

汪晴, 熊杰, 叶锦韶. 电镀行业重金属在线回收清洁生产[J]. 生态科学, 2015, 34(4): 163-168.

WANG Qing, XIONG Jie, YE Jin-shao, et al. *In situ* recycling technology for heavy metals in electroplating industry clean production[J]. Ecological Science, 2015, 34(4): 163-168.

电镀行业重金属在线回收清洁生产技术

汪晴^{1,2}, 熊杰¹, 叶锦韶^{2,*}

1. 珠海市金湾区环境监测站, 珠海 519000

2. 暨南大学环境学院, 广州 510632

【摘要】为了提高电镀企业水重复利用率, 降低物料单耗, 减少重金属产生量, 提升企业清洁生产水平, 通过某电镀厂清洁生产实例, 介绍了膜分离和离子交换在线回收技术的基本原理和技术特性, 计算了经济可行性, 对比了水重复利用率、物料单耗、重金属产生量三项指标。结果表明, 该技术的内部收益率大于基准收益率, 镀镍工序水重复利用率提高了60.1%, 物料单耗降低了4.51%, 废水中镍产生量每年减少360 kg, 镀铬工序水重复利用率提高了46.0%, 物料单耗降低了10.4%, 废水中Cr(VI)产生量每年减少340 kg。

关键词: 电镀; 清洁生产; 重金属; 在线回收

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2015.04.026 中图分类号: X383 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2015)04-163-06

In situ recycling technology for heavy metals in electroplating industry clean production

WANG Qing^{1,2}, XIONG Jie¹, YE Jinshao^{2,*}

1. Zhuhai Jinwan Environmental Monitoring Station, Zhuhai 519000, China

2. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract: In order to improve the reuse rate of water, reduce the consumption of materials, decrease the discharge of heavy metals, and enhance the level of clean production in electroplating enterprises, the feasibility of *in situ* recycling technology for heavy metals was discussed. The clean production of a plating factory was used as an example to introduce the basic principle and technical features of membrane separation and ion exchange *in-situ* recycling technology. The economic feasibility was calculated, and three indices such as the reuse rate of water, consumption of materials, and discharge of heavy metals were compared. The results indicated that the internal rate of return of this *in-situ* recycling technology was higher than benchmark yield. In Ni electroplating process, the reuse rate of water increased by 60.1%, the consumption of materials decreased by 4.51%, and the discharged value of Ni reduced 360 kg per year. Those in Cr electroplating process were 46.0%, 10.4%, and 340 kg per year, respectively.

Key words: electroplating; clean production; heavy metal; *in-situ* recycling

1 前言

电镀作为一种可对金属和非金属表面进行装饰、防护及功能性加工的表面处理技术, 已成为我

国制造业中不可或缺的配套工业, 主要运用于机械、仪器、仪表、轻工、印制电路板、电子元件、航天等工业领域^[1-2]。长期以来, 我国电镀行业粗放式经营不仅对环境造成危害, 也使企业效益低下,

收稿日期: 2014-08-04; 修订日期: 2015-02-12

作者简介: 汪晴(1986—), 女, 湖北武汉人, 助理工程师, 从事环境监测工作, E-mail: watching147@163.com

*通信作者: 叶锦韶, 男, 副教授, 主要从事水环境生物修复研究, E-mail: folaye@126.com

难以持续发展。电镀工艺中需使用大量的重金属材料,未被利用的电镀原材料被作为废物排放,不仅污染环境,而且处理成本高。环境污染的实质就是资源利用不充分,特别是重金属,通过在线回收技术提高重金属的利用率就是直接减少环境污染。该技术也是清洁生产减量化、资源化、再利用、无害化四个原则的体现,使企业从被动消极的末端治理转向积极主动的清洁生产^[3-4]。本文将对某电镀厂清洁实例进行分析,通过计算在线回收技术的经济可行性,比对实施该技术后水重复利用率、物料单耗、重金属产生量三项指标,评价该技术的可行性。

2 电镀工艺及清洁生产措施

电镀工艺大致分为三大部分:一是镀前处理,主要目的是使镀件表面光洁、无油、无锈,从而增进镀层的附着力,包括高温化学除油、超声波除油、阴极电解除油、阳极电解除油、酸电解除油、酸洗活化等工艺;二是电镀部分,通过电沉积方法得到所需金属覆盖层从而改进工件表面性能和外观,包括镀铬、镍、锌、铜等工艺;三是镀后处理,主要包括除氢、钝化、干燥等工艺,其目的是进一步提高镀层的耐蚀性^[5]。

电镀生产中产生的废水含有有机物、重金属、酸、碱等,从某种意义上来说重金属对环境和人类的危害最大。重金属来源主要有:一是镀件漂洗水,该类废水几乎占车间废水排放总量的80%以上,其浓度较低,数量较大,属于经常性排放;二是废镀液,包括工艺上所需的倒槽、过滤镀液后的废弃液、失效的电镀溶液等,此类废水数量不多,但浓度高、污染大;三是工艺操作管理等原因引起的“跑、冒、滴、漏”;四是冲洗极板等设备产生的废水。其中前两种废水中的重金属回收利用价值较大,漂洗水中重金属可回用到镀槽,废镀液作为危险废物,一般按国家规定的处理办法处置。近年来膜分离技术的快速发展,为电镀废水的在线回收创造条件,特别是将几种膜分离过程联合起来,或将膜分离与其他分离方法结合起来,发挥其最大的效率,实现电镀废水零排放的可能^[6]。

目前国家十分重视重金属污染防治工作,大部分地区都已要求电镀行业企业每两年开展一轮清洁生产审核。清洁生产是指不断采取改进设计、使用清洁的能源和原料、采用先进的工业技术与设备、

改善管理、综合利用等措施,从源头削减污染,提高资源利用效率,减少或者避免生产、服务和产品使用过程中污染物的产生和排放,以减轻或者消除对人类健康和环境的危害^[7]。

电镀行业清洁生产的主要措施为:

(1) 采用清洁的生产工艺。采用对环境无害或少害的材料和工艺,来替代传统电镀过程中使用的有毒有害的重污染化学品,如推广低铬、无铬钝化工艺,无氰电镀工艺,其他代替工艺等^[8-9]。

(2) 清洁的电镀生产过程控制。通过对企业管理人员及操作人员的培训,不仅提高其管理意识和环境保护意识,更重要的是调动职工的积极性,使他们认识到在自己的日常工作中只要采取一些简单易行、低成本的措施,即可大大降低原材料和能源的消耗,从而节约成本,提高产品质量。

(3) 循环利用与资源化。电镀生产中可做到资源回收、循环利用的是清洗水的循环利用和有价值金属的回收使用。回收有价值的金属是提高企业经济效益的最佳环境保护措施。如印制电路板行业中的蚀刻废液含有大量的铜($150 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上),必须通过回收以避免资源的浪费和环境的污染。

重金属在线回收技术充分体现循环经济的特点,一方面提高了企业的水重复利用率,另一方面回收的金属具有较高的经济效益。

此外随着电镀技术的发展,电镀工艺也将向闭路循环工艺方向发展,改变电镀清洗方式,引入在线监测系统,加强电镀液的回收,提高资源的利用率,做到电镀工艺的闭路循环。重金属在线回收技术也正是电镀工艺的发展方向。

3 重金属在线回收技术

3.1 膜分离在线回收技术

膜分离技术以选择性透过膜为分离介质,在外力的推动下,对混合物进行分离、提纯、浓缩,能有效净化废水并富集溶解金属。目前常见的膜分离技术包括微滤、超滤、反渗透、纳滤、渗析、电渗析、渗透蒸发、气体分离及液膜等^[10]。以反渗透为例,废水在一定的压力下,通过离子树脂半透膜,该膜只允许水分子通过,阻止溶解金属和杂质通过,使通过的水得到净化,并可循环使用,而被阻止的金属化合物可直接回用。利用反渗透方法处理含镍废水,可以实现闭路循环,逆流漂洗槽的浓液经过预处理后用高压

泵打入膜组件, 浓缩液返回镀槽重新使用, 透过液可补充到漂洗槽, 作为清洗水。工艺流程如图 1 所示。

膜分离技术具有分离效能高、能耗低、操作方便、占地面积少等优点^[11-12]。利用膜分离技术可从电镀废水中回收重金属和水, 减少对环境污染, 产生良好经济效益, 实现电镀行业的清洁生产^[13]。

3.2 离子交换在线回收技术

离子交换是利用高分子合成树脂进行离子交换的方法。树脂中含有一种具有离子交换能力的活性基团, 进行选择性的交换或吸附, 再将被交换的物质用其他试剂从树脂中洗涤下来, 达到去除或回收的目的。相比反渗透技术, 离子交换技术无浓水产生, 不存在浓水浪费, 当树脂吸附饱和后出水水质下降立即启用备用系统, 饱和的树脂立即可以再生, 基本实现闭路循环^[14]。

该技术处理含铬废液一方面在线回收净化并循环利用镀铬带出液, 另一方面净化受到污染的镀铬槽液, 使之能重复使用^[15-16]。工艺流程如图 2 所示。

该技术主要有以下几个步骤:

(1) 通过铬液浓度测量仪检测回收槽溶液, 当槽液铬酸酐达到规定浓度后, 整槽溶液泵入储存槽;

(2) 当储存槽内铬液到达规定液位后, 进入净化装置, 清除其中的杂质, 净化后的铬液转入浓缩装置;

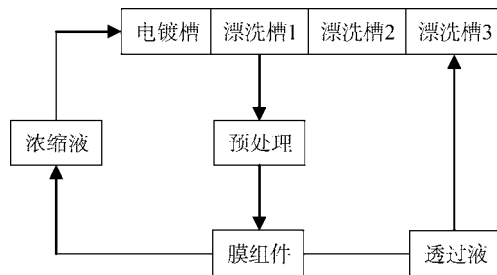


图 1 膜分离在线回收技术流程图

Fig. 1 The process of membrane separation in-situ recycling technology

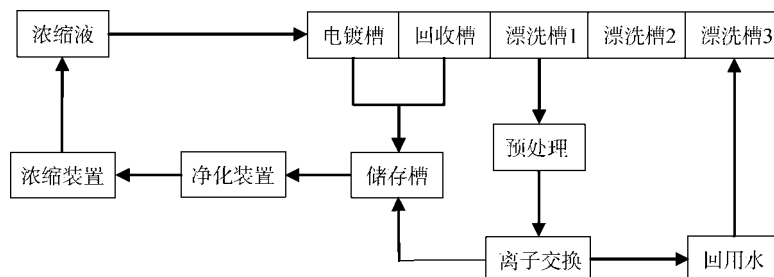


图 2 离子交换在线回收技术流程图

Fig. 2 The process of ion exchange in-situ recycling technology

(3) 铬液经过浓缩后, 按日常生产需要补充回电镀槽使用;

(4) 当电镀槽溶液杂质含量偏高时, 抽出部分槽液至储存槽, 与回收槽溶液进行混合(混合后铬酸酐浓度不超过 $150 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 经过净化并浓缩后返回电镀槽使用;

(5) 逆流漂洗槽的浓液经过预处理去除悬浮物及其他杂质后进入离子交换系统;

(6) 离子交换洗脱再生后得到回收液进入储存槽, 净化浓缩后回用到电镀槽。分离后的回用水再次投入漂洗槽。

目前, 铬液及其废液的净化回用技术不仅满足实际生产的需要, 也实现了全自动化控制。该技术被列入工业和信息化部《电镀行业清洁生产技术推广方案》。

4 技术应用实例

4.1 企业基本情况

某公司是一家五金配件加工、烤漆、电镀的台资企业, 占地 4500 m^2 , 现有员工 170 人, 年均产值达 1400 万元, 年均加工电镀各种成品 2400 万件。公司拥有三条电镀线(其中两条自动线、一条半自动线), 主要镀种包括镀铬和镀镍。五金件经过热脱附、初段、酸电解、负电解、正电解五个阶段的脱脂处理后, 进行镍打底镀上一层薄薄的金属镍, 再经过酸铜槽镀上铜, 经过全光镍(半光镍)镀上一层具有保护性质的镍层, 然后根据工艺需求镀上青铜或黑镍或铬, 最后经钝化烘干包装成成品。公司生产废水主要来源于电镀过程中镀镍、镀铬、镀铜等工艺, 由镀液伴随着镀件带出, 并在漂洗槽中洗去, 从而形成含重金属的废水。公司目前已完成了两轮清洁生产, 在 2011 年第一轮清洁生产中实施了镍在线回收方案, 在 2013 年第二轮清洁生产中实施了铬在线回收方案。

4.2 镍在线回收方案

4.2.1 方案产生的原因

电镀车间排出的镍清洗废液没有进行镍回收,既增加了生产成本,又容易造成污水处理站出水重金属浓度超标。增设在线回收系统后,一方面能对镍槽清洗浓水中金属进行回收,节省金属资源;另一方面,处理后的清洗浓水可回用到生产线,降低了新鲜水用量,节省水资源。在清洁生产审核验收要求中,定性指标也明确规定了必须回收镍^[6]。

4.2.2 方案的简述及要点

公司选择目前较先进的膜分离技术处理电镀清洗水,含镍废水首先收集到原水池,经过机械过滤去除大部分悬浮物、胶体等,然后进入保安过滤,去除有机物、油脂等,使出水符合一级膜系统的进水条件。经一级膜系统处理后的浓水达到一定浓度就进入二级膜系统,二级膜系统浓缩处理后达到回用标准便返回镀槽使用。一级和二级膜系统的透过液可返回漂洗槽使用。工艺流程如图3所示。

4.2.3 技术评估

镍在线回收系统是在镀镍生产线上安装反渗透装置,采用反渗透技术可以不改变漂洗水的相态,

也不用添加大量化学药剂,系统产生的膜浓缩液和膜透析液可进行回收利用。反渗透膜技术在电镀行业已获得逐步推广应用,其技术已相对成熟。该设备占地面积小,可在生产线上切入,不需另外增加场地安装,技术上可行。

4.2.4 环境评估

该方案属于降耗减排项目。方案实施后,不仅回收了镍离子,同时减少含镍废水的排放量,减轻废水处理负荷,提高资源利用率,环境上可行。

4.2.5 经济评估

由表1可知,该方案总投资12.5万元,投资偿还期2.32a,内部收益率大于基准收益率,故该方案经济上是可行的。

4.2.6 方案实施效果

(1) 水重复利用率

由表2计算可得实施前后镀镍工序的水重复利用率提高了60.1%。

(2) 主要材料单耗

由表3计算可得实施前后镍板、硫酸镍、氯化镍单耗分别降低了3.93%、5.44%、4.18%,平均降低了4.51%。

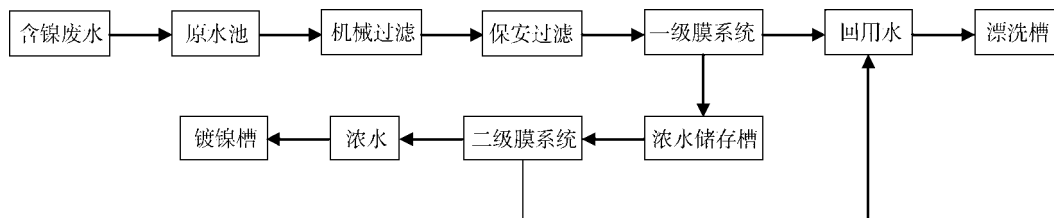


图3 镍在线回收工艺

Fig. 3 The process of Ni in-situ recycling technology

表1 经济评估指标

Tab. 1 The economic evaluation index

项目	公式	结果
项目投资 I /万元	/	12.5
年运行费用总节省 P /万元	/	6.22
设备年折旧费 D /万元	$10\%D$	1.25
年增加现金流量 F /万元	$(P-D) \times (1-17\%) + D$	5.38
投资偿还期 N/a	I/F	2.32
净现值 NPV /万元 ($i=10\%$, $n=10$)	$\sum_{j=1}^n \frac{F}{(1+i)^j} - I$	20.56
内部收益率 $IRR/\%$	$i_1 + \frac{NPV_1(i_2 - i_1)}{NPV_1 + NPV_2 }$	42

(3) 废水排放情况

主要监测了含镍废水总的排放量和总镍的浓度,由表4计算可得实施前后总镍平均一个月产生量减少了30.1kg,排放量减少了0.3kg,每年产生量减少360kg,排放量减少3.6kg。

通过以上三个指标在实施前后的对比表明镍在线回收技术能够提高水重复利用率,降低原材料的单耗,减少污染物产生量,减轻污水处理设施负担,结果证明镍反渗透在线回收技术可行。

4.3 铬在线回收方案

4.3.1 方案产生的原因

铬作为电镀行业污水排放指标中第一类污染物,

表 2 镀镍工序用水量

Tab. 2 The water consumption of Ni electroplating process

时间	新鲜用水量/(t·d ⁻¹)	循环用水量/(t·d ⁻¹)	串级用水量/(t·d ⁻¹)	水重复利用率/%
实施前	47.1	8.9	50.2	55.6
实施后	5.3	35.3	7.6	89.0

注: 循环用水量包括中水回用水和镍在线回收系统用水, 串级用水量指三级逆流漂洗用水。水重复利用率=(循环水+串级水)/(新鲜水+循环水+串级水)×100%。

表 3 镀镍工序主要材料消耗情况

Tab. 3 The main materials consumption of Ni electroplating process

项目 材料	实施前			实施后		
	用量/kg	电镀面积/m ²	单耗/(kg·m ⁻²)	用量/kg	电镀面积/m ²	单耗/(kg·m ⁻²)
镍板	19754	277057	0.0713	18029	263204	0.0685
硫酸镍	20918	277057	0.0755	18792	263204	0.0714
氯化镍	15238	277057	0.0550	13871	263204	0.0527

表 4 含镍废水污染物产生情况

Tab. 4 The generation of Ni-containing wastewater pollutants

时间	废水产生量/t	处理前浓度/(mg·L ⁻¹)	废水排放量/t	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)
实施前	1956	18.5	1897	0.16
实施后	487	12.5	472	ND

注: ND 表示未检出, 检出限为 0.05 mg·L⁻¹。

按照《电镀行业污染物排放标准》(GB21900-2008)的相关要求, 必须在车间或生产设施废水排放口处理达标后才能排放到企业总废水处理设施内。同时, 结合电镀企业开展清洁生产的具体情况, 本着“节能、降耗、减污、增效”的原则, 将生产设施在生产过程中产生的含铬废水通过在线回收装置全部回收带出的铬酐等化工材料, 既降低消耗, 又减轻废水处理量和处理成本。

4.3.2 方案简述及要点

铬回收系统采用离子交换技术, 含铬废水首先经过滤去除机械杂质及悬浮物, 避免污染树脂。前置的阳离子交换树脂用于消除其他金属离子, 使 pH 值下降。核心的阴离子交换树脂先吸附废水中的

CrO₄²⁻和 Cr₂O₇²⁻, 当树脂饱和后用氢氧化钠予以再生, 使 CrO₄²⁻和 Cr₂O₇²⁻交换下来。将再生所得的溶液通过阳离子交换进行脱钠, 最后经浓缩回用到镀铬槽。回收过程的产水可回用到漂洗槽。工艺流程如图 4 所示。

4.3.3 技术评估

铬在线回收系统是在镀铬生产线上安装离子交换装置, 该方法不产生废渣, 占地面积小, 能提高铬酐资源的利用率, 与国家政策相符。该技术设备操作安全、可靠、成熟, 在多数工厂内已投入使用, 技术上可行。

4.3.4 环境评估

六价铬属于国家规定监管的第一类污染物, 对环

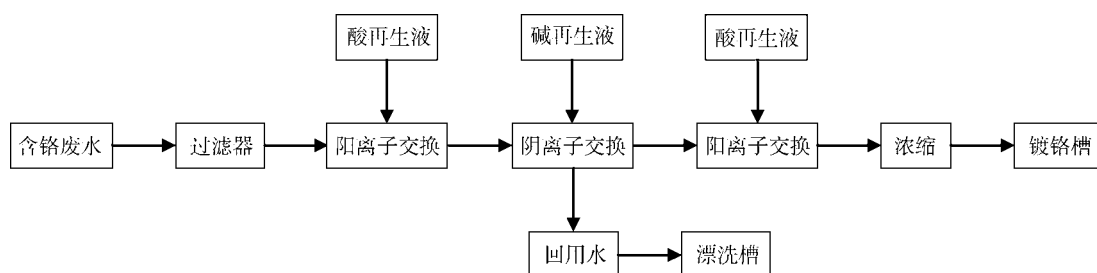


图 4 铬在线回收工艺

Fig. 4 The process of Cr in-situ recycling technology

境及人体都有很大的影响, 该方案的实施能够回收铬酐减少环境的负担, 减少对资源的消耗, 环境上可行。

4.3.5 经济评估

由表 5 可知, 该方案总投资 12.3 万元, 投资偿还期 4.66 a, 内部收益率大于基准收益率, 故该方案经济上是可行的。

4.3.6 方案实施效果

(1) 水重复利用率

由表 6 计算可得实施前后镀铬工序的水重复利用率提高了 46.0%。

(2) 主要材料单耗

由表 7 计算可得实施前后铬酐、氰化钠、三价

铬钝化剂单耗分别降低了 11.3%、8.2%、11.6%, 平均降低了 10.4%。

(3) 废水排放情况

主要监测了含铬废水总的排放量和六价铬的浓度, 由表 8 计算可得实施前后六价铬平均一个月产生量减少了 28.6 kg, 排放量减少了 0.04 kg, 每年产生量减少 340 kg, 排放量减少 0.48 kg。

通过以上三个指标在实施前后的对比表明铬在线回收技术能够提高水重复利用率, 降低原材料的单耗, 减少污染物产生量, 减轻污水处理设施负担, 结果证明铬离子交换在线回收技术可行。

表 5 经济评估指标

Tab. 5 The economic evaluation index

项目	公式	结果
项目投资 I /万元	I	12.3
年运行费用总节省 P /万元	P	2.93
设备年折旧费 D /万元	$10\%D$	1.23
年增加现金流量 F /万元	$(P - D) \times (1 - 17\%) + D$	2.64
投资偿还期 N/a	I/F	4.66
净现值 NPV /万元 ($i=10\%$, $n=10$)	$\sum_{j=1}^n \frac{F}{(1+i)^j} - I$	3.92
内部收益率 $IRR/\%$	$i_1 + \frac{NPV_1(i_2 - i_1)}{NPV_1 + NPV_2 }$	16

表 6 镀铬工序用水量

Tab. 6 The water consumption of Cr electroplating process

时间	新鲜用水量/(t·d ⁻¹)	循环用水量/(t·d ⁻¹)	串级用水量/(t·d ⁻¹)	水重复利用率/%
实施前	36.2	7.3	44.5	58.9
实施后	6.0	31.6	5.3	86.0

注: 循环用水量包括中水回用水和铬在线回收系统用水, 串级用水量指三级逆流漂洗用水。水重复利用率=(循环水+串级水)/(新鲜水+循环水+串级水)×100%。

表 7 镀铬工序主要材料消耗情况表

Tab. 7 The main materials consumption of Cr electroplating process

项目 材料	实施前			实施后		
	用量/kg	电镀面积/m ²	单耗/(kg·m ⁻²)	用量/kg	电镀面积/m ²	单耗/(kg·m ⁻²)
铬酐	4422	263204	0.0168	4747	318615	0.0149
氰化钠	9	263204	0.000034	10	318615	0.000031
三价铬钝化剂	684	263204	0.0026	732	318615	0.0023

表 8 含铬废水污染物产生情况

Tab. 8 The generation of Cr-containing wastewater pollutants

时间	废水产生量/t	处理前浓度/(mg·L ⁻¹)	废水排放量/t	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)
实施前	2764	13.0	2680	0.015
实施后	816	9.00	791	ND

注: ND 表示未检出, 检出限为 0.004mg·L⁻¹。

(下转第 195 页)

要的学术指导和人文关怀, 切实解决研究生的“后顾之忧”, 营造和重塑一种和谐、温馨、积极向上的师生关系。只有这样, 才能重建良好的学术生态环境, 才能激发研究生的积极性和科技原创能力。

致谢: 本文承蒙何道泉、任海教授审阅修改, 谨此致谢!

参考文献

- [1] 李善军. 研究生科研绩效评估方法比较研究[J]. 中国集体经济, 2010, (27): 172-173.
- [2] 曹玉昆, 唐梦凡, 王玉芳. 农林经济管理类研究生原创能力培养的问卷调查及分析[J]. 黑龙江高教研究, 2013, (1): 146-150.
- [3] 臧文彬, 李恩. 当前硕士研究生学术规范现状的调查研究——以重庆市调查为例[J]. 中国电力教育, 2008: 164-166.

- [4] 孟蕾. 硕士研究生学术诚信问题分析[J]. 河南科技学院学报, 2011, (5): 96-100.
- [5] 中国教育在线. 2011 年全国研究生招生数据调查报告[EB/OL]. <http://kaoyan.eol.cn/html/ky/baogao/diaocha1.shtml>, 2012-01-05.
- [6] 中国教育在线. 2012 年全国研究生招生计划[EB/OL]. <http://kaoyan.eol.cn/html/ky/taiwan/2012.shtml>, 2012-06-05.
- [7] 章家恩, 叶延琼. 提升研究生原创力的学术生态建设探讨[J]. 高等农业教育, 2014, (5): 74-78
- [8] 兰云贵. 硕士研究生学术生态研究——以江西高校为例[D]. 江西: 江西师范大学, 2010.
- [9] 陈新忠, 李忠云, 胡瑞. 研究生创新能力评价的三个基本问题[J]. 学位与研究生教育, 2010, (1): 10-13.
- [10] 刘贵华. 一流大学科研条件的保障措施[J]. 机械工业高教研究, 2002, (1): 93-96.
- [11] 黄远. 研究生低补助引发的心理探索[J]. 科教文汇, 2010, (2): 165-166.
- [12] 徐琛. 导师 & “老板”变了味的师生关系[J]. 教育与职业, 2006, (7): 48-50.

(上接第 168 页)

参考文献

- [1] 戴琴, 郑定成, 曾威. 电镀行业现状及推行清洁生产措施[J]. 广东化工, 2012, 39(14): 124-125.
- [2] 王文星. 电镀废水处理技术研究现状及趋势[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(5): 218-222.
- [3] 于宏宾. 清洁生产教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 4.
- [4] 孙晓峰, 李键, 李晓鹏. 中国清洁生产现状及发展趋势探析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(11): 185-188.
- [5] 齐延山. 低浓度络合铜镍电镀废水的处理技术研究[D]. 山东: 山东大学, 2011: 5.
- [6] 肖敏. 电镀行业清洁生产技术探讨与实践[J]. 科技传播, 2012, 04(16): 25-30.
- [7] 张延青, 沈国平, 刘志强. 清洁生产理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 4.
- [8] 李纯爱. 电镀行业清洁生产方案浅析[J]. 科技创新与应用, 2013(23): 101.
- [9] 赵小健. 电镀行业清洁生产技术及其应用[J]. 电镀与精

- 饰, 2013, 35(9): 29-32.
- [10] 刘燕. 关于膜技术在电镀废水处理实施效果的分析与评价研究[D]. 福建: 厦门大学, 2009: 18.
- [11] 胡齐福, 吴遵义, 黄德便, 等. 反渗透膜技术处理含镍废水[J]. 水处理技术, 2007, 33(9): 71-74.
- [12] 冯绍彬. 电镀清洁生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 338.
- [13] 楼永通, 陈益棠, 王寿根, 等. 膜分离技术在电镀镍漂洗水回收中的应用[J]. 膜科学与技术, 2002, 22(2): 43-47.
- [14] 范家屯, 申哲民, 季小丽. 电镀废水中重金属的回收处理技术[J]. 环境监控与预警, 2010, 02(4): 50-53.
- [15] 熊道陵, 李英, 钟洪鸣. 铬回收技术及其研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 02(5): 6-11.
- [16] 傅海霞, 王成端, 吴兴贵, 等. 双阴离子交换柱处理含六价铬废水及回收研究[J]. 西南科技大学学报, 2011, 26(1): 6-11.
- [17] 袁诗璞. 在线法处理镀铬废水与回收金属[J]. 电镀与精饰, 2013, 32(1): 49-53.