

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2404281

纺织印染废水处理技术现状及研究进展

田肖^{1,2}, 王栋¹, 张海峰², 杨敏²

(1. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 中国科学院生态环境研究中心 高浓度难降解有机废水处理技术国家工程实验室, 北京 100085)

摘要: 本文针对纺织印染废水的主要水质特征、污染物组成和来源, 综述了目前国内外纺织印染行业常用的处理工艺(机制、效果及优缺点), 包括物理处理(吸附、膜分离), 物化处理(离子交换、超声波降解), 化学处理(混凝-絮凝、高级氧化、电化学), 生物处理(好氧、厌氧及组合工艺、生物强化工艺), 并总结了多种组合工艺对印染废水的处理效果。最后, 对纺织印染废水处理未来的发展方向进行了展望。

关键词: 纺织印染废水; 物理处理; 化学处理; 生物处理; 组合工艺

中图分类号: X791 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-719X(2024)04-0281-09

Present Situation and Research Progress of Textile Printing and Dyeing Wastewater Treatment

TIAN Xiao^{1,2}, WANG Dong¹, ZHANG Haifeng², YANG Min²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, TCU, Tianjin 300384, China; 2. National Engineering Laboratory for Industrial Wastewater Treatment, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the main water quality characteristics, pollutant composition and sources of textile printing and dyeing wastewater, this article reviews the commonly used treatment processes (mechanisms, effects, advantages and disadvantages) in the textile printing and dyeing industry summarized, including physical treatment (adsorption, membrane separation), physical and chemical treatment (ion exchange, ultrasonic degradation), chemical treatment (coagulation-flocculation, advanced oxidation, electrochemistry), biological treatment (aerobic, anaerobic and combined processes; bioaugmentation processes), and summarizes the treatment effects of various combined processes on printing and dyeing wastewater. Finally, it prospects the future development direction of textile printing and dyeing wastewater treatment.

Key words: textile printing and dyeing wastewater; physical treatment; chemical treatment; biological treatment; combined process

我国是纺织大国, 纺织行业是关系到国计民生的重要行业。然而, 纺织印染废水排放造成的污染制约着纺织行业的发展。据统计, 纺织行业每生产 1 kg 产品, 耗水量高达 200 L, 其中 90% 都在印染工艺后成为工业废水^[1]。2019 年, 我国纺织印染行业年废水排放量约为 20 亿 t, 在全国 41 个行业废水排放量中位居第三^[2]。纺织印染行业废水中的污染物组成复杂, 主要包括染料、重金属、酸、碱等^[3]。此外, 纺织废水中含大量难降解有机污染物, 是一类难处理的有害工业废水^[4]。本文在总结纺织印染废水的来源及特性的基础上, 综

合分析了纺织印染废水的处理技术及其适用性, 并对纺织废水处理技术发展提出展望。

1 纺织印染废水的主要来源及水质特征

图 1 给出了目前纺织印染生产中典型工艺的流程。通常所说的纺织印染废水是纺织染整企业内部经过分类收集或混合收集排入污水处理厂(站)的综合废水, 废水的水质会随着产品和具体工艺不同而不同, 其主要污染物既有共性又有显著差异。纺织印染

收稿日期: 2023-02-28 修订日期: 2023-06-05

作者简介: 田肖(1998—), 女, 山西长治人, 天津城建大学硕士生

通信作者: 王栋(1983—), 男, 教授, 博士, 从事工业废水处理与资源化研究。E-mail: wangdong06@tcu.edu.cn.

废水的 pH 值一般在 8~12.5 之间、化学需氧量(COD_{cr})为 400~1 000 mg/L、生化需氧量(BOD₅)为 200~450 mg/L、总悬浮固体(SS)为 50~250 mg/L、色度为 400~1 500

度^[9]。表 1 列出了主要印染工艺外排废水的水质水量特征和主要污染物等信息。

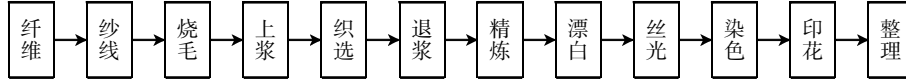


图 1 典型纺织印染生产工艺流程图

表 1 主要印染工艺外排废水水质及主要污染物特征^[1,3,6-7]

生产工艺	废水水质	pH	主要污染物
退浆	COD 高、BOD ₅ 低;可生化性差(聚乙烯醇为上浆剂) COD 约 4 000~10 000 mg/L、BOD ₅ 高;可生化性好(淀粉为上浆剂)	约 12	酶、蜡、浆料、浆料分解物、纤维屑等
煮炼	COD 约 4 000~5 000 mg/L、色度较高	强碱性	纤维素、脂类、表面活性剂等
漂白	COD 和 BOD 较低,属较清洁废水	酸性	过氧化氢、过氧乙酸等氧化剂
丝光	COD 约 800 mg/L、BOD ₅ 约 300 mg/L	12~13	质量分数为 3%~5%的 NaOH
染色	COD 约 500 mg/L、BOD ₅ 约 300 mg/L	强碱性	浆料、染料、助剂
印花	COD 约 1 000 mg/L、BOD ₅ 约 400 mg/L	碱性	浆料、染料、助剂
整理	COD 约 500~1 000 mg/L、BOD ₅ 高	碱性	纤维屑、油脂、浆料

染料是纺织印染废水中最主要的有机污染物之一。废水中的染料主要来自于染色和印花两个步骤。由于染料与织物结合不完全,在染料使用过程中有 10%~15%会进入废水中^[8-9]。

纺织印染过程中所用染料大多为合成染料,合成染料是由有机原料苯、萘、蒽等经一系列化学反应制得,通常带有芳环和杂环,会致癌、致突变,还会引发过敏和皮肤病等^[10]。染料根据其化学结构可以分成偶氮、蒽醌、靛蓝、吡嗪、吡啶、甲川、恶嗪、酞菁、噻嗪、三苯甲烷、氧杂蒽等类别;根据使用目的可以分成酸性、碱性、活性、分散、直接、还原、媒染等类别。

2 纺织印染染料废水的危害

纺织印染废水中存在染料、重金属等多种有毒物质,有生物毒性。纺织印染废水在植物、大鼠、鱼类、微生物及哺乳动物细胞中会引起过敏、致癌、致突变和细胞毒性作用^[11]。合成染料的 60%以上都是偶氮染料,结构中包含一个或多个偶氮基团^[12],据报道,偶氮、蒽醌和酞菁染料均具有生物毒性^[13]。Corce 等在对 42 种染料进行的大型蚤 48 h 急性毒性和藻类 72 h 短期毒性试验中发现分散橙 30、分散橙 61、酸性橙 7 和媒介黑 11 对大型蚤和藻类均具有较高毒性^[14]。水生态系统中的染料会通过生物链累积对人类的健康造成威胁^[15]。有报道称人体内有机物的毒性水平比在水中的初始值高 1 000 倍^[16]。

3 纺织印染废水处理技术

纺织印染废水成分复杂、水质变化大,处理难度较大,在选择处理工艺时需根据实际水质进行分析。一般可以通过物理、化学、生物或组合工艺进行处理。

3.1 物理处理法

物理方法是基于传质原理,利用吸附、膜分离等过程对印染废水进行处理。物理方法原理简单,运行管理方便,微生物毒性物质不会对处理过程产生抑制作用^[17]。

3.1.1 吸附

吸附是一种基于表面的过程,有物理吸附和化学吸附两种类型,此处更偏向于染料分子吸附在吸附剂表面的过程。利用染料分子与吸附剂之间可能存在的范德华力、静电相互作用等作用力将水中的污染物转移到吸附剂中^[18]。常用的吸附剂有沸石、黏土、壳聚糖、氧化铝、硅胶和活性炭等^[19]。Brião 等^[20]采用生物高聚物/ZSM5 沸石吸附剂对含结晶紫(15 mg/L;pH 7.5)、碱性品红(15 mg/L;pH 9.0)、亚甲基蓝(15 mg/L;pH 8.0)的染料废水进行处理,脱色率分别为 75.3%、81.2%、86.6%。此外活性炭含丰富的表面官能团和多孔结构,在吸附过程中不产生有害物质,且具有吸附速率快、化学稳定性高^[21]等优点,在工业上有着广泛的应用。近年来,由农业废物(玉米芯、椰子壳等)制得的生物炭和新型吸附剂也越来越多地用于染料的吸附。徐清艳等^[22]利用玉米芯制得的生物炭对罗丹明 B、孔雀石绿

和亚甲基蓝模拟废水进行吸附脱色研究,在最佳条件下,3种染料的吸附率均达到了90%以上。Bellouchat等^[23]利用活化的有机膨润土/海藻酸钠复合材料对甲基橙进行吸附,吸附过程符合Langmuir模型,吸附量随着复合材料中有机膨润土比例的增加而增加。

3.1.2 膜分离

膜分离根据膜对分子的选择透过性来分离去除污染物,膜法可以进行高效分离、浓缩、提纯等,且工艺简单、操作方便、易于集成控制。水处理中常用的膜分离技术有微滤、超滤、纳滤、反渗透等。微滤可用于含有染料的洗涤槽中用于去除胶体染料,还可以在膜组合工艺中作为预处理减少膜污染^[24]。超滤通常用来回收纺织印染废水中的高分子量物质,如直接染料、靛族染料、分散染料、活性染料以及化学助剂^[25]。另外,超滤出水可作为回用水用于冲洗和清洗过程。印染废水回用处理工艺可将超滤作为纳滤和反渗透的预处理^[26]。纳滤可以截留水中的有机化合物、二价盐、活性染料水解物等^[27]。反渗透膜可以有效截留矿物质盐以及包括活性染料水解物在内的所有有机物^[28]。Aoumi等^[29]用超滤和纳滤处理纺织废水,超滤膜作为预处理减少了后续纳滤膜的污染,纳滤膜贡献了90%以上的COD去除率、90%的色度去除率和80%的电导率去除率。Ong等^[29]在不同的操作条件(温度、纺织废水电导率和pH)下,在实验室和中试规模研究了中空纤维纳滤膜对纺织废水的处理效果,实验中膜对废水中染料的截留率可达到98%以上。然而,在膜工艺运行过程中,膜孔堵塞会导致水通量降低,膜工艺的整体性能下降,因此需要定期清洗更换,这增加了投资和运行的成本。这些应用缺陷限制了其在染料废水处理中的进一步应用。

3.2 物化处理法

3.2.1 离子交换

离子交换是指发生静电引力,并发生置换反应的吸附作用,在离子交换过程中,离子交换树脂表面的可交换离子与目标离子发生交换作用,水中的离子被交换富集^[30]。离子交换去除纺织印染废水中的染料是基于树脂官能团与染料分子之间的氢键^[31]。纺织印染工业中使用的染料由发色团和助色团组成,这些被认为是典型的阴离子基团,因此离子交换法去除废水中的染料多使用阴离子型交换剂,主要有黏土、离子交换树脂、木质纤维素生物物质、微生物生物物质、壳聚糖及衍生物等^[32]。张昊等^[33]使用天然淀粉、甲基丙烯磺酸钠与苯乙烯制备了淀粉基离子交换树脂GSR,对亚甲基蓝的交换容量为17.98 mg/g,在4次再生循环后脱色率仍能达到首次的91.12%以上。

3.2.2 超声波降解法

超声波是一种物理能,作用于液体时会产生空化作用,属于一种复杂的物理化学现象,可用于去除水中的难降解有机染料。该工艺的主要优点是处理时间短、对有毒或不可生物降解的化合物有效,缺点就是单独使用时处理效果较差、需要大量的溶解氧^[34]。许多半导体,如CdSe、CdS/TiO₂和KnbO₃等可被用作此过程中的催化剂^[35]。Mehrizad等^[36]研究了硫化锌二氧化钛纳米管(ZnS-TNTs)催化超声降解酸性红1(AR1)的效率,在AR1质量浓度15 mg/L、pH=6、降解时间20 min、超声功率75 W、ZnS-TNTs投加量为1 g/L的条件下,AR1的去除率超过了75%。沈政赢等^[37]利用超声波强化微生物对酸性橙7的降解,在超声波辐射下活性污泥对酸性橙7的脱色速率增加了50%。

3.3 化学处理法

化学处理法是利用氧化还原或分子间的相互作用等过程,使污染物降解或分解成小分子物质的污水处理方法,如混凝-絮凝、高级氧化、电化学等^[38]。化学法已广泛应用于纺织印染废水的处理中,其具有针对性强、反应速度快等特点,但该方法也具有能耗高,需要使用大量化学品以及需要合适的设备等问题。此外,在应用化学法处理过程中还会形成有毒的代谢物和副产品^[39]。

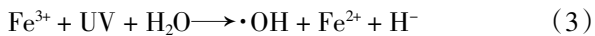
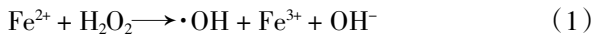
3.3.1 混凝-絮凝

混凝和絮凝工艺(coagulation-flocculation, C/F)原理是利用混凝剂使胶体污染物失稳,细分散颗粒的电荷被中和减少,然后加入絮凝剂,絮凝剂可与细颗粒混合形成易于通过沉淀分离的絮体,从而通过沉淀将水中的污染物去除^[40]。在C/F技术中,金属盐和聚合物可以用作混凝剂,絮凝剂是用来增加絮体聚集的高分子聚合物^[41]。无机混凝剂主要有硫酸铝(Al₂(SO₄)₃)、氯化铝(Al₂Cl₃)、硫酸铁(Fe₂(SO₄)₃)等,也可以使用碳酸镁和熟石灰等混凝剂吸附偶氮染料及其副产物^[42]。然而,混凝剂的投加具有一些缺点,如残留铝会带来健康风险^[43]。对混凝剂或絮凝剂进行改性,可以改善对废水的处理效果。张洛红等^[44]利用聚丙烯腈纤维(PAN)为基体接枝双氰胺甲醛(DDF)制成的阳离子有机高分子絮凝剂PAN-DDF,在30℃、pH=10、PAN-DDF投加量为100 mg/L的条件下,处理20 mg/L的模拟染料废水,对于单一组分刚果红、酸性蓝9、活性嫩黄K-6G脱色率分别达到93.31%、84.16%、83.63%;对于混合组分中3种染料的脱色率分别达到81.74%、76.24%、62.57%。此方法操作和要求简单,投资成本较低;但反应受pH条件影响且会产生污泥,增加处理成本。

3.3.2 高级氧化

高级氧化技术基于强氧化剂羟基自由基的原位生成^[45]。高级氧化技术能够快速分解染料。缺点是成本高、反应受 pH 条件影响并且可能会产生有毒副产物。

芬顿和光芬顿是废水中染料去除广泛使用的高级氧化工艺^[46]。该工艺基于芬顿试剂(H_2O_2)和可溶性铁盐的存在。芬顿法中羟基自由基的形成如公式(1)所示,在光芬顿中的过程见公式(2)、(3)。此类工艺的缺点是较低的 pH 值,同时可能会产生含铁的污泥^[47]。



臭氧氧化是处理工业废水中常用的一种氧化方法。纺织印染废水中的持久性污染物能够被臭氧和臭氧分解过程中产生的羟基自由基氧化^[48]。偶氮染料中发色团的共轭双键结构会被破坏^[49]。孙慧萍等^[50]用自制的膨润土负载锌-钴催化剂催化臭氧氧化处理模拟染料废水,在臭氧通入 10 min 后,对酸性大红的去除率即可达到 99.92%。该工艺的主要优点是脱色速度快,同时臭氧分解产物无毒无害;缺点是臭氧氧化对 pH 值变化敏感,也会产生有毒副产物^[51]。

光催化氧化反应是利用半导体催化剂的催化效果来加速光化学反应速率,利用产生的自由基与有机污染物之间的反应来降解污染物^[52]。TiO₂、CuO、ZnO 等金属氧化物可被用作光催化剂。通过材料改性能够提高半导体材料的稳定性、增强光催化降解过程中的能量利用率、改善光催化反应在印染废水中的处理效果^[53-54]。Fazal 等^[49]用制备的生物炭-TiO₂ 复合材料光催化处理纺织印染废水,染料去除率达到 99.2%。

3.3.3 电化学

电化学氧化(electro-chemical oxidation, EO)常用于纺织印染废水的处理,包括电絮凝、电芬顿、阳极氧化等。在处理过程中,会产生($\cdot OH$)等活性物质用于染料脱色和有机物矿化^[55]。电化学法无需投加药剂、能处理难降解毒性物质;但缺点是耗电量大、对比其他高级氧化技术来讲处理效率不高^[56-57]。

电絮凝在处理过程中能通过直流电将可溶性阳极材原位生成混凝剂,使胶体颗粒失稳,从而去除污染物^[57-59]。电絮凝无需化学药剂投加、操作简便、反应时间短,但运行成本高、会有阴极钝化及产生有毒污泥的缺点^[60-61]。

电芬顿是将高级氧化和絮凝结合起来去除有机污染物的工艺。该工艺能够原位产生亚铁离子和 H_2O_2 ,避免了传统芬顿潜在的 H_2O_2 运输风险及活性丧失的

问题。该工艺对于含芳香染料结构的纺织印染废水具有较好的处理效果。陈晓等^[61]在电芬顿降解罗丹明 B 的研究中,在最佳条件下,降解率为 89.3%。

阳极氧化过程采用直接和间接过程去除废水中的染料和有毒污染物^[62]。直接氧化过程中,有机物被吸附在阴极表面,再通过阳极电子转移机制去除;在间接过程中则是通过氧化剂 O_3 和 H_2O_2 等来产生自由基,进而实现污染物的高效去除^[63]。

此外,还可将不同的处理工艺相结合来处理废水。Zazou 等^[58]研究了电絮凝和过氧化物絮凝、电芬顿、阳极氧化的组合工艺对亚甲基蓝实际废水的处理效果,经对比,得出最优的组合方法为电絮凝-电芬顿组合工艺,处理后的出水色度、浊度、TOC 的去除率分别为 100%、100%和 97%。

3.4 生物处理法

生物处理是利用微生物的代谢将废水中的有机物分解为简单的有机物及无机物。微生物的降解过程在好氧、厌氧、缺氧等条件下均可进行。与物理或化学工艺相比,生物处理法具有生态友好、能耗低、污泥产率低等优点^[64]。污染物的降解效率受微生物种类及酶活性的影响,不同种类的微生物如细菌、真菌、酵母菌、藻类已被广泛应用于纺织染料废水的处理。

3.4.1 好氧、厌氧及组合工艺

好氧工艺包括活性污泥法和生物膜法等。活性污泥法去除效果好、工艺成熟,但由于纺织废水中染料对微生物的毒害作用,会出现污泥膨胀、上浮等问题。在厌氧处理技术中,微生物能够有效分解染料中的三苯甲基团、偶氮基团及蒽醌基团^[65],从而降低废水的色度,但偶氮染料中的偶氮基团裂解后会生成无色、毒性更强的芳香胺。而这些中间代谢物可在好氧条件下完成矿化,降低出水的生物毒性^[66]。在废水处理系统中厌氧-好氧组合工艺,可以实现微生物对含染料废水的有效处理。Shoukat 等^[67]在对厌氧/好氧序批式反应器处理纺织印染废水的研究中,COD、色度和总氮的去除率分别达到了 99.5%、78.4%和 99.3%。

3.4.2 生物强化工艺

由于纺织废水有机物浓度高、成分复杂、难降解等特性,常规的生物处理工艺很难达到满意的处理效果。因此,可以通过生物强化技术在废水中投加具有特定功能的微生物来改善废水处理效果。投加的微生物可以从原有的系统中经驯化、富集、筛选和培养后得到,也可以是外源微生物如细菌、真菌、藻类等^[68]。

细菌其易培养、生长周期短、能产生降解染料的相关酶,在纺织印染废水处理中具有较大潜力。尤其

是产生的偶氮还原酶能够作用于偶氮结构中的双键,可用于偶氮染料的降解脱色^[69]。影响细菌去除染料效率的因素包括溶解氧、水温、溶液 pH、染料结构、氮源、电子供体的数量等。

真菌能够降解可生物降解和不可生物降解的污染物,也能够将各种染料脱色^[70]。真菌在降解过程中,能够产生多种胞内/胞外酶,例如锰过氧化物酶、漆酶、木质素过氧化物酶等来促进对废水中染料的降解^[71]。Sudiana 等^[72]的研究证实了真菌菌株的染料脱色能力与酶的关系,此外,从腐烂木材上得到的毛捻菌在 pH 值为 5、黄体微孔菌和扁平灵芝菌 pH 值为 6 的条件下,培养 7 d 后对水中 30 mg/L 的绿松石蓝去除率分别达到了 82.2%、78.5%和 85.8%。

藻类在海水和淡水中均有分布,具有较大的比表面积以及生物吸附潜力,能够进行光合作用。Priscila 等^[73]利用蓝藻菌株 *Phormidium sp.* 在 25 °C 条件下,培养 14 d 后对靛蓝的去除率达到了 91%。Ishchi 等^[74]使用小球藻,在温度为 40 °C 条件下,对活性黑 5、直接蓝 71 (200 mg/L、pH = 5),分散红 1 (300 mg/L、pH = 8) 的脱色率均达到了 100%。

利用微生物联合体对污染物进行降解能够比单一物种达到更好的效果^[75]。

4 组合处理工艺

表 2 总结了物理处理、化学处理及生物处理的技术及各自的特点。物理法、化学法和生物法的组合工

艺能结合各工艺的优势,弥补单一方法的不足。例如将生物降解法和化学氧化法相结合,化学氧化法可以作为前处理使用,也可在生物法之后作为深度处理去除废水中不可生物降解的污染物^[76],但使用过程中的条件如:接触时间、氧化剂初始浓度、催化剂类型等对反应的影响还需使用系统的方法进行评估,以获得最优的处理效果^[77]。一些具体的工艺见表 3。

5 建议与展望

目前使用的各种工艺对印染废水进行处理后,出水能够满足国家相关排放规定,但也存在着一些问题,例如废水处理成本高、回用率低等问题。因此需要不断改进工艺。

(1) 研究高效、低成本、可回收的吸附剂,强化对吸附容量及可再生吸附剂的研究。

(2) 加强对技术原理的研究,分析各工艺的优势进行组合,可弥补单一技术的不足,提高出水水质。在应用时根据废水的性质进行具体分析,优化印染废水处理工艺。

(3) 关注废水处理工艺的实际应用,目前研究多基于模拟废水的去除效果,应评估各工艺和方法在面对成分更复杂的实际废水时的处理效果。同时,基于小试或中试开展的研究仍需在工程应用中进行评估。此外,对于废水中氨氮、重金属污染物的去除也值得关注。

表 2 各工艺特点总结及对比

处理技术	去除物质	优点	缺点
物理法	水中悬浮物、织物纤维、碎屑等 COD、BOD、pH、色度及大分子有机物 pH、色度、COD、BOD、氨氮、磷等	成本低、操作简单	部分吸附剂吸附容量小、再生性差
膜分离		工艺简单、可资源回用	更换膜和膜清洗导致运行成本增加
物化法		成本低、可再生、操作简单、处理效率高	成本高、通量有限
离子交换		反应时间短、适用范围广、设施简单	单独使用难以达到降解目的
化学法		操作简单、投资成本低	会产生污泥、增加处理成本
超声波降解		反应时间短、能彻底降解有机物	催化剂成本高、光利用率低
高级氧化: 光催化氧化		兼具氧化和混凝的作用	会产生污泥
芬顿/光芬顿		脱色速度快、不产生污泥	对 pH 值敏感、易产生有毒副产品
O ₃ 氧化		对疏水性染料脱色效率高	电耗大、电极寿命有限、CDO 去除效果差
电化学: 电絮凝		无毒副产品生成、药剂使用量少	运行成本高、产生污泥
电芬顿	染料及有机物的去除率高	反应成本较高、系统稳定性差	
阳极氧化	经济性好、对芳香胺分解彻底	处理耗时久、效果不稳定	
生物法		脱色效果好、停留时间短、可产生沼气	出水生物毒性加大
好氧法		COD 去除效率高、运行稳定	抗冲击能力差、反应时间长
厌氧法		增值快、处理效率高	反应耗时、难以获得纯种菌株
厌氧/好氧		降解能力强、适应范围广	单独使用系统不稳定
生物强化: 细菌		表面积大、生物吸附力强	处理效果受反应条件影响较大
真菌			
藻类			

表3 组合工艺处理印染废水的研究

方法分类	工艺	废水性质	工艺参数	处理效果	参考文献
化学法+化学法	电絮凝+O ₃	活性黑 5	EC:电压 12.5 V、电流 2 A O ₃ :投加量 0.3 mg/L、反应时间 16.7 min	脱色率 95%	[78]
化学法+物理法	臭氧+混凝 生物炭吸附+TiO ₂ 光催化	印染厂二沉池出水 亚甲基蓝模拟废水	O ₃ 45 mg/L,反应时间 30 min,150 mg/L PAC、 4 mg/L PAM 制备了杂化生物炭-TiO ₂ 复合材料:500 g BC、18.8 mL 异丙醇、1.88 mL TTIP、超声 2 h、 80±1 °C 4 h、400±1 °C 5 h	满足《纺织染整工业水污染物排 放标准》(GB4287—2012)的要求 COD 去除率 99.40%、吸附容量 2.24 mg/g,脱色率 89.5%	[79] [49]
化学法+生物法	臭氧+Bacillus sp. TiO ₂ /UV+好氧污泥	酸性橙 7 实际废水	O ₃ :pH(3)、投加量 25 mg/L 细菌:35 °C、pH(7) 0.6 g/L 2 h+VSS(2 300 mg/L)、TSS(1 300 mg/L)	脱色率 98.7% 脱色率 97%、TOC 去除率 63%	[80] [81]
物理法+物理法	混凝+吸附+过滤	实际废水	混凝剂:FeCl ₃ 、吸附剂:nZVI、过滤:微沸石、 pH = 6、接触时间 20 min、吸附剂量 0.8 g/L、 搅拌速率 100 r/min	COD97.5%、TSS98%、色度 98.4%、浊度 93.5%、总氮 86.1%	[41]
物理法+化学法	超滤+电渗析	实际废水	UF:50 cm ² ,6 m/s ED:10 L/h,1.98 A,40 min	COD:68.18%、浊度:87.18%、电导 率:87.26%、色度 100%	[24]
生物法+生物法	厌氧 SBR+好氧 SBR	实际废水	好氧/厌氧:HRT(48 d/6 d)、MLSS(6 000 ~ 8 000)、pH(6.8~7.2)、MLSS/MLVSS(0.6~0.7)	COD(99.5%)、色度(78.4%)、总凯 氏氮(99.3%)	[67]
生物法+物理法	混凝+细菌生物 降解 SBR+纳滤	实际废水 活性蓝 21 模拟废水	FeCl ₃ 、FeSO ₄ 、Al ₂ (SO ₄) ₃ 和 CuSO ₄ ,3 种细菌(鞘 氨醇单胞菌、芽孢杆菌和丝状细菌) SBR:V = 2 L、HRT = 72 h、SRT = 10 d、反应 时间 21 h;NF:TMP = 1MPa、25 °C	色度、COD 和苯酚去除率分别为 81.82%、76.17%和 36.69% 染料去除 96%、COD 97%	[82] [83]

参考文献:

[1] WANG Z P, XUE M M, HUANG K, et al. Textile dyeing wastewater treatment[M]// Advances in Treating Textile Effluent. USA: InTech. 2011:91-116.

[2] 薛 罡. 印染废水治理技术进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(9):10-17.

[3] HOLKAR C R, JADHAV A J, PINJARI D V, et al. A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182:351-366.

[4] ZHAO T C, LIU R, LU J P, et al. Photocatalytic degradation of methylene blue solution by diphenylanthrazoline compounds[J]. Journal of Physical Organic Chemistry, 2017, 30(12):e3712

[5] YIN H, QIU P, QIAN Y, et al. Textile wastewater treatment for water reuse: a case study[J]. Processes, 2019, 7(1):34.

[6] 许青枝,王 翔,郑莹莹. 印染废水水质特征及处理技术探讨[J]. 能源与节能, 2022(2):90-91.

[7] 高进长,肖秀婵,李强林,等. 印染废水对水土污染特征及新型处理方法的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(2): 331-336.

[8] TOUNSADI H, METARFI Y, TALEB M, et al. Impact of chemical substances used in textile industry on the employee's health: epi-demiological study[J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2020, 197: 110594.

[9] WU L M, XU Y F, LYU X X, et al. Impacts of an azo food dye tartrazine uptake on intestinal barrier, oxidative stress, inflammatory response and intestinal microbiome in crucian carp (Carassius auratus) [J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2021, 223:112551

[10] SELVARAJ V, SWARNA KARTHIKA T, MANSIYA C, et al. An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications[J]. Journal of Molecular Structure, 2021, 1224: 129195.

[11] KHANDARE R V, GOVINDWAR S P. Phytoremediation of textile dyes and effluents, current scenario and future prospects[J]. Biotechnology Advances, 2015, 33(8): 1697-1714.

[12] THANGARAJ S, BANKOLE P O, SADASIVAM S K. Microbial degradation of azo dyes by textile effluent adapted, Enterobacter hormaechei under microaerophilic condition[J]. Microbiology Research, 2021, 250:126805.

[13] TKACZYK A, MITROWSKA K, POSYNIK A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: a review[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 137222.

[14] CROCE R, CINA F, LOMBARDO A, et al. Aquatic toxicity of several textile dye formulations: a cute and chronic assays with Daphnia magna and Raphidocelis subcapitata[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 144:79-87.

[15] DARWESH O M, ALI S S, MATTERI A, et al. Nanotextiles waste management: controlling of release and remediation of wastes[M]// Nanosensors and Nanodevices for Smart Multifunctional Textiles. Amsterdam: Elsevier, 2021: 267-286.

[16] KORPI A, JÄRNBERG J, PASANEN A L. Microbial volatile organic compounds[J]. Critical Reviews in Toxicology, 2009, 39(2): 139-193.

[17] CAO G, WANG R, JU Y, et al. Synchronous removal of emulsions and soluble organic contaminants via a microalgae based

- membrane system: performance and mechanisms[J]. *Water Research*, 2021, 206: 117–741.
- [18] MUDHOO A, RAMASAMY D L, BHATNAGAR A, et al. An analysis of the versatility and effectiveness of composts for sequestering heavy metal ions, dyes and xenobiotics from soils and aqueous milieu[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 197: 110587.
- [19] JADHAV A C, JADHAV N C. Treatment of textile wastewater using adsorption and adsorbents[M]// *Sustainable Technologies for Textile Wastewater Treatments*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 235–273.
- [20] BRÍO G V, JAHN S L, FOLETTO E L, et al. Highly efficient and reusable mesoporous zeolite synthesized from a biopolymer for cationic dyes adsorption[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 556: 43–50.
- [21] BEDIN K C, MARTINS A C, CAZETTA A L, et al. KOH-activated carbon prepared from sucrose spherical carbon: adsorption equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for Methylene Blue removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 286: 476–484.
- [22] 徐清艳. 超声改性玉米芯生物炭吸附染料的研究[J]. *山东化工*, 2021, 50(23): 20–22.
- [23] BELHOUCHEAT N, ZAGHOUEANE-BOUDIAF H, VISERAS C. Removal of anionic and cationic dyes from aqueous solution with activated organo-bentonite/sodium alginate encapsulated beads[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 135: 9–15.
- [24] LAFI R, GZARA L, LAJIMI R H, et al. Treatment of textile wastewater by a hybrid ultrafiltration/electrodialysis process[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2018, 132: 105–113.
- [25] AOUNI A, FERSI C, CUARTAS-URIBE B, et al. Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes [J]. *Desalination*, 2012, 297: 87–96.
- [26] DASGUPTA J, SIKDER J, CHAKRABORTY S, et al. Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: a state of the art review[J]. *J Environ Manage*, 2015, 147: 55–72.
- [27] DE JAGER D, SHELDON M S, EDWARDS W. Colour removal from textile wastewater using a pilot-scale dual-stage MBR and subsequent RO system[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 135: 135–144.
- [28] KURT E, KOSEOGLU-IMER D Y, DIZGE N, et al. Pilot-scale evaluation of nanofiltration and reverse osmosis for process reuse of segregated textile dyewash wastewater[J]. *Desalination*, 2012, 302: 24–32.
- [29] ONG Y K, LI F Y, SUN S P, et al. Nanofiltration hollow fiber membranes for textile wastewater treatment: lab-scale and pilot-scale studies[J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 114: 51–57.
- [30] 樊小磊, 饶乐, 余书俊, 等. 新型吸附材料在处理含铈废水中的研究进展[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(3): 147–159.
- [31] AHMAD A, MOHD-SETAPAR S H, CHUONG C S, et al. Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(39): 30801–30818.
- [32] HASSAN M M, CARRIC M. A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ionexchange adsorbents[J]. *Chemosphere*, 2018, 209: 201–219.
- [33] 张昊, 李雅兴, 张毅, 等. 淀粉基磺酸型离子交换树脂的制备及对染料的吸附性能[J]. *精细化工*, 2020, 37(1): 135–146.
- [34] PAŹDZIOR K, BILIŃSKA L, LEDAKOWICZ S. A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 376: 120597.
- [35] KUMAR A, SHARMA G, NAUSHAD MU, et al. Bio-inspired and biomaterials-based hybrid photocatalysts for environmental detoxification: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382: 122937.
- [36] MEHRIZAD A, BEHNAJADY M A, GHARBANI P, et al. Sonocatalytic degradation of acid red 1 by sonochemically synthesized zinc sulfide-titanium dioxide nanotubes: Optimization, kinetics and thermodynamics studies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1341–1350.
- [37] 沈政赢, 袁东星, 马剑, 等. 超声波强化微生物对偶氮染料AO7的生物降解机理研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 243–247.
- [38] 胡必清, 朱亚伟. 印染废水的化学法处理研究进展[J]. *印染*, 2016, 13: 46–50.
- [39] KISHOR R, PURCHASE D, SARATALE G D, et al. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(2): 105012.
- [40] FRIHA I, BRADAI M, JOHNSON D, et al. Treatment of textile wastewater by submerged membrane bioreactor: in vitro bioassays for the assessment of stress response elicited by raw and reclaimed wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 160: 184–192.
- [41] BADAWI A K, ZAHER K. Hybrid treatment system for real textile wastewater remediation based on coagulation/flocculation, adsorption and filtration processes: performance and economic evaluation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40: 101963.
- [42] DOS SANTOS T R T, MATEUS G A P, SILVA M F, et al. E-

- valuation of magnetic coagulant (α -Fe₂O₃-MO) and its reuse in textile wastewater treatment[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, 229(3): 92.
- [43] FREITAS T K F S, OLIVEIRA V M, DE SOUZA M T F, et al. Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant[J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 76: 538-544.
- [44] 张洛红, 翟迎博, 王文韬, 等. PAN 基双氰胺甲醛絮凝剂的制备及对染料废水的脱色性能[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 826-834.
- [45] RAHMANI A R, MOUSAVI-TASHAR A, MASO-UMI Z, et al. Integrated advanced oxidation process, sono-Fenton treatment, for mineralization and volume reduction of activated sludge[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168: 120-126.
- [46] XIANG H, REN G, YANG X, et al. A low-cost solvent-free method to synthesize α -Fe₂O₃ nanoparticles with applications to degrade methyl orange in photo-fenton system [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 200: 110744.
- [47] AYYARU S, DHARMALINGAM S. Enhanced response of microbial fuel cell using sulfonated poly ether ether ketone membrane as a biochemical oxygen demand sensor[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2014, 818: 15-22.
- [48] HIEN N T, NGUYEN L H, VAN H T, et al. Heterogeneous catalyst ozonation of Direct Black 22 from aqueous solution in the presence of metal slags originating from industrial solid wastes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 233: 115961.
- [49] FAZAL T, RAZZAQ A, JAVED F, et al. Integrating adsorption and photocatalysis: a cost effective strategy for textile wastewater treatment using hybrid biochar-TiO₂ composite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121623.
- [50] 孙慧萍, 吕文洲. 膨润土负载锌-钴催化臭氧处理模拟染料废水[J]. *纺织学报*, 2019, 40(3): 118-124.
- [51] GOSAVI V, SHARMA S. A general review on various treatment methods for textile wastewater[J]. *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology*, 2014, 3(1): 29-39.
- [52] HASSANSHAHI N, KARIMI-JASHNI A. Comparison of photo-Fenton, O₃/H₂O₂/UV and photocatalytic processes for the treatment of gray water[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 161: 683-690.
- [53] 李 华. 光催化技术在印染废水处理中的应用研究进展[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(7): 116-118.
- [54] AL-MAMUN M R, KADER S, ISLAM M S, et al. Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: a review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(5): 103248.
- [55] MIRONYUK I, TATARCHUK T, NAUSHAD M, et al. Highly efficient adsorption of strontium ions by carbonated mesoporous TiO₂[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 285: 742-753.
- [56] DÓRIA A R, PUPO M, SANTOS G de O S, et al. Electrochemical oxidation of indanthrene blue dye in a filter-press flow reactor and toxicity analyses with *Raphidocelis subcapitata* and *Lactuca sativa*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 198: 110659.
- [57] ZHANG X, LI F, WANG J, et al. Strategy for improving the activity and selectivity of CO₂ electroreduction on flexible carbon materials for carbon neutral[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117196.
- [58] ZAZOU H, AFANGA H, AKHOUIRI S, et al. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electro-chemical advanced oxidation process[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 28: 214-221.
- [59] AHMAD A, DAS S, GHANGREKAR M M. Removal of xenobiotics from wastewater by electrocoagulation: a mini-review[J]. *Journal of Indian Chemical Society*, 2020, 97: 493-500.
- [60] SAMSAMI S, MOHAMADIZANIANI M, SARRAF-ZADEH M-H, et al. Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: overview and perspectives[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 143: 138-163.
- [61] 陈晓, 周紫荆, 陈雄建, 等. 碳毡电芬顿降解罗丹明 B 染料废水[J]. *海峡科学*, 2020(6): 28-30.
- [62] MONTAÑÉS M T, GARCÍA-GABALDÓN M, ROCAPÉREZ L, et al. Analysis of norfloxacin ecotoxicity and the relation with its degradation by means of electrochemical oxidation using different anodes[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 188: 109923.
- [63] AL-TOHAMY R, ALI S S, LI F, et al. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231: 113160.
- [64] ALI S S, AL-TOHAMY R, SUN J. Performance of *Meyerozyma caribbica* as a novel manganese peroxidase-producing yeast inhabiting wood-feeding termite gut symbionts for azo dye decolorization and detoxification [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 806: 150665.
- [65] SARATALE R G, SARATALE G D, CHANG J S, et al. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review [J]. *Journal of the Taiwan (China) Institute of Chemical Engineers*, 2011, 42(1): 138-157.
- [66] PANG Y L, ABDULLAH A Z. Current status of textile industry wastewater management and research progress in malaysia: a

- review[J]. *Clean Soil Air Water*, 2013, 41(8): 751 – 764.
- [67] SHOUKAT R, KHAN S J, JAMAL Y. Hybrid anaerobic-aerobic biological treatment for real textile wastewater[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 29: 100804.
- [68] 刘 路. 纺织印染废水处理技术研究现状及进展 [J]. *上海工程技术大学学报*, 2017, 31(2): 174–177.
- [69] SYBIYA VASANTHA PACKIAVATHY I A, AGILA DE – SWARI P, MUSTHAFA K S, et al. Antibiofilm and quorum sensing inhibitory potential of *Cuminum cyminum* and its secondary metabolite methyl eugenol against Gram negative bacterial pathogens[J]. *Food Research International*, 2012, 45(1): 85–92.
- [70] ALI H. Biodegradation of synthetic dyes a review[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2010, 213: 251–273.
- [71] NOMAN E, TALIP B A, AL-GHEETHI A, et al. Decolourisation of dyes in greywater by mycoremediation and mycosorption process of fungi from peatland; primary study[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 31: 23–30.
- [72] SUDIANA I K, CITRAWATHI D M, SASTRAWIDANA I D K, et al. Biodegradation of Turquoise Blue Textile Dye by Wood Degrading Local Fungi isolated from plantation area[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2022, 23(7): 205–214.
- [73] DELLAMATRICE P M, SILVA-STENICO M, MORAES L, et al. Degradation of textile dyes by cyanobacteria[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2017, 48(1): 25–31.
- [74] ISHCHI T, SIBI G. Azo dye degradation by *Chlorella vulgaris*: optimization and kinetics[J]. *International Journal of Biological Chemistry*, 2019, 14(1): 1–7.
- [75] THIRUPATHI K, RANGASAMY K, RAMASAMY M, et al. Evaluation of textile dye degrading potential of ligninolytic bacterial consortia[J]. *Environmental Challenges*, 2021, 4: 100078.
- [76] BASHA C A, SELVAKUMAR K V, Prabhu H J, et al. Degradation studies for textile reactive dye by combined electrochemical, microbial and photocatalytic methods[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 79(3): 303–309.
- [77] ADANE T, ADUGNA A T, ALEMAYEHU E, et al. Textile industry effluent treatment techniques [J]. *Journal of Chemistry*, 2021, 2021: 1–14.
- [78] BILIŃSKA L, BLUS K, GMUREK M, et al. Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 358: 992–1001.
- [79] 李 猛, 伊学农, 樊祖辉. 臭氧-混凝沉淀工艺深度处理印染废水的中试实验[J]. *广东化工*, 2021, 48(2): 86–87
- [80] KUMAR S R, PANDEY S, KUMAR YA-DAV S, et al. Construction of integrated system for the treatment of acid orange 7 dye from wastewater: optimization and growth kinetic study[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125478.
- [81] SILVA L S, GONÇALVES M M M, RADDI de A. Combined photocatalytic and biological process for textile wastewater treatments[J]. *Water Environment Research*, 2019, 91(11): 1490–1497.
- [82] AYED L, KSIBI I E, CHAREF A, et al. Hybrid coagulation-flocculation and anaerobic-aerobic biological treatment for industrial textile wastewater: pilot case study [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2021, 112(2): 200–206.
- [83] KHOSRAVI A, KARIMI M, EBRAHIMI H, et al. Sequencing batch reactor/nanofiltration hybrid method for water recovery from textile wastewater contained phthalocyanine dye and anionic surfactant[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(2): 103701.