

超微细气泡处理印染废水

施晨¹, 凌福康¹, 冯辉辉², 朱荣麟¹, 吴伟立^{1*}

¹宁波长净环保材料工程有限公司, 浙江 宁波

²宁波黄家埠滨海污水处理有限公司, 浙江 余姚

收稿日期: 2023年11月8日; 录用日期: 2023年12月8日; 发布日期: 2023年12月19日

摘要

随着我国纺织业日益壮大, 随之而来的就是大量的污水排放。印染废水色度高, 成分复杂, 可生化性极低, 普通的生化处理已无法满足许多企业的处理要求。通过研究发现, 将臭氧+超微细气泡处理工艺与现在常见的一些污水处理工艺相结合, 就可以达到更好的污水处理效果。本文就以宁波某印染废水处理厂为研究对象, 在实际运行中探究臭氧超微细气泡对印染废水的处理效果。

关键词

超微细气泡, 印染废水, 污水处理

Treatment of Printing and Dyeing Wastewater with Ultrafine Bubbles

Chen Shi¹, Fukang Lin¹, Huihui Feng², Ronglin Zhu¹, Weili Wu^{1*}

¹Ningbo Changjing Environmental Protection Materials Engineering Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²Ningbo Huangjiabu Binhai Sewage Treatment Co., Ltd., Yuyao Zhejiang

Received: Nov. 8th, 2023; accepted: Dec. 8th, 2023; published: Dec. 19th, 2023

Abstract

With the increasing growth of China's textile industry, a large amount of sewage discharge has followed. Printing and dyeing wastewater has high chromaticity, complex components, and extremely low biodegradability. Ordinary biochemical treatment can no longer meet the treatment requirements of many enterprises. Through research, it has been found that combining the ozone ultrafine bubble treatment process with some commonly used sewage treatment processes can

*通讯作者。

achieve better sewage treatment results. This article will take a printing and dyeing wastewater treatment plant in Ningbo as the research object, and explore the treatment effect of ozone ultra-fine bubbles on printing and dyeing wastewater in actual operation. title, main text, figure, table and references are defined, and this document is formatted according to the Hans standard, which illustrates all the formats.

Keywords

Ultrafine Bubbles, Printing and Dyeing Wastewater, Sewage

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

印染工艺有洗染、印花、上浆等多道加工工序，每道工序都会产生大量有毒有害的废水，污水中主要含有纺织纤维上的污物、油脂、盐类以及加工过程中附加的各种浆料、染料、表面活性剂、助剂、酸碱等，其成分极为复杂。由于印染过程中会用到大量的染料，因此产生的印染废水还含有很高的色度。如此巨大的废水产生量，若不进行合理有效的处理，就会对环境造成严重污染，甚至影响人类生命健康。据统计，我国的纺织业一年产生的废水排放量大约有 15.23 亿吨，其中就包括了 13.4 亿吨的印染废水[1]。为了规范纺织整染工业企业的废水排放，国家环境保护部制定了印染废水排放标准《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287-2012)，要求纺织印染企业严格按照此标准来排放废水，以便于废水的后续处理。

对于印染废水的处理主要有物理法，化学处理法和生物处理法，物理法常用的工艺有吸附法、气浮法和过滤法；化学法常用的工艺有光催化法、臭氧催化氧化法、芬顿法和电化学氧化法；生物法常用的工艺有活性污泥法及其延伸工艺。现阶段国内对于印染废水深度处理的主流工艺有芬顿法和臭氧催化氧化法。而超微细气泡技术作为一种新型的高级氧化技术，也经常用于印染废水的处理。

芬顿法是由化学家 Fenton 于 1893 年发现并提出，芬顿法属于高级氧化技术，其原理在于将过氧化氢(H_2O_2)与二价铁离子混合从而产生具有强氧化性的羟基自由基($\cdot OH$)，它与污染物之间的链反应会使有机物降解，最后生成二氧化碳(CO_2)和水[2]。单宁[3]等采用芬顿法在 pH 为 4，反应时间在 30 min 的条件下对某印染厂的生化出水进行处理，COD 去除率可达到 70%。除了印染废水，芬顿法对于许多工业废水都有较好的处理效果。张庆喜[4]等就某些含有高盐、具有一定 COD、氨氮和总磷的工业废水，利用芬顿法对尾水进行处理，处理后发现芬顿后的出水 COD 去除率可达到 81%~92%。总的来说，芬顿法能够有效去除废水的有机物。

臭氧催化氧化法与芬顿法相同，也属于高级氧化技术。臭氧本身具有极强氧化性和杀菌性，利用这两个特性，臭氧通常用于漂白、消毒、杀菌及氧化分解。但是臭氧在直接氧化的过程中常常会出现臭氧利用率低的情况。因此有些时候需要将其与其他工艺联用来达到更好的处理效果。例如将臭氧与气浮技术相结合[5]来提高臭氧的利用效率，使得废水处理效果得到了进一步的提升。而臭氧催化氧化技术的原理在于通过投加相应的催化剂使臭氧催化分解来生成氧化能力更强的羟基自由基，从而达到降解有机物的目的[6]。臭氧催化氧化反应快速，不会对环境造成二次污染。在工业废水处理领域有着较好的应用前景。

在气浮技术出现之前，沉淀法是应用最为广泛的水处理工艺，直到气浮技术的出现，使得污水在固液分离方面更加快速，高效，它的出现使得净水技术得到了进一步的提升。因为水中的气泡本身带有负

电荷因此气泡可以吸附水中悬浮物并依靠浮力将其带到水体表面,从而实现固液分离[7]。但是当制造出来的气泡不够微细时,那么气泡就会对絮粒的粘着能力就会大打折扣,过大的气泡还会造成严重的紊流而撞碎絮粒。根据 Stokes 定律,气泡在水中的上升速度与气泡直径的平方成正比,更长的停留时间可以让气泡吸附更多的絮粒。因此在很长一段时间,人们都将重点放在如何才能产生更小的气泡,经过不断的探索和研究后最终发现了超微细气泡。超微细气泡技术起源于日本,最初应用于水产养殖业[8]。随着技术的不断发展和进步,超微细气泡技术也逐渐被应用于更广阔的领域。在水环境修复领域,国外有许多成功的案例,例如韩国仁川国际机场的地表水污染治理,以及日本的栃木县中央公园、势田川的微污染水体治理都取得了良好的效果[9]。Zhang 等用臭氧大气泡和臭氧超微细气泡处理湿纺丙烯酸废水,发现用臭氧超微细气泡处理后废水中的 COD、氨氮去除率分别为 42%、21%,比臭氧大气泡分别提高了 25%、9%。通过使用 3D-EEM 对羟基自由基进行半定量测量发现臭氧超微细气泡中产生了更多的羟基自由基[10]。根据超微细气泡的特性,方红等提出了一种新型的造纸废水深度处理技术——RDAF 辐流式微纳米气浮,对 COD 去除率可以达到 75%左右[11]。超微细气泡与普通气泡相比体积更小,可以长时间停留在水中;气液传质效率比普通气泡更高,气泡越小,比表面积越大,表面张力就越大。气泡大小在 1000 nm 时内压达到了 3.8 bar,高压使超微细气泡破裂收缩或消失溶于水。该特性使得水体中溶解氧达到过饱和条件时,超微细气泡仍可继续进行气体的传质过程并保持高效的传质效率;超微细气泡电位值的范围通常为-40~-100 mV,表面带-电荷,使气泡间很难合并,表现出良好的稳定性与持久性。同时,可吸附在水中漂浮带+电荷的小颗粒物质(污浊物质等),正负电荷的接触,促进气泡的收缩破裂,气泡破裂后能够自发生成大量的羟基自由基($\cdot\text{OH}$),降解水中的难降解的物质,实现水质提升。

本文以黄家埠滨海污水处理厂为研究对象,了解分析印染废水水质情况及污水厂在现阶段的运行情况,根据污水厂实际运行情况设计相关处理工艺及运行参数,跟踪监测废水水质。结合相关数据,分析臭氧超微细气泡对印染废水的处理效果。本文所探讨的印染废水处理方法可为类似污水处理工程提供一定的参考。

2. 正文

2.1. 研究对象分析

在本次对臭氧超微细气泡处理印染废水的研究项目中,我们以黄家埠滨海污水处理厂的印染废水为研究对象。据调查,黄家埠污水处理厂于 2003 年起专业处理黄家埠镇印染工业园区企业排放的印染废水,现阶段污水处理量为 1.0 万 m^3/d ,进水水质执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287-2012)之间接排放标准。出水水质执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287-2012)之直接排放标准。由于周边印染厂产生的印染废水水质变化较大,可生化性较差,污水厂现有生化系统处理能力较弱,深度处理臭氧利用率低,再加上当地政府对出水标准的严格把控,因此黄家埠污水处理厂计划对出水水质进行进一步提升,以此来达到目标水质。

2.1.1. 存在的问题

由于黄家埠污水处理厂承接的都是周围印染厂所产生的印染废水,因此导致进入污水处理厂的原水可生化性差。另外由于污水厂原有的水解酸化池处理效果不佳,使生化处理没有达到预期目标,同时原深度处理阶段臭氧利用率低,加上水处理药剂的大量使用,使得运行成本大大增加。

2.1.2. 工艺运行状况

周边的印染厂产生的印染废水流入黄家埠污水厂后首先进入调节池对污水进行水量水质的初步调节,混凝沉淀后污水流入初沉池经行沉淀后流入水解酸化池提高污水的可生化性,随后流入生化池进行

生化处理，之后进入二沉池进行泥水分离，分离出去的水流入臭氧及接触氧化池进行深度处理，经过活性炭的吸附以及再次的混凝沉淀处理后流入滤站及排海泵站，最后达标排放。工艺流程图见图 1。

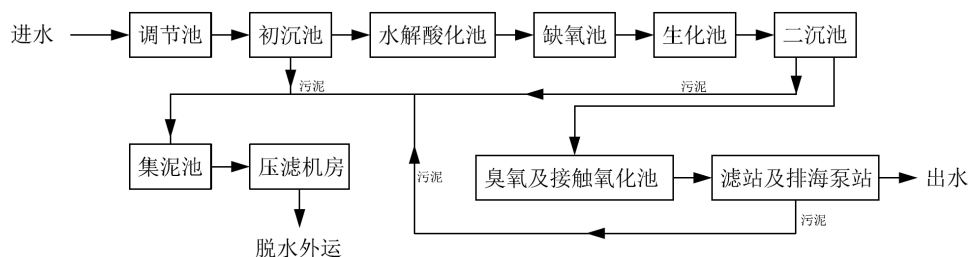


Figure 1. Process flow diagram

图 1. 工艺流程图

2.1.3. 进水水质

根据污水厂统计数据，污水厂现状进水指标详见表 1。

Table 1. Current status of influent water quality

表 1. 进水水质现状

水质指标	COD _{Cr} (mg/l)	SS (mg/l)	色度(倍)
进水现状	206~376	86~277	50~100

2.1.4. 出水水质

污水厂尾水排放执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287-2012)直接排放标准，详见表 2。

Table 2. Current status of influent water quality

表 2. 出水水质

水质指标	COD _{Cr} (mg/l)	SS (mg/l)	色度(倍)	TP (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	TN (mg/l)
出水	80	50	50	0.5	10	15

2.2. 工艺比选

经过对污水厂水量水质特性的分析，并分析各项污染物指标，再此基础上结合处理效果稳定性、工艺控制灵活性、工程实施可行性、系统优化整体性及出水水质标准，提出了三个适宜的污水处理工艺(详见表 3)。

Table 3. Process comparison and selection

表 3. 工艺比选

序号	处理工艺
1	预处理 + 生化处理 + 深度处理(芬顿氧化法)
2	预处理 + 生化处理 + 深度处理(臭氧催化氧化法)
3	预处理(臭氧超微细气泡技术) + 生化处理 + 深度处理(臭氧超微细气泡技术)

芬顿氧化法的主要过程包括调酸、药剂投配、污泥处理。在运行过程中需要先将池内废水 pH 值调至 3~4，然后需要根据实际情况投加一定量的硫酸亚铁和过氧化氢来产生大量的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)，最后通过碱液中和 pH 后流入沉淀池进行固液分离。若采用芬顿氧化法则需要新的废水处理单元，建造相应的构筑物，处理过程中还会产生大量污泥，使得最终的污泥处理成本也会相应增加。

臭氧催化氧化法的原理是通过向污水中投加特定的催化剂,使得臭氧吸附在催化剂表面分解生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$),并利用羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的强氧化性将有机物经行氧化分解。臭氧催化氧化技术被广泛应用于各种化工废水的处理,但是由于化工废水种类繁多,因此催化剂的类型以及相应的投加量也是一个影响污水处理效果的重要因素。另外,由于不同的催化剂有着不同的使用寿命,因此随着时间的推移,还需要将催化剂进行更换,使得废水处理的成本大大增加。

超微细气泡技术,芬顿氧化法和臭氧催化氧化法的相同点在于都是利用产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)来氧化分解水中的污染物质,达到废水处理的效果,但是不同点在于超微细气泡技术是通过气泡收缩破裂从而产生大量羟基自由基($\cdot\text{OH}$),其产生羟基自由基的方式更为直接,并且运行过程中没有任何药剂添加,也不需要另外新增其他构筑物,只需要安装超微细气泡发生设备,设备可自吸大量空气并在设备内部经过回旋切割从而产生大量致密的超微细气泡,引入臭氧还能进一步增加羟基自由基的产生量,提升臭氧利用率。

通过对以上三种印染废水处理工艺的比较可以看出,臭氧超微细气泡工艺的操作更加便捷,运行成本相对较低。更适用于处理黄家埠污水厂的印染废水。

3. 工艺设计及运行

3.1. 实验验证

取黄家埠污水处理厂进水 80 L,二沉池出水 80 L 经行验证实验。

预处理实验:使用 CJFQ01-05 超微细气泡发生器并通入 10 g/h 臭氧处理污水厂进水,从表 4 中可以看出,处理 3 个小时后,COD 从 274 mg/L 下降至 120 mg/L,去除率可达 56%;SS 从 90 mg/L 下降至 23 mg/L,去除率达到了 74%;废水 B/C 从 0.07 上升至 0.20,大幅提升了废水的可生化性。并且处理过程中废水色度明显下降,如图 2。

Table 4. Water inlet treatment data sheet

表 4. 进水处理数据表

实验时间(h)	臭氧用量(g/h)	臭氧累计用量(g)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	BOD5 (mg/l)	B/C
0	10	0	274	90	20	0.07
0.5	10	5	193	45	14	0.07
1	10	10	169	30	21	0.12
1.5	10	15	154	29	24	0.16
2	10	20	138	25	23	0.17
2.5	10	25	135	27	24	0.18
3	10	30	120	23	24	0.20

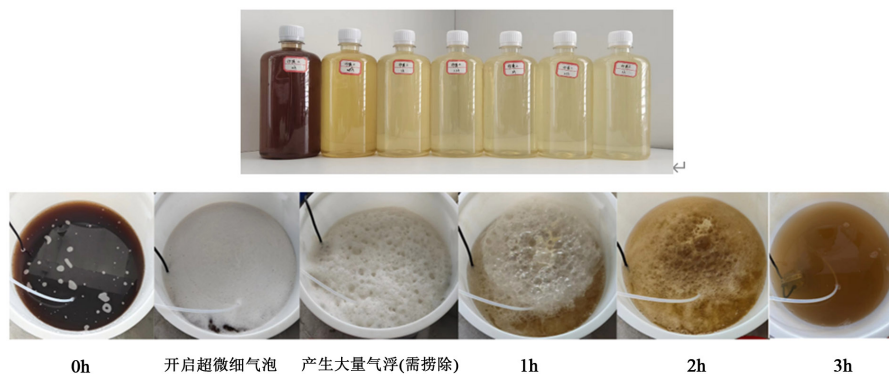


Figure 2. Water sample changes

图 2. 水样变化情况

深度处理实验：使用 CJFQ01-05 超微细气泡发生器并通入 10 g/h 臭氧处理污水厂二沉池出水，从表 5 可以看出，处理 5 个小时后，废水 COD 从 104 mg/L 下降至 33 mg/L，去除率可达 62%，完全达到了要求的 COD70 mg/L 以内的排放目标；SS 指标从 90 mg/L 下降至 36 mg/L，去除率为 60%，并且运行期间废水颜色逐渐变淡、变清澈，如图 3。

Table 5. Data sheet for secondary sedimentation tank effluent treatment

表 5. 二沉池出水处理数据表

实验时间(h)	臭氧用量(g/h)	臭氧累计用量(g)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
0	10	0	104	90
1	10	10	78	68
2	10	20	69	56
3	10	30	42	48
4	10	40	39	41
5	10	50	33	36

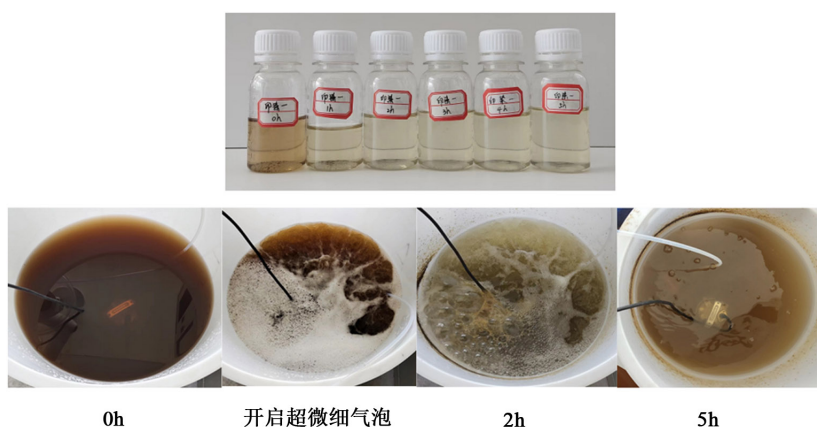


Figure 3. Water sample changes

图 3. 水样变化情况

通过实验验证发现，使用超微细气泡 + 臭氧处理印染废水是可行的，并且在没有任何药剂添加的情况下，处理效果也非常明显。

3.2. 工艺设计

通过与黄家埠污水处理厂的协商与交流，决定在试运行阶段对污水厂的调节池和臭氧接触氧化池进行改造升级，要求出水 COD 浓度维持在 60 mg/L 左右。根据已有资料，现阶段黄家埠污水厂在接触氧化池投放了约 200 ppm 的活性炭，加上在接触氧化池末端投放的 PAM 和聚合硫酸铁，最终可将出水 COD 浓度维持在 75 mg/L 左右。设计在调节池加入 6 台超微细气泡发生设备，并结合 2~3 kg 臭氧，以此来提升水厂进水的可生化性，加强后续生化处理效果；在臭氧接触氧化池段加入 10 台超微细气泡发生设备，并结合 9~10 kg 臭氧，来改善原先臭氧利用率低的情况，还能均质提升活性炭的吸附能力，从而加强深度处理效果，使出水达到目标水质。具体处理工艺如图 4 所示。我们在原有处理工艺的基础上，分别在预处理阶段的调节池和深度处理阶段的臭氧接触氧化池投加了超微细气泡发生设备。

分别设置调节池进水点和出水点；二沉池出水点；臭氧反应池进水点；接触氧化池 midpoint (排除尾端药剂影响)；尾水排放点 6 个采样点经行跟踪检测。主要检测指标为 BOD、COD 和色度，BOD 检测采用稀释接种法，COD 检测采用快速消解法，色度检测采用目视比色法。

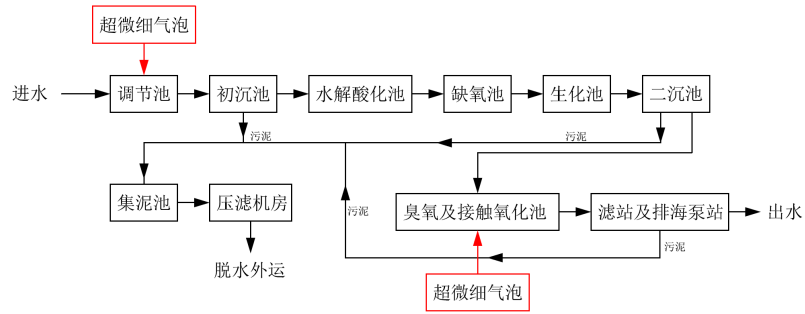


Figure 4. Process flow diagram
图 4. 工艺流程图

3.3. 数据分析

经过一段时间的稳定运行，以其中一个月的运行数据为例，各监测点数据如图 5 所示。

取样时间	COD数据记录表						色度数据记录表					
	调节池进水	调节池出水	二沉池出水	臭氧反应池进水	接触氧化池中端	在线数据	调节池进水	调节池出水	二沉池出水	臭氧反应池进水	接触氧化池中端	出水
2022/11/1 8:00	231.60	189.62	127.90	85.78	70.70	53.60	100.00	120.00	90.00	50.00	70.00	30.00
2022/11/1 20:00	225.60	216.60	126.40	94.81	63.21	62.50						
2022/11/2 8:00	183.60	219.60	126.40	76.75	61.70	57.80	100.00	110.00	70.00	30.00	50.00	20.00
2022/11/2 20:00	216.60	207.60	121.90	85.78	63.21	60.40						
2022/11/3 8:00	249.80	213.60	129.40	79.76	84.28	65.50	130.00	110.00	80.00	70.00	70.00	20.00
2022/11/4 8:00	252.80	219.60	87.28	75.24	81.26	60.70	130.00	140.00	70.00	60.00	50.00	30.00
2022/11/5 8:00	210.60	198.66	93.00	87.29	75.24	60.60	120.00	140.00	80.00	60.00	40.00	30.00
2022/11/5 20:00	255.80	213.60	90.30	97.82	85.78	60.40						
2022/11/6 8:00	282.80	246.80	93.30	93.30	69.22	60.80	130.00	130.00	70.00	50.00	40.00	30.00
2022/11/7 8:00	243.80	261.80	87.28	70.73	72.24	63.90	130.00	150.00	80.00	70.00	60.00	60.00
2022/11/7 20:00	258.80	234.60	102.34	73.74	61.70	63.10						
2022/11/8 8:00	264.80	225.60	96.32	84.28	69.23	64.90	150.00	170.00	140.00	80.00	60.00	40.00
2022/11/8 20:00	276.80	216.60	102.34	88.79	75.25	60.30						
2022/11/9 8:00	228.60	222.60	105.34	96.32	78.26	61.50	140.00	160.00	130.00	50.00	70.00	30.00
2022/11/9 20:00	261.80	231.60	105.34	60.20	58.69	58.00						
2022/11/10 8:00	261.80	228.60	108.36	99.33	69.23	59.70	140.00	150.00	120.00	60.00	80.00	30.00
2022/11/10 20:00	286.00	246.80	111.36	91.80	70.74	65.50						
2022/11/11 8:00	304.00	252.80	114.38	82.77	87.29	59.30	140.00	130.00	100.00	70.00	50.00	20.00
2022/11/11 20:00	286.00	246.80	105.34	85.78	63.21	68.90						
2022/11/12 8:00	255.80	246.80	106.80	99.81	69.23	65.70	130.00	130.00	50.00	80.00	60.00	70.00
2022/11/12 20:00	289.00	228.80	108.36	93.31	78.79	64.20						
2022/11/13 8:00	283.00	237.80	114.38	106.80	61.17	64.50	140.00	120.00	90.00	40.00	70.00	20.00
2022/11/13 20:00	252.80	249.80	105.34	87.29	70.73	66.80						
2022/11/14 8:00	289.00	261.80	114.38	90.30	82.77	67.30	130.00	140.00	70.00	40.00	60.00	40.00
2022/11/14 20:00	279.80	258.80	105.34	87.29	55.68	62.90						
2022/11/15 8:00	226.60	249.80	111.36	97.82	78.26	65.30	130.00	140.00	100.00	90.00	60.00	40.00
2022/11/15 20:00	237.60	243.80	111.36	96.32	85.78	64.50						
2022/11/16 8:00	237.60	237.60	120.40	91.80	66.22	62.30	150.00	160.00	100.00	100.00	50.00	30.00
2022/11/16 20:00	270.80	243.80	117.38	85.78	78.26	60.40						
2022/11/17 8:00	267.80	234.60	116.38	90.30	76.75	63.20	140.00	150.00	110.00	60.00	60.00	40.00
2022/11/17 20:00	240.80	231.60	99.32	99.33	73.74	64.70						
2022/11/18 8:00	252.80	228.60	111.36	112.80	76.75	64.40	130.00	140.00	100.00	80.00	60.00	50.00
2022/11/18 20:00	234.60	234.60	114.38	82.60	70.73	66.10						
2022/11/19 8:00	252.80	225.60	108.36	93.31	85.78	62.40	120.00	140.00	110.00	90.00	60.00	30.00
2022/11/20 8:00	228.60	237.60	103.80	94.81	63.21	61.10	130.00	150.00	80.00	100.00	60.00	70.00
2022/11/20 20:00	231.60	258.80	99.32	106.80	99.33	59.80						
2022/11/21 8:00	255.80	227.60	126.42	70.73	75.20	59.70	120.00	130.00	90.00	50.00	70.00	40.00
2022/11/21 20:00	252.80	252.80	117.38	105.30	57.19	60.80						
2022/11/22 8:00	252.80	273.80	108.36	101.30	63.22	59.80	110.00	120.00	80.00	50.00	60.00	40.00
2022/11/22 20:00	255.80	222.60	114.38	100.80	64.71	59.70						
2022/11/23 8:00	264.80	246.80	117.38	94.81	85.78	63.00	100.00	120.00	90.00	70.00	50.00	30.00
2022/11/23 20:00	285.80	249.80	126.42	96.32	90.30	57.60						
2022/11/24 8:00	267.80	249.80	120.40	94.81	73.74	59.50	110.00	130.00	90.00	90.00	60.00	30.00
2022/11/25 8:00	252.80	234.60	96.32	76.75	61.70	63.10	130.00	120.00	80.00	40.00	60.00	30.00
2022/11/25 20:00	237.60	219.60	99.32	100.80	60.20	59.30						
2022/11/26 8:00	234.60	219.60	105.34	100.80	96.32	66.00	140.00	150.00	80.00	70.00	40.00	20.00
2022/11/26 20:00	261.80	252.80	103.40	120.40	111.30	66.50						
2022/11/27 8:00	258.80	252.80	105.34	90.30	88.79	66.20	140.00	140.00	90.00	70.00	60.00	40.00
2022/11/27 20:00	285.80	255.80	102.34	100.80	73.74	65.00						
2022/11/28 8:00	252.80	258.80	99.32	100.80	72.24	65.80	120.00	130.00	70.00	60.00	30.00	20.00
2022/11/28 20:00	288.80	261.80	108.36	102.34	79.76	66.40						
2022/11/29 8:00	282.80	258.80	109.36	90.30	58.69	66.40	110.00	120.00	80.00	90.00	40.00	30.00
2022/11/29 20:00	243.80	273.80	102.34	91.80	78.26	54.90						
2022/11/30 8:00	270.80	243.80	99.32	87.29	55.68	61.60	110.00	130.00	70.00	60.00	30.00	20.00
2022/11/30 20:00	255.80	252.80	96.32	75.25	63.21	59.40						

Figure 5. Partial operational data
图 5. 部分运行数据

COD 数据变化情况如图 6 所示。

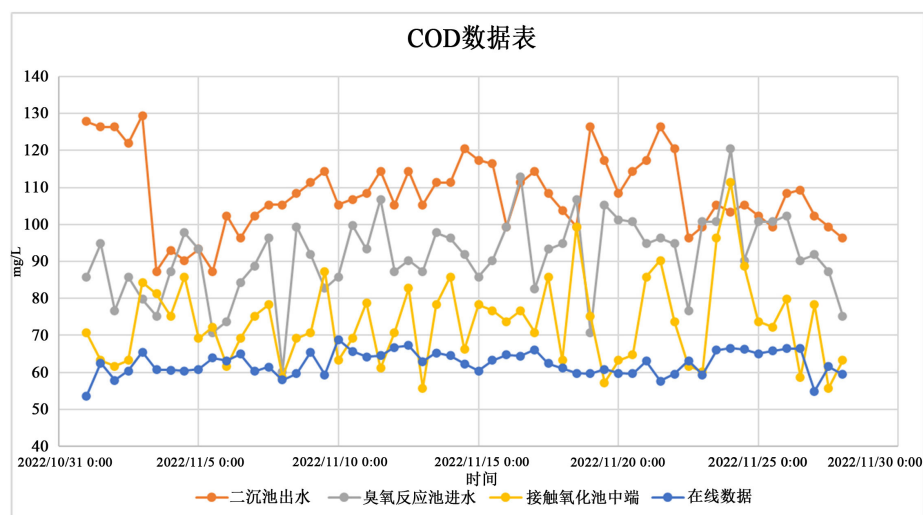


Figure 6. COD changes
图 6. COD 变化情况

根据选取的部分运行数据显示，各监测点均值数据如表 6 所示。

Table 6. Mean data of monitoring points
表 6. 监测点均值数据

检测点	调节池 进水点	调节池 出水点	二沉池 出水点	臭氧反应池 进水点	接触氧化池 中点	尾水排放点
CODcr (mg/l)	260	238	108	90	74	62
色度 (倍)	127	136	89	66	56	34

由表 6 可知，在臭氧超微细气泡的作用下，臭氧反应池和接触氧化池的设备投放段，平均 COD 从 90 mg/L 下降至 74 mg/L，尾水 COD 可稳定在 70 mg/L 以下。色度变化也较为明显。

4. 经济运行指标概算

经济运行指标

Table 7. Electricity consumption
表 7. 电耗

序号	名称	数量	功率(kw)	用电时间(h)	用电(kwh)
1	潜水泵	16	5.5	24	2112
2	合计	/	/	/	2112

设备运行过程可减少活性炭以及次氯酸钠的投加。

新增运行费用为电费，项目新增 16 台 45 m³/h，扬程 23 m 的泵，每台泵功率为 5.5 kW，按照 80% 的运行效率，因此总功率为 1690 kwh，按 0.8 元/kwh 计算，新增电费约 1352 元，折合每吨废水为 0.1 元/吨。

5. 结论与展望

5.1. 结论

在本次对印染废水处理的研究中,我们以黄家埠印染废水处理厂为对象,使用超微气泡发生器与臭氧联用,将其与黄家埠污水厂现有处理工艺结合,通过实验验证与现场实际运行,并对各个环节的污水指标进行跟踪检测,结合相关文献资料得出了以下结论:

(1) 超微细气泡工艺能够有效提升臭氧利用率,实现尾水达标排放。在黄家埠污水处理厂原先的处理工艺中,臭氧在臭氧接触氧化池的实际利用率较低,因此处理效果并不理想。加入超微细气泡发生器后,臭氧与超微细气泡相结合,从而大幅提升了臭氧传质效率,使得臭氧利用率大大提升。加上超微细气泡破裂后所产生的大量的羟基自由基,使得废水的 COD 指标得到了进一步的降低,从而使出水能够稳定达标。

(2) 相比其他印染废水处理工艺,以芬顿氧化工艺为例,若使用芬顿工艺处理,则需要另外建造酸碱中和池,不仅如此,后续运行需要购入双氧水等药剂,其运行成本高昂。超微细气泡工艺的费用更低,投入使用后不需要新建任何其他构筑物,只需要将设备投入到原有的水处理设施中,连接相应的固定装置就可运行使用,在后续运行过程中可减少药剂的投加,且新增运行费用仅有电费,还能大幅提升臭氧的利用效率,防止臭氧逸散而造成的浪费。

(3) 普通臭氧接触氧化工艺是通过曝气或溶气装置将臭氧通入水中,由于曝气或溶气装置所产生的气泡粒径较大,因此也缩短了气泡在水中的停留时间,导致部分臭氧在还未反应的情况下就直接逸散出水面,加上此类装置极易容易发生堵塞,需要定期清理,耗时耗力。而超微细气泡发生器可有效解决此类问题,由于其产生的超微细气泡粒径小,使得臭氧利用率大幅提升,而且臭氧还能增强超微细气泡的负电位,使气泡能更好的吸附正电荷物质,进一步增强超微细气泡对废水的处理效率。不仅如此超微细气泡发生器不易堵塞,维护方便,减少了人工维护的成本。

5.2. 展望

超微细气泡的应用范围十分广泛,不仅是在水处理领域,在其他行业也可以做到高效的应用。其中包括食品、工业、制造业等许多行业,对于食品行业,超微细气泡可用于消毒,清洗,栽培,养殖等;在工业方面,可用于多数的废水废气治理;在制造业可用于提升产品制造加工的精度,提高产量等等。本文仅仅是对引印染废水的处理做了一个粗略的研究,我们也仍然在不断深入研究超微细气泡的作用。而超微细气泡技术对于其他行业是否能有更好的促进效果则需要更多的实践和研究。

参考文献

- [1] 王丹宇,李子程. 印染废水处理技术与展望[J]. 广东化工, 2022, 49(19): 161-162+168.
- [2] 方景礼. 废水处理的实用高级氧化技术第一部分——各类高级氧化技术的原理、特性和优缺点[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(8): 350-355. <https://doi.org/10.19289/j.1004-227x.2014.08.009>
- [3] 单宁, 汤梅洁. 芬顿法深度处理印染废水[J]. 浙江化工, 2015, 46(2): 47-49.
- [4] 张庆喜, 何如民, 黄启镜, 覃钦, 许玉健, 郭华. 芬顿氧化法深度处理工业废水尾水中试研究[J]. 广东化工, 2022, 49(14): 145-147.
- [5] 游婷, 王永磊, 金丽, 邵明睿, 元华, 韩延镇. 臭氧化微气泡强化气浮技术研究[J/OL]. 工业水处理, 2022: 1-22. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2022-0887>
- [6] 孙浩. 臭氧催化氧化技术在化工废水处理中的应用[J]. 清洗世界, 2022, 38(1): 10-11.
- [7] 石金田, 张士金, 井继琛. 气浮净水技术及应用[J]. 江苏化工, 2003(1): 48-50.

-
- [8] 孙茹, 薛红俊. 微纳米气泡技术在环保领域中的应用[J]. 石化技术, 2021, 28(4): 61-62.
- [9] 翟伟哲, 王永刚, 王旭, 董婧, 王恒嘉. 微纳米气泡的特性及在水处理技术上的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(7): 95-98.
- [10] Zheng, T.L., Wang, Q.H., Zhang, T., *et al.* (2015) Microbubble Enhanced Ozonation Process for Advanced Treatment of Wastewater Produced in Acrylic Fiber Manufacturing Industry. *Journal of Hazardous Materials*, **287**, 412-420.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.069>
- [11] 方红, 蒋孔坚, 王加峰, 王树岩, 刘圣. RDAF 辐流式微纳米气浮深度处理造纸废水[J]. 中华纸业, 2013, 34(12): 45-47.