

# 江苏某地区机械电子加工废乳化液污染特征分析<sup>1</sup>

吴宝强, 黄翔峰, 熊永娇, 张佳路, 谢丽, 陆斌, 彭开铭

(同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

**【摘要】**在机械电子加工企业密集的江苏某地区, 开展了废乳化液来源、水量、水质的调研分析。研究发现, 废乳化液来源多样, 命名繁杂, 尚未统一。水量上, 该地区小型机械电子加工企业数量较多, 污染源分散, 大型企业产废量占主导, 呈现两极分化特征。水质上, 废乳化液污染物浓度高且差异大, 乳化结构稳定。

**【关键词】**机械加工; 废乳化液; 废切削液

**【中图分类号】**X832 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1005-829X(2021)03-0057-06

乳化液被广泛应用于汽车、金属制品、机电设备、电子芯片等加工制造过程中, 经过多次循环使用后, 逐渐腐败、变质、失效, 成为废乳化液。随着经济快速发展, 机械电子加工产品市场的需求不断扩大, 金属制品生产日益规模化, 废乳化液的产量也逐渐增加, 其管控和处置压力也在不断增大。

废乳化液的处理一般要先进行破乳分离的物化处理, 再进行生化处理<sup>[1-2]</sup>, 其中破乳分离是实现有效处理的关键。化学破乳是现阶段最为常用的物化处理技术, 但是面对日趋复杂的废乳化液, 化学破乳的适应性差, 处理效果不稳定等问题逐渐凸显。对废乳化液的水量、水质特征进行分析是实现高效处理废乳化液的重要因素和关键前提。目前, 尚无对废乳化液水量、水质特征的综合研究分析和报道, 一定程度上限制了该类废水的处理处置。笔者基于机械电子加工行业发达的江苏某地区废乳化液污染现状的调研, 对废乳化液来源及分类进行了总结, 并结合文献中所提供的相关数据, 分析了废乳化液的水量、水质特征, 为实际处理废乳化液的工程应用和工艺改进提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源及样品采集

水量及名称数据来源: 依托于江苏某危废处理企业及危险废物动态管理系统, 调研了该地区 456 家企业产废情况, 并对 2018 年 1 月—2019 年 12 月期间, 江苏某危废处理中心两年内实际转运收集的 394 个产废企业和 1940 次转运数据进行统计, 提取废乳化液相关的名称 394 个(包括重复名称), 以及相应名称出现的频次。

**基金项目:**“十三五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202-003-02); 国家自然科学基金(51978490); 上海市自然科学基金(20ZDR1461200)

**收稿日期:**2020-12-12(修改稿)

**作者简介:**吴宝强(1993—), 硕士在读。电话: 15251933717, E-mail: 1832849@tongji.edu.cn 通讯作者: 彭开铭, 博士, 助理教授。电话: 15921268904, E-mail: pengkaiming@tongji.edu.cn。

为了进一步分析废乳化液的水质参数，本研究从相关企业、危险废弃物处理单位等收集了 97 个废乳化液。废乳化液一般储存在 1m<sup>3</sup> 的塑料桶或铁桶中，经过长期静置后会有一定的浮油和沉渣，为保证样品的代表性，在采集样品时将虹吸管伸入桶中间位置，吸取 500mL 样品，存于样品瓶中备用，测试前将样品充分混匀。

## 1.2 测试方法

对上述采集的 97 个废乳化液样品进行了常规水质监测，获得有效数据 COD<sub>cr</sub>87 个、pH55 个、TN54、NH<sub>3</sub>-N55、TP44。其中 pH 采用玻璃电极法、COD<sub>cr</sub>采用重铬酸钾法、TP 采用抗坏血酸法、nh<sub>3</sub>-n 采用水杨酸法、TN 采用过硫酸盐氧化法进行测定。同时，从已经发表文献中选取了机械电子加工相关的废乳化液的 COD<sub>cr</sub>数据 52 个，用于分析 COD<sub>cr</sub> 的分布特征。

此外使用 Malvern Zetasizer NanoZS90 激光粒度仪测定油滴粒径，使用 Malvern Mastersizer 3000 电位分析仪测定油滴 Zeta 电位，分析废乳化液的稳定性。

## 1.3 数据统计与分析

将提取到的废乳化液相关名称依据出现的频率赋予不同字号，使用 TAGUL 提供的程序绘制了表达机械电子加工废乳化液最常使用名称的词云图。

在分析水量特征时，将收集到的 2018 年 1 月—2019 年 12 月期间 456 家企业产生的废乳化液量及单位数量按划分的区间进行统计，绘制柱状图，分别从不同规模产量的产废企业频率分布及累积产量分布进行特征分析。

针对机加工企业废乳化液水质数据的分析，首先根据测试得到的 COD<sub>cr</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 等数据特征，进行区间统计分析，明确水质参数的分布范围与特点。进一步将数据由小到大排列，统计计算单变量样本数据集的上限(非异常范围内最大值)、上四分位(75%, Q<sub>3</sub>)、中位数、下四分位(25%, Q<sub>1</sub>)与下限(非异常范围内最小值)，并通过箱线图(Boxplot)的形式表达。箱线图可以识别异常值，更加直观、客观地反映数据的离散分布情况。因此，本研究采用箱线图的 Q<sub>1</sub>~Q<sub>3</sub> 的数值来反映不同来源的废乳化液 COD<sub>cr</sub> 的集中趋势及主要分布范围。

## 2 结果与讨论

### 2.1 废乳化液的来源与命名

#### 2.1.1 废乳化液来源

在机械电子加工行业，常因加工对象、操作环境、运行参数等因素的不同而需要使用不同性质的乳化液，其产生的废乳化液也有一定的差异。根据金属制品生产过程的不同，废乳化液的来源可分为两个方面：金属原料生产过程产生的，如钢铁厂的冷/热轧废液<sup>[3]</sup>；金属加工过程中产生的，如机械加工企业的废乳化液<sup>[4]</sup>。后者因产废企业数量多且分散是管控的重点。

从废乳化液形成的差异来看，机械加工行业中废乳化液来源有两个方面：成品乳化液使用失效后变成的废乳化液，如金属加工过程中的废切削液；在金属处理过程中因用清洗液冲洗金属表面的油而形成的乳化状态或油水混合态的清洗废液。其中废切削液油含量较高、污染物种类复杂、乳化结构非常稳定，处理难度较大。而从机械加工企业类型来看，废切削液可分为来源于机械零件类、汽车行业类和电子通讯类，其中电子通讯类废切削液的污染物浓度更高，稳定性更强。

根据国家危险废弃物名录中 HW09 的分类，废乳化液主要来源可分为：机械维护、更换和拆卸过程所产生的乳化液(900-005

-09)；切削过程所产生的乳化液(900-006-09)；其他工艺过程所产生的乳化液(900-007-09)。

### 2.1.2 废乳化液的命名

统计了江苏某危废处理中心实际转运过程中废乳化液名称共计 394 个，并绘制成词云图，如图 1 所示。

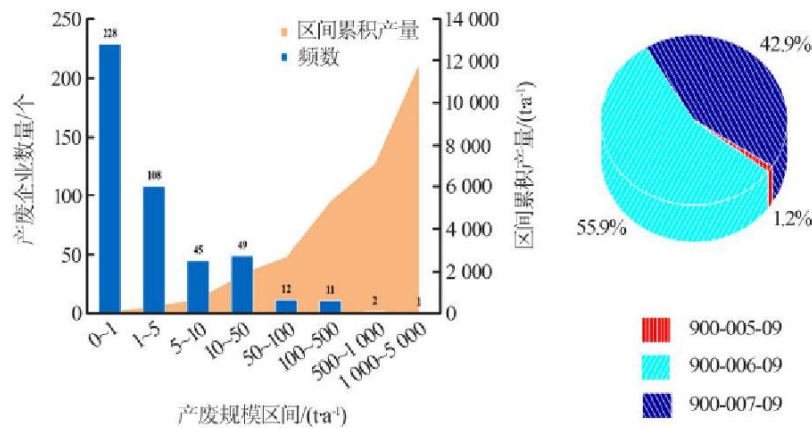


图 1 废乳化液常用名称

各产废企业对危险废物 HW09 所指废水的名称使用较为繁杂，达 90 余种。其中废乳化液、废切削液、油水混合物、清洗废液等名称使用较多，使用频次占比分别为 33.8%、27.3%、12.6%、11.5%。这些命名方式多从加工工艺衍生而来，如废切削液、废磨削液、水帘废水、清洗废液等；也有按照废水状态与成分命名的，如废乳化液、油/炷、水混合物、废油等。其中，加工工艺中的“废切削液”和“清洗废液”来源比较明确，与 HW09 分类中的 900-006-09 和 900-007-09 两亚类对应性较强。“油水混合物”、“废乳化液”、“炷/水混合物”等名称仅反映了废水的乳化状态，没有具体的来源，可简单归为 900-007-09 亚类中。而其他诸如“离心废液”、“废皂化液”和“废脱模剂”等命名过细，则难以判断废水来源和水质特征，会对水质判断造成一定偏差，归类较困难。为了便于废乳化液的统一管理和高效处理，基于上述调研结果，建议对废乳化液分类如下：机械电子加工行业所产生废液统称为“废乳化液”，其中明确来源于切削、磨削等过程的一般采用主动合成的乳化液，可统称为“废切削液”。而明确来源于清洗过程的可统称为“清洗废液”。对于来源不明确，或多种废乳化液混合而成的废乳化液统称为“油水混合物”。

## 2.2 废乳化液的产量特征

图 2 为该地区企业废乳化液的产废情况及危废处理中心收集的废乳化液种类分布情况。



(a) 产废规模

(b) 分类占比

图 2 企业废乳化液产废情况分析

经过统计,当地废乳化液产废企业 456 家,年产量高达 11827.4t 由图 2(a)可知,年产量在 50t 以下的企业多达 430 个,占比 94.3%,但废乳化液产量不足整体产量的 16%;年产量大于 50t 的企业仅有 26 个,占比 5.7%,但废乳化液产量占整体产量的 84%。可以看出该地区小型机械电子加工厂数量较多,污染源分散,但大型机械电子加工企业产废量占主导,其产量呈现“两极分化”的特点。

而江苏某危废处理中心两年内服务企业 394 个,实际转运收集的废乳化液共 13150.7t 图 2(b)是基于国家危险废弃物名录的分类对收集的废乳化液进行分类,发现所收集的废乳化液 900-005-09 亚类 154.41,900-006-09 亚类 7350.5t,900-007-09 亚类 5645.81,分别占比 1.2%、55.9%、42.9%。产量上 900-006-09 亚类最多,大于 900-007-09 和 900-005-09 亚类,说明较多的实际废乳化液主要是切削等机械电子加工过程中所产生的,清洗、喷淋等过程所产生的废乳化液量占比也较大,而机械维护、更换、拆卸等过程在机械加工生产过程产生的含油废水量较少。

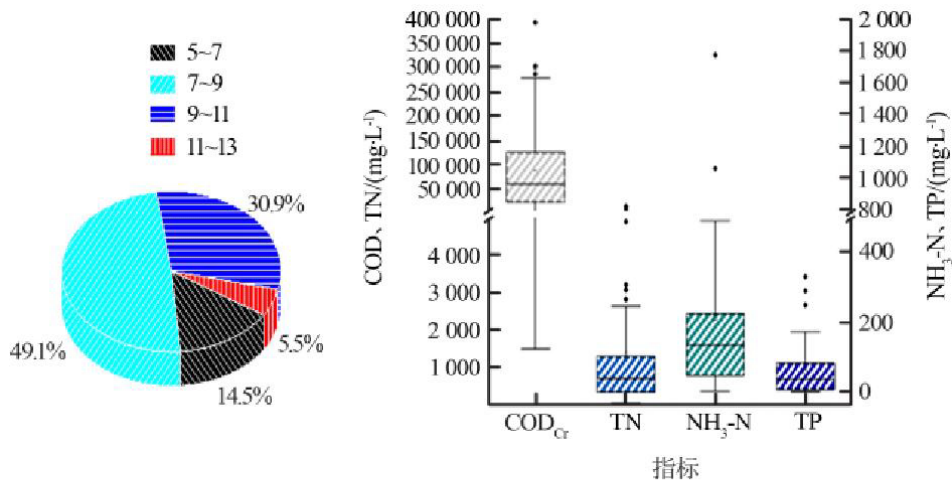
上述结果表明,该区域内废乳化液产废企业众多,其中年产量低于 50t 的企业占主要地位。废乳化液产量具有分散性强,产废规模小的特点。废乳化液中,切削、清洗和其他所产生的废乳化液占主要组成部分。为了减少处理成本,保障处理效果,建议产废量小的企业委托于有资质的危废中心集中处置。而产废量较大的企业,废乳化液较为单一,水量、水质稳定,建议原位自行处置,在减少转运风险的同时可削减相关处理成本。

## 2.3 废乳化液的水质特征

### 2.3.1 废乳化液综合水质特征

为了探明废乳化液的综合水质特征,通过实际调研对 97 家企业中的 59 家废乳化液样品取样测试,并结合相关文献中废乳化液的数据统计了废乳化液的 pH、COD<sub>cr</sub>(139 个样本)、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP5 项常规水质指标,如图 3 所示。

如图 3(a)所示,85.5%的废乳化液 pH 大于 7,其中 pH 在 7~11 之间占比 80.0%,14.5%的废乳化液 pH 在 7 以下。废乳化液 pH 的分布特征与其本身功能需求是相关的。当乳化液 pH 偏低时,大量 H<sup>+</sup>破坏了乳化液界面膜结构<sup>[16]</sup>,体系失稳,乳化液中油被析出,乳化液变质;而乳化液 pH 偏高时,金属摩擦面不易吸附油性剂、润滑剂,导致乳化液的润滑性降低。pH 也直接影响了油滴分散性,Jiling Liang 等<sup>[17]</sup>研究发现,随着 pH 的升高,在相同质量油的条件下,油滴粒径越小,油滴颗粒越多,分散度越高。因此,废乳化液 pH 一般大于 7。



(a)pH 分布 (b)COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 分布

图 3 废乳化液常规污染指标

废乳化液中含有矿物油、动/植物油、乳化剂及其他添加剂，其中油类为 COD<sub>Cr</sub> 的主要贡献者。如图 3 (b) 所示，废乳化液的 COD<sub>Cr</sub> 分布范围广，Q<sub>1</sub>~Q<sub>3</sub> 值显示废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 主要分布于 24125~125997mg/L，而个别废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 达 380000mg/L。废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 分布范围广与乳化液的配方及其作用对象有关。当乳化液中的含水量增大到一定值时，润滑油含量相对过少，难以形成连续的边界润滑膜，从而影响边界润滑效果<sup>[18]</sup>。在实际生产过程中，则通过调整乳化液的稀释倍数来控制乳化液的油含量。如钎孔、钻孔、攻牙等重负荷加工，其通常按 (8~12): 100 稀释<sup>[19]</sup>，轻负荷加工通常按 (4~6): 100 稀释。不同的稀释倍数导致乳化液中油浓度的差异，最终产生了不同 COD<sub>Cr</sub> 的废乳化液。因此，可以推断废乳化液中的油浓度较高，而不同废乳化液油浓度差异较大，COD<sub>Cr</sub> 分布范围广。

NH<sub>3</sub>-N 在 50~600mg/L, TN 在 65~2600mg/L 不等，其 Q<sub>1</sub>~Q<sub>3</sub> 值分别为 47~233, 324~1343mg/L。而 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度大于 400mg/L 占比为 11.1%，而 TN 超过 2000mg/L 占比高达 15.1%，不同废乳化液的含氮量也差异较大。TN 的来源与 NH<sub>3</sub>-N 类似，主要来源于添加剂<sup>[20]</sup>，如苯并三氮唑、三乙醇胺等防锈添加剂废乳化液 TP 的 Q<sub>1</sub>~Q<sub>3</sub> 值为 7~83mg/L，浓度相对较低，主要来源于磷系极压剂、水溶性防锈剂等添加剂<sup>[20]</sup>。

机械电子加工过程中所使用的乳化液种类繁多，组成复杂，一种乳化液中甚至含 60 多种化合物，在已知的机械电子加工乳化液中已有超过 300 种不同的物质被使用<sup>[21]</sup>，这使得废乳化液呈现出水质多变，污染物浓度波动范围大的特点。通过上述分析，首次得出废乳化液的 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 集中分布范围分别为 24000~126000, 50~250, 300~1300.5~100mg/L 而废乳化液中油浓度高，根据测试数据显示，其 B/C 往往低于 0.3，可生化性极差<sup>[22]</sup>，因此 COD<sub>Cr</sub> 是应该重点关注的指标。

### 2.3.2 不同来源的废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 分布特征

基于上述分析，为了进一步揭示废乳化液来源对水质的影响规律，笔者对不同工艺和行业所产生的废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 进行统计分析，如图 4 所示。

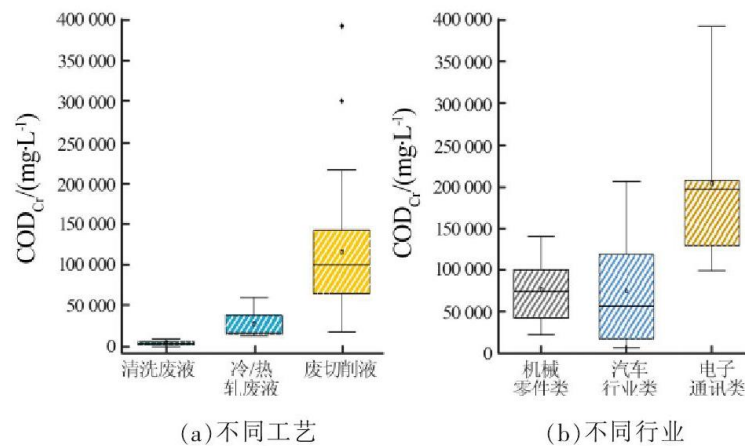


图 4 不同工艺和行业废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 分布

如图 4(a) 所示, 根据其来源不同, 对清洗废液、冷/热轧废液和废切削液的 COD<sub>Cr</sub> 进行统计, 发现不同类型的废乳化液的 COD<sub>Cr</sub> 差异与其工作需求有很强的相关性。清洗废液 COD<sub>Cr</sub> 的平均值为 3873.2mg/L, Q1~Q3 数值为 1548~6000mg/L。相对于其他工艺段的废乳化液, 清洗废液 COD<sub>Cr</sub> 最低, 这主要是因为其产生于工件表面的除油、除杂工段, 所用的水含有少量或不含表面活性剂, 水中的 COD<sub>Cr</sub> 主要来源于工件表面残留的油污。冷/热轧废液的 Q1~Q3 数值为 13750~43175mg/L, 有机物污染浓度高于清洗废液。冷/热轧废液主要产生于钢铁轧制、成型阶段, 起到冷却、润滑和清洗的目的, 此过程所使用的乳化液有两类, 一类是钢铁碱洗、酸洗过程混入大量的油形成的乳化液。如碱洗过程中, 油脂和碱产生皂化反应, 形成脱脂的含油废水; 另一种是购买的商品乳化液, 按一定比例配成, 用于钢铁生产段, 最终失效形成的废乳化液因此, 此类废乳化液中的油类和添加剂含量明显高于清洗废液, COD<sub>Cr</sub> 自然也高于前者。废切削液 COD<sub>Cr</sub> 的 Q1~Q3 数值为 59000~149567mg/L, COD<sub>Cr</sub> 分布范围更广。切削工艺在保护刀具及加工金属面的同时, 需要达到较高的加工质量, 所使用的切削液品质要求更高; 且切削液的稀释倍数小, 油浓度往往更高, 所产生的废切削液的 COD<sub>Cr</sub> 普遍高于前两者。

不同工艺段所产生的废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 差异较大, 其中切削工艺所产生的废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 更高, 分布范围广。从废切削液来源行业来分析, 如图 4(b) 所示, 以机械零件行业为代表的粗加工行业产生的废切削液 COD<sub>Cr</sub> 主要集中在 17312~56573mg/L; 以电子元器件加工行业为代表的精加工行业产生的废切削液 COD<sub>Cr</sub> 主要集中在 122244~253939mg/L。而汽车加工行业产生的废切削液 COD<sub>Cr</sub> 主要集中在 42500~112830mg/L, 这包含汽车车架生产的粗加工工段和发动机零部件加工的精加工工段所产生的混合废切削液。

由此可见, 不同工艺和行业所产生的废乳化液有机污染物浓度差异较大, 值得注意的是切削工艺中, 电子通讯行业所产生的废切削液 COD<sub>Cr</sub> 最高, 且分布范围更为广泛。而随着加工精度及技术要求的提高, 所产生的废乳化液 COD<sub>Cr</sub> 也越高, 污染更加严重。

## 2.4 废乳化液稳定性特征

研究者们主要关注了废乳化液的 COD<sub>Cr</sub>、TN 等指标, 很少对其稳定性进行分析评价, 而废乳化液的稳定性是选择处理技术的重要因素之一。通过对废乳化液样品取样测试, 统计了多种废乳化液的油滴平均粒径 (49 种) 和 Zeta 电位 (57 种), 如图 5 所示。

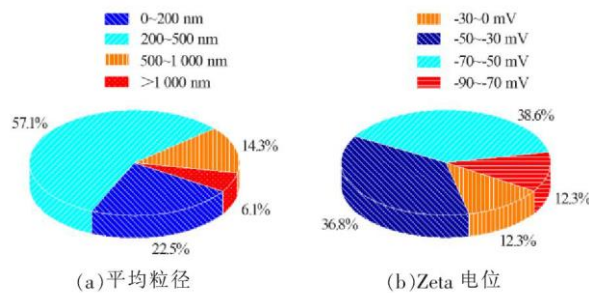


图5 废乳化液平均粒径和 Zeta 电位分布

如图 5(a) 所示, 油滴粒径小于 200nm 的废乳化液种类占比 22.5%, 油滴粒径在 200-500nm 范围的占比 57.1%, 微米级别液滴的乳化液占比仅 6.1%。可见废乳化液的油滴粒径基本处于纳米级别。在乳化液中, 油滴平均粒径越小, 在水相中分散就越均匀充分, 乳化液越稳定。如图 5(b) 所示, 废乳化液绝大部分 Zeta 电位在 -30—70mV, 占比 75.4%, 更有数种废乳化液的 Zeta 电位绝对值超过 70mV, 占比高达 12.3%, 表现出较强的负电性。根据胶体稳定性理论, 当 Zeta 电位绝对值超过 30mV 时, 胶体体系具有较强的稳定性。而废乳化液的负电性更强, 液滴之间产生较大的静电斥力, 难以自发聚集、聚并。阴离子表面活性剂在乳化液稳定中起了重要的作用, 它将原本非极、憎水性的油滴变成了带负电荷的胶核, 表面能降低, 在界面膜和静电斥力作用下, 液滴难以实现聚并分离。H. Katepalli 等(7)研究发现, 当表面活性剂减少时, 乳化液将逐渐失稳, 油滴粗粒化。因此, 与一般含油废水中的浮油、分散油不同, 在表面活性剂作用下, 油滴以微纳米级油滴形式稳定分散于水中, 形成更加稳定的乳化液, 乳化状态甚至可维持数年之久。机械电子加工废乳化液油滴粒径小, Zeta 电位绝对值高, 乳化结构稳定, 这是限制废乳化液资源化和减量化的重要原因。

### 3 结论与建议

废乳化液是工业生产过程中的最难处理的废水之一, 通过对机械电子加工废乳化液水量、水质的调研分析, 首次总结出此类废水的污染特征, 并根据该特征给出相关处理建议。

(1) 由于来源于不同工段和加工工艺, 废乳化液种类繁多, 且命名繁杂。建议对其统一命名, 统称“废乳化液”, 根据来源和产生工段分为“废切削液”和“清洗废液”, 对来源不明的称为“油水混合物”。统一命名将规范危废管理, 实现废乳化液的合理分类和高效处置。

(2) 废乳化液水量上具有产废规模小的企业数量多但废乳化液总量少, 产废规模大的企业数量少但废乳化液总量多的“两极分化”特征。建议产废规模小的企业委托第三方集中处理, 处理成本相对较低, 处理效果有保障; 而产废规模大的企业采用原位处理, 便于处理系统的稳定运行, 极大地减少转运风险并降低处理成本。

(3) 首次提出了废乳化液的  $COD_{Cr}$ 、 $NH_3-N$ 、 $TN$ 、 $TP$  分布范围分别为 24000-126000, 50-250, 300-1300.5-100mg/L, 污染物浓度高且不同废乳化液污染物浓度差异大。同时, 就稳定性而言, 废乳化液油滴粒径小, 粒径在 500nm 以下的占 79.5%; Zeta 电位绝对值高于 30mV 的占比 87.7%, 具有良好的稳定性, 其处理难度较大。

### 参考文献

[1] 姜鑫, 黄天寅, 李晓峰, 等. 超滤+UASB+接触氧化组合工艺处理乳化液废水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 100-103.

[2] 马士龙. 物化-生化组合工艺处理不同来源乳化液废水研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.

- 
- [3]岳丽芳, 赵延虎. 首钢京唐公司冷轧废水处理工程实例[J]. 工业水处理, 2018, 38(12):101-104.
- [4]张涛. 机械加工乳化液废水的处理研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- [5]黄春林, 卢智昊. 金属加工乳化液废水处理工程实例[J]. 工业水处理, 2018, 38(5):102-104.
- [6]冯凡让, 郑帅飞, 胡元娟, 等. 振动膜和碟管膜联合处理高浓度废乳化液[J]. 工业水处理, 2019, 39(2):70-74.
- [7]胡娜, 余玲玲, 姚明辉, 等. 真空低温蒸馏在废乳化液处置中的应用研究[J]. 广东化工, 2019, 46(1):34-35.
- [8]An Chunjiang, Huang Gordon, Yao Yao, et al. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 537-556.
- [9]Peng Kaiming, Xiong Yongjiao, Lu Lijun, et al. Recyclable functional magnetic nanoparticles for fast demulsification of waste metalworking emulsions driven by electrostatic interactions [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(8): 9682-9690.
- [10] Chawaloeshon N, Guiraud P, Painmanakul P. Analysis of cutting-oil emulsion destabilization by aluminum sulfate [J]. Environmental Technology, 2018, 39(11): 1450-1460.
- [10] Guvenc S Y, Okut Y, Ozak M, et al. Process optimization via response surface methodology in the treatment of metal working industry wastewater with electrocoagulation [J]. Water Science and Technology, 2017, 75(4): 833-846.
- [11] Gutierrez G, Lobo A, Benito J M, et al. Treatment of a waste oil-in-water emulsion from a copper-rolling process by ultrafiltration and vacuum evaporation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2/3): 1569-1574.
- [12] Feng Wanli, Yin Yao, Mendoza M D, et al. Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 84-89.
- [13] Demirbas E, Kobya M. Operating cost and treatment of metalworking fluid waste water by chemical coagulation and electrocoagulation processes [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 105:79-90.
- [14]田禹, 范丽娜. 高浓度乳化液废水处理工艺及机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(6):756-758.
- [15]李新冬, 黄万抚. 不锈钢膜过滤混凝工艺处理铝材加工中乳化废水研究[J]. 膜科学与技术, 2012, 32(5):103-106.
- [16]Shahid S, Gurram S R, Basavaraj M G. pH responsive emulsions by exploiting aggregation of oppositely charged nanoparticles and polyelectrolytes [J]. Langmuir, 2018, 34(17): 5060-5071.
- [17]Liang Jiling, Du Na, Song Shue, et al. Magnetic demulsification of diluted crude oil-in-water nanoemulsions using oleic acid-coated magnetite nanoparticles [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering

---

g Aspects ,2015 ,466:197-202.

[18]刘宸旭, 陈朝浪, 张继平, 等. 油水乳化液的边界润滑行为及机理分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 48-54.

[19]熊红旗, 陈国需, 蒋途相. 环保型重负荷加工全合成切削液的研制[J]. 润滑与密封, 2015, 40(12): 103-110.

[20]刘镇昌. 切削液技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 70-77.

[21]MacAdam J, Ozgencil H, Autin O, et al. Incorporating biodegradation and advanced oxidation processes in the treatment of spent metalworking fluids [J]. Environmental Technology, 2012, 33(24): 2741-2750.

[22]张笑维, 许芝, 费洪剑, 等. 生物固定床处理混凝后乳化液出水[J]. 四川环境, 2018, 37(5): 50-55.

[23]尤勇. 宝钢五冷轧含油废水处理工艺改善研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[24]刘杨, 王占胜, 杨杰, 等. 影响水包油型乳化液稳定性的因素研究[J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1266-1269.

[25]王炜, 封顶成. 乳化油废水 Zeta 电位值的影响因素研究[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(6): 55-57.

[26]Politova N I, Tcholakova S, Tsibranska S, et al. Coalescence stability of water-in-oil drops: Effects of drop size and surfactant concentration [J]. Colloids & Surfaces A :Physicochemical & Engineering Aspects, 2017, 531:32-39.

[27]Katepalli H, Bose A, Hatton T A, et al. Destabilization of oil-in-water emulsions stabilized by non-ionic surfactants: effect of particle hydrophilicity[J]. Langmuir, 2016, 32(41): 10694-10698.