

印染废水的电化学氧化脱色研究进展

吕伟伟,姚继明,张维

(河北科技大学 纺织服装学院,河北 石家庄 050018)

摘要:随着电化学的发展和高效能反应装置的出现,电化学脱色被应用于废水的处理和净化中。文中从不同电极反应方式下的电化学脱色方法出发,总结了近年来纺织印染行业常用种类染料电化学处理技术研究现状,叙述了不同染料电化学降解原理,探讨电池配置、电极材料、电解质等反应装置的组成,重点分析各因素对印染废水降解和脱色原理及脱色效率。结果表明,直接染料、活性染料和酸性染料的染色废水多采用间接氧化法处理,还原染料可采用直接氧化法和间接氧化法。为加速强氧化性物质生成可通过使用新型电极材料如DSA电极、BDD电极或加入催化剂等手段实现。电化学对印染废水氧化脱色需要根据染料种类选择合适的电极材料,并对试验参数进行合理调控,以实现高效化、大规模使用的脱色技术与方法。

关键词:印染废水;电化学;氧化脱色;电极材料;脱色效率

中图分类号:X 791

文献标志码:B

文章编号:1000-4033(2019)04-0053-05

Research Progress in Electrochemical Oxidation Decolorization of Printing and Dyeing Wastewater

Lv Weiwei, Yao Jiming, Zhang Wei

(College of Textile and Garment, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: With the development of electrochemistry and the emergence of high-efficient reaction devices, electrochemical decolorization has been applied to the treatment and purification of wastewater. Based on the electrochemical decolorization method under different electrode reaction modes, this paper summarized the research progresses of electrochemical treatment technology for dyes commonly used in textile printing and dyeing industry in the past years. The principles of electrochemical degradation for different dyes were described. The composition of battery configuration, electrode materials and electrolytes were also discussed. The degradation and decolorization principles and efficiency of printing and dyeing wastewater were analyzed. The results show that the wastewater from direct dyes, reactive dyes and acid dyes are mostly treated by indirect oxidation methods, and those from vat dyes can be either directly oxidized or indirectly oxidized. In order to accelerate the formation of strong oxidizing substances, novel electrodes material such as a DSA electrode, a BDD electrode or a catalyst can be applied. Electrochemical oxidation and decolorization of printing and dyeing wastewater requires selection of suitable battery materials according to the type of dyes, and through reasonable adjustment of experimental parameters, high-efficient, large-scale decolorization techniques and methods can be achieved.

Key words: Printing and Dyeing Wastewater; Electrochemistry; Oxidative Decolorization; Electrode Material; Decolorization Efficiency

据报道,近17%~20%的工业水污染是由纺织染色和处理产生的。此外,存在污染的纺织染料已

超过100 000种,我国作为纺织生产大国,每年大约排放 $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的染料废水^[1]。染料工业废水处理

的突出问题是色度高、有机物质降解困难。传统上常采用物理法、生物法和化学法等来处理印染废水。

基金项目:河北科技大学博士科研基金(1181196);石家庄市科学技术研究与发展计划(191190551A)。

作者简介:吕伟伟(1995—),女,硕士研究生。主要从事纺织品清洁生产及功能化先进加工技术的研究。

通讯作者:姚继明(1965—),男,教授。E-mail:yaojiming66@126.com。

常见的物理法处理废水有吸附法、絮凝法、膜分离技术等^[2]。物理方法处理效率有限,不能破坏废水中染料的结构,通过微生物代谢以实现氧化分解染料分子、破坏染料发色基团的生物法对反应条件要求苛刻^[3]。因此,急需既能够有效去除有害污染物,又实现降低色度的废水处理办法^[4]。基于上述研究背景和科技的发展,电化学法应运而生。

1 电化学脱色技术

传统废水处理方法效率低,并且在降解过程中会生成芳香胺等中间产物,其毒性危害更为严重^[5]。电化学法属于清洁高效的水处理技术,通过在阳极表面上产生的强氧化性物质破坏染料分子的发色基团^[6]。电化学氧化技术效率高、易于操作,更重要的是无二次污染^[7],还可与其他处理方法组合使用,这些优点使得电化学法成为处理染料废水的新趋势^[8]。

1.1 电絮凝沉淀法

电絮凝沉淀是在中性或碱性条件下,铁或铝阳极失去电子后生成铁离子或铝离子,在水溶液中生成氢氧化铁或氢氧化铝等微絮凝体,微絮凝体通过包裹或架桥聚集污染物后,随着在阴极产生的大量氢气气泡上浮而除去^[9]。

1.2 内电解法

内电解法是利用活性金属碎屑作为反应原料形成对废水有氧化性的原电池。其中最广泛应用的是铁炭内电解法,处理废水时铁屑作为阳极被腐蚀,阴极的炭上有 H_2 生成,染料分子先被吸附在炭表面,然后在两极发生氧化还原反应,阴极产物新生态(H)可破坏染料分子发色结构,再利用阳极产物 Fe^{2+} 混凝作用,形成絮体沉降^[10]。

1.3 电化学氧化技术

电化学氧化技术是污水中的

有机物在电极板上或者在溶液中发生氧化还原反应。有机污染物的电化学氧化既可以通过电极与有机物之间电子传递达到氧化降解的目的,也可以通过电极上产生强氧化性物质,如 ClO^- 和芬顿试剂。前者称为直接电氧化,后者称为间接电氧化^[11]。

1.3.1 直接氧化

直接氧化指被氧化物和电极直接进行电子传递的氧化方法^[12]。直接电解分为两种:一种是电化学转化,通过电极催化氧化作用把电极表面有机污染物氧化成小分子物质;另一种是电化学燃烧,有机污染物在电催化作用下彻底氧化为 CO_2 和 H_2O 等无机物^[13]。

1.3.2 间接氧化

间接电氧化利用电解产生强氧化剂氧化脱色。在含氯化物介质中利用阳极析氯水解形成 ClO^- ,或电解生成芬顿试剂氧化染料^[14]。电芬顿氧化法在1894年由化学家Fenton最先发现,在酸性条件下向阴极板喷射氧气使阴极板产生 H_2O_2 , Fe^{3+} 发生电化学还原产生 Fe^{2+} , Fe^{2+} 与 H_2O_2 继续反应生成羟基自由基氧化降解废水^[15]。

2 不同染料电化学氧化脱色

目前不同染料电化学氧化脱色都是通过直接氧化或间接氧化产生羟基自由基($\cdot OH$)、 ClO^- 等强氧化性物质,将有毒污染物氧化成无害有机物或者可降解的物质。

2.1 直接染料

直接染料多为含有羧基、磺酸基直链大分子,染色时需加入大量食盐进行促染,导致印染废水中总有机碳(TOC)、化学需氧量(COD)较高。直接染料废水的脱色降解多采用间接氧化方法,如电芬顿技术。电芬顿反应是指 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应生成氧化活性很强的羟基自由

基来降解废水。Phi et al^[16]选用金属铁作为阳极,不锈钢做为阴极,利用铁电极的催化氧化作用把电极表面直接大红4BE氧化分解达到脱色效果,其中染料浓度对脱色影响最为显著,在染料浓度50 mg/L条件下,脱色率达到92.10%。李然等^[17]同样选用铁作为阳极,以接触面积更大的圆筒形电极取代平板电极,在搅拌器作用下电解液对电极表面持续冲刷,使电极表面上电解液层能快速更新,加速了 $HO\cdot$ 生成。该方法对染料废水脱色率可达到96.00%以上。铁做阳极存在的问题是阳极铁在溶解为 Fe^{2+} 时,也存在着阳极板被电化学氧化(钝化)的过程,使废水脱色所需时间延长,电耗增加。

除上述单一电化学氧化外,现在也常常采用生物电化学系统^[18]。黄皖唐等^[19]基于生物电化学系统(BES)对刚果红进行脱色,对BES进行了电极和构型改进,构造固定化电子介体核黄素(RF)和腐殖酸(HA)修饰阳极微生物燃料电池(MFC)和无膜生物阴极微生物电解池(MFMEC),通过在阳极加入RF、HA可以有效地加速电子传递过程,增强微生物氧化降解效果。试验结果表明,加入电子介体的修饰阳极比空白阳极(MFC)的脱色效率提高了22.86%。

2.2 活性染料

活性染料作为棉、麻以及丝绸纤维的主要染料,分子中含有活性基团,易溶于水,使用时能与纤维形成牢固的共价键结合;但上染率不够高,易产生大量有色污水,COD值一般在8 000~30 000 ppm。活性染料的氧化降解多采用间接氧化法,常以含氯的化合物作为电解质溶液, Cl^- 在阳极上发生氧化反应生成 Cl_2 ,一部分 Cl_2 溶于溶液,

形成具有较强氧化作用的 ClO^- ,通过 Cl_2 和 ClO^- 氧化降解废水。目前为了提高降解效率常常采用高性能阳极材料或添加催化剂^[20]。形稳性阳极(DSA)是目前电化学废水处理中较为常见一种阳极材料^[21],以金属钛为导电基体,用热分解法在其表面涂覆一层铂族金属(如钌)氧化物和贵金属(如钛)氧化物的双层复合结构。自1965年荷兰科学家Beer首次制备Ti/RuO₂电极并取得专利至今,DSA电极已有50多年的发展历史,在使用过程中常常添加涂层(IrO₂、RuO₂等)和稀土材料(La、Ce、Pr、Nd等)。DSA电极具有优异的化学稳定性和电催化活性,更适合工业化^[22]。Parsa et al^[23]以Ti/Sb-SnO₂作为阳极,不锈钢为阴极,在含有NH₄Cl电解质的间歇式反应器中对活性橙7(RO₇)染料废水脱色。由于Ti/Sb-SnO₂承受电流密度大于铅、石墨电极等,通过加大电流,加速强氧化性物质 ClO^- 产生,脱色率达到95.30%,COD去除率可达70.30%。

掺硼金刚石薄膜电极(BDD薄膜电极)是在金刚石薄膜中掺杂了硼元素,该电极析氧电位高,背景电流低,且化学性质稳定,因此,作为电化学废水处理电极,明显优于其他电极。邢剑飞等^[24]比较了Si、Ta、SiC、Ti这4种不同基底沉积制备的掺硼金刚石薄膜电极,得出以Ta为基底制备的BDD薄膜电极作为阳极、Cu作为阴极、NaCl作为电解质处理废水效果优异,在酸性条件下,对活性艳红X-3B废水的色度去除率可达90.00%以上。通过使用DSA、BDD等高性能阳极电极材料取代易发生析氧反应的石墨或易被腐蚀的不锈钢等材料,加速了 Cl_2 、 ClO^- 等强氧化性物质产生,提高了降解效率。

2.3 酸性染料

酸性染料是指在染料分子中含有酸性基团,又称阴离子染料,与蛋白质纤维分子中的氨基以离子键相结合,大多数为偶氮染料。酸性染料也多采用间接氧化法降解废水,其中最具有开发潜力的为电芬顿反应,但处理废水时需要添加酸性介质,还要维持适宜 Fe^{2+} 浓度。Fernández et al^[25]设计了一种在中性条件下处理废水的新颖电芬顿反应器,该装置包括3个串联隔室,其中两个装有阳离子交换树脂,中间隔室装载印染废水,使用这种装置处理废水不需要再添加酸或铁,同时在中性条件下 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应产生 $\text{HO}\cdot$ 等强氧化性物质,对酸性橙2有较好脱色率,且不会产生大量铁污泥。

Irikura et al^[26]在压滤机反应器中使用Ti/ β -PbO₂或Ti-Pt/ β -PbO₂阳极处理酸性绿28。通过统计响应面法(RSM)研究不同参数对脱色率的影响。pH值为5时,废水脱色率达到90.00%左右。 β -PbO₂膜对pH值稳定性较好,在pH值 ≥ 5 以上几乎没有膜损伤。Isarainchavez et al^[27]比较了Ti/Ir-Pb、Ti/Ir-Sn、Ti/Ru-Pb、Ti/Pt-Pd和石墨电极氧化降解能力,得出了Ti/Ir-Pb、Ti/Ir-Sn、Ti/Ru-Pb、Ti/Pt-Pd氧化降解效果均优于石墨电极,其中Ti/Ir-Pb阳极脱色效果最好,这是由于活性金属电极、Ti/IrO₂电极和非活性电极PbO₂结合后,氧化能力高于活性电极如Pt、RuO₂、Ti/Ir-Pb电极加速了 $\text{HO}\cdot$ 产生。在最优工艺条件下对甲基橙脱色率可达96.00%左右,电极矿化度达76.00%左右。

目前,多数研究只利用单一工作电极(阳极或阴极)对染料进行降解(氧化或还原)处理,辅助电极

并未直接发挥脱色作用^[28]。班福忱等^[29]利用阴阳极的共同作用对印染废水进行降解,以电极钛基铱涂层电极为阳极,钛板为阴极,并借助 Cl^- 协助均相芬顿法对甲基橙进行降解。试验表明阴阳极的同时作用明显高于单独作用,且甲基橙脱色率和COD去除率分别达到94.61%和78.11%。

2.4 还原染料

还原染料可用于棉及涤棉混纺织物的染色。靛蓝是一种不溶于水的还原染料,广泛应用于牛仔印染纺织工业。该染料染色时需要先还原为隐色体钠盐,降解时可以直接在废液中添加氧化剂或通过 Cl^- 、 H_2O_2 失电子转化为 ClO^- 、 $\text{HO}\cdot$ 等强氧化性物质。靛蓝染料的脱色处理涉及多方面的影响因素,包括pH值、盐浓度、复杂的化学结构和施加电压等^[30]。李笑岚等^[31]采取直接氧化法使靛蓝发色团体系中的 $\text{O}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$ 结构变成 $\text{HO}-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{OH}$,改变了整个共轭发色体系达到脱色效果。以活性炭纤维(ACF)同时作为阳极和阴极,研究了不同电流密度下的靛蓝脱色机理。当电流的密度为-1.250~-40.000 mA/cm²时,脱色以染料的电还原为主;当电流密度为-0.65~0.02 mA/cm²,脱色源于染料的吸附;0.0250~40.000 mA/cm²时,脱色以染料的电氧化为主。前两者对靛蓝的脱色及废液中有有机物的去除效果微弱,第3种则对其有较大的影响。

脉冲电解技术是一种新兴而高效的有机废水处理技术,将直流电压变成了脉冲电压。它既有电解的一些优点,又可以克服直流电解的电耗高、对电极消耗大等缺陷^[32]。占伟等^[33]采用脉冲电催化氧化反应体系为研究主体,以NaCl为电

解质,通过电解产生的 Cl_2 或 ClO^- 对酸性靛蓝进行降解。建立动力学模型分析发现,影响该反应速率常数的主要因素是电解质浓度。并与直流电压作对比得出,在脱色率达到 99.00%,TOC 去除率达到 31.20%时,脉冲电压比直流电压节约电能将近 20.00%。

Hendaoui et al^[34]使用铁电极通过连续电凝法处理靛蓝染料废液,在碱性条件下,铁电极失去电子后生成铁离子,在水溶液中生成氢氧化铁微絮凝体,微絮凝体通过包裹聚集靛蓝后,随着阴极产生的大量氢气气泡上浮而除去废液。与 Fe^{2+} 、 H_2O_2 反应产生 $\text{HO}\cdot$ 氧化降解废水对比,在相同的试验条件下,前者废水脱色率和 COD 去除率达到 89.20%和 76.10%,后者废水脱色率和 COD 去除率是 92.70%和 78.60%,并且后者没有絮凝沉淀。

2.5 其他染料

除了常用的纺织用染料还有一些合成的色素如苋菜红、Allura Red AC 等,也会造成环境污染,在采用电化学氧化方法进行脱色处理方面,取得了新的进展。Fajardo et al^[35]比较了 Ti/Pt 和 Ti/Pt-SnSb 阳极氧化对苋菜红染料溶液的降解情况。其中 Ti/Pt-SnSb 阳极氧化产物具有较高电活性,通过 DSA 电极加速了 Cl_2 或 ClO^- 的产生,在该材料电极下的电流密度为 30.000 mA/cm^2 下进行电解,脱色率为 97.50%,COD 的去除率达到 70.30%。Thiam et al^[36]采用电芬顿(EF)氧化法对食品偶氮染料 Allura Red AC 废液脱色和矿化。比较了普通石墨电极和掺硼金刚石膜(BDD)电极的降解效果,得出使用 BDD 电极时在电流密度为 $33.300\sim 150.000 \text{ mA/cm}^2$ 下,可实现完全脱色,TOC 去除率达到

96.00%~98.00%,而选用石墨电极时脱色率达到 95.00%,TOC 去除率仅为 75.00%左右。

3 结束语

电化学氧化技术由于其设备小,占地少,运行管理简单,COD 去除率高和脱色效果好等优点日益受到重视。直接染料、活性染料和酸性染料等大部分属于偶氮染料,对于偶氮染料常采用间接氧化法进行降解脱色,即利用电解产生的强氧化性物质来氧化脱色,如在含氯化物介质中利用阳极析氯继而水解形成 Cl_2 和 ClO^- ,或电解生成芬顿试剂氧化染料, Fe^{3+} 发生电化学还原产生 Fe^{2+} , Fe^{2+} 与 H_2O_2 继续反应生成 $\text{HO}\cdot$ 来氧化降解废水。还原染料由于染色时需要先预还原成隐色体钠盐,所以可以直接在废液中添加氧化剂或通过电解产生强氧化性物质降解废水。

其次,电化学氧化过程的效率很大程度上取决于电池配置,如电极材料、电解质组成等,电池的配制和材料选取又依赖于污染物结构和组成。除了常用的石墨、铁、铂等金属作为电极材料,近年来也已经开发了许多新型的电极材料如 DSA 电极、BDD 电极等,在实验阶段均呈现出良好的处理效果。从生态经济的角度看,电化学氧化不适合单独处理印染废水,而是需要与传统净化技术相结合。近些年来三维电极技术逐渐兴起,在二维电极的基础上填充粒子电极增强氧化能力,提高电解效果,它比二维电极降解效果提高近 50.00%,但目前用于实际工厂废水处理的效果和前景需要进一步探索。

参考文献

[1] AKERDI A G,BAHRAMI S H,ARAMI M, et al. Photocatalytic discoloration of acid red 14 aqueous solution

using titania nanoparticles immobilized on graphene oxide fabricated plate [J]. *Chemosphere*, 2016(159):293-299.

[2] 史会剑,朱大伟,胡欣欣,等.印染废水处理技术研究进展探析[J].*环境科学与管理*, 2015,40(2):74-76+80.

[3] STREECK J,HANK C,NEUNER M, et al. Bio-electrochemical conversion of industrial wastewater-COD combined with downstream methanol synthesis-an economic and life cycle assessment [J]. *Green Chemistry*, 2018,20(12):2742-2762.

[4] IRFAN M,BUTT T,IMTIAZ N, et al. The removal of COD,TSS and colour of black liquor by coagulation-flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate [J].*Arabian Journal of Chemistry*, 2017(10):2307-2318.

[5] LEVIDOW L,ZACCARIA D,MAIA R, et al. Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices [J].*Agricultural Water Management*, 2014(146):84-94.

[6] SARKKA H,BHATNAGAR A,SIL-LANPAA M, et al. Recent developments of electro-oxidation in water treatmenta review [J].*Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015(754):46-56.

[7] CHAPLIN B P. Critical review of electrochemical advanced oxidation processes for water treatment applications [J].*Environmental Science:Processes & Impacts*, 2014,16(6):1182-1203.

[8] ISARAINCHAVEZ E,BARO M D,ROSSINYOL E, et al. Comparative electrochemical oxidation of methyl orange azo dye using Ti/Ir-Pb,Ti/Ir-Sn,Ti/Ru-Pb,Ti/Pt-Pd and Ti/RuO₂ anodes [J].*Electrochimica Acta*, 2017(244):199-208.

[9] ONCEL M S,MUHCU A,DEMIRBAS E, et al. A comparative study of chemical precipitation and electrocoagulation for treatment of coal acid drainage wastewater [J].*Journal of Environmental*

Chemical Engineering, 2013, 1(4): 989-995.

[10]王勇辰.探讨铁屑内电解法处理电镀含铬废水的研究[J].科学技术创新, 2017(27):47-48.

[11]刘圣厚,张笑吟,刘楠.电催化氧化法对酸性藏蓝染料废水脱色的研究[J].科技创业家, 2014(9):67.

[12]方良充.探究影响电化学方法降解酸性艳绿染料废水效果的因素[J].中国资源综合利用, 2018, 36(4):23-26.

[13]OTURAN M A, AARON J. Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. a review[J].Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, 44(23):2577-2641.

[14]GARCIASEGURA S, OCON J D, CHONG M N, et al. Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents—a review[J].Process Safety and Environmental Protection, 2018 (113): 48-67.

[15]YANG J, HONG L, LIU Y, et al. Treatment of oilfield fracturing wastewater by a sequential combination of flocculation, fenton oxidation and SBR process[J]. Environmental Technology, 2014, 35(22):2878-2884.

[16]PHI N Q, 孙兆楠, 胡筱敏.铁阳极电化学对直接大红 4BE 模拟废水脱色[J].环境工程学报, 2012, 6(11):3994-3998.

[17]李然,唐淑娟,刘桂英.印染废水电化学脱色研究[J].印染, 2004(14):27-29.

[18]WANG Y, WANG A, LIU W, et al. Accelerated azo dye removal by biocathode formation in single-chamber biocatalyzed electrolysis systems [J].Bioresour. Technology, 2013(146):740-743.

[19]黄皖唐.电子介体修饰阳极 MFC 和生物阴极 MFMEC 对刚果红脱色的研究[D].广州:华南理工大学, 2017.

[20]KARIYAJJANAVAR P, JOGTTAPPA N, NAYAKA Y A, et al. Studies on

degradation of reactive textile dyes solution by electrochemical method[J].Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(3):952-961.

[21]HU C, HU B, WANG Y, et al. TiO₂ nanotube arrays based DSA electrode and application in treating dye wastewater[J].Russian Journal of Electrochemistry, 2016, 52(5):420-426.

[22]WANG Y, CHEN M, HUANG Q, et al. Experimental study of a solar-driven photo-electrochemical hybrid system for the decolorization of acid red 26 [J].Energy Conversion and Management, 2017 (150):775-786.

[23]PARSA J B, MERATI Z, ABBASI M, et al. Modeling and optimizing of electrochemical oxidation of C.I. reactive orange 7 on the Ti/Sb-SnO₂ as anode via response surface methodology [J].Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(4):1350-1355.

[24]邢剑飞,王珺,李侃,等.不同基底 BDD 电极对模拟染料废水的降解脱色试验[J].净水技术, 2013, 32(1):55-59, 98.

[25]FERNÁNDEZ D, ROBLES I, RODRÍGUEZ-VALADEZ F J, et al. Novel arrangement for an electro-fenton reactor that does not require addition of iron, acid and a final neutralization stage, towards the development of a cost-effective technology for the treatment of wastewater [J].Chemosphere, 2018, 199(5):251-255.

[26]IRIKURA K, BOCCHI N, ROMEU C, et al. Electrodegradation of the Acid Green 28 dye using Ti/β-PbO₂ and Ti-Pt/β-PbO₂ anodes[J].Journal of Environmental Management, 2016, 183(1):306-313.

[27]ISARAINCHAVEZ E, BARO M D, ROSSINYOL E, et al. Comparative electrochemical oxidation of methyl orange azo dye using Ti/Ir-Pb, Ti/Ir-Sn, Ti/Ru-Pb, Ti/Pt-Pd and Ti/RuO₂ anodes [J].

Electrochimica Acta, 2017 (244): 199-208.

[28]刘艳,左燕君.电化学法处理染料废水的脱色实验研究[J].环境与发展, 2018, 30(1):84-85.

[29]班福忱,姜亚玲,韩雪,等.阴阳极同时作用电化学法降解水中甲基橙[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2016, 32(2):347-352.

[30]BECHTOLD T, TURCANU A, SCHROTT W, et al. Electrochemical decolourisation of dispersed indigo on boron-doped diamond anodes [J].Diamond and Related Materials, 2006, 15(10):1513-1519.

[31]李笑岚.酸性靛蓝在 ACF 电极上的电化学脱色[D].大连:大连理工大学, 2006.

[32]SANROMAN M A, PAZOS M, RICCART M T, et al. Decolourisation of textile indigo dye by DC electric current [J].Engineering Geology, 2005, 77(3): 253-261.

[33]占伟.脉冲电催化氧化处理染料废水研究[D].武汉:华中科技大学, 2013.

[34]HENDAOU K, AYARI F, RAYANA I B, et al. Real indigo dyeing effluent decontamination using continuous electrocoagulation cell: Study and optimization using Response Surface Methodology [J].Process Safety and Environmental Protection, 2018, 116(1):578-589.

[35]FAJARDO A S, MARTINS R C, SILVA D R, et al. Electrochemical abatement of amaranth dye solutions using individual or an assembling of flow cells with Ti/Pt and Ti/Pt-SnSb anodes [J].Separation and Purification Technology, 2017, 179(1):194-203.

[36]THIAM A, SIRE I, GARRIDO J A, et al. Decolorization and mineralization of Allura Red AC aqueous solutions by electrochemical advanced oxidation processes [J].Journal of Hazardous Materials, 2015, 290(1):34-42.

收稿日期 2018 年 12 月 5 日