

刘婷婷,赵彤,王健,等.金属表面处理工艺危险废物产生节点和处置现状[J].环境工程技术学报,2021,11(5):1027-1033.

LIU T T, ZHAO T, WANG J, et al. Generation nodes and disposal status of hazardous wastes from metal surface treatment process [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 1027-1033.

金属表面处理工艺危险废物产生节点和处置现状

刘婷婷^{1,2}, 赵彤^{1,2}, 王健^{1,2}, 黄泽春^{1,2}, 傅海辉^{1,2*}

1. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院

2. 国家环境保护危险废物鉴别与风险控制重点实验室, 中国环境科学研究院

摘要 金属表面处理行业危险废物种类多、危害大,加上生产企业对危险废物产生节点识别不清以及危险废物管理意识薄弱,加剧了金属表面处理行业危险废物的管理难度。选取金属表面处理工艺中应用最为广泛的电镀、化学镀、阳极氧化、磷化和钝化处理工艺,通过工艺流程梳理,结合《国家危险废物名录(2021版)》,分析各工艺的危险废物产生节点、产生特点和规律;调研其中主要危险废物的产生量、处置工艺和处置现状,并对未来金属表面处理工艺危险废物的管理和处置工作提出合理建议。研究结果对实现金属表面处理行业危险废物的源头减量化和无害化处置具有重要的借鉴意义。

关键词 金属表面处理;危险废物;电镀;阳极氧化;化学镀;磷化;钝化

中图分类号:X705 文章编号:1674-991X(2021)05-1027-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210082

Generation nodes and disposal status of hazardous wastes from metal surface treatment process

LIU Tingting^{1,2}, ZHAO Tong^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, HUANG Zechun^{1,2}, FU Haihui^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Hazardous Waste Identification and Risk Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract It is difficult to manage hazardous wastes in the metal surface treatment industry because of the wide variety of hazardous wastes, the great hazards, the unclear identification of hazardous waste production nodes and the weak awareness of hazardous waste management in the production enterprises. The most used technologies including electroplating, electroless plating, anodic oxidation, phosphating, and passivation processes were selected and analyzed. By combing the process flow and comparing with *National Hazardous Waste List* (version 2021), the production nodes, characteristics, and rules of hazardous waste in each process were analyzed. In addition, the generation, disposal process and disposal status of main hazardous wastes were investigated, and reasonable suggestions were put forward for the management and disposal of hazardous wastes in metal surface treatment process in the future. The research results had important reference significance for the realization of source reduction and harmless disposal of hazardous wastes in metal surface treatment industry.

Key words metal surface treatment; hazardous waste; electroplating; anodic oxidation; electroless plating; phosphating; passivation

金属工件在加工、运输、存储以及使用过程中,表面会发生腐蚀、磨损、氧化等,缩短金属工件使用

寿命,造成巨大经济损失。据统计^[1],每年全球钢产量的10%由于腐蚀而损失,一些制造产业中有

收稿日期:2021-03-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC190013)

作者简介:刘婷婷(1989—),女,助理研究员,博士,主要从事固体废物管理及风险管控研究,liutt@craes.org.cn

*通信作者:傅海辉(1986—),女,助理研究员,硕士,主要从事固体废物管理及风险管控研究,fu_haihui123@126.com

30%的能源直接消耗于摩擦磨损。金属表面处理工艺是改善金属材料表面性能、延长使用寿命的有效手段,在现代工业中扮演着不可或缺的角色。根据

处理工艺作用方式和金属材料使用目的的不同,金属表面处理工艺分类如表 1 所示。

表 1 金属表面处理工艺种类^[1-2]

Table 1 Types of metal surface treatment technology

工艺种类	具体工艺	用途
抛丸	铸钢丸、钢丝切丸、不锈钢丸	增加工件表面的粗糙度,提高漆膜的附着力
喷砂	铁砂、金刚砂、石英砂	改变工件的外表和形状,提高清洁度,改变粗糙度
电镀	镀铜、镀镍、镀锌、镀锡、镀银等	提高耐腐蚀、耐磨、耐热、防辐射性能
阳极氧化	铝合金、钛合金的阳极氧化等	提高表面硬度、耐磨损性、涂装打底
化学转化膜技术	磷化、钝化、铬盐处理等	基体保护、提高涂层结合力
化学镀	化学镀镍、化学镀铜等	提高耐磨导电性、润滑性能
电泳涂装	阴极/阳极电泳	工件表面上漆等
静电喷涂	纯静电雾化、有附加能的静电雾化	工件表面上面漆
淬火	水冷淬火、油冷淬火、空冷淬火等	使过冷奥氏体进行马氏体或贝氏体转变,提高钢的刚性、硬度、耐磨性、疲劳强度以及韧性
渗碳	气体渗碳、固体渗碳、液体渗碳、碳氮共渗(氰化)	使工件的表面层具有高硬度和耐磨性,而工件的中心部分仍然保持着低碳钢的韧性和塑性
热盐浴	钡盐、硝酸盐、氰盐浴	防止工件表面氧化和脱碳
堆焊	堆焊耐磨合金等	工件焊接、局部强化、磨损和崩裂修复
热浸镀	热镀锌、热镀铝等	低熔点金属及其合金镀层的生产,主要以防蚀为目的,并有一定装饰作用
热喷涂	热喷涂锌、热喷涂铝等	防腐、防磨、导电、导热、隔热等
热烫印	热烫印铝箔等	表面装饰或标志

金属表面处理工艺中,镀层技术(电镀、阳极氧化、化学镀等),化学转化膜技术(磷化、钝化等)以及热化学处理工艺(淬火、渗碳、热盐浴、堆焊、热浸镀等)均离不开多种酸、碱、有机溶剂、金属盐等化学试剂的使用,进而产生成分复杂的废酸、废碱、废渣、污泥等危险废物^[3]。加上金属表面处理行业分布广泛以及蓬勃发展,其危险废物来源广、产量大、难处置。

随着《中华人民共和国固体废物污染环境防治法(2020 修订)》的颁布和实施,以及在倡导“减污降碳”的大背景下,我国危险废物管理工作面临着更大挑战。作为《国家危险废物名录(2021 版)》中非常重要的一类危险废物,金属表面处理行业危险废物(主要指 HW17 类危险废物)的减量化和无害化是我国危险废物管理工作中非常重要的组成部分。分析金属表面处理工艺危险废物产生节点,总结危险废物产生特点和规律,明确危险废物产生量,不仅有助于金属表面处理行业危险废物的源头减量化,提升金属表面处理行业危险废物管理水平、提高处置效率,破除金属表面处理行业的发展瓶颈,也对

我国危险废物管理工作起促进作用。受篇幅所限,笔者仅对几种典型金属表面处理工艺包括电镀、化学镀、阳极氧化等镀层技术以及钝化和磷化等化学转化膜技术进行分析,总结相关危险废物的产生情况、处理工艺和处置现状,并对今后危险废物的管理提出合理建议。

1 典型金属表面处理工艺及危险废物产生节点

1.1 电镀工艺

电镀是以待镀工件为阴极、预沉积金属为阳极,利用电解原理,使金属或合金在工件表面沉积,形成均匀、致密、结合力良好的金属薄膜的工艺^[4]。最常见的电镀工艺包括镀锌、镀镍、镀锡、镀铬、镀铜等。电镀工艺基本流程主要由镀前处理、电镀、镀后处理 3 个部分组成(图 1)。

根据电镀工艺流程特点,梳理了该工艺危险废物产生的节点和产生规律(表 2)。由表 2 可以看出,主要包括以下几个方面。

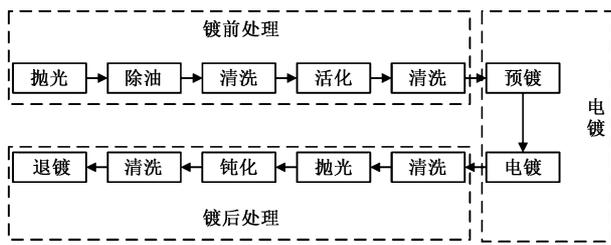


图 1 电镀工艺流程

Fig.1 Electroplating process flow chart

(1)废有机溶剂、废石蜡和润滑油。电镀前,需要对工件表面进行抛光以及去除油脂。除电解除油、超声除油法外,也使用碱性脱脂剂或有机溶剂去除较重油脂,产生废有机溶剂、废石蜡和润滑油。根据除油效果,定期补充更换,频率为 3~6 个月 1 次。

(2)废槽液、槽渣以及废水处理污泥。为保证镀层均匀性和导电性,在电镀过程中,常以预沉积金属离子的盐溶液作为电解质,因此电镀工艺涉及多

种重金属盐溶液的使用^[1,5]。如镀锌工艺常用氯化锌、氯化钾、硼酸为电镀液;镀锡用硫酸、硫酸亚锡配置电镀液;镀镍可以用硫酸镍、硼酸为电镀液;镀铬可以用铬酐、硫酸制备电镀液。在电流的作用下,电解液中预镀金属阳离子在材料表面沉积,形成镀层。一些质检不达标的镀件需要使用酸液或者碱液剥蚀表面镀层,重新进行电镀。因此电镀和退镀工序会产生废槽液、槽渣。电镀后的三级逆流漂洗以及退镀后清洗工序会产生清洗污水,经处置后产生废水处理污泥。《国家危险废物名录(2021 版)》中,不同金属的电镀工序产生的上述危险废物分属不同的危险废物编码,而镀层剥除过程中产生的废槽液、槽渣和废水处理污泥则未按金属种类分类,属于同一类危险废物^[6]。通过收集项目资料和查阅文献,废槽液的产生系数为 0.33~1.80 g/m²,槽渣的产生系数为 14.34~33.58 g/m²,废水处理污泥产生系数为 100~600 g/m²^[7-8]。

表 2 电镀行业危险废物产生节点及规律^[7-8]

Table 2 Generation nodes and rules of hazardous waste from electroplating industry

危险废物	编码	产生环节	产生系数/(g/m ²)	产生规律
废有机溶剂	HW06 废有机溶剂与含有机溶剂废物 900-404-06	脱脂除油		间歇产生
废石蜡和润滑油	HW08 废矿物油与含矿物油废物 900-209-08	金属、塑料的定型和物理机械表面处理		间歇产生
废槽液	HW17 表面处理废物 336-052-17—336-057-17、336-059-17、336-060-17、336-062-17、336-063-17、336-066-17、336-068-17、336-069-17、336-101-17		0.33~1.80	间歇产生
槽渣		金属电镀、退镀、电镀污水处理	14.34~33.58	
废水处理污泥			100~600	
敏化处理产生的废渣和废水处理污泥	HW17 表面处理废物 336-050-17、336-051-17	氯化亚锡、氯化锌、氯化铵敏化		间歇产生
废腐蚀液、废洗涤液、废槽液、槽渣	HW17 表面处理废物 336-064-17	金属和塑料表面酸(碱)洗、除油、除锈、洗涤、磷化、出光、化学抛光工艺	43	间歇产生
废酸	HW34 废酸 900-300-34、900-304-34—900-307-34	抛光工艺	100~600	连续产生

(3)废腐蚀液、废洗涤液、废槽液、槽渣。该类危险废物属于为 HW17 表面处理废物,危险废物编码为 336-064-17,主要是指金属或塑料表面酸(碱)洗、除油、除锈、洗涤、磷化、出光、化学抛光工艺产生的危险废物。该类危险废物产生系数约为 43 g/m²。

(4)废酸。电镀工艺产生的废酸,包括使用电解除油、金属表面敏化产生的废酸液、使用硝酸剥落不合格镀层及挂架金属镀层产生的废酸液、使用硝酸进行钝化产生的废酸液以及使用酸进行电解抛光处理产生的废酸液。《国家危险废物名录(2021 版)》中,电镀工艺产生的废酸被归类在 HW34 废酸

非特定行业中,危险废物编码为 900-300-34、900-304-34—900-307-34。

(5)敏化处理产生的废渣和废水处理污泥。敏化工序常用作非金属材料的电镀前处理工序,因此本研究将敏化处理产生的危险废物也算作电镀工艺产生的危险废物。《国家危险废物名录(2021 版)》单独规定了表面处理工艺中敏化工序产生的危险废物^[6],包括氯化亚锡、氯化锌、氯化铵敏化产生的危险废物 336-050-17 和 336-051-17。

1.2 化学镀工艺

化学镀是依据氧化还原反应原理,利用强还原

剂在含有金属离子的溶液中,将金属离子还原成金属沉积在各种材料表面形成致密镀层的方法^[1]。如利用化学镀在铝合金表面镀镍,以提高工件的导电性能、耐腐蚀性能高以及硬度^[9]。化学镀的工艺流程(图 2)与电镀工艺类似,也分为镀前处理、化学镀、镀后处理。

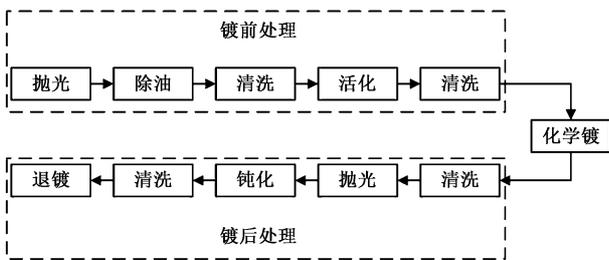


图 2 化学镀工艺流程

Fig.2 Electroless plating process flow chart

结合《国家危险废物名录(2021 版)》,对化学镀工艺产生危险废物节点进行分析,结果如表 3 所示。化学镀产生的危险废物包括废槽液、废槽渣和废酸液。废槽液主要来自镀层剥除过程中产生的废液,废槽渣主要来自镀前处理工序包括除油、脱脂、酸电解、浸蚀工艺以及镀层剥除过程中产生的残渣,废酸液主要由化学镀之前的酸洗和催化工序产生。由于化学镀镍和镀铜是应用的最广泛的化学镀工艺,因此在《国家危险废物名录(2021 版)》中,化学镀工序产生的危险废物主要是指含镍/铜废槽液、槽渣和废水处理污泥^[6]。

表 3 化学镀工艺危险废物产生节点及规律

Table 3 Generation nodes and rules of hazardous waste during electroless plating process

危险废物	编码	产生环节	产生规律
废槽渣	HW17 金属和塑料表面酸(碱)洗、除油、除锈、洗涤工艺产生的废腐蚀液、洗涤液和污泥 346-064-17	除油、脱脂、酸电解、浸蚀	间歇产生
含镍/铜废槽液、槽渣和废水处理污泥	HW17 使用镀镍液进行镀镍产生的槽液、槽渣和废水处理污泥 346-055-17, HW17 使用镀铜液进行化学镀铜产生的废槽液、槽渣和废水处理污泥 336-058-17	化学镀	间歇产生
废酸液	HW34 使用酸清洗产生的废酸液 900-300-34, HW34 使用酸进行催化(化学镀)产生的废酸液 900-308-34	酸洗、酸催化	间歇产生
废槽液、废槽渣	HW17 镀层剥除过程中产生的废液及残渣 346-066-17	退镀	间歇产生

1.3 阳极氧化工艺

阳极氧化指将金属材料放入适当的电解液中,以工件为阳极,其他材料(如铅、碳棒等)为阴极,在外加电流的作用下,使其表面生成氧化膜的过程。阳极氧化与电镀过程一样,也属于氧化-还原反应,只是工件所处极性与电镀相反,故为阳极氧化^[10]。阳极氧化一般指铝和镁材的硫酸或铬酸氧化,其工艺流程如图 3 所示,主要包括前处理、阳极氧化和后处理工序。

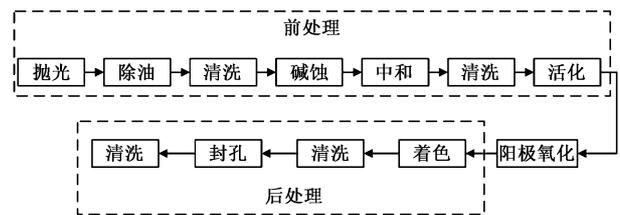


图 3 阳极氧化工艺流程

Fig.3 Anodic oxidation process flow chart

梳理阳极氧化工艺,其产生的危险废物主要包括废槽液、废槽渣、废水处理污泥和废酸,如表 4 所示。废槽液来自前处理中脱脂除油、碱蚀、化学抛光以及铬酸阳极氧化工序,如果后处理封孔工序采用重铬酸钾法,也会产生废槽液。废槽渣来自铬酸阳极氧化工序。废水处理污泥来自铬酸阳极氧化产生的废水处理。废酸主要来自前处理中的中和、活化工序。另外,阳极氧化后处理后,会对工件进行着色处理,因此会产生废颜料危险废物。值得注意的是,《国家危险废物名录(2021 版)》中 HW17 表面处理废物 336-064-17,排除了铝、镁材(板)表面酸(碱)洗、粗化、硫酸阳极处理、磷酸化学抛光产生的废水处理污泥,该类废物可作为一般工业固体废物进行管理。

表 4 阳极氧化工艺危险废物产生节点及规律

Table 4 Generation nodes and rules of hazardous waste during anodic oxidation process

危险废物	编码	产生环节	产生规律
废槽液	HW17 表面处理废物 336-064-17	脱脂除油、碱蚀、化学抛光、铬酸阳极氧化、着色、封孔	间歇产生
废槽液、废槽渣、废水处理污泥	HW17 表面处理废物 336-100-17	铬酸阳极氧化	连续产生
废颜料	HW12 染料、涂料废物 900-255-12	着色	间歇产生
废酸	HW34 废酸 900-306-34	中和、活化	间歇产生

1.4 钝化、磷化工艺

钝化和磷化属于化学转化膜工艺。金属在含有锰、铁、锌的磷酸盐溶液中进行化学处理,使金属表面生成一层难溶于水的结晶型磷酸盐保护膜方法称为磷化工艺,其最大用途是涂装前的打底^[11-12],工艺流程如图 4 所示。

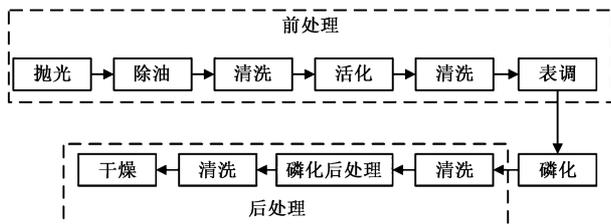


图 4 磷化工艺流程

Fig.4 Phosphating process flow chart

钝化指将金属或金属镀层置于铬酐或重铬酸盐溶液中,使金属表面生成一层铬酸盐钝化膜的过程,目的是进一步延缓金属的腐蚀速度^[1],工艺流程如图 5 所示。为了促进金属溶解,缩短成膜时间,需要添加硫酸、硝酸以及相应盐类作为活化剂^[13]。钝化常作为电镀锌、电镀铬工件后处理工序,如镀锌之后使用 Cr³⁺钝化工艺,锌层溶解生成 Zn²⁺,Zn²⁺会与 Cr³⁺反应生成锌铬氧化层^[14]。钝化也可为铝、镁及其合金表面提供防护层,提高材料表面的耐蚀性。

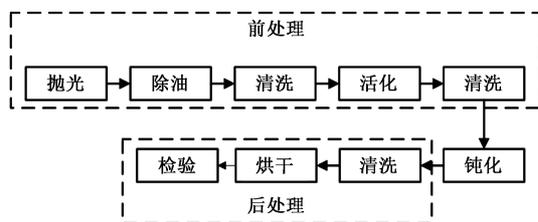


图 5 钝化工艺流程

Fig.5 Passivation process flow chart

钝化和磷化的前处理工序与电镀以及阳极氧化类似,产生的危险废物主要为废槽液、槽渣和废水处理污泥,编码为 HW17 表面处理废物 336-064-17(表 5)。不同的是,《国家危险废物名录(2021 版)》中将磷化和钝化产生的废酸单独列出,分别为磷酸进行磷化产生的 HW34 废酸液 900-303-34 和硝酸进行钝化产生的 HW34 废酸液 900-306-34。因此,在实际生产中,需要严格区分磷化和钝化工艺与其他工艺产生的废酸。

2 金属表面处理工艺危险废物产生和处置现状

对照《国家危险废物名录(2021 版)》,金属表

表 5 钝化、磷化工艺危险废物产生节点及规律

Table 5 Generation nodes and rules of hazardous waste during passivation and phosphating processes

危险废物	编码	产生环节	产生规律
废槽液	HW17 表面处理废物 336-064-17	脱脂除油、表调、磷化、钝化	间歇产生
废渣	HW17 表面处理废物 336-064-17	钝化、酸洗、磷化、磷化后处理	间歇产生
废水处理污泥	HW17 表面处理废物 336-064-17	废水处理	间歇产生
废酸	HW34 废酸液 900-303-34、900-306-34	使用磷酸进行磷化、使用硝酸进行钝化产生的废酸液	间歇产生

面处理行业产生 21 种 HW17 表面处理危险废物,9 种 HW34 废酸危险废物以及 1 种 HW06 废有机溶剂与 2 种 HW08 废矿物油废物。从行业上看,电镀行业产生的危险废物种类最多、产生量最大。电镀企业通常同时建有电镀生产线和阳极氧化生产线,钝化和磷化工艺也经常作为电镀、化学镀和阳极氧化的后处理工序,《国家危险废物名录(2021 版)》中 HW17 336-064-17 类危险废物,实际包含了电镀工艺、化学镀和阳极氧化前处理及后处理对金属和塑料表面酸(碱)洗、除油、除锈、洗涤、磷化、出光、化学抛光产生的废腐蚀液、废洗涤液、废槽液、槽渣和废水处理污泥等危险废物。在实际统计中,HW17 336-064-17 类危险废物通常被当作电镀行业产生的危险废物。据统计,2017 年电镀行业危险废物产生量占全国危险废物产生总量的 4%,其中 HW17 336-064-17 类危险废物产生量为 108 万 t,约占电镀行业危险废物总产生量的 50%^[15]。从种类上看,电镀污泥是表面处理行业产生量较大的危险废物,约占电镀行业危险废物产生量的 85%左右;废酸是危害最大的危险废物,如江苏省金属表面处理行业每年产生约 200 万 t 废酸^[16],但全国范围内废酸的产生量还缺乏统计数据。此外,电镀、化学镀、阳极氧化、钝化、磷化工艺均会产生金属氧化物废渣。

为了减少资源消耗,降低环境风险,金属表面处理工艺危险废物提倡以回收利用为主、无害化处置为辅的综合原则进行管理。针对重点关注的金属表面处理危险废物,总结了目前主流的回收利用和无害化处置方式,如表 6 所示。一些含贵金属和稀有金属的电镀污泥,如含金属铜、镍的电镀污泥,可以采用湿法回收工艺进行回收,回收率可达 90%以上^[15]。对于含有其他金属的电镀污泥,以焚烧、水

泥窑协同处置、热解、填埋、固化等无害化处置为主^[17-20]。废酸通常含有重金属,根据所含金属种类,可用不同的回收利用工艺。如含铬废酸可采用还原+絮凝沉淀的方法,先将 Cr^{6+} 还原为低毒的 Cr^{3+} ,然后加入絮凝剂沉淀来回收金属铬^[21-22];含铁废盐酸可以采用催化氧化剂制备聚合氯化铁^[23]。另外,还可以采用电渗析、膜技术分离酸和废液^[24-25]。表面处理工艺产生的废渣主要为金属氧化物,可以通过冶炼的方式将其进行回收利用。

表 6 金属表面处理工艺危险废物处置利用方法^[21-25]

Table 6 Disposal and utilization methods of hazardous waste from metal surface treatment

危险废物种类	回收利用方法	处置方法	
电镀 污泥	含铜、含镍、含银、 含金等电镀污泥	湿法回收(酸浸法 和氨浸法)、生物 浸取法	焚烧、水泥窑 协同处置、热 解、填埋、固 化等
	含其他重金属电 镀污泥		
废酸	含重金属废酸	电渗析、膜技术分 离酸和废液	
	含铬废槽液	还原+絮凝沉淀	
	含铁废盐酸	催化氧化制备聚 合氯化铁	
废渣	金属氧化物等	冶炼回收金属	

据统计^[15],2017 年全国共接收 226 万 t HW17 类危险废物,其中 88% 来自江苏、广东、浙江、山东、上海、福建等沿海省(直辖市),最终利用率和处置率分别为 61% 和 27.8%。该数据不包括表面处理工艺产生但列入《国家危险废物名录(2021 年版)》中的 HW34 废酸。

3 结语与建议

通过梳理几种代表性金属表面处理工艺产废节点和危险废物产生现状,调研相关危险废物处理工艺和处置现状发现,我国金属表面处理行业危险废物产生环节多、产生种类多、产生量大、危险性高。虽然《国家危险废物名录(2021 年版)》对金属表面处理行业危险废物进行了详细分类,但一些生产企业对危险废物规范化管理落实不到位,对危险废物分类回收不够彻底,不利于后续资源化利用。随着我国危险废物处置体系和配套设施的不断完善,金属表面处理行业危险废物处置能力整体上较高,但资源化利用率仍有待提高。受产业布局和地域发展影响,危险废物处置能力发展不均衡,相关处置企业多

集中在江苏、广东、浙江等金属表面处理行业发达的沿海地区,东北地区处置能力仍有所欠缺。另外,清洁生产制度推行不够彻底,落后的生成工艺未被完全淘汰,尤其是微型金属表面加工企业管理水平低,危险废物产生系数大,危险废物源头减量化任务仍然艰巨。同时,表面处理行业危险废物再生利用污染控制技术要求处于空白,再生产品缺乏相应产品质量标准,也极大限制了危险废物的回收利用。

针对金属表面处理行业危险废物生成、管理和处置中存在的上述问题,建议进一步强制推广并执行清洁生产制度,淘汰落后的重污染企业和工艺,从源头上降低危险废物产生量。以《中华人民共和国固体废物污染环境防治法(2020 修订)》为依托,进一步规范企业危险废物管理意识,压实企业主体责任,提高危险废物管理信息化水平。以《国家危险废物名录(2021 年版)》为指导,严格执行分类回收、分类循环和分类处置,提高废物资源化利用水平。鼓励企业开发再生利用相关技术,降低资源化利用成本,减少回收利用处置过程二次废物的产生,推动制定危险废物再生产品的产品标准,为危险废物资源化利用提供理论指导和技术支撑。

参考文献

- [1] 苗景国.金属表面处理技术[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [2] 张宇婷,朱国强,崔美红.表面处理技术的种类和发展[J].化工管理,2019(31):4-5.
- [3] LIU J,ZHANG X H,TRAN H, et al.Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 18(9):1623-1632.
- [4] 赖柳锋.浅谈电镀工艺的发展[J].当代化工研究,2017(5):101-102.
LAI L F.Discussion of the electroplating technology development [J]. Modern Chemical Research, 2017(5):101-102.
- [5] 冯立明.电镀工艺与设备[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 国家危险废物名录(生态环境部令第 15 号)[A/OL].[2020-11-27]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202011/t20201127_810202.html.
- [7] 王克和.电镀加工量与产生的废水量及废渣量之关系[J].电镀与精饰,2010,32(6):40-44.
WANG K H.Relationship between amount of resultant waste water and waste sludge and processing amount in electroplating process [J]. Plating & Finishing, 2010, 32(6):40-44.
- [8] 花莉,党海迪,张浏,等.巢湖流域电镀危险废物产污系数研究[J].电镀与涂饰,2017,36(13):715-719.
HUA L, DANG H D, ZHANG L, et al. Study on pollutant-producing coefficient of hazardous waste discharged from

- electroplating industry in Chao Lake Basin[J]. *Electroplating & Finishing*, 2017, 36(13): 715-719.
- [9] 杨冠华,王洪涛,张鲲,等.施镀工艺对铝合金化学镀镍的影响[J].*材料保护*, 2020, 53(11): 55-61.
YANG G H, WANG H T, ZHANG K, et al. Effect of plating process on electroless nickel plating of aluminum alloy [J]. *Materials Protection*, 2020, 53(11): 55-61.
- [10] 徐捷.镁和镁合金的阳极氧化膜染色[J].*染料与染色*, 2020, 57(5): 13-26.
XU J. Anodized film dyeing of magnesium and magnesium alloy [J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2020, 57(5): 13-26.
- [11] 张伟华,衣淑丽,张颖超.碳钢常温磷化工艺及磷化膜性能的研究[J].*化工管理*, 2020(25): 169-170.
- [12] 叶永梅,蔡河山,徐颂.金属表面处理类项目环境影响评价实例分析[J].*广东化工*, 2015, 42(3): 105-106.
YE Y M, CAI H S, XU S. Analysis of the example project environmental impact evaluation of surface treatment of metals [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(3): 105-106.
- [13] 王佳莹.铝合金金属阳极氧化废水处理改造项目案例分析[J].*工程建设与设计*, 2017(4): 125-126.
WANG J Y. Case study on the treatment of aluminum anodic oxidation wastewater [J]. *Construction & Design for Engineering*, 2017(4): 125-126.
- [14] 景媛,杨荣,宋振华,等.电镀锌三价铬黑色钝化及其耐蚀性[J].*电镀与涂饰*, 2019, 38(19): 1045-1050.
JING Y, YANG R, SONG Z H, et al. Black trivalent chromium passivation of electroplated zinc coating and its corrosion resistance [J]. *Electroplating & Finishing*, 2019, 38(19): 1045-1050.
- [15] 郭瑞,矫云阳,杨强威,等.我国电镀行业危险废物环境管理对策[J].*环境与可持续发展*, 2020, 45(3): 112-115.
GUO R, JIAO Y Y, YANG Q W, et al. Environmental management of hazardous waste of electroplating industry in China [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2020, 45(3): 112-115.
- [16] 陈昊,叶飞,李兵,等.江苏省表面处理行业废酸处置利用现状及问题分析[J].*环境工程技术学报*, 2017, 7(6): 718-725.
CHEN H, YE F, LI B, et al. Waste acid disposal and utilization status and existing problems of surface treatment industry in Jiangsu Province [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(6): 718-725.
- [17] ESPINOSA D C R, TENÓRIO J A S. Thermal behavior of chromium electroplating sludge [J]. *Waste Management*, 2001, 21(4): 405-410.
- [18] 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, 31(8): 40-42.
ZHANG Z Y. Hazardous wastes recovery and disposal for electroplating industry district [J]. *Plating & Finishing*, 2009, 31(8): 40-42.
- [19] 余昭辉,康宇洁,张亚甜,等.机械工业工艺危险废物的来源和处置技术研究[J].*当代化工研究*, 2019(10): 148-149.
YU Z H, KANG Y J, ZHANG Y T, et al. Study on the source and disposal technology of process hazardous waste in machinery industry [J]. *Modern Chemical Research*, 2019(10): 148-149.
- [20] ZHANG M T, CHEN C, MAO L Q, et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: characterization and environmental risk evaluation [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 159: 27-36.
- [21] 杨晓冰.西安市金属表面处理行业现状调查与环保对策研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2011.
- [22] JAMES M G, BEATTIE J K, KENNEDY B J. Recovery of chromate from electroplating sludge [J]. *Waste Management and Research*, 2000, 18(4): 380-385.
- [23] 张焕然,王俊娥.电镀污泥资源化利用及处置技术进展[J].*矿产保护与利用*, 2016(3): 73-78.
ZHANG H R, WANG J E. Status of resource utilization and disposal technology of electroplating sludge [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2016(3): 73-78.
- [24] 张滨,韩文爱,王占文,等.电镀酸洗液资源化的中试研究[J].*石家庄职业技术学院学报*, 2015, 27(2): 49-51.
- [25] AGRAWAL A, SAHU K K. An overview of the recovery of acid from spent acidic solutions from steel and electroplating industries [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1/2/3): 61-75. □