

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.019

机械加工废乳化液分类处理工艺及抗冲击运行策略

贺梦凡¹, 吴宝强¹, 王宇², 陆斌¹, 黄翔峰¹, 郑维伟¹,
薛佳², 杨文新², 彭开铭¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 江苏绿赛格再生资源利用有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 机械加工废乳化液污染物种类多、浓度高且波动大,给传统单一处理工艺的稳定高效运行带来较大挑战。基于废乳化液集中处理的技改项目,构建了机械加工废乳化液物化-生化分类处理工艺,并重点探究了污染物负荷对生物硝化功能的影响。工程实践表明,物化处理段分别采用蒸发、磁破乳分离、混凝气浮等技术进行分类分质处理,可显著提高对复杂废乳化液的普适性;对TN和NH₃-N的去除率不足60%,但对COD、油类、SS和TP等的平均去除率均大于90%。在生化段的运行调试中发现,进水COD和NH₃-N波动范围分别为2 885~5 100和60~170 mg/L,它们是显著影响生物脱氮的主控因素;进水COD及NH₃-N容积负荷分别与生化出水NH₃-N浓度呈正相关,相应地,保证系统稳定硝化的临界容积负荷分别为1.13、0.034 kg/(m³·d)。技改项目的综合处理成本较改造前显著降低。分类分质处理的工程实践与生化段运行负荷控制研究为废乳化液高效稳定处理提供了工艺思路和运行参数借鉴。

关键词: 废乳化液; 油水分离; 分类处理; 生物脱氮

中图分类号: X52 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0122-08

Classified Treatment Process for Mechanical Processing Waste Emulsion and Anti-impact Load Operation Strategy

HE Meng-fan¹, WU Bao-qiang¹, WANG Yu², LU Bin¹, HUANG Xiang-feng¹,
ZHENG Wei-wei¹, XUE Jia², YANG Wen-xin², PENG Kai-ming¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Jiangsu Lusaige Regenerated Co. Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Mechanical processing waste emulsions contain diverse pollutants with high concentrations and significant fluctuations, posing significant challenges to the stable and efficient operation of traditional single treatment process. This study, based on a technical transformation project for centralized waste emulsion treatment, developed a combined physicochemical and biochemical

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978490); 上海市自然科学基金资助项目(20ZDR1461200); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202003-02)

通信作者: 彭开铭 E-mail: pengkaiming@tongji.edu.cn

treatment process tailored for mechanical processing waste emulsions. The study focused on exploring the impact of pollutant load on biological nitrification. In the physicochemical treatment stage, practices such as evaporation, magnetic demulsification and separation, coagulation, and air flotation were implemented to classify and treat emulsions. These methods significantly enhanced the process's versatility for handling various waste emulsions. While the removal rates of TN and $\text{NH}_3\text{-N}$ were below 60%, the average removal rates of COD, oil, SS, and TP exceeded 90%. In the biochemical treatment stage, operational and debugging processes revealed that influent COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations fluctuated between 2 885–5 100 mg/L and 60–170 mg/L, respectively. These fluctuations significantly affected the stability of biological denitrification. The $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in biochemical effluent was positively correlated with the influent COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ volumetric loads. Critical influent COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ volumetric loads for stable biological nitrification were identified as $1.13 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ and $0.034 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, respectively. Overall, the comprehensive treatment cost of the technical transformation project was significantly reduced compared to the previous process. The engineering practices and operational load control studies provide valuable insights and operational parameters for the efficient and stable treatment of waste emulsions.

Key words: waste emulsion; oil water separation; classified treatment; biological denitrification

在机械电子加工行业,乳化液被广泛应用于切割、研磨、钻孔和锻造等工段,发挥润滑、冷却、防锈、清洗等功能。由于产品、工段和加工精度不同,废弃后的乳化液种类多、成分复杂、污染负荷波动明显,被列为国家危险废物名录HW09。机械加工废乳化液含有300多种物质^[1],包括高浓度矿物油以及多种油性剂、极压剂、乳化剂、防锈剂和抑菌剂等生物难降解和有毒有害物质^[2-3]。前期调研发现,其COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN分别集中分布在24 000~126 000、50~250以及300~1 300 mg/L^[4],属于高COD、高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 废水,且水质波动明显。

废乳化液处理工艺通常包括物化+生化两部分^[5],物化段以混凝气浮技术为主,生化段则以接触氧化技术为主^[6-7],工艺路线单一导致物化段对废乳化液适应性较差,易对生化段造成冲击,影响出水水质稳定。因此,构建能有效适应污染负荷波动、具有较高破乳分离效率的集成技术尤为关键。

生物脱氮是生化段对水质波动最为敏感的过程之一。然而,当前对废乳化液生化处理的研究主要关注对COD、油类、SS等污染物指标的削减效果^[8-9],在污染负荷长期波动情况下,生化段的稳定脱氮面临较大挑战,特别是进水负荷波动对硝化效果的影响规律仍不明确。

笔者基于废乳化液分类分质处理的思路构建

多模式处理工艺,并开展工程实践,提高了物化段对废乳化液的普适性;研究了进水负荷对生化段硝化效果的影响规律,总结了其影响机制,明确了保持稳定硝化效果的COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 临界负荷以及工程调试措施,为废乳化液高效处理提供工艺思路和运行策略。

1 废乳化液处理工艺的构建与工程改造

1.1 工程背景

江苏某危险废弃物集中处理企业主要收集处理周边地区机械电子加工、金属表面处理、压延、喷涂等行业产生的废乳化液。原处理工艺主要包括:化学混凝破乳/超滤膜分离/UASB厌氧反应池/缺氧反应池/接触氧化池/二沉池,设计处理规模 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 。出水水质执行《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015),COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的排放限值分别为500、45、70、8 mg/L。

对该处理中心连续一年的跟踪调研发现:该企业年接收数百家企业产生的各类废乳化液,其COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP分别为1 500~392 800、50~3 200、250~3 300以及250~1 200 mg/L,具有服务企业数量众多、水质波动范围大的特点。由于物化段处理模式单一,难以适应复杂多样的废乳化液,且对进水负荷波动影响生化段尤其是脱氮效能考虑不足,导致实际运行规模仅 $1 470 \text{ m}^3/\text{a}$,不能满足产

能和运行效果的需求。

1.2 废乳化液多模式处理工艺的构建

基于前期对废乳化液特征分析和工程现场跟踪调研,根据废乳化液的来源和水质特征可将其分为3类:①清洗废液,主要来自金属表面清洗过程,油浓度较低,乳化结构稳定性较差,COD为1 500~10 000 mg/L;②粗加工废切削液,主要来自金属零件粗加工过程,油浓度较高,表面活性剂浓度较低,具有一定的稳定性,COD为10 000~50 000 mg/L;③精加工废切削液,主要来自电子芯片、发动机制造等精密加工工段,表面活性剂浓度较高,乳化结构

稳定性极强,COD一般大于50 000 mg/L。

针对不同类型废乳化液,在原有处理设施基础上分别对物化段和生化段实施了一系列工艺优化和扩容等技改工作,构建了废乳化液多模式处理工艺(见图1)。由磁破乳分离、机械式蒸汽再压缩(MVR)构成一级物化段,由混凝气浮、膜分离构成二级物化段。3类乳化液采用多模式处理:①清洗废液直接进入二级物化段,通过混凝气浮或膜分离实现破乳分离;②粗加工废切削液采用磁性颗粒进行破乳分离;③精加工废切削液采用MVR实现油水分离。

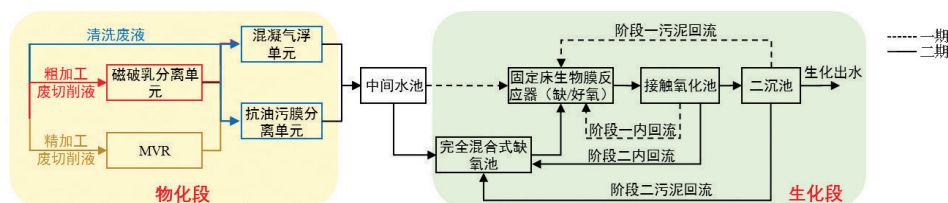


图1 废乳化液多模式处理工艺流程

Fig.1 Multi-mode process flow for waste emulsion treatment

生化段基于边运行边改造的策略,在原处理设施基础上构建了改良缺氧-接触氧化(A-O)工艺,分为一期改造和二期扩容两个阶段。一期原缺氧反应池改造为缺/好氧可切换的固定床生物膜反应器,有效池容75.4 m³,采用纤维组合填料,池内装有旋混曝气器,池顶封闭,风机进风口与池顶相连形成闭环结构,以缺氧状态运行;好氧段采用原生物接触氧化池,有效池容101.9 m³。二期将原UASB反应池改建为完全混合式缺氧池,有效池容170.7 m³,并加装2台潜水搅拌机改善混合条件,拆除固定床生物膜反应器顶盖,切换为好氧状态运行。生化段整体回流比为400%~500%。

1.3 废水水质指标检测

原水、物化及生化出水的COD(重铬酸钾法)、SS(质量法)、石油类、动植物油(红外分光光度法)、NH₃-N(水杨酸法)、TN(过硫酸盐氧化法)、TP(抗坏血酸法)等指标检测频率为12次/月;生化段进出水的COD、NH₃-N、TN、TP等指标检测频率为1次/d。废乳化液原液采样点位于一级物化段前的混合均质池,物化出水(生化进水)采样点位于中间水池,生化出水采样点为二沉池出水口。

2 废乳化液多模式处理效果分析

2.1 多模式工艺运行效果及分析

多模式工艺自2019年11月下旬完成技改后,

稳定运行至今。跟踪工艺建成后第一年(2019年12月—2020年11月)的运行情况(见表1)发现,单日处理量达20~40 m³/d,实际处理规模由技改前的1 470 m³/a大幅提升至8 000 m³/a以上,接收并处理的废乳化液来自周边地区的425家机械加工企业,囊括精密机械加工、金属加工处理、电子元器件生产、木材加工、生物医药等诸多行业,涉及切削、清洗、铸造、锻造等工段。相比技改前,在处理规模、服务企业数量、辐射范围等方面均有明显提升。

表1 废乳化液多模式工艺处理的效果分析

Tab.1 Effect analysis of multi-mode process for waste emulsion treatment

项目	原水浓度/ (mg·L ⁻¹)	物化段		生化段	
		出水浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均去除率/%	出水浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均去除率/%
COD	57 014±13 706	4 491±2 330	92.1	148±144	96.7
SS	4 509±3 789	38±27	99.2	20±12	47.3
石油类	3 276±2 868	25±34	99.2	3.72±4	85.1
动植物油	2 524±1 255	43±29	98.3	5.04±4	88.3
NH ₃ -N	501±275	227±197	54.7	5.11±7	97.7
TN	1 115±498	455±228	59.2	31.4±7	93.1
TP	123±63	1.99±4.08	98.4	0.135±0.2	93.2

注: 数据来源于技改完成后连续运行12个月的月监测结果。

从污染物去除效率来看,工艺整体出水水质达

标。物化段对COD、油类、SS和TP等的平均去除率均在90%以上;对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的去除率不足60%。这是由于物化段以破乳和除油为主,难以高效去除各类水溶性添加剂,尤其是酰胺、醇胺、胺盐等含氮组分,而这些含氮物质是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的重要来源^[2],进而对生化段的脱氮功能提出了较高要求。

在多模式处理工艺中,磁破乳分离通过磁性颗粒在磁场作用下强化油滴聚集聚并,絮体分离速度可提高10倍,絮体体积比从45%减至10%,有效提高了破乳分离效率^[3],对破乳难度较低的粗加工废切削液适应性较好。MVR技术对不同特征废乳化液均具有理想的油水分离效果,但能耗普遍较高^[10],因此仅用于高油浓度且稳定性极强的精加工废切削液的油水分离。二级物化段的混凝气浮和膜分离单元可直接用于低油浓度、乳化稳定性差的清洗废液的油水分离,有效避免了混凝气浮普适性差、药剂投加量大、分离效率低、次生危废量大以及膜分离存在的膜污染、分离效率较低等问题^[11]。

多模式工艺打破了废乳化液处理路线单一的工程现状^[6-7,12],解决了普适性差的问题,将处理对象从简单清洗废液拓展到芯片、飞机、汽车等高端精密制造业产生的精加工废切削液,COD可达1 500~126 000 mg/L。同时,采用分类分质处理的思路,综合考量来水特征、技术适应性和处理成本,灵

活组建适于各类乳化液的处理模式,通过负荷的合理分配提高处理效率,并降低处理成本。

2.2 物化出水的水质波动分析

物化段虽能适应不同类型废乳化液,大幅削减各类污染物,但物化出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN等浓度依然高、波动范围大。通过分析物化出水连续148次日监测数据,发现COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN集中分布范围分别为2 885~5 100、60~170和170~240 mg/L,平均浓度分别为3 912、140和230 mg/L,变异系数分别为36.46%、79.21%和51.41%,水质波动明显。

由于废乳化液的来源、用途、配方和水量存在差异,导致物化段对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN等指标的削减效果不同。调研发现,工程上废乳化液物化段出水COD分别为700~72 800^[13]、3 120~38 730 mg/L^[14],波动均较为明显,而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN波动情况鲜见报道。物化出水的波动可能对生化段稳定运行造成影响,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在TN中占比较大,生物脱氮十分依赖硝化过程。然而,对水质、水量和环境因素变化均较为敏感的硝化菌^[15],是最易受负荷波动影响的菌群之一。因此,有必要探明进水负荷对硝化效果的影响规律,以及对高负荷的预防和调试措施。

3 COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷对硝化功能的影响规律

生化段两期改良A-O工艺均能长期稳定运行。生化段进、出水COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化见图2。

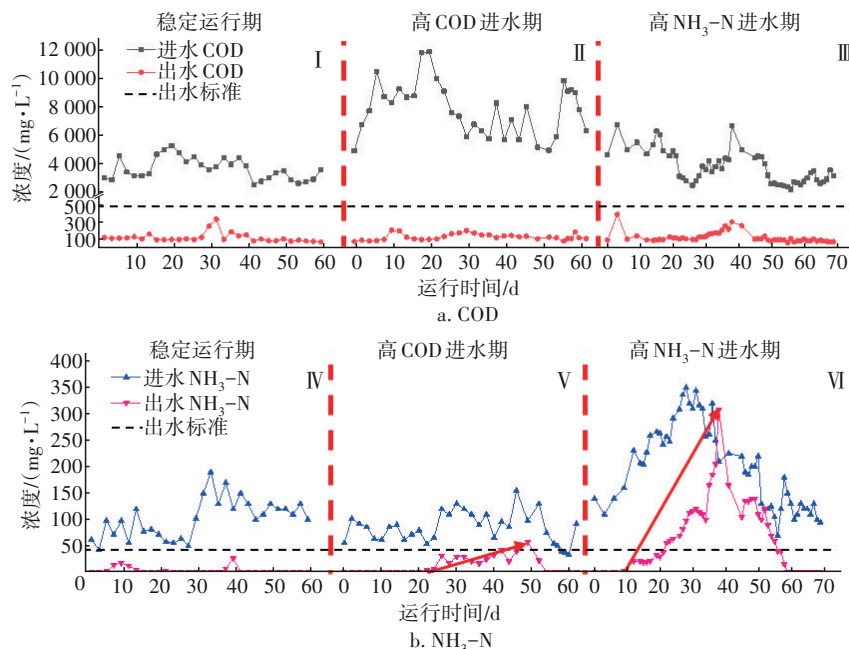


图2 生化段进、出水COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度

Fig.2 Concentration of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ in influent and effluent of biochemical section

图2(a) I、图2(b) IV分别为生化段稳定运行期的进出水 COD 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度水平,出水 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别为 72~340、0~27 mg/L,长期稳定达标。

在调试运行阶段,分别发现进水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 冲击导致系统硝化效果变差的现象,如图2(b)的 V、VI 中红色箭头所示。

对稳定运行期、高 COD 进水期以及高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进水期的进水 COD 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度水平进行分析,如图3所示。结合图2(b)的 V、VI,发现在高 COD 进水期和高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进水期,尽管出水 COD 稳定达标,但出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度明显上升,表明硝化菌数量和活性受到影响,即进水 COD 或 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷变化导致硝化功能异常。

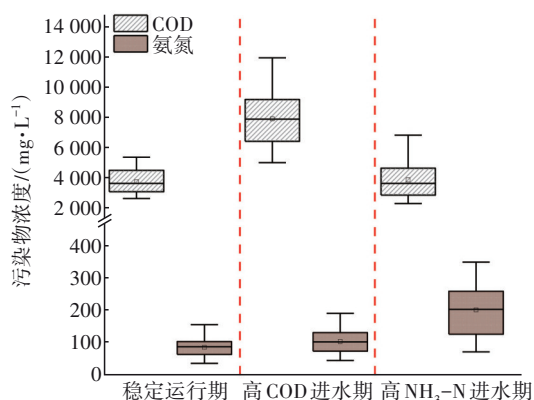


图3 生化段不同运行阶段进水COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分布

Fig.3 Distribution of influent COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in different operation stages of biochemical section

3.1 高COD负荷对硝化功能的影响

高COD进水期间,主要调试运行参数如下:工艺处于一期(5月12日—7月13日),生化段理论水力停留时间(HRT)约为8 d;固定床生物膜反应器(缺氧池)DO为0.11~0.51 mg/L,pH为7.21~7.81;接触氧化池DO为1.93~6.50 mg/L,pH为6.6~7.7。各池水温集中在31~32℃。将出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 上升时期(26 d前)进水COD容积负荷与8 d后的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进行相关性分析,如图4所示。

由图4可知,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与COD容积负荷的相关程度较高。尤其是当进水COD负荷超过1.13 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 明显上升,并随负荷的提高进一步上升,且高COD负荷对硝化效果的影响存在滞后效果,滞后时间约为8 d。

调试运行期的第50~51天,向接触氧化池补充

活性污泥,同时在二沉池排出相同体积的剩余污泥,并以低负荷培养。自第52天起,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 快速下降,第54天起出水中未检出 $\text{NH}_3\text{-N}$,硝化效果恢复正常。综上所述,系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除能力对进水COD负荷变化较为敏感,低负荷有助于硝化功能缓慢恢复。

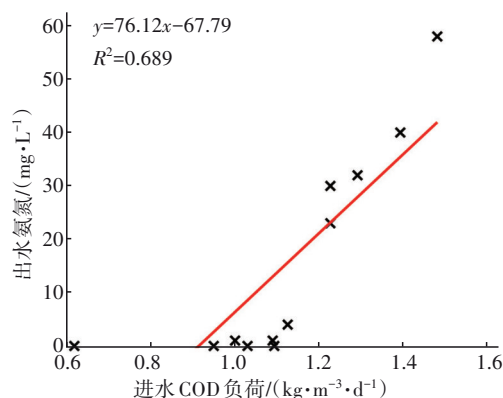


图4 COD容积负荷与出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between COD volumetric load and effluent $\text{NH}_3\text{-N}$

高COD负荷下硝化效果恶化已有报道。在生活污水生化处理研究中,周童等^[16]发现当有机负荷从2.14 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)增至5.42 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率由97.0%降至60.0%。还有人关注了废乳化液生化处理过程中可耐受的COD容积负荷变化,马士龙^[13]采用水解酸化/接触氧化工艺处理振动膜破乳出水,系统可耐受的COD负荷计算为1.13 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),与本研究一致。林方敏等^[17]使用UMBR反应器处理混凝气浮破乳出水,COD容积负荷为1.50 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),也与本研究相近。因此,机械加工废乳化液的生化处理系统,相比于生活污水,更宜在低负荷条件下运行,其原因可能是水质的复杂性、波动性、有毒有害且可生化性差^[2,18],更容易对微生物尤其是硝化菌造成不利影响。

COD负荷对硝化效果的影响可能是异养菌与硝化菌的竞争所致。在较高的COD负荷下,繁殖速率快、生长在生物膜或污泥絮体外部的异养菌层增厚,大量消耗DO并阻碍了DO向内部的扩散,硝化菌缺少电子受体,代谢受阻,数量和活性大大降低^[19]。还有研究发现,当COD负荷升高时,系统可发挥硝化作用的空间被压缩,只有当COD降解至较低水平,硝化菌才能逐渐占据优势,发挥硝化作用^[20]。

3.2 高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷对硝化功能的影响

高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进水期间主要调试运行参数如下:工艺处于二期(10月14日—12月22日),生化段理论HRT约10 d,缺氧池DO为0.12~0.23 mg/L、pH为7.00~7.92,接触氧化池DO为2.06~6.95 mg/L、pH为6.80~7.88,各池水温集中在21~27℃。将出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 上升期(38 d前)进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 容积负荷与8 d后的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进行相关性分析(见图5)。

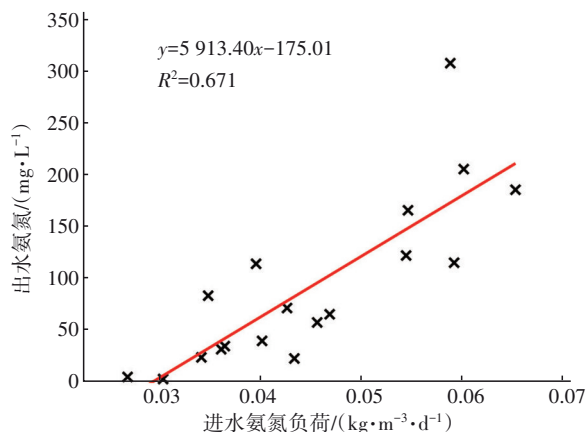


图5 $\text{NH}_3\text{-N}$ 容积负荷与出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between $\text{NH}_3\text{-N}$ volumetric load and effluent $\text{NH}_3\text{-N}$

由图5可知,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 容积负荷的相关程度同样较高。尤其当进水负荷高于0.034 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 明显上升,并随进水负荷的提高而进一步上升,且高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷对硝化效果的影响同样存在约8 d的滞后时间。

第39天起向接触氧化池补充新鲜污泥,置换原有污泥,并连续调低进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷,对应地,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 持续下降,第59天起未检出 $\text{NH}_3\text{-N}$,硝化效果恢复正常。综上所述,系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除能力对进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷变化同样较为敏感,低负荷有助于硝化功能缓慢恢复。

水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以游离氨(FA)和离子态两种形式存在,其中,FA既是硝化过程的基质,对硝化菌也具有多种直接抑制甚至毒害作用,可概括为以下3种途径:①FA直接抑制参与质子转移和电子传递的酶,阻碍ATP合成,影响硝化菌合成代谢过程^[21-22];②FA分解胞外聚合物、溶解细胞膜,并直接杀死细菌^[23];③FA通过细胞膜被动扩散到细胞质,吸收质子导致细胞质碱化^[24]。为平衡pH,细胞过度使用钾泵运输机制,细胞缺钾^[25],导致特定酶促反应的抑

制,影响硝化过程。

3.3 低负荷控制下稳定运行情况

为验证临界负荷值的可靠性,将临界负荷编入该技改项目运行操作手册,指导生化段运行,持续监测硝化以及反硝化效果(见图6)。由图6可知,在90 d运行期间,生化进水COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷均低于临界值,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN长期稳定达标,系统脱氮功能高效稳定。

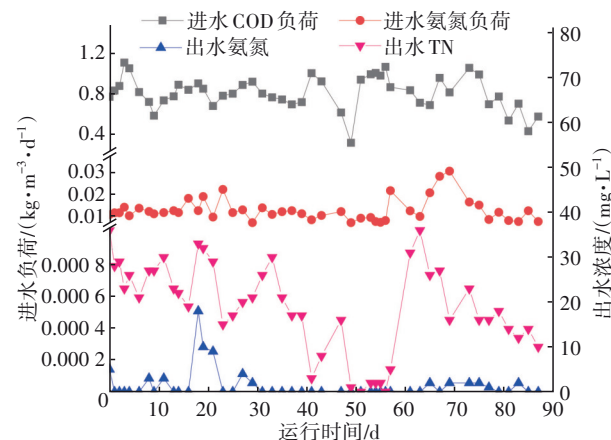


图6 低于临界负荷值时的连续运行效果

Fig.6 Continuous operation effect below critical load

4 技术经济指标

上述多模式工艺主要在原工艺的基础上大幅提高了处理规模,减少了药剂和人力消耗。经计算,原工艺所需药剂费用为130.00元/ m^3 、能耗费用(电费)为134.47元/ m^3 、人工费用为468.89元/ m^3 ,综合处理成本为733.36元/ m^3 ;采用多模式工艺,药剂费约8.59元/ m^3 、能耗费(电费)为122.04元/ m^3 、人工费为108.16元/ m^3 ,综合处理成本为238.79元/ m^3 ,较原工艺大幅下降。

5 结论

① 构建了废乳化液的多模式处理工艺,包括由低温蒸发、磁破乳分离、混凝气浮、膜分离等单元组成的两级物化处理段,以及由固定床生物膜、接触氧化等组成的缺氧-好氧生物处理段。工程实践证明,该工艺大幅提升了处理规模,对来源广泛的废乳化液表现出了良好的适应性,并降低了处理成本。

② 物化段对油类、SS、TP和COD等污染物平均去除率均在90%以上,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的去除率不足60%;出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN集中分布范围分别为2885~5100、60~170和170~240 mg/L,出水水

质的波动对生化段抗负荷冲击以及脱氮功能的稳定提出了较高要求。

③ 生化出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与进水 COD 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 容积负荷呈正相关。进水 COD 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷分别低于 1.13、0.034 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时,生化段脱氮功能长期稳定,具有较强的工程意义和推广价值。

参考文献:

- [1] RABENSTEIN A, KOCH T, REMESCH M, *et al.* Microbial degradation of water miscible metal working fluids [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, 63(8): 1023-1029.
- [2] 张力, 李丹丹, 张立, 等. 乳化液添加剂的类型、作用及发展趋势[J]. 润滑油, 2018, 33(1): 30-33.
ZHANG Li, LI Dandan, ZHANG Li, *et al.* Types, applications and trends of additives used in emulsions [J]. Lubricating Oil, 2018, 33(1): 30-33 (in Chinese).
- [3] XIONG Y J, HUANG X F, LU B, *et al.* Acceleration of floc-water separation and floc reduction with magnetic nanoparticles during demulsification of complex waste cutting emulsions [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 89: 80-89.
- [4] 吴宝强, 黄翔峰, 熊永娇, 等. 江苏某地区机械电子加工废乳化液污染特征分析[J]. 工业水处理, 2021, 41(3): 57-62.
WU Baoqiang, HUANG Xiangfeng, XIONG Yongjiao, *et al.* Contaminant properties analysis of waste emulsion from mechanical electronic processing industry in Jiangsu district [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(3): 57-62 (in Chinese).
- [5] 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.
JIANG Xin, HUANG Tianyin, LI Xiaofeng, *et al.* Treatment of emulsion liquid wastewater by a combined process of ultrafiltration/UASB/contact oxidation [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(22): 100-103 (in Chinese).
- [6] 王福祥. 电子产品型机 CNC 加工含油切削液废水处理工程实例[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(6): 35-38.
WANG Fuxiang. An engineering case of cutting oil wastewater treatment in electronic product processing [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(6): 35-38 (in Chinese).
- [7] 孙秀君. 机械加工生产废水处理回用工程实例[J]. 工业水处理, 2016, 36(1): 96-99.
SUN Xiujun. Instance of the reusing project on the treatment of industrial wastewater from machinery processing [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(1): 96-99 (in Chinese).
- [8] 童新, 周国勋, 王军辉, 等. 机械加工行业乳化液废水处理工艺改造研究及应用实例[J]. 工业水处理, 2014, 34(9): 87-89.
TONG Xin, ZHOU Guoxun, WANG Junhui, *et al.* Process renovation research on emulsion wastewater treatment in mechanical processing enterprises and its application examples [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(9): 87-89 (in Chinese).
- [9] 高融, 张进, 孟平. MBR 平板膜在机械加工废水中应用及清洗研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(2): 134-135.
GAO Rong, ZHANG Jin, MENG Ping. Research on application and cleaning of MBR flat membrane in mechanical processing wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(2): 134-135 (in Chinese).
- [10] SI Z T, HAN D, SONG Y, *et al.* Experimental investigation on a combined system of vacuum membrane distillation and mechanical vapor recompression [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2019, 139: 172-182.
- [11] GE J L, ZHANG J C, WANG F, *et al.* Superhydrophilic and underwater superoleophobic nanofibrous membrane with hierarchical structured skin for effective oil-in-water emulsion separation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(2): 497-502.
- [12] 唐国平, 陈德超, 黄振旭, 等. 废矿物油、废乳化液废水处理工程实例[J]. 水处理技术, 2017, 43(4): 128-130.
TANG Guoping, CHEN Dechao, HUANG Zhenxu, *et al.* Treatment engineering project of waste mineral oil and emulsion wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(4): 128-130 (in Chinese).
- [13] 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.
MA Shilong. Study on Physico-chemical-Biochemical Process to Treat Different Emulsion Wastewater [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013 (in Chinese).

- [14] XIONG Y J, WU B Q, HUANG X F, *et al.* Coupling magnetic particles with flocculants to enhance demulsification and separation of waste cutting emulsion for engineering applications [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 105: 173–183.
- [15] DING Y H, REN H Q, WANG Q. Inhibition of the activities of activated sludge in a sequencing batch reactor by high-strength ammonium nitrogen [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(13/15): 2792–2798.
- [16] 周童, 张刚, 邓海华. 污染物负荷对曝气生物滤池处理效果的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(5): 57–60, 64.
ZHOU Tong, ZHANG Gang, DENG Haihua. Effect of pollutant loading on effectiveness of hypoxia/aerobic BAF system [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(5): 57–60, 64(in Chinese).
- [17] 林方敏, 李鑫华. 气浮—UMBR工艺处理回用机械加工废水[J]. *给水排水*, 2010, 36(9): 56–58.
LIN Fangmin, LI Xinhua. Air flotation—UMBR process for mechanical processing wastewater reclamation treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(9): 56–58(in Chinese).
- [18] 王雄, 王婷, 董斌. 超声波—陶瓷膜—Fenton工艺处理机械加工废水工程实例[J]. *水处理技术*, 2017, 43(6): 132–134.
WANG Xiong, WANG Ting, DONG Bin. Engineering project of machining wastewater treatment by ultrasonic—ceramic membrane—Fenton process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(6): 132–134(in Chinese).
- [19] NAVADA S, KNUTSEN M F, BAKKE I, *et al.* Nitrifying biofilms deprived of organic carbon show higher functional resilience to increases in carbon supply [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 7121.
- [20] 王海东, 王淑莹, 彭永臻. 进水负荷对硝化菌与异养菌竞争关系的影响[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(23): 26–29.
WANG Haidong, WANG Shuying, PENG Yongzhen. Influence of applied loading on competition between nitrifiers and heterotrophs [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(23): 26–29(in Chinese).
- [21] VADIVELU V M, KELLER J, YUAN Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched nitrobacter culture [J]. *Water Research*, 2007, 41(4): 826–834.
- [22] 张彬, 邓佳, 陈杨武, 等. 游离氨对硝化过程的影响与定量表征[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(5): 1260–1267.
ZHANG Bin, DENG Jia, CHEN Yangwu, *et al.* Effect and quantitative characterization of free ammonia on nitrification process [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(5): 1260–1267(in Chinese).
- [23] ZHANG C, QIN Y G, XU Q X, *et al.* Free ammonia-based pretreatment promotes short-chain fatty acid production from waste activated sludge [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(7): 9120–9129.
- [24] FERREIRA T B, CARRONDO M J T, ALVES P M. Effect of ammonia production on intracellular pH: consequent effect on adenovirus vector production [J]. *Journal of Biotechnology*, 2007, 129(3): 433–438.
- [25] LIU Y W, NGO H H, GUO W S, *et al.* The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: a review [J]. *Environment International*, 2019, 123: 10–19.

作者简介: 贺梦凡(1996—), 男, 河北深泽人, 硕士研究生, 研究方向为破乳和油水分离。

E-mail: 295277056@qq.com

收稿日期: 2022-04-14

修回日期: 2022-05-25

(编辑: 衣春敏)