

精细化工行业高盐、高浓度有机废水资源化处理集成技术

罗莉涛^{1,2,3}, 高誉², 张鸿涛^{2,3}, 陈兆林⁴, 李天增⁴, 韩志伟⁴

1. 华北理工大学建筑工程学院, 唐山 063210
2. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084
3. 清华大学环境学院, 北京 100084
4. 清控环境(北京)有限公司, 北京 100084

摘要 针对高盐、高浓度有机废水处理过程,通过多类技术比选,推荐金属萃取法作为实现金属的回收与资源化再利用的技术、树脂吸附法作为有机物回收与资源化再利用的技术、高级氧化法作为实现有机物降解的技术、机械蒸汽再压缩(MVR)作为盐分回收与分离的技术,进而集成一套以“金属萃取法-树脂吸附法-高级氧化法-机械蒸汽再压缩”为主体工艺的高盐、高浓度有机废水资源化处理集成技术。

关键词 精细化工;有机废水;资源化

中国是精细化学品生产和使用大国,产量、出口量已处于世界第一位,在化工生产过程中,往往会伴随着废水的产生。2015年,中国工业废水排放量达200亿t,其中精细化工行业占总水量的14%,且以每年20%的速度增长。2014年,内蒙古自治区腾格里工业园向腾格里沙漠腹地偷排化工工业污水,造成严重沙漠污染事件;2017年,因化工工业偷排废水,造成河北省廊坊市大城县出现工业废水渗坑污染事件。这些污染事件成为了精细化工行业“双高”废水污染之痛。精细化工行业高盐、高浓度

有机废水已成为化工行业废水污染的重要来源^[1-2]。由于高盐、高浓度有机废水成分复杂、可生化性差、治理难度大、成本高,其治理问题已成为制约精细化工行业可持续发展的瓶颈问题,也是化工行业污染事件频发的主要原因^[3]。近年来,部分农药、染料、专用化学品(无机精细化学品)等生产企业由于管理滞后和惯性思维不能适应新形势和新要求,为降低治理成本恶意偷排引发了多起严重的环境污染事件,在社会上造成了恶劣影响^[4-5]。高盐、高浓度、难降解有机废水治理已成为精细化工行业乃至

收稿日期:2021-01-31;修回日期:2021-07-30

基金项目:“十三五”水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110006,2018ZX07402005)

作者简介:罗莉涛,副教授,研究方向为水体污染控制与治理,电子信箱:mhlppl6184@126.com

引用格式:罗莉涛,高誉,张鸿涛,等.精细化工行业高盐、高浓度有机废水资源化处理集成技术[J].科技导报,2021,39(17):17-23;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.17.002

整个化学工业污染治理最为紧迫的问题^[6]。

精细化工企业对提升高盐、高浓度有机废水的处理刻不容缓,有必要结合当前国家及行业治理需求,针对目前行业形势及现有技术水平,亟待梳理有机污染物废水处理相关技术,研究一套无机精细化学品生产过程高盐、高浓有机废水资源化集成技术,解决行业相关问题,为精细化工行业的健康发展提供技术支撑。

1 高盐、高浓度有机废水资源化处理迫切性及技术难点

中国是精细化学品生产和使用大国,产量、出口量已处于世界第一位,且以每年 20% 的速度增长。精细化工在国民经济中发挥着重要作用,同时也是集中产生有毒污染物的行业,精细化工的污染及其难以治理是发达国家向发展中国家大规模产业转移的原因之一,长期以来受到国家、社会和企业的高度关注^[7-8]。

国务院发布《水污染防治行动计划》(简称“水十条”),明确要求对印染、农药及染料等精细化工行业进行专项整治。精细化工生产过程中所需的部分原料为中国“水中优先控制污染物”中的有机毒物和美国环境保护署(EPA)重点控制的 129 种水环境污染物质,水体中有毒物质可以在极低的浓度下累积于生物体内,对人体健康和环境造成严重的甚至不可逆的影响。新时期精细化工行业企业亟需开展废水治理,走上绿色可持续发展的环保之路。因此,有必要开展精细化工行业高盐、高浓度有机废水资源化集成技术研究工作。

国内外常用的溶解性有机物处理方法有生物法、高级氧化法、树脂吸附法等。其中,针对有机物的氧化法通常采用芬顿氧化、电化学氧化、臭氧催化氧化、光催化氧化、生物氧化法等处理技术^[9-10],但是药剂耗量大,投资成本高,未考虑附加值较高的有机组分的回收;废水蒸发过程产生的盐多为杂盐,资源化利用途径较少。

精细化工产品生产步骤长,生产工序步骤多,造成工艺中具有资源化价值的成份回收率较低,平

均回收率为 30%~50%。大部分原料、中间体及副产物都以“三废”形式排放^[11-12]。其中对环境污染最大的是工业废水,其特点是成分复杂,有毒污染物含量高、含盐量高、色度高,含有许多“三致”类化合物,使得废水处理难度较大。

目前,由于处理技术短板、处理成本高昂的原因,使大量中小企业无法按照严格的标准对高盐废水进行处理后再排放,而是仅使用稀释后外排这种简单的技术,造成淡水浪费,并导致严重的土地盐碱化。

由于部分精细化工行业高盐、高浓有机废水中含有大量的有价金属,废水处理面临金属离子分离与回收的难题;废水 COD(化学需氧量)浓度高达 1000~10000 mg/L^[13-14],废水处理面临有机物进行降解和回收的难题;废水中盐浓度高达 5000~20000 mg/L,且废盐具备来源广泛、成分复杂、含有大量的有害物质、产生量与合规处理量之间不对称的特征,造成大量废盐堆积的现实难题^[15-16],废盐中含有大量的可回收钠盐,资源化程度低,废水处理面临盐分离回收及资源化的难题。

目前,精细化工行业高盐、高浓有机废水的处理方法存在深度处理效果不佳、成本高、易产生二次污染等问题,无法满足工业发展要求。

2 高盐、高浓度有机废水资源化处理技术

2.1 有价重金属的分离与回收

在无机精细化学品生产过程中产生的有机废水中含有大量的有价金属元素,如钴、镍等。钴、镍作为中国新能源汽车行业的重要支撑原料^[17],有较高的回收价值。目前,对金属元素的回收常用的方法有金属络合法、金属萃取法等。

1) 金属络合法是利用一些有机酸盐作为金属络合剂吸附金属离子或与金属离子发生反应生成不溶性颗粒,进而形成絮体,结合成为重金属污泥,实现重金属从废水中分离的方法。金属络合法原理为金属络合剂含有一COOH(羧基)、—OH(羟基)等官能团以及自身带有阴离子,可对金属离子

进行吸附;其同时表面还黏附着大量有机含硫、含磷高分子化合物,与金属离子发生反应,形成不溶性颗粒。

2) 金属萃取法是利用金属在2种互不相溶的溶剂中的溶解度不同,使金属从一种溶剂中转到另一种溶剂中,经过反复多次萃取,将金属离子提取出来的方法。金属萃取剂主要是一些常见的磷盐、铵盐等有机高分子化合物,金属与这些萃取剂结合,形成有机化合物,从而溶于有机溶剂中。由于各种金属离子与萃取剂的结合能力不同,因而萃取剂萃取金属的顺序不同,从而分离出不同的金属离子。

金属络合法虽然能去除废水中的有价重金属元素,但沉淀出来的金属污泥含有多种金属元素,难以实现有价重金属的分离与回收,无法实现资源化目标。对比而言,金属萃取法使用有机萃取剂对金属元素进行萃取,不仅达到去除金属元素的目的,而且还能根据萃取顺序的不同,对部分离子进行回收利用,从而实现资源化再利用。由表1可看出,经过技术对比,推荐选择金属萃取法以实现金属的回收与资源化再利用。

表1 有价重金属处理技术对比

技术名称	优点	缺点
金属络合法	实现金属元素去除较彻底	不能实现金属元素回收
金属萃取法	能实现金属元素回收	萃取剂种类筛选工作较大

2.2 有机物回收与降解

高盐、高浓度有机废水中有价重金属的分离与回收后,废水中仍含有高浓度的有机物,其中部分有机物和金属萃取剂具有较高的回收再资源化利用的价值。因此,有机物的回收与降解成为废水进一步处理的目标。

2.2.1 有机物回收

1) 树脂吸附法。

吸附树脂又称聚合物吸附剂,它是一类以吸附为特点,对有机物具有浓缩分离作用的高分子聚合物。按照树脂的表面性质,吸附树脂一般分为非极性吸附树脂、中性树脂和极性树脂3类。非极性

吸附树脂是由偶极矩很小的单体聚合物制得的不带任何功能基的吸附树脂;中性吸附树脂指含酯基的吸附树脂;极性吸附树脂是指含酰胺基、胺基、酚羟基等含氮、氧、硫极性功能基的吸附树脂。

吸附树脂在对有机物的吸附过程中,物理吸附和化学吸附同时进行,吸附示意原理见图1。树脂的吸附与其物理结构和化学结构有着密切的关系:非极孔交换树脂性树脂主要是物理结构(比表面、孔径、空隙率等)起作用;极性树脂和大孔交换树脂既具有一定的比表面积和细孔,又具有各种极性或不同功能基团,化学吸附则相应起着极为重要的作用。目前,吸附树脂在水处理领域得到了广泛的应用,具有可深度净化、处理效率高、对有机物有浓缩分离的优点,因此占有十分重要的地位。

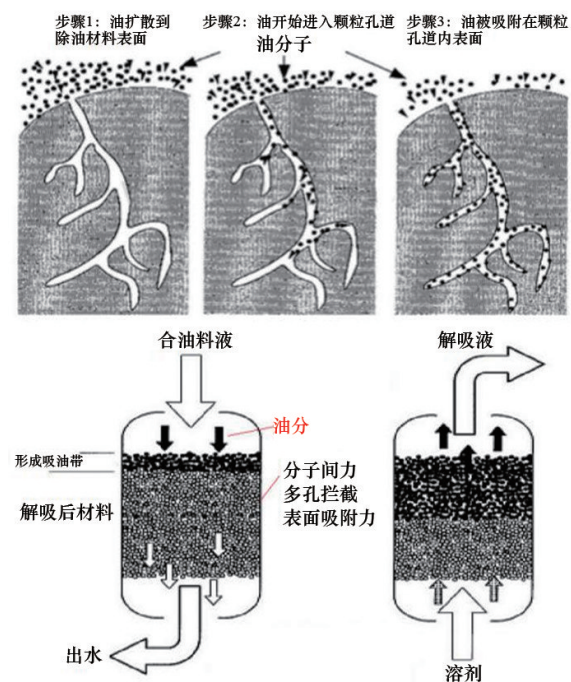


图1 高效吸附材料吸附-解吸附原理示意

2) 活性炭吸附法。

活性炭是一种很细小的炭粒,具有很大的表面积,而且炭粒中还有较多更细小的孔——毛细管。这种毛细管具有很强的吸附能力,由于炭粒的表面积很大,所以能与气体(杂质)充分接触。当这些气体(杂质)碰到毛细管被吸附,起净化作用。

活性炭是一种具有多孔结构和比表面积大等

特点的材料。由于活性炭具有比表面积大、微孔结构复杂、吸附能力强的特点,使得其能够有效去除废水大部分有机物和部分无机物,部分活性炭还可再生活化,所以被各国广泛应用于污水的处理、空气净化。但废水经过活性炭吸附处理后,部分具备回收资源化再利用价值的有机物就无法实现回收资源化。

在废水中部分有机物回收资源化再利用的原则下,由表2可看出,通过树脂吸附法和活性炭吸附法技术比选,推荐树脂吸附法对有机物进行回收,经过吸附后剩余有机物需进行降解处理。

表2 有机物回收降解技术对比

技术名称	优点	不足
树脂吸附法	吸附回收有机物,且回收技术成熟,处理能力高	—
活性炭吸附法	处理效果好、操作简单、方便管理、工艺简单	消耗量较大,成本昂贵

2.2.2 有机物降解

1) 生物法是利用微生物降解代谢有机物为无机物来处理废水。通过人为地创造适于微生物生存和繁殖的环境,使之大量繁殖,以提高其氧化分解有机物的效率。根据使用微生物的种类,可分为好氧法和厌氧法等。由于生物法是基于微生物的代谢机理的废水处理方法,具有无二次污染、处理能力大运行费用低、净化效果好、能耗小等优点。但对可生化性差、相对分子质量大物质处理较困难,且不能实现有机物的回收。

2) 高级氧化技术又称为深度氧化技术,以产生具有强氧化能力的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)为特点,在特定的反应条件下,使大分子难降解有机物氧化成低毒或无毒的小分子物质。使大部分有机物完全降解,具有良好的应用前景。

在废水中有机物降解的原则下,由表3可看出,通过生物法和高级氧化法技术比选,推荐高级氧化法作为有机物的降解方法,最终以树脂吸附和高级氧化法的集成技术对废水中有机物的回收降解。

2.3 混盐分离与回收

经过金属分离与回收、有机物降解与分离后,

表3 有机物回收降解技术对比

技术名称	优点	不足
生物法	工艺简单,技术成熟	对水质要求高,占地面积大
高级氧化法	反应时间短,速度快,有机物降解完全	过程复杂,处理费用较高

废水中含有大量的盐分,基于环保及资源化再利用原则,需将废水中高浓度的盐类进行混盐分离与回收,从而实现分盐提质资源化利用目标。分离后的成分为残盐,这些残盐通过浓缩、高温固定后进行填埋。

目前,高盐废水中混盐分离与回收的技术主要有蒸发法^[10-12]、电解法^[13-14]、膜分离法^[15-16]和生物处理法^[17]等。蒸发法是处理高盐废水的传统方法,对高盐废水盐分回收与分离经济有效^[11]。电解法在处理高盐废水过程中存在电极钝化和能耗较高等问题。生物处理法不仅能有效降低污水盐浓度,同时可降解C、N、S、P等成分,但生物工艺处理高盐废水的最大问题在于系统耐受值低、容积负荷小^[17]。由此,在综合考虑技术经济效益后,优先选择蒸发法处理高盐废水混盐分离与回收。蒸发法包括多效蒸发、机械蒸汽再压缩(MVR)及膜蒸馏等3种,以下对3种蒸发法进一步比选。

1) 多效蒸发。

在蒸发生产中,二次蒸汽的产量较大,且含有大量的潜热,故应将其回收加以利用,若将二次蒸汽通入另一蒸发器的加热室,只要后者的操作压强和溶液沸点低于原蒸发器中的操作压强和沸点,则通入的二次蒸汽仍能起到加热作用,这种操作方式即为多效蒸发。多效蒸发器中的每一个蒸发器称为一效。凡通入加热蒸汽的蒸发器称为第一效,用第一效的二次蒸汽作为加热剂的蒸发器称为第二效,以此类推。采用多效蒸发器的目的是为了节省加热蒸汽的消耗量。将前效的二次蒸汽作为下一效加热蒸汽的串联蒸发操作。在多效蒸发中,各效的操作压力、相应的加热蒸汽温度与溶液沸点依次降低。

2) 机械蒸汽再压缩。

蒸发器利用蒸发器中产生的二次蒸汽,经压缩

机压缩,压力、温度升高,热焓增加,然后送到蒸发器的加热室当作加热蒸汽使用,使料液维持沸腾状态,而加热蒸汽本身则冷凝成水。这样,原来要废弃的蒸汽就得到了充分的利用,回收了潜热,又提高了热效率,生蒸汽的经济性相当于多效蒸发的30效,减少了对外部加热及冷却资源的需求,降低能耗,减少污染。

3) 膜蒸馏。

膜蒸馏是一种采用疏水微孔膜,以膜两侧蒸汽压力差为传质驱动力的膜分离过程,可用于水的蒸馏淡化,可去除水溶液中挥发性物质。例如当不同温度的水溶液被疏水微孔膜分隔开时,由于膜的疏水性,两侧的水溶液均不能透过膜孔进入另一侧,但由于暖侧水溶液与膜界面的水蒸汽压高于冷侧,水蒸汽就会透过膜孔从暖侧进入冷侧而冷凝,这与常规蒸馏中的蒸发、传质、冷凝过程十分相似,所以称其为膜蒸馏过程。

通过对比3种蒸发法(表4),机械蒸汽再压缩技术相比其他蒸发技术有适应巨大的水量、复杂的水质和极高的盐度,且配合盐硝分离装置可实现废水中杂盐的分离和回收,整个过程中消耗能量较少等特点,在高盐废水中有极大的应用前景。因此,确定推荐机械蒸汽再压缩技术作为高盐废水实现混盐分离与回收的处理技术。

表4 脱盐技术对比

技术名称	优点	不足
多效蒸发	脱盐效果显著	规模大、成本高
机械蒸汽再压缩	无需产生蒸汽、低能耗、低运行费用,可与结晶器结合形成MVR形式的连续结晶器	原材料成本高 传热效率低、膜孔易堵塞、膜结构造价较高
膜蒸馏	受溶液浓度影响小	易堵塞、膜结构造价较高

2.4 集成技术

集成金属分离与回收、有机物降解与回收及混盐分离与回收技术后,确定推荐出高盐、高浓度有机废水处理集成技术(图2)。

针对无机精细化工生产过程中产生的高盐、高浓度有机废水含有有价重金属、混盐和有机物等物质。首先,筛选出金属萃取剂,依据不同金属与萃取剂的不同反应特征,实现对废水中可回收金属回收目标。其次,经萃取后的废水中含有可回收有机物、难降解有机物及有机萃取剂等有机物。为响应国家资源化政策,应通过树脂吸附对部分有机物吸附,树脂吸附饱和后,通过解吸及解吸剂再生技术将分离出来的有机物进行回收。再次,通过高级氧化技术对废水中剩余有机物进行彻底降解。最后,通过机械蒸汽再压缩技术对废水进行蒸发,蒸汽通

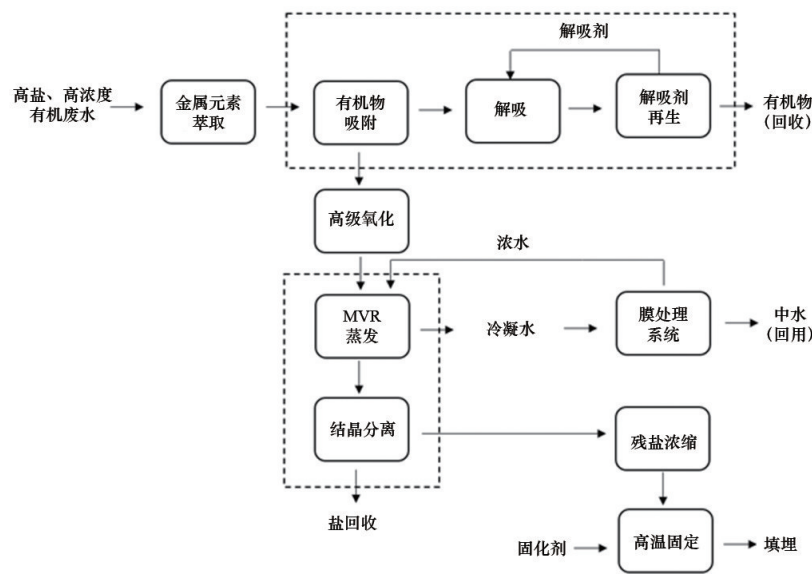


图2 高盐、高浓度有机废水处理集成技术流程

过冷凝管流入膜处理系统进行污水处理,达到工艺循环用水要求,全部回用于企业生产系统,经过机械蒸汽再压缩技术结晶出来的混盐通过结晶分离技术得到可回收的产品盐和废弃残盐,废弃残盐经过机械浓缩,加入固化剂进行高温固定,固定后的残盐固体运往垃圾填埋场进行填埋。

通过树脂吸附和高级氧化2个单元保障能够实现有机物(油类)去除率99%以上,回收率95%以上;浓缩残盐无害化后水溶性盐固化率 $\geq 99\%$,固化物水浸液(1:10)中TOC(总有机碳) < 0.5 mg/L,与传统水泥固化技术相比,固化物总量降低30%以上。

3 典型应用工程案例

衢州华友资源再生科技有限公司镍钴电池材料资源化绿色循环利用项目设计共建2条镍钴电池材料处理线,分别处理一元废旧电池8499 t,处理废旧三元电池56181 t,全部建成后处理废旧电池64680 t,生产钴镍化学品产生的废水经有机物分离回收后采用浓缩蒸发,离心产出元明粉,母液回收锂,年处理高盐、高COD废水约10万t。

低镍电池材料(一元钴料)处理工艺流程:预处理→粉碎分级脱铝→浸出→除铁铝→萃杂→萃钴,产出合格硫酸钴溶液,含锂萃余液经蒸发富锂后,沉淀回收锂,沉锂滤液外排;该线萃取全部采用钠皂。高镍电池材料(三元料)处理工艺流程:预处理→粉碎分级脱铝→浸出→除铁铝→萃杂→萃钴→萃镍→萃镁,产出合格硫酸钴溶液和硫酸镍溶液,含锂萃余液经蒸发富锂后,沉淀回收回收锂,沉锂滤液外排;该线萃取全部采用钠皂。一元料回收钴后的萃余液含有少量的镍,配入到三元萃镍系统,统一回收镍,回收镍钴后的萃余液,含有4~5 g/L锂的硫酸钠溶液,采用蒸发富集锂,再碳酸钠沉锂,冷冻结晶硫酸钠后,继续蒸发使母液使锂浓度达到10 g/L左右,再回收锂。母液全部制备无水硫酸钠,水处理采用机械蒸汽再压缩系统。

4 结论

针对典型无机精细化学品生产过程高盐、高浓有机废水资源化技术与产业化处置问题及处理需求,研究典型无机精细化学品生产过程高盐、高浓有机废水资源化技术具有重要的技术指导作用,助力精细化工行业绿色可持续发展。

针对高盐、高浓度有机废水处理过程,通过金属络合法和金属萃取法技术比选,推荐金属萃取法作为实现金属的回收与资源化再利用的技术;通过树脂吸附法和活性炭吸附法技术比选,推荐树脂吸附法作为有机物回收与资源化再利用的技术;通过高级氧化法和生物法的技术比选,推荐高级氧化法作为实现有机物降解的技术;通过多效蒸发、机械蒸汽再压缩、膜蒸馏技术比选,推荐机械蒸汽再压缩作为盐分回收与分离的技术,整体集成一套以“金属萃取法-树脂吸附法-高级氧化法-机械蒸汽再压缩”为主体工艺的高盐、高浓度有机废水处理集成技术。

高盐、高浓度有机废水处理集成技术有助于精细化工企业实现清洁生产,为企业带来可观的经济效益,从而增强其市场竞争力;有助于实现有机物及无机盐的高质、高值回收,为流域实现水污染控制及实现环境、经济和社会的协调发展,具有重要的社会效益;有助于全面提升中国精细化工等行业的废水处理水平及资源循环利用效率,产生显著的环境效益。

参考文献(References)

- [1] 樊锐,刘玉坤.工业废盐资源化处置现状及分析[J].环境与发展,2020,32(8):52-53.
- [2] 王昱,王浩,周海云.化工废盐处理处置技术与政策的发展研究[J].污染防治技术,2017,30(4):11-15.
- [3] 周海云,鲍业闯,包健,等.工业废盐处理处置现状研究进展[J].环境科技,2020,33(2):70-75.
- [4] 李小燕.全国危险废物填埋污染控制标准与废盐杂盐处

- 理处置技术研讨共识无害化管理资源化利用[J]. 城乡建设, 2018(22): 44-45.
- [5] 李强, 戴世金, 郑怡琳, 等. 工业废盐中有机物脱除和资源化技术进展[J]. 环境工程, 2019, 37(12): 200-206.
- [6] 毛彦霞. 机械蒸汽再压缩技术处理含盐废水试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [7] 陈浩, 张枫, 王中正, 等. 高盐废水处理技术研究进展[J]. 广州化工, 2017, 45(22): 17-18, 31.
- [8] 韩雪冬, 吴艳军, 周然, 等. 浓盐水资源化利用装置运行问题与对策[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(增刊 2): 232-234.
- [9] 陈浩, 张枫, 王中正, 等. 高盐废水处理技术研究进展[J]. 广州化工, 2017, 45(22): 17-18, 31.
- [10] 贾西部. 高盐废水调质后在余热烟气中的蒸发应用[J]. 环境工程, 2018, 36(5): 49-53.
- [11] 崔凤霞, 李荣, 陈玮娜. 高含盐废水零排放蒸发结晶技术进展[J]. 广州化学, 2017, 45(1): 21-23.
- [12] 徐腾, 张有贤, 施仲扬. pH 对蒸发技术处理高盐高氨氮废水的影响[J]. 福建师范大学学报, 2016, 32(6): 83-88.
- [13] 冯嵩. 微电解 - Fenton 氧化联用去除高盐废水 COD 研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(10): 103-106.
- [14] Yi X, Wang Y. Treatment of high salt oxidized modified starch waste water using micro-electrolysis, two-phase anaerobic aerobic and electrolysis for reuse[J]. Applied Water Science, 2017, 7(3): 1231-1237.
- [15] 卢峰. 纳滤膜对脱硫废水零排放系统浓盐水的分盐性能研究[J]. 广州化工, 2018, 46(13): 38-40.
- [16] Shijie S. Research on the salt separation performance of nano-filtration membrane in high salinity wastewater zero discharge field[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(9): 75-78.
- [17] 于鹏飞, 耿佳鑫, 高子平, 等. 高盐废水生化处理技术[J]. 广州化工, 2015, 43(7): 25-26, 83.

On integrated technology for resource treatment of high salinity high concentration organic wastewater in fine chemical industry

LUO Litao^{1,2,3}, GAO Yu², ZHANG Hongtao^{2,3}, CHEN Zhaolin⁴, LI Tianzeng⁴, HAN Zhiwei⁴

1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China
2. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China
3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China
4. TSING Holding Environment Co., Ltd., Beijing 100084, China

Abstract In view of the treatment process of high salt and high concentration organic wastewater, through comparison and selection of various technologies, this article recommends the metal extraction method as the technology to realize metal recovery and resource reuse, the resin adsorption method as the technology to realize organic matter recovery and resource reuse, the advanced oxidation method as the technology to realize organic matter degradation, and the mechanical vapor recompression as the technology to realize salt recovery and separation. Furthermore, a set of technologies for resource treatment of high salt and high concentration organic wastewater is integrated, which takes "metal extraction resin adsorption advanced oxidation mechanical vapor recompression (MVR)" as the main process. This integrated technology is useful for fine chemical enterprises to realize cleaner production and bring considerable economic benefits; it is helpful to realize the high quality and high value recovery of organic matter and inorganic salt, and has very important social benefits; it may improve the wastewater treatment level and resource recycling efficiency of China's fine chemical industry, and produce significant environmental benefits. It can provide important technical guidance for the recycling technology and industrialization of high salt and high concentration organic wastewater in the production process of typical inorganic fine chemicals, and help the green and sustainable development of fine chemical industry.

Keywords fine chemicals; organic wastewater; resources ●



(责任编辑 刘志远)