

高含盐废水生物处理技术研究进展与展望

王毅霖^{1,2} 杨雪莹^{1,2} 谢加才^{1,2} 王玉希^{1,2} 李婷^{1,2} 唐宇³ 李洪涛³

(1. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室; 2. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司;
3. 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司)

摘 要 煤化工、油气田和石化行业均会产生大量高含盐废水。文章介绍了高含盐废水的生物法深度处理工艺及方法,包括曝气生物滤池(BAF)、序批式活性污泥法(SBR)、生物接触氧化(BCO)、膜生物反应器(MBR)、流式厌氧污泥床反应器(UASB)、厌氧膜生物反应器(AnMBR)、厌氧好氧工艺(An/O)及其变型工艺等,阐述了驯化后的嗜盐菌和耐盐菌的使用效果,并对高含盐废水生物处理研究的前景进行展望,提出:微生物处理高含盐废水具有成本低、几乎无二次污染的优点,能实现高含盐废水有机物组分的有效降解,提高“近零排放”产品盐纯度,但还需在耐盐、嗜盐微生物的筛选和挖掘方面进行技术攻关,这将是生物法处理高含盐废水的重要研究方向。

关键词 高含盐废水; 微生物处理; 耐盐菌; 嗜盐菌

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2021.05.002

文章编号: 1005-3158(2021)05-0006-05

Research Progress and Prospect of High Salinity Wastewater Biological Treatment Technology

Wang Yilin^{1,2} Yang Xueying^{1,2} Xie Jiakai^{1,2} Wang Yuxi^{1,2} Li Ting^{1,2} Tang Yu³ Li Hongtao³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control;
2. CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology;
3. PetroChina Jilin Oilfield Company)

ABSTRACT Coal chemical industry, oil and gas fields and petrochemical industry all generate large amounts of high salinity wastewater. This paper specifically introduces the advanced biological treatment process and methods of high-salinity wastewater, including: Biological Aerated Filter (BAF), Sequencing Batch Reactor Sludge Process (SBR), Biological Contact Oxidation (BCO), Membrane Bioreactor (MBR), Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR), Anaerobic-aerobic process (An/O) and its variant processes, etc. It is also elaborated the effect of domesticated halophilic bacteria and salt-tolerant bacteria, as well as the prospect of research on biological treatment of high salinity wastewater. Microbial treatment of high-salinity wastewater has the advantages of low cost and almost no secondary pollution. Herein, in order to achieve the effective degradation of organic components in high-salinity wastewater and improve the salt purity of “near-zero discharge” products, it is necessary to carry out technical research on the screening and training of salt-tolerant and halophilic microorganisms, which is an important research direction for biological treatment of high-salinity wastewater.

KEY WORDS high salinity wastewater; microbiological treatment; salt-tolerant bacteria; halophilic bacteria

0 引 言

高含盐废水通常是指溶解性总固体(TDS)质量浓度 $\geq 3.5\%$ 的废水,也有学者定义为总含盐量(以NaCl含量计) $\geq 1\%$ 的废水(即盐度 > 10 g/L)^[1-4],其

通常含较高浓度的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等可溶性无机盐离子和氮、磷、中低碳链有机物^[5]。本文针对的高含盐废水主要涉及三类:一是煤化工高含盐废水;二是油气田采出水及压裂返排液;

三是石化行业的高含盐废水,包括反渗透浓水、烟气脱硫脱硝废水等^[6]。

处理高含盐废水的方法主要有生物处理法和物理化学法,其中生物处理法具有经济、高效、工艺可靠和无二次污染等显著优点,是高含盐废水处理方向上应用最广泛的工程技术。本文以高含盐有机废水的COD降解问题为核心,介绍了目前研究较多的高含盐废水生物处理工艺及方法,探讨其研究进展并进行展望,为“近零排放”的绿色、环境友好的高含盐废水处理技术提供参考。

1 耐盐及嗜盐微生物

高含盐废水中的无机盐对微生物有较强的抑制作用,Li等^[7]提出了多种生物工艺处理有机含盐废水的耐受盐度,研究表明大多数生物方法对含盐度5%以上的废水难以直接处理。生物处理工艺对废水中NaCl浓度的限值见表1。

表1 几种生物处理工艺对废水中NaCl浓度的限值^[8]

处理工艺	NaCl浓度/%
污泥处理	0.5~1.0
活性污泥工艺	0.8~0.9
生物滤池	1.0~4.0
两段接触氧化法	2.5~3.5

有效利用并驯化耐盐菌和嗜盐菌处理高含盐废水,可以实现高盐环境下有机物的高效降解。嗜盐菌细胞膜上具有类黄醛蛋白构成的紫膜,使嗜盐菌可以浓缩 K^+ ,并排出 Na^+ 。在以 Na^+ 为主的高盐环境中,嗜盐菌不会摄入过多的 Na^+ ,以保持其细胞内外的离子浓度相近,来抵御盐度差导致细胞脱水的问题。另外在高盐环境下,嗜盐菌会合成糖、氨基酸等物质,用以调解渗透压维持其细胞结构稳定,从而进行正常的代谢并很好地生存^[9]。1995年,Woolard等^[10]最早从美国大盐湖中分离出一种嗜盐菌进行处理苯酚废水的研究,该菌在15%的高含盐油田采出水模拟水中生长良好,对苯酚的去除率高达99.5%。

耐盐菌和嗜盐菌通常可以从以下4种环境中提取得到^[11]:1)海水、海泥、盐湖或盐渍土壤等具有一定盐度的水生环境;2)污水处理厂的活性污泥;3)石油、苯酚或其他有机物污染的土壤和水样;4)鱼类等海洋动物的肠道菌落。Peyton等^[12]从美国犹他州大盐湖、加利福尼亚州Cargill Solar盐厂以及华盛顿皂湖区,分离出5种耐盐菌处理高含盐废水,在10%的

NaCl环境中,将废水中苯酚浓度从50 mg/L降至2 mg/L以下。季民等^[13]采用微生物技术从垃圾渗滤液中分离、筛选出5种专性耐盐菌,经纯化和富集发现这5种菌对垃圾渗滤液中COD的平均去除率为22%,其中一种菌种对COD的去除率高达47.5%。宋晓雪^[14]和丁舒心^[15]从巴丹吉林沙漠盐湖筛选出2株嗜盐菌,在苯酚浓度200 mg/L、盐浓度10%条件下,苯酚的降解率分别为88%和83%,硝基酚降解率分别为89.8%和88.6%。以上研究表明,耐盐菌和嗜盐菌可以应用于多种生物处理工艺。

2 好氧工艺

2.1 曝气生物滤池(BAF)

BAF的工艺原理是在滤池中装填一定数量滤料(多为直径5 mm的材料),将生物膜附着在滤料表面,对滤池内部进行曝气^[16],处理污水时,滤料上的高浓度生物膜发挥其强氧化降解、吸附阻留能力,可以较快完成污水的净化。BAF与普通活性污泥法相比,具有更高的容积负荷,抗冲击能力相对较好,可以在同一个池子中形成从上至下不同的优势菌群,从功能上实现了硝化与反硝化的同时进行。但BAF工艺的反冲洗水量、水头损失均较大,且对进水的SS指标有相应的要求,需与相应的预处理工艺结合应用。

邹杰英^[17]开展了BAF反应器中生物膜在逐步提高盐度的驯化过程中,其硝化及反硝化性能所受到的影响和抗盐度冲击能力研究。结果表明:BAF反应器中的生物膜上附着的生物量丰富,具有优异的硝化及反硝化性能,能够较快适应高盐度的冲击;经过驯化后,硝化及反硝化性能与无盐环境下相差无几;与亚硝化菌相比硝化菌对盐度更加敏感,污泥在含盐环境驯化过程中,当含盐量达到15~25 g/L时出现较明显的亚硝态氮累积现象。刘鹏程等^[18]从嗜耐盐菌种资源库中筛选出2株能够在高盐环境下高效降解碱减量废水中COD的菌种,采用二级生物曝气池处理印染碱减量废水,在进水COD $\geq 15\ 000$ mg/L的条件下,出水COD可稳定在250 mg/L左右。张柯等^[19]利用曝气生物滤池对经过湿式氧化处理后的乙烯废碱液进行处理,在温度为20~25℃,水力停留时间9 h的条件下,当废碱液含盐量低于6%时,COD去除率稳定在85%左右;当含盐量达到8%时,微生物活性受到影响,但仍可获得较高的处理效率。中石化天津分公司^[20]采用BAF法处理炼油电脱盐污水、环烷酸废水、液态烃碱渣等高含盐污水,可将废水COD由2 000 mg/L左右降至500 mg/L以下,该系

统对水质大范围波动具有较强的适应能力。

研究人员通过不断的对 BAF 的结构形式、功能、启动和滤料等方面进行优化,使该工艺在应用的过程中逐渐完善,处理效果更加高效、稳定。

2.2 序批式活性污泥法(SBR)

SBR 是一种以间歇操作为主要特征的生物处理污水方法。每一个操作周期按批次可分为进水、反应、沉淀、排水和待机 5 个阶段,是集均质、初次沉淀、生物降解、二次沉淀多功能于一体的回流系统。该工艺在同一构筑物中反复交替进行缺氧和曝气反应,具有工艺流程简单、泥水分离效果好、耐冲击等优点,非常适合处理小水量、间歇排放的工业污水与分散点源污染治理。因此,该技术在中小型工业企业的含盐废水处理中得到广泛应用^[21]。

李秀珍等^[22]从海水、采油废水及石油污染的土壤中筛菌,采用 SBR 处理高氯根采油废水。研究表明,当 Cl^- 含量 $< 10\,000\text{ mg/L}$ 时,用 SBR 处理采油废水是可行的,COD 去除率在 70% 左右,且设备简单易于管理。潘超^[23]采用 SBR-超滤联用技术处理船舶与海洋平台含盐生活污水,污泥经耐盐驯化后,盐度在 4% (质量百分比) 以下稳定后的系统出水 COD 去除率达到 92.34%,出水氨氮、总磷的去除率分别为 88.96% 和 84.27%。Kargi^[24] 在好氧序批式活性污泥培养反应器内,使用耐盐菌处理含盐有机废水,对含盐量为 1%~5% 的废水适应性较好,对含盐为 5% 的废水 COD 去除率达到 85%,在培养物中投加合适的协同菌可以调高 COD 的去除率。姜超等^[25]从城市污水处理厂的活性污泥中驯化分离出 2 株耐盐高效菌,利用 SBR 处理高盐生活污水,在 30 d 完成快速启动,TOC 去除率大于 85%。王玫等^[26]采用嗜盐菌结合 SBR 法处理高含盐采油废水,COD 去除率为 32.2%~76.2%。

工程现场选用可回收的絮凝剂、吸附剂,可以强化有机物去除效率,并控制二次污染和运行成本。

2.3 生物接触氧化法(BCO)

BCO 也称淹没式生物滤池,是一种介于生物滤池与活性污泥法之间的生物膜法,可以使微生物在填料上充分的接触和富集,具备较高的有机物去除能力,最大程度避免活性污泥法常见的污泥膨胀问题,适用于处理高含盐污水,但过高负荷易造成生物膜堵塞,因此 BCO 多应用于低盐度污水或二级处理。

何明杰等^[27]采用水解酸化-BCO,可处理含油 $> 500\text{ mg/L}$ 、矿化度 $> 20\,000\text{ mg/L}$ 、进水量 $> 4.0\text{ m}^3/\text{h}$

的油田污水,处理后污水 $\text{COD} < 100\text{ mg/L}$,石油类 $< 10\text{ mg/L}$,挥发酚 $< 0.5\text{ mg/L}$ 。张明生等^[28]采用生 BCO 处理高含酸盐废水,考察盐浓度连续升高时对 COD 去除率的影响及抗冲击能力,结果表明:进水硫代硫酸钠的浓度在 573~14 812 mg/L 时,出水 COD 浓度 $< 500\text{ mg/L}$,COD 去除率为 91%~95%;当生物接触氧化系统受到冲击时,恢复较快,一般 3~5 个周期后即可恢复正常。郭亮^[29]采用水解酸化+BCO 工艺处理高含盐采油废水,COD、氨氮、油类平均去除率分别为 91.32%,92.55%,92.6%。

生物接触氧化工艺常采用分段法提高净化能力,通过加接触层的办法来提高沉淀池效率。

2.4 膜生物反应器(MBR)

MBR 是膜分离技术与生物处理技术有机结合之新型态废水处理系统。该工艺的核心是在曝气池内设置膜组件,用膜分离替代自然沉淀分离,污泥在膜的一侧即在生物反应器内聚集,形成状态良好的微生物种群,生化系统的处理效率得到有效提升。过滤介质的分子量、膜的孔径等参数决定膜的分离性能,污水生物处理系统中,粒径较大的,如颗粒污泥、细菌等微生物被膜高效截留,经过膜过滤的产出水水质优于传统沉淀工艺。MBR 工艺中的膜具有较好的固液分离性能,在高盐污水冲击时,可以保持较好的污泥絮凝程度。但膜的污染和堵塞是膜工艺存在的共性问题,胞外聚合物的分泌会加剧膜的污染,因此膜的正常运行操作很重要,维护费用也较高^[3]。

李宇庆等^[30]采用“三效蒸发器+MBR+反渗透(RO)”组合工艺,对某企业高含盐有机废水进行深度处理,首先通过三效蒸发器去除大分子有机物和盐分,然后利用 MBR 进一步去除有机污染物,最后利用 RO 系统去除剩余的有机物和盐分,研究表明,出水水质可满足企业生产工艺回用水的水质要求。周豪^[31]采用驯化后的耐盐菌强化 MBR 反应器,使 COD 去除率上升至 81%。黄广道^[32]从深海(水深 3 667 m)沉积物中筛选、驯化得到 3 株耐盐优势功能菌,利用优势菌强化多级生物反应器(IMBR)处理制革废水,对 COD 和氨氮具有良好的去除效果和抗冲击负荷,COD 去除率达到 96%,去除负荷达到 12.5 kg COD/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),氨氮和总氮去除率分别为 97.0% 和 87.2%。目前,MBR 在国内的洛阳石化、岳阳石化等炼化企业成功应用,应用情况具体见表 2。

抗污染膜新材料的研发是膜生物反应器革命性的进展,于此同时,通过解析生物膜的传质过程及其去除污染物的微观机制,以实现膜污染的控制。

表2 MBR在国内石化行业的应用情况^[33]

应用企业	处理能力/(m ³ ·d ⁻¹)	开车时间/a
洛阳石化	5 000	2004
岳阳石化	7 200	2004
金陵石化	12 000	2005
巴陵石化	7 200	2005
小虎岛精细化工园区	10 000	2006
海南石化	12 000	2006
惠州市大亚湾石化	25 000	2006
哈尔滨石油化工集团	10 000	2006
长庆石化	9 600	2008
九江石化	12 000	2009

3 厌氧工艺

3.1 升流式厌氧污泥床反应器(UASB)

进水在UASB中向上涌动,能够实现固、液、气的三相分离,形成颗粒污泥,提高处理效率及生物量。该工艺既适用于处理高强度含盐废水,又可以用于处理低C/N废水,是应用最广的厌氧生物反应器形式。盐度超过10 g/L的环境会抑制产甲烷菌的生长,并且传统的UASB反应器通常无法处理含盐量超过50 g/L的废水,接种耐盐菌是一个可以有效提高微生物抗盐度冲击的选择。

吴建华等^[34]利用3 L的UASB反应器在中温条件下处理高含盐有机废水,当进水COD浓度为2 000~5 000 mg/L,容积负荷为2~5 kg COD/(m³·d)逐步提高NaCl浓度,当Cl⁻浓度从1 000 mg/L增加到5 000 mg/L时,COD去除率从大于90%降到83%~85%。刘春爽等^[35]采用UASB工艺处理高盐度稠油采油废水,在水力停留时间(HRT)≥24 h,进水COD浓度为350~640 mg/L,原油浓度为112~205 mg/L时,COD去除率达到65.08%,原油平均去除率达到74.33%,研究表明,UASB反应器能高效处理高含盐采油废水,且反应器内有颗粒污泥形成。

该技术的优势是无需搅拌装置及共生物附着的填料,结构简单,通过形成颗粒污泥使微生物天然固定化,改善了微生物的环境条件,增加工艺的稳定性。

3.2 厌氧膜生物反应器(AnMBR)

AnMBR将厌氧工艺与膜生物反应器结合,使得HRT与污泥停留时间(SRT)分开,与传统厌氧工艺相比占地面积更小。因此,AnMBR引起了学术界和工业界的广泛关注。

李腾飞等^[36]利用电渗析(ED)-AnMBR处理含甘油高含盐废水,ED过程脱盐率达99%以上,平均能耗为616 kJ/L,电流效率91.4%;AnMBR处理含甘油废水过程中COD去除率为95%。金艳青等^[37]处理模拟高盐有机废水采用沼气循环厌氧膜生物反应器(MCAnMBR),研究表明,当进水NaCl浓度小于19 g/L时,厌氧微生物对COD的去除率大于94%,盐度对其没有明显的抑制作用;而当进水NaCl浓度小于19 g/L时,对COD的去除率明显下降,恢复效率低,高污泥浓度是AnMBR在高盐环境提高有机物去除率的关键。

虽然目前AnMBR的研究大部分基于小试、中试规模,其膜结构形态优化、膜污染机理等问题仍是研究关注热点。

4 厌氧好氧工艺(An/O)及其变型工艺

An/O及其变型工艺是污水处理领域应用最广的生物处理工艺之一,也是高含盐废水处理的重要环节。石化企业规模在10万m³/d以上的高含盐污水处理工程中,使用An/O及其变型工艺的比重是56.55%^[38]。

林海等^[39]采用水解酸化+生物接触氧化(A/O)工艺接种生活污水处理厂的活性污泥,采用分阶段逐步加压驯化法,处理高盐混合化工废水,经二段驯化后COD平均去除率为83%。严忠等^[40]采用A/O工艺处理稠油区块高含盐采油废水,接种复合耐盐微生物菌种,出水的COD、石油类及挥发酚平均去除率分别为31.9%,58%,65%。某煤洁净综合利用示范项目^[41]通过多段AO+MBR工艺实现了污水的高效处理,出水COD基本在30 mg/L以内,具备较强的抗负荷冲击能力以及较为理想的废水处理结果。

厌氧与好氧工艺组合后可以实现氮、磷、COD等污染物的多目的协同去除,普及程度较高。

5 结论与展望

微生物处理高含盐废水具有成本低、几乎无二次污染的优点,但盐度变化大和高盐度都会对未驯化的微生物产生抑制,降低微生物的降解能力。近年来,利用耐盐及嗜盐菌处理高含盐废水的研究和应用日益增多。耐盐及嗜盐菌具有和传统水处理微生物相同的代谢功能,对水中有机物有显著去除作用。此外,好氧菌和厌氧菌都可能在高盐水中生存,并且盐度变化也会使微生物的代谢类型发生改变,这两类微生物适应性较好,可以应用于不同类型的生物反应器,适用范围广阔。因此,耐盐、嗜盐微生物的筛选和挖掘是生物处理高含盐废水的研究趋势。

参考文献

- [1] 曹美玲,李海,刘佛财,等.高盐有机废水的处理与研究进展[J].有色金属科学与工程,2019,10(3):92-98.
- [2] 李凤娟,徐菲,李小龙,等.高盐度废水处理技术研究进展[J].环境科学与管理,2014,39(2):72-75.
- [3] 顾薇琼.石化企业高盐污水生物处理技术探讨[J].石油化工安全环保技术,2008,24(4):53-57.
- [4] 李俊虎,周珉,王乔,等.高盐废水处理工艺最新研究进展[J].环境科技,2018,31(4):74-78.
- [5] 黄欣,陈业钢,苏楠楠,等.高含盐废水分质结晶及资源化利用研究进展[J].化学工业与工程,2019,36(1):10-23.
- [6] 赵鹏,张新妙,栾金义.石化高盐废水深度处理技术研究进展[J].石油化工,2018,47(7):769-774.
- [7] LI A, GU G W. The treatment of saline wastewater using two-stage contact oxidation method [J]. Water science and technology, 1993, 28(7): 31-37.
- [8] 易绣光,林俊岳.利用嗜盐及耐盐菌处理高盐废水的现状与展望[J].江西农业学报,2012,24(7):121-122.
- [9] 郭艳丽,张培玉,于德爽,等.嗜盐菌与高盐度废水生物处理研究进展[J].环境科学与管理,2008(9):79-83.
- [10] WOOLARD C R, IRVINE R L. Treatment of hypersaline wastewater in the sequencing batch reactor [J]. Water environment research, 1995, 29(4):1159-1168.
- [11] LI H, MENG F, DUAN W Y, et al. Biodegradation of phenol in saline or hypersaline environments by bacteria: A review [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2019, 184:1-12.
- [12] PEYTON B M, WILSON T, DAVID R Y. Kinetics of phenol biodegradation in high salt solutions [J]. Water research, 2002, 36(19):4811-4820.
- [13] 季民,王苗苗,姜少红,等. AF-MBBR 技术处理高盐垃圾渗滤液的试验研究[J].中国给水排水,2006(21):93-95.
- [14] 宋晓雪.巴丹吉林沙漠盐湖嗜(耐)盐苯酚降解菌的筛选及其降解特性研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2016:57.
- [15] 丁舒心.巴丹吉林沙漠湖泊两株嗜耐盐菌降解废水中对硝基酚特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2020:48.
- [16] 付丽亚.石化废水臭氧/曝气生物滤池深度处理工艺与机理研究[D].北京:清华大学,2018:8-9.
- [17] 邹英杰.高盐度环境下 SBR-BAF 复合工艺的废水处理效能研究[D].青岛:中国海洋大学,2009:52.
- [18] 刘鹏程,杜佳丽,郑凤娟,等.三元耐盐复合菌种在碱减量废水处理中的应用[J].印染,2017,43(7):10-13.
- [19] 张柯,陶冠红,陈建军,等.曝气生物滤池处理高含盐乙烯废碱液的试验研究[J].石油化工安全环保技术,2009,25(1):50-51.
- [20] 王刚,袁仲全. BAF 法处理高浓度含盐炼油污水[J].安全、健康与环境,2009,9(10):26-28.
- [21] 王兆丰.微生物强化处理含盐有机废水[D].青岛:青岛科技大学,2014:6.
- [22] 李秀珍,李斌莲,于晓丽,等.高含氯采油废水生物治理技术研究[J].油气田环境保护,2002(2):17-19.
- [23] 潘超. SBR-超滤联用技术处理含盐生活污水及其微生物群落分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019:21-31.
- [24] KARGI F. Enhanced biological treatment of saline wastewater by using halophilic bacteria [J]. Biotechnology letters, 2002, 24(19):1569-1572.
- [25] 姜超,隋倩雯,陈梅雪,等.耐盐复合菌剂强化生物工艺处理高盐废水的快速启动[J].环境工程学报,2017,11(7):3929-3935.
- [26] 王玫,刘艳,邓芳.利用嗜盐菌和 SBR 工艺处理高含盐采油废水[J].油气田环境保护,2014,24(5):37-38.
- [27] 何明杰,张艳,孟庆伟,等.生化处理沙漠油田高盐含油污水[J].油气田环境保护,2018,28(2):36-39.
- [28] 张明生,齐永红,段宝民.生物接触氧化工艺处理高含盐废水的研究[J].应用化工,2008(11):1342-1344.
- [29] 郭亮.水解酸化+生物接触氧化法处理高含盐采油废水的试验研究[D].西安:长安大学,2010:46.
- [30] 李宇庆,马楫,余杰,等.高含盐有机废水处理与回用技术应用研究[J].工业水处理,2014,34(1):80-82.
- [31] 周豪.耐盐菌强化 MBR 集成技术处理高含盐有机废水研究[D].杭州:浙江大学,2019:59.
- [32] 黄广道.深海耐盐菌强化 IMBR 系统用于制革废水处理研究[D].新乡:河南师范大学,2016:105.
- [33] 余良正.膜生物反应器去除炼油化工废水中芳香类化合物的研究[D].杭州:浙江大学,2019:8.
- [34] 吴建华,张贵清,李娟红,等. UASB 处理高盐制药废水的试验研究[J].应用化工,2009,38(3):460-462.
- [35] 刘春爽,赵东风,国亚东,等.升流式厌氧污泥床(UASB)反应器处理高盐度稠油采出水性能和建模[J].中国炼油与石油化工,2012,14(3):90-95.
- [36] 李腾飞,颜丙花,谭明,等.电渗析-厌氧膜生物反应器处理含甘油高盐废水[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(8):93-99.
- [37] 金艳青,章启帆,李勇,等.沼气循环厌氧膜生物反应器处理高盐有机废水[J].中国给水排水,2017(17):117-121.
- [38] 林明敏.简析石油化工企业高含盐污水的处理方法[J].现代国企研究,2018(6):48.
- [39] 林海,张国华,陈月芳,等. A/O 工艺处理高盐混合化工废水的启动研究[J].环境科学与技术,2015,38(8):179-185.
- [40] 严忠,王澄滨,贾宝贵,等.生化技术处理高含盐废水试验研究[J].油气田环境保护,2016(3):18-20.
- [41] 魏沁.多段 AO+MBR 工艺在煤化工废水处理中的应用探究[J].化工管理,2018(31):97-98.

(收稿日期 2021-02-23)

(编辑 刘晓辉)