

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.018



微好氧与厌氧水解酸化对明胶废水的 预处理效果

李艳¹, 孔秀琴¹, 贾金娥², 苏瑞¹

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 2. 中国石油长庆油田分公司, 西安 710016)

摘要:以明胶废水为研究对象,采用微好氧与厌氧水解酸化工艺进行对比处理实验,探讨了不同水力停留时间下微好氧与厌氧水解酸化对明胶废水水质改善的效果。实验结果表明,在水力停留时间达到 72 h 的时候,溶解氧为 1.3~1.6 mg/L 的微好氧反应器的 COD 去除率最大可达 25%,溶解氧为 0.3~0.5 mg/L 的厌氧反应器的 COD 去除率最大可达 22%;微好氧反应器的 VFA 的含量达到 12 mg/L 左右,厌氧反应器只有 8 mg/L 左右;微好氧反应器的 pH 值可由最初的 12.5 降至 7.5 左右,而厌氧反应器只能降至 8.0 左右;两个反应器对蛋白质去除效果的差别并不明显,都可以达到 90% 以上,但是微好氧反应器的氨氮浓度只有 22 mg/L,小于厌氧反应器中的氨氮浓度,说明微氧条件有利于氨氮的扩散挥发,低浓度的氨氮对微生物的危害较小。对比得出微好氧反应器的出水水质较好,更适合明胶废水水解酸化的预处理。

关键词:明胶废水;预处理;微好氧;水解酸化

中图分类号:X131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)05-0129-06

Quality improvement of gelatin wastewater by micro aerobic and anaerobic hydrolysis acidification

Li Yan¹, Kong Xiuqin¹, Jia Jine², Su Rui¹

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China;
2. Petrochina Changqing Oilfield Branch, Xi'an 710016, P. R. China)

Abstract: The micro aerobic and anaerobic hydrolysis acidification were used to improve the quality of gelatin wastewater. The effects of hydraulic retention time were explored. The experimental results showed that when the hydraulic retention time was 72 h, the COD removal rate of micro aerobic reactor could reach up to 25% when dissolved oxygen was 1.3~1.6 mg/L, and that of anaerobic reactor up to 22% when dissolved oxygen was 0.3~0.5 mg/L. The content of VFA of micro aerobic reactor was 12 mg/L, and that of the anaerobic reactor was lower to 8 mg/L. The pH of aerobic reactor was reduced to 7.5 from original 12.5, and that of the anaerobic reactor was reduced to 8.0. The removal rate of protein for

收稿日期:2017-01-01

基金项目:国家自然科学基金(51268034)

作者简介:李艳(1991-),女,主要从事污(废)水生物治理研究,(E-mail)1558895076@qq.com。

孔秀琴(通信作者),女,教授,(E-mail)xqkong@yeah.net。

Received:2017-01-01

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51268034)

Author brief:Li Yan (1991-), main research interest: biological treatment of wastewater, (E-mail): 1558895076@qq.com.

Kong Xiuqin (corresponding author), professor, (E-mail)xqkong@yeah.net.

both reactors was more than 90%. However, the ammonia nitrogen of micro aerobic reactor was only 22 mg/L, less than that of the anaerobic reactor, which indicated that anaerobic conditions was beneficial for spread and volatile of ammonia nitrogen. All the data suggested that hydrolytic acidification of micro aerobic reactor was better than anaerobic reactor for the pretreatment of gelatin wastewater.

Keywords: gelatin wastewater; pretreatment; micro aerobic; hydrolytic acidification

明胶业是中国的重要工业之一,但是,明胶生产废水量大,废水污染特性为高钙(800~2 000 mg/L)、高碱(pH 值>11)、高蛋白质(COD 500~2 000 mg/L、总氮 140~300 mg/L),治理难度大^[1]。同时,利用活性污泥法处理会产生大量含钙剩余污泥,增加污泥处理的成本^[2]。如何采用有效的手段降低明胶废水的高钙、高碱、高蛋白质的特性是有效治理明胶生产废水迫切需要解决的问题。

由于物理处理法成本较高,在实践应用中,针对明胶废水的处理工艺基本以生物处理法为主,主要包括光合细菌法、序批式活性污泥法、厌氧好氧工艺法等。由于明胶废水水质的复杂性,仅仅依靠单一的生物处理并不能达到出水水质要求,所以,在实践应用中,经常采用一些预处理工艺与上述生物处理方法联用来处理明胶废水。例如,邓昕轶^[3]利用物化+水解酸化+两级 A/O 组合工艺处理明胶废水,结果显示,该组合工艺对明胶废水的 COD、BOD、SS、氨氮、总氮的去除率可达到 90% 以上。孔秀琴等^[4]利用预酸化+SBR 工艺组合工艺来处理明胶废水,实验结果证明,预酸化可以有效降低明胶废水的 pH 值、去除明胶废水部分 COD,对后续活性污泥生物处理也有明显的污泥减量化效果。Breure 等^[5]利用改变稀释率和 pH 值条件确定了水解酸化处理明胶废水的最佳条件。以上研究表明,水解酸化作为一种预处理工艺在实践生活中已经得到广泛应用,笔者选取明胶废水的水解酸化过程作为研究对象,对明胶废水水解酸化过程的现象进行研究分析。

水解酸化技术是一种厌氧处理的方法,广泛应用于工业废水和生活污水的预处理,且与其他工艺组合可以有效降低处理成本,提高处理效率^[6-7]。水解酸化在实际处理废水过程中的应用也十分广泛。溶解氧对于水解酸化是一项非常重要的控制指标,通常认为水解酸化是厌氧过程,但近年来也出现了很多关于微好氧水解酸化的研究^[8]。在工程应用中,通常认为溶解氧浓度在 0.5 mg/L 以下时为厌氧,在 2 mg/L 以上时为好氧,介于 0.5~2 mg/L 为微好氧^[9]。例如,Tian^[10]在利用水解酸化工艺处理

猪肥料的过程中发现,在微好氧水解酸化过程中的溶解氧浓度在 0.26 mg/L 时可以增加有机物的水解过程,微好氧水解过程中挥发性脂肪酸的浓度也比厌氧水解酸化过程高 25% 左右。Zuo 等^[11]在利用水解酸化处理高磷污水时,通过正交试验,将 3 个反应器的溶解氧浓度分别控制在 0.8、1.0、1.5 mg/L,最终确定出在溶解氧为 1.5 mg/L 时磷的去除率最高。朱晨等^[12]利用微好氧水解酸化处理石化废水,发现微好氧环境对硫酸盐还原菌有抑制作用,减少了有毒和恶臭类气体产生,改善了周围环境。王佩超等^[13]对比研究了微好氧水解酸化与厌氧水解酸化在处理石化废水过程中的特性,发现在微好氧条件下 COD 的去除效率更高,对难降解芳香有机物和含有共轭双键化合物的大分子处理效果更好。众多研究结果表明,溶解氧作为水解酸化过程中的重要控制参数,具有十分重要的研究意义。关于不同溶解氧条件下水解酸化对明胶废水处理效果的研究,未见相关报道。笔者以水解酸化作为一种工艺进行单独研究,并对比了微好氧与厌氧条件水解酸化反应对明胶废水水质的影响。

1 实验部分

1.1 实验用水

实验用水为甘肃海石湾某明胶厂的明胶废水,是在生产明胶过程中的高钙废水,有机物含量、钙离子含量较高,可生化性较差,直接使用活性污泥法处理会产生较大的剩余污泥量。实验采用水解酸化作为明胶废水的预处理工艺,以期改善废水的可生化性,在后续的活性污泥处理过程中取得更好的处理效果。该废水基本水质情况为 $[Ca^{2+}]$ 为 1 400~1 800 mg/L,COD(Chemical Oxygen Demand 化学需氧量)为 600~800 mg/L,pH 值为 11.5~12.3,VFA(Volatile Fatty Acid 挥发性脂肪酸)为 1.5~1.8 mg/L,蛋白质 11~12 mg/L,氨氮 11~14 mg/L。

1.2 分析方法

Ca^{2+} 浓度的测定采用标准 EDTA 滴定法,COD 测定采用标准重铬酸钾法,蛋白质测定采用考马斯

亮蓝法,氨氮测定采用纳氏试剂分光光度法,pH值、ORP(氧化还原电位)采用雷磁 pHS-3C 型精密酸度计进行测定,DO(Dissolved Oxygen 溶解氧)采用 JPSJ-605F 型溶解氧仪进行测定,VFA 含量采用气相色谱法测定。

VFA 含量的测定所用试剂为甲酸(分析纯),相对密度 1.22,含量 88%,混合酸标准储备液:乙酸(分析纯)517 $\mu\text{L/L}$,丙酸(分析纯)497 $\mu\text{L/L}$,丁酸(分析纯)401 $\mu\text{L/L}$ 。样品先加入 6 mol/L 硫酸使 pH 值降至 3.5 左右,离心 20~30 min,取上层透明清液 3 mL,加入 0.15 mL 浓甲酸,最终 pH 值为 2.0 左右。色谱条件:色谱柱 2 m \times φ 6 mm,柱温 180~200 $^{\circ}\text{C}$,气化室温度 240 $^{\circ}\text{C}$,检测温度 210 $^{\circ}\text{C}$,进样量 2 μL ,载气流量(N_2) 50 mL/min,氢气流量 50 mL/min,空气流量 600~700 mL/min。

1.3 实验装置与方案

实验平行启动了 2 个有效容积各为 2 L 的水解酸化反应器,2 个反应器温度都维持在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。其中,微好氧反应器敞口运行,保持反应器内废水与空气中氧气的接触,用以维持微好氧条件,并加以搅拌以提高传质能力;厌氧反应器密封运行,并加以震荡以提高传质能力。通过对反应器的实时监测测得微好氧反应器的 DO 浓度维持在 1.3~1.6 mg/L,ORP 维持在(-215 \pm 35)mV,厌氧反应器的 DO 浓度维持在 0.3~0.5 mg/L,ORP 维持在(-235 \pm 37)mV。在实验初期,发现明胶废水水解酸化反应在水力停留时间达到 60~72 h 以后,水质情况基本不会发生太大变化,所以,在实验进行过程中,维持总的水力停留时间为 72 h,实时监测 2 个反应器 pH 值、DO、ORP 值,每隔 2 h 在微好氧与厌氧反应器分别取样,监测水解酸化过程 COD、VFA 含量、pH 值、蛋白质、氨氮浓度的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 COD 去除效果

水解酸化工艺重点在于污染物质化学结构和性质上的改变,该阶段的主要作用是在水解酸化菌的作用下将废水中的大分子有机物转化为小分子有机物,将不溶性的有机物转化为可溶性的有机物,提高废水的可生化性,追求的目的不在于 COD 量的去除,主要为后续的生物处理提供有利条件。从图 1、图 2 可以看出,随着水解酸化反应水力停留时间的增加,微好氧水解酸化的最大 COD 去除率在 25% 左右,厌氧水解酸化的最大 COD 去除率在 22% 左

右。一般认为水解酸化的 COD 去除率为 10%~30%,该结论与很多研究结论类似。总体来看,微好氧水解酸化的 COD 去除率稍高于厌氧水解酸化,这是由于微好氧水解酸化过程中存在的低浓度溶解氧能够强化兼性菌的生理代谢功能,使其能够充分发挥分解代谢功能,对降低 COD 有贡献。另外,微好氧反应器的搅拌作用使得有机物与微生物的接触更加充分,有效提高了传质效率,促进明胶废水中有机物的降解。

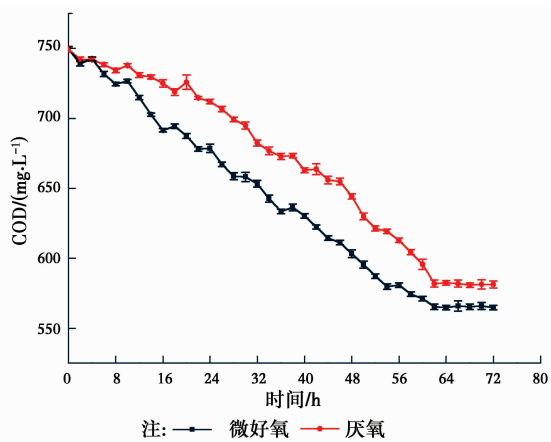


图 1 反应器中 COD 变化情况

Fig. 1 The situation of COD in reactor

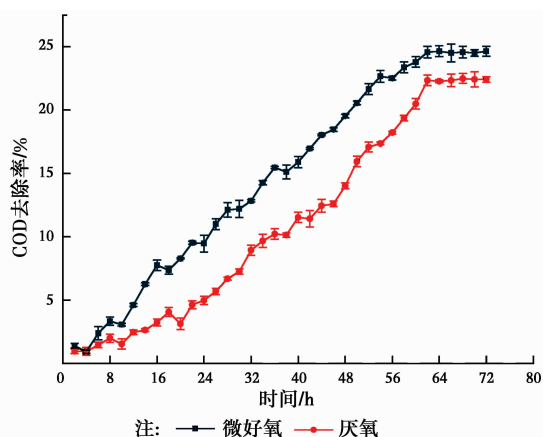


图 2 反应器中 COD 去除率变化情况

Fig. 2 The situation of COD removal rate in reactor

2.2 pH 值和 VFA 含量变化情况

VFA 作为水解酸化的重要指标,可以反映水解酸化的效果。水解酸化出水中大量 VFA 的生成,是废水生物降解性能改善的指标,许多在好氧条件下难以降解或不能降解的物质,往往也容易被水解酸化生成 VFA。由于水解酸化反应生成的 VFA 主要成分为乙酸、丙酸、丁酸,所以,通过气相色谱法测定明胶废水各个反应时期废水中乙酸、丙酸、丁酸的量,由此得出 VFA 的量。图 3 为两个反应器不同水

力停留时间下的 VFA 含量。由图 3 可以看出,随着水力停留时间的增加,反应器中的 VFA 含量逐渐增高,并且在水力停留时间相同的时候,微好氧反应器内的 VFA 含量高于厌氧反应器,在水解酸化过程,VFA 主要为水解菌分解小分子有机物而产生。从实验结果可以看出,微氧条件下明胶废水生物降解性能更好,即微氧条件更有利于明胶废水中污染物质的降解。

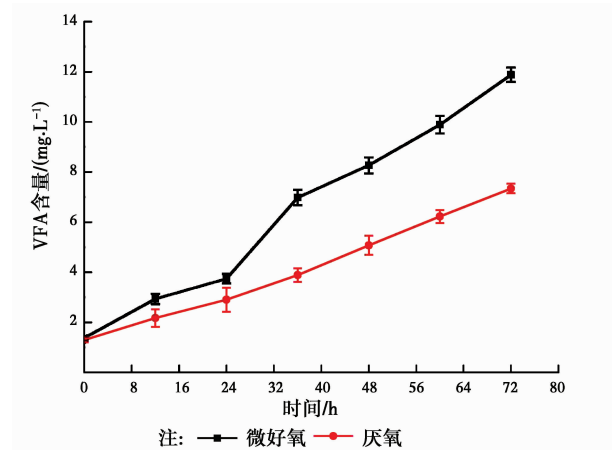


图 3 反应器中 VFA 含量变化情况

Fig. 3 The situation of VFA in reactor

由于水解酸化过程是把废水中的有机物转化成各种有机酸,由图 3 也可以看出,在水解酸化过程中产生了大量的 VFA,那么通过测定反应器内 pH 值的变化可以反映出水解酸化过程进行的程度^[14]。图 4 为 2 个反应器不同水力停留时间下的 pH 值,由图 4 可以看出,在相同的水力停留时间条件下,微好氧反应器的 pH 值低于厌氧反应器。在水力停留时间达到 64 h 时,2 个反应器的 pH 值基本保持不变;在水力停留时间到达 72 h 的时候,微好氧反应器的 pH 值由 12.5 左右降至 7.5 左右,厌氧反应器的 pH 值由 12.5 左右降至 8.0 左右。导致反应器内 pH 值降低的原因正是水解酸化过程生成了 VFA,以乙酸、丙酸、丁酸组成的 VFA 会导致反应器内溶液 pH 值的下降。由图 3 可以看出,微好氧反应器的 VFA 产量要高于厌氧反应器,所以,微好氧反应器的 pH 值的下降速率高于厌氧反应器。明胶废水的初始 pH 值较高,不适宜直接使用活性污泥法进行处理,经过水解酸化后 pH 值得到显著降低,特别是微好氧反应器内的明胶废水经过 72 h 水解酸化后 pH 值为 7.5,水质基本达到中性,可直接进入后续的生物处理工序,这对明胶废水的生物处理具有重要意义。

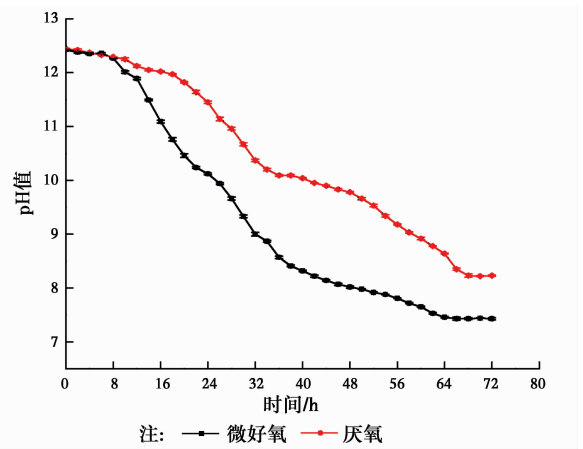


图 4 反应器中 pH 值变化情况

Fig. 4 The situation of pH removal rate in reactor

2.3 蛋白质和氨氮变化情况

当含蛋白质废水进行水解酸化处理时,蛋白质先水解成氨基酸,继而酸化为氨和 VFA,生成大量的氨氮,因而氨氮浓度是表征含蛋白质废水酸化水平的直观指标^[15]。从图 5、图 6 来看,随着水解酸化反应水力停留时间的增加,2 个反应器中的蛋白质浓度越来越低,蛋白质去除率越来越高,在水力停留时间达到 56 h 时,2 个反应器的蛋白质浓度基本不变,蛋白质的去除效率均达到 90% 以上。并且从图 5、图 6 可以看出,2 个反应器内蛋白质的浓度曲线与蛋白质去除率曲线基本重合,即 2 个反应器在蛋白质去除效果方面并没有明显差别,原因为在水解酸化过程中,对蛋白质起分解作用的主要为水解菌,水解菌是兼性细菌,例如,乳球菌属、梭菌属、芽孢杆菌属等,在微好氧与厌氧条件下都能很好地生存,发挥蛋白质的转化作用,所以,2 个反应器内蛋白质的去除率差别并不明显。

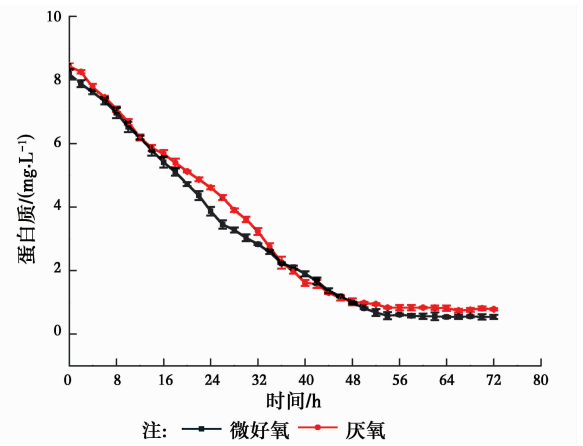


图 5 反应器中蛋白质变化情况

Fig. 5 The situation of protection in reactor

从图 7 可以看出,2 个反应器的氨氮含量随着水力停留时间的增加都在增加,并且厌氧反应器的

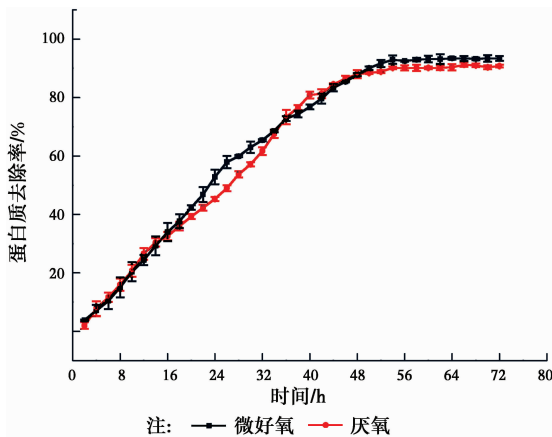


图6 反应器中蛋白质去除率变化情况

Fig. 6 The situation of protection removal rate in rector

氨氮浓度要高于微好氧反应器。在水力停留时间达到 56 h 的时候,2 个反应器的氨氮浓度基本不再增加;在水力停留时间达到 72 h 时,微好氧反应器的氨氮浓度基本保持在 22 mg/L 左右,厌氧反应器的氨氮浓度基本保持在 29 mg/L 左右。反应器中的氨氮主要是由蛋白质降解生成,而 2 个反应器的蛋白质降解程度基本相同。分析导致 2 个反应器中氨氮浓度相差较大的原因,微好氧反应器在水解酸化过程中 pH 值维持在 7.5~12 之间,基本维持在碱性条件,导致反应器在反应过程中产生的氨氮在碱性条件下有一定量的挥发,而且微好氧反应器的开放搅拌条件也促进了氨氮的挥发扩散,使得最终微好氧反应器的氨氮浓度较低;而厌氧反应器在水解酸化过程中 pH 值维持在 8~12,基本也是维持在碱性条件,但由于整个反应器是密闭环境,氨氮的挥发扩散受阻,逸出速度较慢,所以,导致厌氧反应器的氨氮浓度要高于微好氧反应器。有研究表明,废水中高浓度的氨氮无论对于好氧还是厌氧微生物都是有害的^[16],由于高浓度的氨氮对微生物有害,所以,2 个反应器相比较而言,微好氧反应器要优于厌氧反应器。

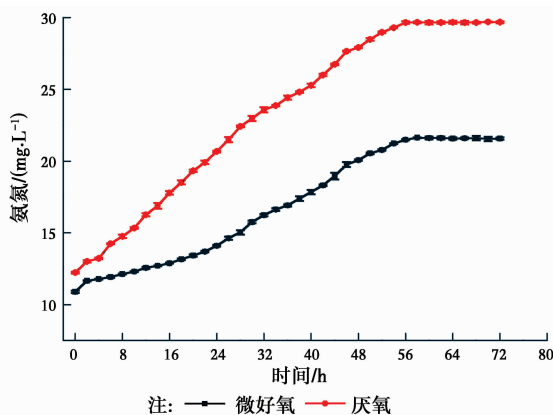


图7 反应器中氨氮含量变化

Fig. 7 The situation of NH₃-N in rector

2.4 微好氧及厌氧条件在实际工程中的适用性

研究的微好氧条件是保持反应器开放运行,液面充分与大气接触,同时进行机械搅拌,增加气液界面,加强溶解氧的复入,检测反应器内 DO(溶解氧)浓度维持在 1.3~1.6 mg/L,ORP 维持在(-215±35)mV,即可以维持微好氧条件,实际工程中容易达到。

厌氧反应器为密闭运行,避免大气中溶解氧的复入,同时在摇床中保持溶液震荡,随着碳源(COD)的降解,原来废水中的溶解氧被迅速消耗,检测反应器内 DO 浓度维持在 0.3~0.5 mg/L,ORP 维持在(-235±37)mV,达到了厌氧条件。实际工程中,作为水解酸化的厌氧反应器通常只需保持溶液静置,不加搅拌也难以进行震荡,根据经济条件可密闭也可不密闭。

由于微好氧反应器优良的水解酸化效果,对明胶废水而言,适宜采用微好氧水解酸化,一般情况下只需在原来的厌氧反应器中加上机械搅拌,并去掉密闭设施即可,在工程中容易实现。所以,按照研究结果,推荐采用微好氧水解酸化进行明胶废水的预处理。

3 结论

1) 微好氧反应器最大的 COD 去除率可达 25%,厌氧反应器最大的 COD 去除率可达 22%,微好氧条件相比厌氧条件对有机物的去除效果更好。

2) 微好氧反应器产生的 VFA 含量高于厌氧反应器,并且出水 pH 值低于厌氧反应器,更加接近中性,为后续的生物处理提供良好基础。

3) 微好氧反应器与厌氧反应器对蛋白质的去除效果相差不大,但由于微好氧反应器的敞口以及搅拌作用导致部分氨氮的挥发扩散,微好氧反应器中氨氮的含量要低于厌氧反应器,更加有利于微生物的生存与后续的生物处理,进一步说明微好氧水解酸化反应器对明胶废水的处理效果优于厌氧反应器。

4) 在实验室条件下,微好氧水解酸化反应器比厌氧水解酸化反应器在有机物的去除、水质改善方面具有更好的处理效果;在实际工程中,微好氧条件也容易实施,微好氧水解酸化适宜在明胶废水的处理中作为预处理工艺。

参考文献:

- [1] 赵峰. 明胶生产废水末端综合治理试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

- ZHAO F. Experimental study of treatment synthetically on gelatin production wastewater [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 樊艳丽, 孔秀琴, 牛佳雪. 活性污泥法处理高钙废水中污泥特性的变化[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3670-3674.
- FAN Y L, KONG X Q, NIU J X. Change of sludge characteristics in high calcium wastewater by activated sludge process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3670-3674. (in Chinese)
- [3] 邓昕轶. 物化+水解酸化+两级 A/O 处理明胶废水的试验研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(3): 81-83.
- DENG X Y. Experimental study on the treatment of wastewater from gelatin production by physico-chemical method+hydrolytic acidification+two stage A/O process [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(3): 81-83. (in Chinese)
- [4] 孔秀琴, 高萌, 周昌琴, 等. 生物预酸化处理明胶废水对活性污泥减量化的作用[J]. 工业水处理, 2016, 36(10): 36-39.
- KONG X Q, GAO M, ZHOU C Q, et al. Effect of the biological pre-acidification treatment of gelatin wastewater on activated sludge reduction [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(10): 36-39. (in Chinese)
- [5] BREURE A M, ANDEL J G V. Hydrolysis and acidogenic fermentation of a protein, gelatin, in an anaerobic continuous culture [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1984, 20(1): 40-45.
- [6] 孟庆彬. 水解酸化-SBR 工艺在食品加工废水处理中的应用[J]. 环境工程, 2011, 29(Sup1): 114-116.
- MENG Q B. Application of hydrolytic acidification, SBR process in treatment of food wastewater [J]. Environmental Engineering, 2011, 29(Sup1): 114-116. (in Chinese)
- [7] YAN P, GUO J S, WANG J, et al. Enhanced excess sludge hydrolysis and acidification in an activated sludge side-stream reactor process with single-stage sludge alkaline treatment: a pilot scale study [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2016, 23(22): 1-10.
- [8] 熊攀攀. 微氧水解酸化-A/O 工艺处理石化废水及微生物种群结构分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- XIONG P P. Treatment of petrochemical wastewater by micro-aerobic hydrolysis acidification-A/O processes and analysis of microbial community [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese)
- [9] RAMOS I, PÉREZ R, REINOSO M, et al. Microaerobic digestion of sewage sludge on an industrial-pilot scale: the efficiency of biogas desulphurisation under different configurations and the impact of O₂ on the microbial communities [J]. Bioresource Technology, 2014, 164(7): 338-346.
- [10] TIAN S. The process of hydrolysis and acidification of swine manure under limited dissolved oxygen [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(7): 1083-1088.
- [11] ZUO N, JI F Y. Optimizing and controlling of dissolved oxygen in advanced HA-A/A-MCO sludge reduction process [J]. Asian Journal of Chemistry, 2012, 24(10): 4784-4786.
- [12] 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 等. 微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3738-3742.
- ZHU C, WU C Y, ZHOU Y X, et al. Application of micro-aerobic hydrolysis acidification in the pretreatment of petrochemical wastewater [J]. Environmental Sciences, 2015, 36(10): 3738-3742. (in Chinese)
- [13] 王佩超, 吴昌永, 周岳溪, 等. 石化废水微好氧水解酸化与厌氧水解酸化的运行对比[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(5): 386-390.
- WANG P C, WU C Y, ZHOU Y X, et al. Comparative study of micro-aerobic and anaerobic hydrolysis acidifications of petrochemical wastewater [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(5): 386-390. (in Chinese)
- [14] 王星, 初里冰, 丁鹏元, 等. 微氧水解酸化处理石化废水的生物降解特性[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 161-167.
- WANG X, CHU L B, DING P Y, et al. Biodegradation characteristics of petrochemical wastewater by micro-aerobic hydrolysis acidification [J]. Journal of Environmental Science, 2015, 35(1): 161-167. (in Chinese)
- [15] 宋梦琪, 周春江, 马鲁铭. 水解酸化工艺处理印染废水的机理[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 102-106.
- SONG M Q, ZHOU C J, MA L M. Mechanism of printing and dyeing wastewater treatment by hydrolysis and acidification process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1): 102-106. (in Chinese)
- [16] 丁雷, 祁佩时, 赵一先. 水解酸化工艺效果评价体系研究[J]. 环境工程, 2012, 30(6): 65-68.
- DING L, QI P S, ZHAO Y X. Evaluation system on treatment effect of hydrolysis and acidification process [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(6): 65-68. (in Chinese)