



印染废水脱色研究进展

冯天照,王红林,严宗诚,陈 砾

华南理工大学化学与化工学院;广东省绿色化学产品技术重点实验室,广州 510641

摘要 分别从生物处理法、化学氧化法、吸附法和电化学法等方面介绍了印染废水的处理方法和研究进展,介绍了放电等离子体技术、超临界水氧化技术、膜分离技术以及超声波技术等新兴的治污技术,分析了染料废水处理技术的研究状况。化学氧化技术使用广泛,一般常用于生物处理的前处理;吸附法的吸附效率较高,吸附过程不破坏染料的分子结构,染料可以回收利用;电化学技术不仅能去除重金属,而且能去除化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)和总悬浮固体(TSS)浓度,对染料的脱色效果很好;超临界水氧化法使有毒有害的有机物完全转化,可以避免二次污染问题,氧化反应速率快,适用范围广;膜分离技术高效、节能,可实现废水的循环利用和有用物质回收;超声技术操作条件温和、降解速率快、可以单独使用或与其他水处理技术联合使用。

关键词 印染废水;高级氧化技术;等离子体技术;超声技术

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0112-04

Progress of Discoloration of Dyeing Wastewater

FENG Tianzhao, WANG Honglin, YAN Zongcheng, CHEN Li

School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangdong Provincial Laboratory of Green Chemical Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract The research progress of printing and dyeing wastewater treatment methods is reviewed in this paper, which include the biological treatment method, chemical oxidation method, adsorption method and electrochemical method. The new wastewater treatment technology such as the discharge plasma technology, supercritical water oxidation technology, membrane separation technology and ultrasound technology are discussed. The dye wastewater treatment technology is specially addressed. Chemical oxidation technique is widely used and usually as a pretreatment before biological treatments. Adsorption technique is efficient and does not destroy the structure of dye molecules, while the dye can be recycled. Electrochemical techniques not only can remove heavy metal ions, but also can remove Chemical Oxygen Demand (COD), Biological

Oxygen Demand (BOD) and Total Suspended Solids (TSS), with a good effect on the decolorizing dye. Supercritical water oxidation can completely discolor noxious organics so as to avoid the secondary pollution, with a fast reaction rate and a wide application. Membrane separation technique is efficient and energy saving, which reuses waste water and recycles useful substance. Ultrasonic technique has a fast reaction rate and can be used in various operating conditions. It not only can be used alone but also be combined with other methods.

Keywords dyeing wastewater; supercritical water oxidation technology; discharge plasma technology; ultrasound technology

0 引言

近半个世纪以来,随着染料工业的高速发展,印染废水也随之成为水环境的重点污染源之一,且排放量逐年递增^[1-3]。染料工业生产工序的复杂导致废水产生量大,对环境构成了严重威胁,处理技术研究一直深受国内外环保界的关注。

印染废水一般是指棉、麻、毛、丝、化学纤维或者混纺产品在预处理、染色、印花及其他处理过程中排出的废水^[4]。根据化学结构和合成方法,可以分为偶氮染料、醌染料、蓝硫靛染料、菁类染料、硫化染料、三芳基甲烷类染料以及杂环结构染料等^[5]。

印染废水一般具有以下特点:排放量大、色度深、浓度高、可生化性低、pH 值变化大^[6-8]。印染废水处理的突出问题是色度和难降解有机物的去除,目前的研究主要从分离去除富集

收稿日期:2009-06-30

基金项目:教育部广东省产学研合作项目(2007B090400069);广东省科技计划项目(2005B50101001)

作者简介:冯天照,研究方向为绿色化学与可再生资源研究,电子信箱:tz.feng@mail.scut.edu.cn;陈砾(通信作者),教授,研究方向为绿色化学与可再生资源研究,电子信箱:celichen@mail.scut.edu.cn

发色物质和破坏发色基团两个方面着手,达到脱色和降解有机物的目的。当前,国内外印染废水处理的主要方法有:生物处理法,化学氧化法,吸附法和电化学法等,其他新技术方法研究也有较大的突破。

1 染料废水的处理方法

1.1 生物处理法

生物处理法主要通过生物菌体的絮凝、吸附和生物的降解作用对废水中发色物质分离和降解^[9]。生物的絮凝和吸附作用属于物理过程,并不能使染料分子的结构发生化学变化,而生物的降解作用则是利用微生物酶氧化或还原染料分子,破坏其发色基团和不饱和键,并通过一系列氧化、还原、水解、化合过程,将染料最终降解为简单无机物,或转化成各种营养物质或原生质。处理过程主要有好氧处理、厌氧处理和厌氧-好氧处理3种。其中,好氧处理方法使用得最多,厌氧-好氧法是近几年针对印染废水特点新开发的一种方法。

好氧处理法因其效果较好而应用广泛。相对于厌氧处理法,好氧处理法不产生臭味。厌氧生物处理法在一定条件下能够对复杂大分子物质有明显的降解效果,是一种很有发展前途的工业废水处理方法。但厌氧法处理产生的工业废水经常伴随腐臭味,且单独运用时效果也不理想。所以,国内外对单纯的厌氧处理工艺研究得较少。任随周等^[10]通过细菌脱色酶 TpmD 酶学特性研究,发现 TpmD 对结晶紫、碱性品红、灿烂绿和孔雀绿4种三苯基甲烷类染料具有较强的脱色能力。E. Silveira 等^[11]采用假单胞菌属处理14种工业印染废水,结果表明,食油假单胞菌对其中的甲基橙、B15染料的脱色率达到80%以上,并且表现出较强的高浓度染料耐受性。

为了寻求高效、低耗、省投资的印染废水处理新技术,专家们将好氧处理技术与厌氧处理技术结合,开发了兼氧水解-好氧生物处理工艺。罗昊进等^[12]采用连续搅动水箱式反应器(CSBR)工艺处理印染废水,在平均进水水质的化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)为1200 mg/L,生物需氧量(Biological Oxygen Demand, BOD)为350 mg/L,悬浮固体(Suspended Solids, SS)浓度为200 mg/L,色度为400倍时,去除率分别为90%、94%、91%和85%。Xia Shibin 等^[13]采用微电化学氧化-空气脱模-好氧生物处理工艺处理2,2,5,5-四氯联苯胺(TCB),在好氧反应器中, COD、TCB 和 NH_4^+-N 去除率可分别达到86.3%、70.6%和90%;总 COD、TCB 和 NH_4^+-N 去除率可分别达到98.9%、98%和88.8%。

1.2 化学氧化法

化学氧化技术是印染废水脱色的主要方法,常用于生物处理的前处理。一般是在催化剂的作用下,用氧化剂如臭氧、过氧化氢、氧气等氧化剂处理有机废水以提高其可生化性,或直接氧化降解废水中有机物使之稳定化。

臭氧氧化具有反应完全、速度快、氧化能力强且无二次污染等优点,不足之处是制备臭氧的电能耗耗较大,臭氧与系统接触效率低,主要用于低浓度、难氧化的有机废水的处

理。在实际工程应用中常与其他方法联合使用。赵伟荣等^[14]采用“生化+物化+ O_3 ”法处理添加阳离子红 X-GRL(Cationic Red X-GRL)的印染废水, COD_{Cr} 由897 mg/L降至78 mg/L。

Fenton 氧化技术是基于 H_2O_2 的高级氧化技术。 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应生成的羟基自由基具有很强的氧化性,能够氧化打破有机高分子共轭体系结构,使持久性难降解染料有机物降解成为无色的有机小分子,达到降解脱色的目的。Zhang Xingwang 等^[15]利用氮功能碳纳米管作为阴极产生 H_2O_2 形成电催化-Fenton 降解甲基橙废水,结果表明,氮功能碳纳米管阴极可以大大提高 H_2O_2 的利用率,对甲基橙具有较快的脱色率,电极的周期稳定性和处理污水的能力大大提高。Ali Özcan 等^[16]采用电芬顿法处理酸性橙-7,在最优条件电流300 mA, Fe^{3+} 浓度0.1 mmol/L, pH 值为3时3 min 可处理完全。

湿空气氧化技术(WAO)是指在高温(125~320℃)和高压(0.5~20 MPa)条件下,以纯氧或空气作为氧化剂,在液相中将有机污染物氧化为无机物或小分子有机物的化学过程。WAO 在处理有机污染物过程中二次污染小,且可以回收能量和有用物料。在处理工艺中,加入适宜的催化剂可以降低反应所需温度和压力,提高氧化分解能力,缩短反应时间,减轻设备腐蚀和降低生产成本。杨建礼等^[17]用 Cu-Zn 双金属系列催化剂 C_9 对 H-酸模拟印染废水进行 WAO 处理,当操作条件为温度170℃、氧分压1.2 MPa、pH 值7.0时,反应90 min 后 COD 去除率可达95%以上。Zhang Yang 等^[18]制备出具有纳米结构的多氧基钼酸盐 $\text{Zn}_{1.5}\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$,并用它作为湿空气氧化处理碱性藏红 T(ST)的催化剂,结果表明当 ST 含量为10 mg/L 时,反应40 min 后,脱色率和 COD 去除率分别达到98%和95%。

1.3 吸附法

吸附法是指利用吸附剂的多孔性,使废水中的一种或多种物质被吸附在固体表面而去除的方法^[19]。该方法具有很多优点:吸附剂来源广泛,种类较多,价格便宜,能够满足不同种类染料的需求;吸附效率较高,常与其他方法联合使用作为前处理;吸附过程不破坏染料分子的结构,染料可以回收利用。

许彬彬等^[20]用面包酵母作为单体,戊二醛为交联剂,制备聚胺酸修饰面包酵母,研究聚胺酸修饰面包酵母对碱性品红和亚甲基蓝的吸附行为。在 pH 值为4.0~11.0,吸附反应分别在40和20 min 达到平衡,过程符合 Langmuir 模型,最大吸附量分别为335.9、694.2 mg/g。Uma R. Lakshmi 等^[21]采用米糠灰作为吸附剂处理靛蓝胭脂红模拟印染废水,结果表明吸附满足假二级反应模型;初始 pH 值为5.4,吸附剂用量10.0 g/L,反应时间8 h 时为最佳吸附条件。Piyawan Leechart 等^[22]采用废木屑吸附活性红-141,结果表明木屑加硫酸体系在30℃时具有最大吸附能力29.9 mg/L,符合 Langmuir 模型。木屑硫酸体系对废水的脱色和 COD 去除具有很好的效果。

1.4 电化学法

电化学法是利用电极产生的氧化还原剂破坏染料分子

结构而使染料脱色降解的方法,1971年由 Andco 公司发明。电化学法最初用于从各种工业废水中去除重金属离子,近年研究表明,电化学技术不仅能够去除重金属,而且能够去除 COD、BOD 和 TSS,对染料的脱色效果很好。在反应过程中加入适宜的催化剂形成电催化氧化,电催化氧化过程通过阳极反应直接降解有机物,或者通过阳极反应产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、臭氧等氧化剂降解有机物,这种降解途径使有机物分解更加彻底,不易产生毒害中间产物,设备体积小、占地少,便于自动控制。

尹红霞等^[23]采用电沉积-热解氧化法制备的含有中间层 $\text{SnO}_2+\text{Sb}_2\text{O}_3$ 的钛基二氧化铅电极 ($\text{Ti}/\text{SnO}_2+\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{PbO}_2$),以甲基橙水溶液为模拟废水进行研究,发现对含 60 mg/L 甲基橙的模拟废水处理 2 h,脱色率可达到 82.21%,COD 去除率 76.75%。K. V. Radh 等^[24]采用电化学法处理工业纺织废水,电流强度 0.6 A, pH 值为 1.3 时,COD、总固体量、总溶解固体量、总有机碳去除率分别保持在 68%、49.2%、50.7%和 96.8%,脱色率在 60 min 内达到 96%。

1.5 其他新技术方法

1.5.1 放电等离子体技术

等离子体是在特定条件下使气(汽)体部分电离而产生的非凝聚体系。体系中离子、自由基、中性原子或分子等重粒子的温度接近或略高于室温,所以称这些等离子体为低温等离子体。低温等离子体是具有足够高能量的活性物质,可以使反应物分子激发、电离或断键。

研究表明,等离子源在湿润的空气中放电产生强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{NO}\cdot$,它们能够破坏染料分子结构而使其脱色降解。但该技术实际应用时面临如何改进反应设备降低能耗、提高降解效率等问题^[25]。Hao Xiaolong 等^[26]用 TiO_2 作为光催化剂,采用低温等离子体反应降解 4-氯酚,结果表明反应速率常数、废水去除率和总有机碳去除率都有明显提高。Shen Yongjun 等^[27]采用高压脉冲放电降解甲基橙模拟废水,通过提高电路循环,甲基橙的降解效率达到 1.34×10^{-9} mol/J。

1.5.2 超临界水氧化技术

将废水中含有的有机物在超临界状态下用氧化剂或催化剂氧化分解去除的方法称为超临界水氧化法,是美国学者 Moden 于 20 世纪 80 年代中期提出的一种能完全彻底破坏有机物结构的深度氧化技术。用超临界水氧化法处理高浓度有机废水,能提高有机物和空气在水中的溶解度,消除相间的传质过程,使有毒有害的有机物完全转化。由于有机物氧化完全,可以避免二次污染问题;热能以超临界水的形式存在,可以回收其氧化分解时所释放出的热能;反应在接近绝热状态下进行,出口温度高、氧化反应速率快、适用范围广,可适用于各种有毒有害物质的处理。超临界水氧化技术也存在一些缺点:高温高压、高浓度溶解氧和某些金属盐离子的存在会加快反应器设备的腐蚀;寻求在超临界水中既稳定又具有活性的催化剂比较困难;由于临界点附近的热量传递,使临

界点温度不易控制等。

李方等^[28]采用蒸发壁式超临界水氧化技术对分散红和活性红这两种染料在 374~430℃、压力 18~30 MPa 条件下连续进行降解实验。两种染料 COD、TN 的去除率随着反应温度的升高而上升。在相同条件下活性红的 COD 去除率明显高于分散红,而分散染料的 TN 去除率要高一些。Onur Ö. Söğüt 等^[29]采用超临界水氧化技术在管式反应器中处理分散橙-25 模拟印染废水,在压力为 25 MPa,400~600℃时,停留时间为 2~4 s 时的 COD 去除率达到 98.52%。

1.5.3 膜分离技术

膜分离技术是一种高效、节能的分离技术,与传统的水处理方法相比具有处理效果好,可实现废水的循环利用和有用物质回收等优点。目前,所用的生化治理方法只能达到排放要求,虽然在色度上有所下降,但实际上只是一些有机物部分分解成较小分子物质。而采用膜技术处理染料废水,可将废水分离为浓缩液和透过液。把这两部分分开处理,透过液可回用或排入污水处理系统,浓缩液可用于回收染料。刘梅红等^[30]用乙酸纤维素纳滤膜处理色度为 13 500, COD_G 为 10 300 mg/L,盐含量质量分数大于 5%的蓝色染料废水,膜对染料的截留率和色度的去除率仍保持在 100%,即使过程回收率达到 80%时,膜对废水的 COD_G 的脱除率仍高达 99%以上。Shengjie You 等^[31]采用聚乙烯膜联合生化处理法处理活性黑-5 印染废水,通过比较序批式活性污泥法(SBR),好氧膜生物反应器(AMBR),兼氧膜生物反应器(AOMBR)以及 AOMBR/RO,结果表明含膜单元对固体悬浮物和 BOD 具有很好的去除效果。

1.5.4 超声波技术

超声波技术是指利用超声辐射产生的空化效应在极短的时间内崩溃释能,形成具有极端物化条件和含有高能量的“微反应器”,并使水分子裂解形成 H_2O_2 、 $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{OH}$,将溶解于水的有机大分子化合物分解为环境可以接受的小分子化合物的废水处理技术。该技术处理有机废水是一种很有应用前景的技术,该技术操作条件温和、降解速率快、适用范围广、可以单独使用或与其他水处理技术联合使用。但目前的有关超声技术降解水中有机污染物的报道大多属于实验研究阶段,由于其能量利用率低,与其他水处理技术相比,存在着处理效率低、费用高的问题。因此如何通过优化参数和改进反应器结构来进一步提高降解率和降低成本是关键问题。

Hui Zhang 等^[32]通过臭氧和超声波联合作用处理甲基橙模拟废水,当超声波频率在 20 kHz 时,甲基橙的降解速率符合一级动力学模型,当 pH 值为 5.5~9.7 时影响较大。Michael M. Tauber 等^[33]采用超声波联合虫漆酶处理印染废水的氧化过程表明,虫漆酶单独作用时 1~5 h 内能完全处理酸性橙和直接蓝,但对活性染料无氧化能力;超声波单独作用时需要 5~15 h 才能完全降解以上染料,二者联用时表现出协同效应。

2 展望

从目前印染行业废水治理技术的现状来看,由于印染废水的处理成本限制,大多采用组合传统工艺来实现,如电化学和吸附组合、吸附和生物降解的组合等。新兴的治污技术如等离子体降解、超临界水氧化技术和超声降解的实验室的研究表明,其治污能力优越,必将成为未来发展的一个趋势。膜分离技术一般用于稀有染料的回收处理,随着成膜技术的发展,膜分离技术也必将成为印染废水行业的研究热点。

参考文献 (References)

- [1] 黄川, 刘元元, 罗宇, 等. 印染工业废水处理的研究现状 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 11(6): 139-142.
Huang Chuan, Liu Yuanyuan, Luo Yu, et al. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2001, 11(6): 139-142.
- [2] 吴祖望, 杨威. 21 世纪 20 年代我国的染料工业与染料学科展望[J]. 染料与染色, 2007, 44(1): 1-4.
Wu Zuwang, Yang Wei. *Dyestuffs and Coloration*, 2007, 44(1): 1-4.
- [3] 许益. 纺织染料的应用现状及趋势[J]. 纺织导报, 2008(4): 29-40.
Xu Yi. *China Textile Leader*, 2008(4): 29-40.
- [4] Gurrham C F. Industries waste control [M]. New York: Aeademie Press, 1965: 21-23.
- [5] 杨薇, 杨新玮. 国内外活性染料的进展[J]. 染料工业, 2001, 38(4): 1-5.
Yang Wei, Yang xinwei. *Dyestuff Industry*, 2001, 38(4): 1-5.
- [6] 张淑芬, 杨锦宗. 活性染料的现状与展望[J]. 染料与染色, 2008, 45(1): 1-7.
Zhang Shufen, Yang Jinzong. *Dyestuffs and Coloration*, 2008, 45(1): 1-7.
- [7] National Bureau of Statistics. Wastewater drainage and treatment of different industries[M]. Beijing: China Statistical Press, 2005: 11-13.
- [8] Huang Yaohui, Tai Shuting, Huang Yifong, et al. Degradation of commercial azo dye reactive Black B in photo/ferrioxalate system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 14(1): 382-388.
- [9] 宋轩, 张利红. 有机废水生物处理系统中 SMP 的形成及特性 [J]. 科技创新导报, 2008, 27: 126-128.
Song Xuan, Zhang Lihong. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008, 27: 126-128.
- [10] 任随周, 郭俊, 王亚丽, 等. 细菌脱色酶 TpmD 对三苯基甲烷类染料脱色的酶学特性研究[J]. 微生物学报, 2006, 46(3): 385-389.
Ren Suizhou, Guo Jun, Wang Yali, et al. *Acta Microbiologica Sinica*, 2006, 46(3): 385-389.
- [11] Silveira E, Marques P P, Silva S S, et al. Selection of pseudomonas for industrial textile dyes decolorization [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, 62(2): 143-152.
- [12] 罗昊进, 谭力国. 印染废水处理新技术 [J]. 工业水处理, 2008, 28(3): 87-88.
Luo Haojin, Tan Ligu. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(3): 87-88.
- [13] Xia Shibin, Tang Bin, Xia Shuichun, et al. Combined treatment of 2,2,5,5-tetrachlorobenzidine (TCB) industrial wastewater[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 40(1): 249-252.
- [14] 赵伟荣, 周威明, 刘万生, 等. 臭氧与生化组合处理印染废水研究[J]. 工业水处理, 2006, 26(5): 75-78.
Zhao Weirong, Zhou Weiming, Liu Wansheng, et al. *Industrial Water Treatment*, 2006, 26(5): 75-78.
- [15] Zhang Xingwang, Fu Jianliang, Zhang Yi, et al. A nitrogen functionalized carbon nanotube cathode for highly efficiente ectrocatalytic generation of H₂O₂ in Electro-Fenton system[J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 64(1): 116-123.
- [16] Özcan A, Oturan M, Oturan N, et al. Removal of Acid Orange 7 from water by electrochemically generated Fenton's reagent [J]. *Journal of*

- Hazardous Materials*, 2008, 153(1): 834-842.
- [17] 杨建礼, 吕娟. 催化湿式空气氧化(CWAO)处理染料废水[J]. 大众科技, 2007(5): 104-107.
Yang Jianli, Lu Juan. *Popular Science & Technology*, 2007(5): 104-107.
- [18] Zhang Yang, Li Dongliu, Chen Yang, et al. Catalytic wet air oxidation of dye pollutants by polyoxomolybdate nanotubes under room condition[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, 79(1): 30-37.
- [19] 邱仁荣, 赵颖, 姚曙光. 印染废水深度处理及回用技术的研究现状[J]. 工业水处理, 2007, 27(9): 11-15.
Qiu Renrong, Zhao Ying, Yao Shuguang. *Industrial Water Treatment*, 2007, 27(9): 11-15.
- [20] 许彬彬, 佟蜜, 孙小梅, 等. 聚胺酸修饰酵母对碱性品红和亚甲基蓝的吸附行为[J]. 化学工程师, 2008, 153(6): 60-62.
Xu Binbin, Tong Mi, Sun Xiaomei, et al. *Chemical Engineer*, 2008, 153(6): 60-62.
- [21] Lakshmi U R, Srivastava V C, Mall I D, et al. Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 710-720.
- [22] Leechart P, Nakbanpote W, Thiravetyan P. Application of waste wood shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 912-920.
- [23] 尹红霞, 康天放, 张雁, 等. 电化学催化氧化法降解水中甲基橙的研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 88-91.
Yin Hongxia, Kang Tianfang, Zhang Yan, et al. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 88-91.
- [24] Radh K V, Kalaivani S. Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry waste water [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(2): 987-990.
- [25] Zhang Yanzong, Zheng Jingtang, Qu Xianfeng, et al. Design of a novel nonequilibrium plasma based water treatment reactor [J]. *Chemosphere*, 2007, 70(8): 1518-1524.
- [26] Hao Xiaolong, Zhou Minghua, Lei Lecheng. Nonthermal plasma-induced photocatalytic degradation of 4-chlorophenol in water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 114(3): 475-482.
- [27] Shen Yongjun, Lei Lecheng, Zhang Xingwang, et al. Improvement of diagnostic techniques and electrical circuit in azo dye degradation by high voltage electrical discharge[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(8): 2254-2263.
- [28] 李方, 恭为进, 田晴, 等. 蒸发壁式超临界水氧化反应器处理分散红和活性红染料废水的比较[J]. 环境工程学报, 2008, 8(2): 1031-1035.
Li Fang, Gong Weijin, Tian Qin, et al. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 8(2): 1031-1035.
- [29] Söğüt O Ö, Akgün M. Treatment of textile wastewater by SCWO in a tube reactor[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2007, 43 (1): 106-111.
- [30] 刘梅红, 姜坪. 膜法染料废水处理工艺研究 [J]. 膜科学与技术, 2002, 22(4): 43-45.
Liu Meihong, Jiang Ping. *Membrane Science and Technology*, 2002, 22(4): 43-45.
- [31] You Shengjie, Tseng Dyihwa, Deng Junyu. Using combined membrane processes for textile dyeing wastewater reclamation [J]. *Desalination*, 2008, 234(3): 426-432.
- [32] Zhang Hui, Duan Lijie, Zhang Daobin. Decolorization of methyl orange by ozonation in combination with ultrasonic irradiation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(1): 53-59.
- [33] Tauber M M, Gübitz G M, Rehorek A. Degradation of azo dyes by oxidative processes—Laccase and ultrasound treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(10): 4213-4220.

(责任编辑 岳臣)