在生物浸出中,锌、铜、镍和铬在pH1.5的温和条件下达到95%以上的高浸出率,表明微生物浸出是去除电镀污泥中重金属的有效方法。与化学浸出相比,微生物浸出可使重金属浸出率平均提高5~10%,可保证污泥符合相关法规标准,它为电镀污泥提供了一种有效的解毒方法,不仅可以将金属转化为产品,而且可以将生物浸出渣进一步用作建筑原料。

Sarah等<sup>[31]</sup>从工业电镀废水中通过硫化物沉淀回收镍,如图4所示。他们对实验室制备的电镀工业溶液和合成溶液在完全搅拌的间歇反应器中进行测试,以评估工业废水中金属离子沉淀过程中形成的络合剂的影响。两种溶液中的镍浓度均为100

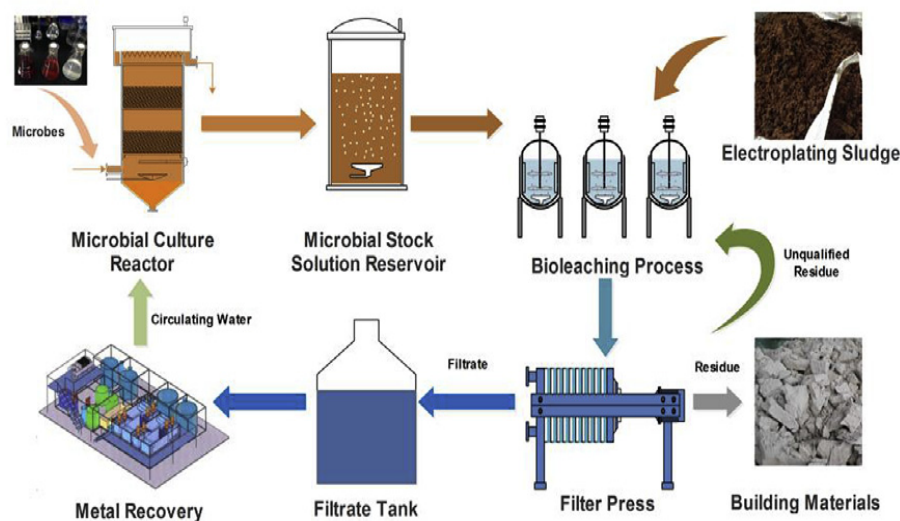
图3 电镀污泥微生物解毒工艺流程图<sup>[30]</sup>

Fig. 3 Process flow chart for microbial detoxification of electroplating sludge

图4 硫化沉淀法去除镍及电镀废水污泥示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of removal of nickel and sludge from electroplating wastewater by sulfide precipitation

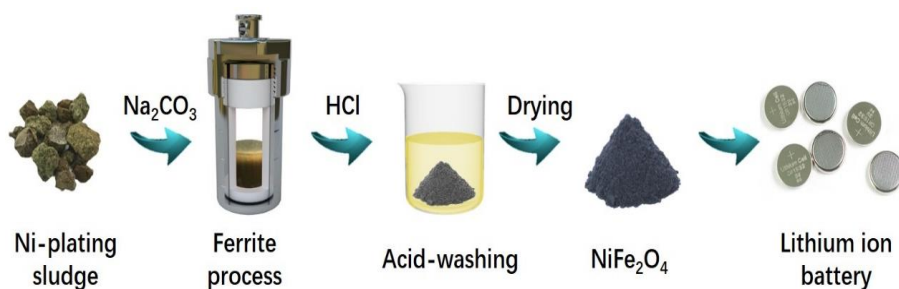
图5 电镀污泥中的Ni定向转化为LIB负极材料示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the directional conversion of Ni in electroplating sludge to LIB anode material

mg/L。对硫化物沉淀工艺的操作条件进行了优化：pH、摩尔比 $[S^{2-}]/[Ni^{2+}]$ 和 $S^{2-}$ 离子用量。否则，对于过饱和条件下的相同pH值( $[S^{2-}]/[Ni^{2+}]=1.5/1$ )，工

业和合成溶液的去除效率分别接近62%和92%。对于33 mg/L的 $S^{2-}$ ， $Ni^{2+}$ 的去除效率约为90%。当溶液的初始pH值(化学计量比( $[S^{2-}]/[Ni^{2+}]=1/1$ )设置

为 5 时,镍沉淀的回收率得到改善,镍去除率高于 98%。沉淀反应产生更多的 HS 和  $H_2S$  以及多硫化物。对富镍废水进行的硫化物沉淀处理研究提供了对该过程中发生的现象的理解。工业废水处理 25 分钟,去除率接近 90%。

Weng 等人<sup>[32]</sup>通过测试酸洗液和固体产品中的镍含量来确定镍向铁酸镍的转化效率。如图 5 所示,采用调节剂辅助水热酸洗法制备铁酸镍,以多金属电镀污泥为原料<sup>[32]</sup>。其中,根据铁酸镍的化学计量系数、原电镀污泥的镍铁摩尔比和化学平衡计算了添加铁源和调节剂。通常,将 4.0 g 干生污泥和 1.08 g  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  混合在 40 mL  $Na_2CO_3$  溶液 (2.5 mol/L) 中。在这项工作中,含镍电镀污泥是具有多种金属成分的复杂废物的典型案例,在碳酸钠的帮助下,通过水热洗涤策略有针对性地将其转化为高价值的  $NiFe_2O_4$  纳米材料。所制备的  $NiFe_2O_4$  纳米粒子表现出稳定的电化学储锂性能,库仑效率为 67.81%,可逆容量约为在 0.5 和 1 A/g 循环 100 次后分别为 316.94 和 242.44 mAh/g。可以为金属资源选择性靶向转化为高价值功能材料提供可持续的方法,激发多金属复杂固体的大规模加工处理废物。

## 4 结语

以电镀镍污泥为原料回收处理含镍资源,具有减少环境污染、降低生产成本扩大镍资源和增加社会效益等重要意义。目前需要对污泥中金属镍的回收工艺设计和最佳工艺参数的进行深入探索。通过不同方法联合处理,充分发挥各方法的优势,将电镀污泥中的镍目标转化为可以用于制备高附加值材料;采用生物法回收时需要降低处理成本并缩短处理污泥的周期。进一步研究对镍目标转化率的影响因素:不同的镍和铁摩尔比、调节剂浓度、温度和时间等。在电镀污泥的重金属的赋存状态、回收避免二次污染、综合利用等方面还有非常大的进步空间。

## 参考文献

- [1] 高天锐,蓝卓越,吕晋芳,等. 电镀污泥中有价金属综合回收技术研究现状[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(11): 42-47.
- [2] 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.
- [3] 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): 56-58.
- [4] 赵晶磊,王岱,杨占昆. 电镀污泥的资源化利用技术及实例研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(3): 96-98.
- [5] Ellis R J, Neish B, Trett M W, et al. Comparison of microbial and meiofaunal community analyses for determining impact of heavy metal contamination[J]. Journal of Microbiological Methods, 2001, 45(3): 171-185.
- [6] Zhang J, Zhang J, Xu Y, et al. Efficient selective catalytic reduction of NO by novel carbon-doped metal catalysts made from electroplating sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48: 11497-11503.
- [7] 吴长淋. 电镀污泥的性质及资源化研究进展[J]. 资源节约与环保, 2018, (4): 94+123.
- [8] Chen Q, Zhang L, Ke Y, et al. Influence of carbonation on the acid neutralization capacity of cements and cement-solidified/stabilized electroplating sludge[J]. Chemosphere, 2009, 74 (6): 758-764.
- [9] Li H, Yang X, Xu W, et al. Application of dry composite electroplating sludge into preparation of cement-based decorative mortar as green pigment[J]. Clean Production, 2014, 66: 101-106.
- [10] Ballesteros F, Manila A A, Choi A E S, et al. Electroplating sludge handling by solidification/stabilization process: a comprehensive assessment using kaolinite clay, waste latex paint and calcium chloride cement additives[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2019, 21(6): 1505-1517.
- [11] 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]. 再生资源与循环经济, 2002, (5): 34-36.
- [12] 党晓娥,周雪,吕军,等. 整合电镀污泥的基本理化特性及燃烧特性[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3762-3768.
- [13] 李志. 电镀污泥中铜镍浸出条件的选取及 PtCuNi 合金电极的制备与电氧化性能研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2018.
- [14] 张焕然. 氨法回收电镀污泥中铜、镍的工艺研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2013.
- [15] Zhang M, Chen C, Mao L, et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation[J]. Construction & Building Materials, 2018, 159: 27-36.
- [16] Hou Z Y, Liu T B, Tahir M U, et al. Facile conversion of nickel-containing electroplating sludge into nickel-based multilevel nano-material for high-performance pseudocapacitors[J]. Applied Surface Science, 2021, 538: 147978.

- [17] 彭明明. 电镀污泥中铜、镍回收工艺现状[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(8): 458-461.
- [18] 俞杰翔, 付培敏, 刘伟, 等. 电镀污泥中铜镍锌元素的检测[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(12): 31-33, 40.
- [19] 查丽娜, 李金花, 周保学, 等. 电镀铬(VI)废水离子交换处理与资源化利用的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(10): 123-126.
- [20] 林玮, 袁子洲. Fe-Si-B 非晶雾化粉末去除 Cd(II) 的机理研究[J]. 材料保护, 2021, 54(9): 148-152.
- [21] 杨金辉, 雷增江, 杨斌, 等. 烟末生物质对 Pb(II) 的吸附性能研究[J]. 材料保护, 2020, 53(7): 162-167, 176.
- [22] Peng G L, Deng S B, Feng L, et al. Superhigh adsorption of nickel from electroplating wastewater by raw and calcined electroplating sludge waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 118948.
- [23] Xia Y X, Meng F L, Zhong L V, et al. Develop spinel structure and quantify phase transformation for nickel stabilization in electroplating sludge[J]. Waste Management, 2021, 131: 286-293.
- [24] Roy A, Stegemann J A. Nickel speciation in cement-stabilized/solidified metal treatment filtercakes[J]. Hazard Mater. 2017, 321: 353-361.
- [25] Zheng J, Lyu J, Liu W, et al. Selective recovery of Cr from electroplating nanosludge via crystal modification and dilute acid leaching[J]. Environmental Science Nano, 2020, 7: 1593-1601.
- [26] 龚方旭. 电镀污泥中回收镍的工艺优化研究[D]. 合肥: 合肥学院, 2021.
- [27] Wu C B, Li B S, Yuan C F, et al. Recycling valuable metals from spent lithium-ion batteries by ammonium sulfite-reduction ammonia leaching[J]. Waste Management, 2019, 93: 153-161.
- [28] Pathak A, Dastidar M G, Sreekrishnan T R. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2343-2353.
- [29] Marchenko W, Demchenko V, Pshinko G. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge with recirculation of the liquid phase: a mass balance model[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 350: 429-435.
- [30] Zhou W B, Zhang J, Peng J, et al. Cleaner utilization of electroplating sludge by bioleaching with a moderately thermophilic consortium: A pilot study[J]. Chemosphere, 2019, 232: 345-355.
- [31] Sarah J, Mohammed A, Hassan Nour, et al. Removal of nickel through sulfide precipitation and characterization of electroplating wastewater sludge[J]. Water Quality Research Journal, 2020, 55(4): 345-357.
- [32] Weng C Z, Sun X, Han B, et al. Targeted conversion of Ni in electroplating sludge to nickel ferrite nanomaterial with stable lithium storage performance[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122296.