马红梅,胡佳杰,席北斗,等.二沉出水驱动摩擦纳米发电降解甲基橙废水实验研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1367-1375.
Ma H M, Hu J J, Xi B D, et al. Research on degradation of methyl orange wastewater with triboelectric nanogenerator (TENG) driven by secondary effluent [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1367-1375.

二沉出水驱动摩擦纳米发电降解甲基橙废水实验研究

马红梅 [1,2,3],胡佳杰 [4],席北斗 [1,5*],陈永志 [1,3],罗 杰 [1,3],张永辉 [1,3] (1.兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070；2.西北民族大学,甘肃 兰州 730030；3.甘肃省污水处理行业技术中心,甘肃 兰州 730070；4.酒泉经开园区运营管理(集团)有限公司,甘肃 酒泉 735008；5.中国环境科学研究院环境基准标准与风险管控全国重点实验室,北京 100012)

摘要：以二沉出水驱动氧化铟锡(ITO)、聚四氟乙烯(PTFE)和导电铝胶带制备的摩擦纳米发电机(TENG)发电,用其产生的电能降解甲基橙废水.结果表明,TENG 单元输出电压最高达 23.52V,电流最高达 2.15μA.采用铝、铁、铜和不锈钢作电极降解 40mg/L 的甲基橙废水,其脱色率分别为83.21%,82.88%,75.27%和 51.38%.用铝电极降解甲基橙废水时,当其浓度小于 60mg/L 时,脱色率大于 80%,当其浓度大于 60mg/L 时,脱色率逐渐降低,当甲基橙浓度增加到 150mg/L 时,其脱色率仅为 27.85%.TENG 单元数量增加可提高脱色率,其单元数量从 1 个增加到 6 个时,甲基橙脱色率从 85.05%升高至 91.05%.甲基橙废水降解过程符合一级动力学方程:$\ln(C_0/C_t)=0.027t-0.0815$.

关键词：摩擦纳米发电机(TENG)；二沉出水；甲基橙废水降解；脱色率
中图分类号：X703 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1367-09

Research on degradation of methyl orange wastewater with triboelectric nanogenerator (TENG) driven by secondary effluent.

MA Hong-mei[1,2,3], HU Jia-jie[4], XI Bei-dou[1,5*], CHEN Yong-zhi[1,3], LUO Jie[1,3], ZHANG Yong-hui[1,3] (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China；2.Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China；3.Technical Center of Sewage Treatment Industry in Gansu, Lanzhou 730070, China；4.Jiuquan Economic Development Zone of Operation and Management (Group) Co., Ltd., Jiuquan 735008, China；5.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1367~1375

Abstract：The triboelectric nanogenerator (TENG), which was constructed of indium tin oxide (ITO), polytetrafluoroethylene (PTFE), and conductive aluminum tape, was utilized in this study. It was driven by secondary effluent to generate electricity for degrading methyl orange wastewater. Experimental results showed that a maximum output voltage of 23.52V and a current of 2.15μA were achieved by a single TENG unit. When aluminum, iron, copper, and stainless steel were used as electrodes to treat 40mg/L methyl orange wastewater, decolorization rates of 83.21%, 82.88%, 75.27%, and 51.38% were obtained respectively. With aluminum electrodes, decolorization rates exceeding 80% were achieved for methyl orange concentrations<60mg/L, but they declined gradually for methyl orange concentrations>60mg/L, and only 27.85% was reached at 150mg/L. When the number of TENG units was increased from one to six, the decolorization rate was increased from 85.05% to 91.05%. The degradation process was fitted to the first-order kinetic equation: $\ln(C_0/C_t) = 0.027t-0.0815$.

Key words：triboelectric nanogenerator (TENG)；secondary effluent；methyl orange wastewater degradation；decolorization rate

甲基橙废水具有色度高[1-2]、生物毒性强[3-4]、难降解物质占比大等特点[5-6].这类废水若未经有效处理直接排放,不仅会破坏水体生态平衡[7-9],影响水生生物的生存,残留的甲基橙还可能转化为有毒芳香胺[10-12],通过食物链富集对人类健康构成潜在威胁[13-14].

甲基橙废水的处理早期多采用化学法[15-16],化学法虽能在一定程度上降低污染物浓度,但存在成本高、效率低、加药系统复杂且易造成二次污染等问题[17-18].电化学技术因应用范围广[19-20]、设备简单、操作方便、温度要求低等优势[21-23],在难降解染料废水处理中受到广泛关注.其中,高压脉冲放电等离子体法、超声法[24-26]、光电催化[27]等虽然处理效果好,但存在设备昂贵、技术要求高、能耗大等缺陷,难以实现工业化应用[28].而直流电絮凝法凭借机理

收稿日期：2025-07-28
基金项目：甘肃省科技计划项目(24CXNA029)
* 责任作者, 教授, xibd@craes.org.cn

研究成熟、实际应用理论依据坚实、设备制造难度小、对操作人员要求低、电源技术成熟、安全系数高及电极材料易获取等特点[29],展现出良好的应用前景,阴阳两电极通电后产生氢氧化物及气体,借助絮凝沉淀、气浮效应和氧化还原等作用去除污染物,在多种实际染料废水处理中取得了较好效果[30].然而,直流电电解处理甲基橙废水仍面临一些技术难点.电催化氧化过程中,存在能耗过高的问题,限制了其实际应用;此外,如何在保证处理效果的前提下,进一步降低设备成本和运行费用,也是亟待解决的关键问题.摩擦纳米发电机(TENG)是一种可以收集低频、低能和高熵能量的技术[31-33],其发电是由接触起电和静电感应两个现象完成的.任意两种不同的材料接触,核外电子轨道被共用使得电子在两个原子间发生转移,由于介电材料不导电,接触的介电材料分开后,之前获得或失去电子的状态得以保留,两种介电材料一个带负电一个带正电[34].固-液 TENG 的输出性能主要受水质、介电层、频率等因素影响[35-36],目前 TENG 技术已用于降解有机污染物罗丹明 B[37]和二甲酚橙[38].

生活污水中存在大量易被忽略的低频能量[39],基于此,本文利用氧化铟锡(ITO)膜、聚四氟乙烯(PTFE)膜和导电铝胶带制备出 TENG 单元,用于收集达到一级 A 标准的二沉出水的能量,并以此作为降解甲基橙废水的外接电源,研究 TENG 单元供电对甲基橙废水降解的影响,探究这种供电方式下的反应动力学关系, 旨在为高效利用生活污水能量降解甲基橙废水提供参考.

1 材料与方法

1.1 TENG 单元的制备

将一片玻璃(40mm×30mm×1mm)分别浸入丙酮(国药集团,99.5%)和乙醇(国药集团,97%)中各 10min,然后在电热鼓风干燥箱内烘干(上海博讯).在玻璃片上平整地贴上一层(30mm×20mm×0.125mm)ITO 薄膜,并贴上导线.再将 PTFE 膜(厚度 0.05mm)完全覆盖在 ITO 薄膜上,并将一小片导电铝胶带(厚度 0.065mm)剪成 L 型贴在 PTFE 薄膜上,同时将导线与铝胶带连接[40].将带有膜组件的玻璃片放置在支架上,生活污水由带阀门的导管控制滴落在铝胶带上,滴落的液滴由带排水口的容器收集(图 1 所示).

实验所用的生活污水来自兰州交通大学居民区(氨氮(NH_4^+-N):48.576~83.103mg/L,总氮(TN):49.135~83.134mg/L,总磷(TP):1.64~4.105mg/L,化学需氧量(COD):127.241~201.105mg/L,电导率(EC):1217~1638μS/cm,总溶解固体(TDS):543~814×10^{-6}V,pH 值:7.13~7.26),生活污水由实验室内多级 AO 处理装置处理,TENG 单元所用液滴均来自达到一级 A 标准(GB 18918-2002)的二沉出水,通过阀门控制滴落在 TENG 单元的的铝电极表面,该过程中产生的电流经整流器整流后输出.实验所用试剂均为分析纯.

1.2 电解甲基橙废水的实验方法

在 250mL 的锥形瓶中加入 150mL 的甲基橙废水,加入 0.03mol/L 的氯化钠,锥形瓶放置在磁力搅拌器(苏瑞 85-2A)上.整流器整流后的正负极接口分别连接在降解甲基橙废水的金属电极上,金属电极插入到甲基橙废水中.反应开始时打开生活污水滴管阀门,一定时间后,取一定量甲基橙废水测量其吸光度的[41].

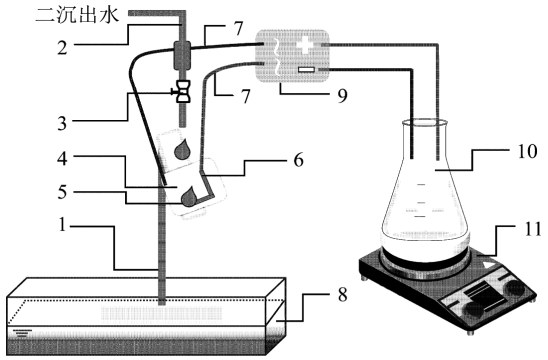


图 1 电解甲基橙废水实验装置

Fig.1 Diagram of the experimental setup for the degradation of methyl orange wastewater

1.支架;2.导管;3.导管阀门;4.摩擦纳米发电机(TENG)单元膜组件;5.二沉出水液滴;6.导电铝胶带;7.导线;8.收集液滴容器;9.整流器;10.金属电极;11.磁力搅拌器

1.2.1 不同电极降解甲基橙废水的实验 实验选用铝电极、铁电极、铜电极和不锈钢电极分别对 40mg/L 的甲基橙废水进行电解,甲基橙废水加入 0.03mol/L 的 NaCl,电极尺寸为 3.5cm×1.5cm.每个周期降解时间为 90min,之后测量甲基橙废水的吸光度并计算脱色率.每个周期结束后将电极取出,并用蒸

馏水冲洗擦干,再次放入新的 40mg/L 的甲基橙废水中进行电解,每个电极均使用 10 个周期.

1.2.2　降解不同浓度甲基橙废水的实验　实验选用铝电极,分别对 10~150mg/L 的不同甲基橙废水降解 90min,甲基橙废水加入 0.03mol/L 的 NaCl,计算脱色率.

1.2.3　甲基橙废水降解对 pH 值的影响　实验选用铝电极,分别对浓度 2,5,10,20,30,40mg/L 的甲基橙废水降解 120min,测量降解前后的 pH 值.对 10mg/L 的甲基橙废水降解 120min,间隔一定时间测量甲基橙废水的 pH 值.

1.2.4　添加氯化钠降解甲基橙废水的实验　实验选用铝电极,配置 2 组 40mg/L 甲基橙废水,一组加入 0.03mol/L 的 NaCl,一组不加 NaCl,降解 120min,间隔一定时间测量吸光度并计算脱色率.

1.2.5　甲基橙废水降解的动力学　用蒸馏水配置不同浓度的甲基橙废水并测量吸光度,绘制甲基橙浓度标准曲线.实验选用铝电极,对 40mg/L 的甲基橙废水降解 120min,间隔一定时间测量吸光度并计算甲基橙浓度,对实验结果进行动力学方程拟合.

1.2.6　TENG 单元数量对甲基橙废水降解的影响　配置 6 组 40mg/L 甲基橙废水,实验选用铝电极,分别与 1 个、2 个、3 个、4 个、5 个和 6 个 TENG 单元并联输出端连接,降解 120min,间隔一定时间测量吸光度并计算脱色率.

1.3　分析方法

二沉出水中的 NO_x−N、COD、NH_4^+−N、总氮(TN)和总磷(TP)浓度依据《水和废水监测分析方法》[42]测定.总溶解固体(TDS)和电导率(EC)采用便携式多参数水质检测仪(般特 901P−CN,中国)测定. TENG 单元的输出电压和电流通过静电计(Keithley 6517,美国)进行测量.pH 值使用 pH 计(上海雷磁 PHF−2F,中国)测定.吸光度通过紫外−可见分光光度计(上海尤尼柯 UV−4802,中国)测定. 实验中每个样品设 3 个平行样,结果以均值表示.

$$脱色率(\%) = (1-A_t/A_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中:A_t 表示降解 t 时刻的甲基橙吸光度;A_0 表示初始甲基橙的吸光度.

2　结果与讨论

2.1　TENG 单元的输出性能

单个 TENG 单元的输出电压波动范围为 7.05~23.52V,输出电流波动范围为 0.1~2.15μA(图 2).

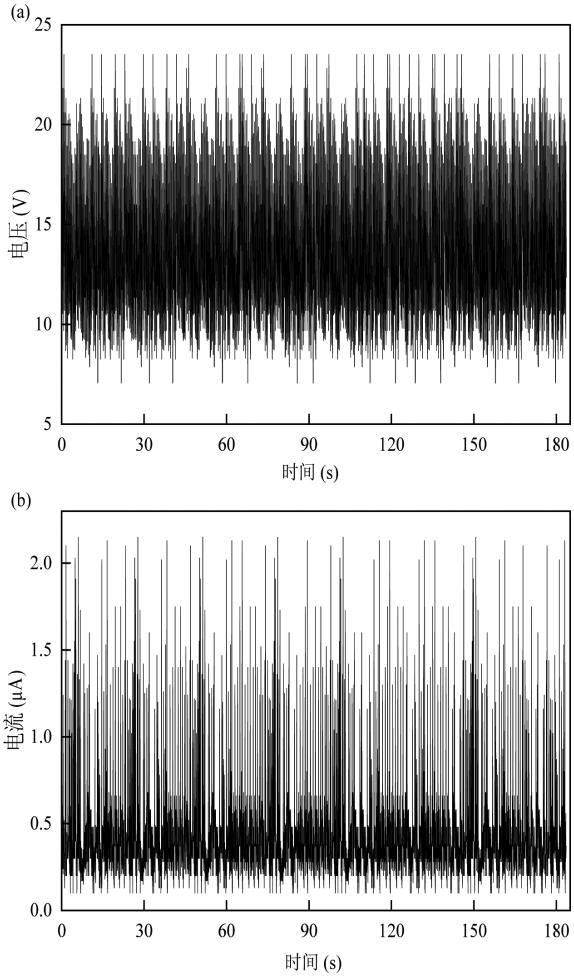


图 2　TENG 单元的输出性能

Fig.2　Output performance of the TENG unit

尽管生活污水出水液滴通过 TENG 单元产生的电流强度相对较低,但其输出电压较高,可提供稳定的电能进行甲基橙废水的降解.污水水质对 TENG 的输出性能有很大的影响,二沉出水水质越好, TENG 的输出性能越好.TENG 的输出性能随着污水水质的波动而波动,二沉出水达到一级 A 标准时, TENG 的最大输出电压在 16.75~26.71V 范围内波动[43].

纺织印染在工业中是属于高耗水的行业,每天排放的印染废水量大于 400 万 t,每年排放的印染废水量大于 15 亿 t[44].降解 150mL 的甲基橙废水, TENG 单元最高可节约 5.06×10^{-5}W,如果该技术应用到实际废水处理中,每天为纺织印染行业废水处理最高可节约 1.35×10^{6}W.

2.2　TENG 单元作为外接电源对甲基橙废水降解

的影响

从图 3 可以发现,0min 时,甲基橙废水浓度越高,在 464nm 处的吸光度也越高,不同浓度的甲基橙废水在 464nm 处的吸收峰均随着降解时间的延长而逐渐降低.后续实验的脱色率均以 464nm 的吸光度进行计算.甲基橙废水由初始时的橙红色逐渐变为淡黄色,这可能是因为甲基橙分子($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$)的偶氮键(−N=N−)被破坏,使得甲基橙颜色发生变化[45-46],甲基橙废水逐渐被降解.

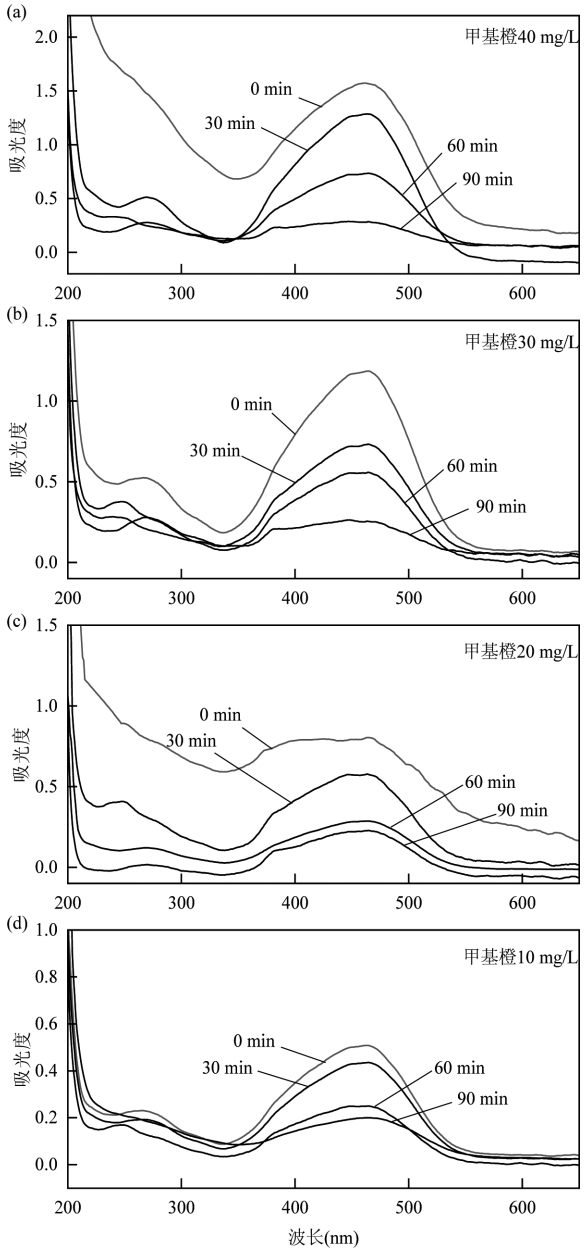


图 3 不同浓度甲基橙废水的吸光度

Fig.3 Absorbance of methyl orange wastewater at different concentrations

降解的原因可能是 NaCl 在溶液中解离为 Na^+ 和 Cl^-,NaCl 溶液的电解还会产生氢氧化钠(NaOH)和氯气(Cl_2)[47],反应过程如下:

$$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^- \quad (2)$$

$$Cl^- + Cl^- \rightarrow 2Cl^- + 2e^- \text{ (阳极)} \quad (3)$$

$$2Cl \rightarrow Cl_2 \text{ (阳极)} \quad (4)$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HCl \quad (5)$$

$$HOCl \rightarrow H^+ + OCl^- \quad (6)$$

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \text{ (阴极)} \quad (7)$$

$$Na^+ + OH^- \rightarrow NaOH \quad (8)$$

$$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S\text{(甲基橙)} + OH^- + Na^+ + Cl^- \rightarrow \text{中间产物} + H_2O + CO_2 \quad (9)$$

Cl^-,OH^-和 HOCl 都对甲基橙的降解起到作用,可促使偶氮键断裂.同时 OH^-和金属电极可以形成氢氧化物,氢氧化物可起到絮凝剂的作用,将甲基橙吸附在其表面. 这表明 TENG 单元作为电解甲基橙废水的外接电源,能够对甲基橙废水进行有效的降解.与传统外接电源相比,该方式不使用外部电源,从而降低电解处理废水的运行成本.

2.3 不同电极对甲基橙废水降解的影响

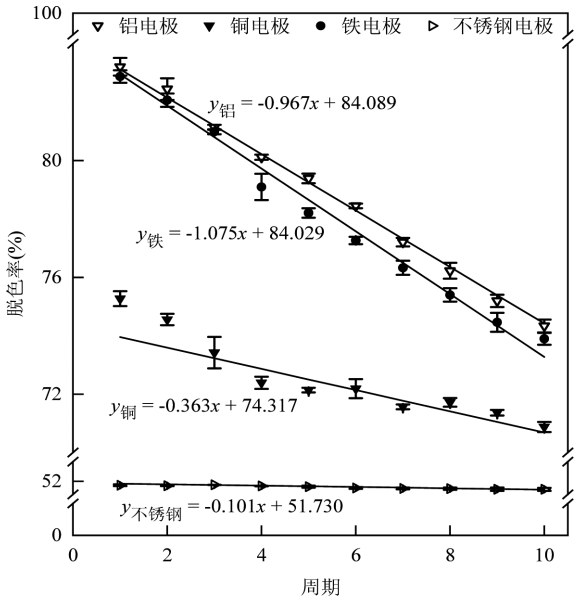


图 4 不同电极对甲基橙废水脱色率的影响

Fig.4 Effect of electrodes on decolorization rate of methyl orange wastewater

从图 4 可以看出,铝、铁、铜和不锈钢作为电极其脱色率分别为 83.21%,82.88%,75.27%和 51.38%,铝、铁电极去除甲基橙废水的效果更优,这可能是因为铁和铝容易失电子形成金属阳离子,之后与 OH^-

形成沉淀[48].单次降解过程中,形成的氢氧化物可以起到絮凝剂的作用, 可将甲基橙吸附在氢氧化物的表面上,从而达到去除甲基橙的目的,形成的氢氧化物越多,越有利于甲基橙的去除.

拟合曲线的斜率越接近于 0,电极的稳定性越好. 不锈钢电极的拟合曲线斜率为−0.101,稳定性最好, 铜电极的拟合曲线斜率为−0.363,铝电极的拟合曲线斜率为−0.967,铁电极的的拟合曲线斜率为−1.075, 铝电极和铁电极的稳定都较差,这可能是因为随着循环次数增加, 阳极的金属电极损耗会逐渐增多, 促使形成的氢氧化物减少,从而降低了对甲基橙的去除能力,使得脱色率随着循环次数的增加逐渐减小.为避免因阳极电极损耗使脱色率降低这种情况的发生,可及时更换阳极电极.

2.4　甲基橙废水浓度对降解的影响

甲基橙废水浓度在 10~60mg/L 时,脱色率均达到了 80%以上(图 5),当甲基橙废水浓度从 60mg/L 升高至 150mg/L 时,甲基橙废水的脱色率从 81.04%降低到 27.85%.这说明 TENG 可以降解较低浓度的甲基橙废水.甲基橙的降解和溶液中 Cl^-,OH^-和氢氧化物有关,溶液中氢氧化物表面可与甲基橙结合的位点有限,甲基橙的浓度逐渐升高后,氢氧化物表面吸附位点逐渐饱和,达到饱和后再增加甲基橙溶液浓度,氢氧化物表面无法再吸附甲基橙,使得脱色率逐渐降低.

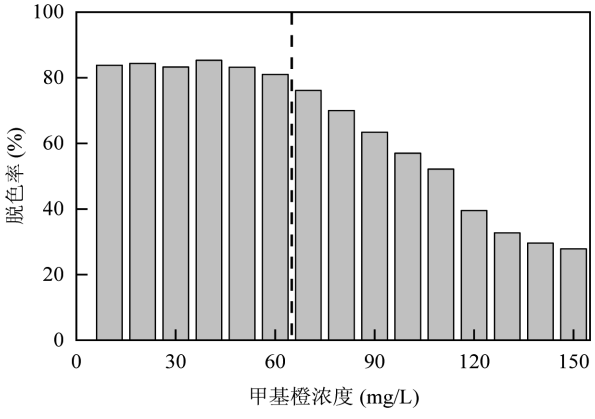


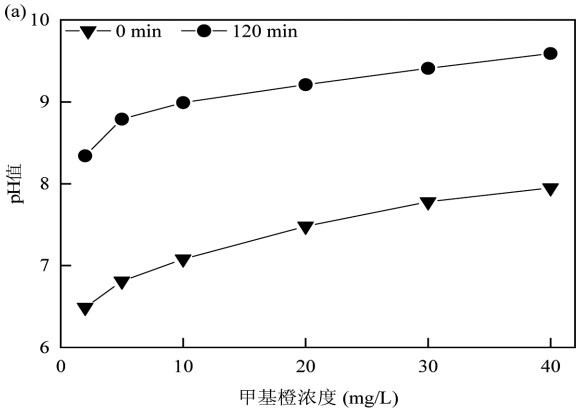
图 5　甲基橙废水在不同浓度时的脱色率

Fig.5　Decolorization rate of methyl orange wastewater in different concentrations

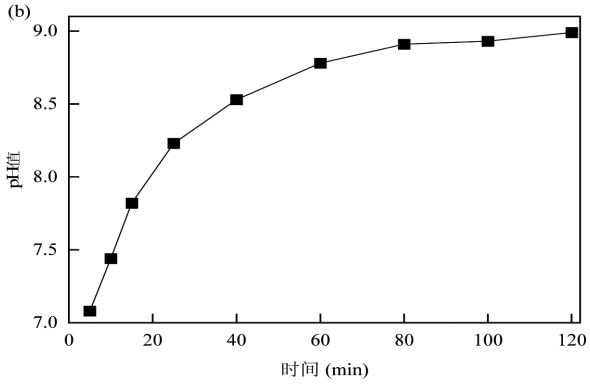
当使用直流稳压电源供电降解 100mg/L 的甲基橙废水,电流密度为 30mA/cm^2 时,其脱色率可达 99.59%[29],提高电流密度可加快电子在溶液中的转移速度,使得溶液中 Cl^-,OH^-和氢氧化物浓度增大,从而提高对甲基橙的去除能力.

2.5　TENG 单元对降解甲基橙废水 pH 的影响

从图 6(a)可以观察到,与初始状态相比,电解后甲基橙废水的 pH 值均增大了,这可能是因为在阳极 Al 失电子变成 Al^{3+},H_2O 在阴极得到电子生成 OH^-. 废水中的 Al^{3+}会与其他一些离子或离子团形成铝的羟基络合物、多核羟基络合物和氢氧化物等,这些物质都具有较大的比表面积、带电特性或很强的吸附能力,他们能起到絮凝作用,再结合电解产生的气泡,一部分甲基橙因气浮作用被带到液面,一部分因絮凝和氢氧化物的沉淀被去除[48].从图 6(b)可以发现, 10mg/L 甲基橙废水在 0~60min 时,pH 值快速升高, 80~120min 时,废水的 pH 值趋于稳定,这有利于絮凝体的生成,能够更好地去除甲基橙.



(a)　甲基橙废水降解始末的 pH 值变化



(b)　甲基橙废水浓度为 10mg/L 时 pH 值变化

图 6　甲基橙废水降解过程中 pH 值的变化

Fig.6　The change of pH during methyl orange wastewater degradation

2.6　氯化钠对甲基橙废水降解的影响

从图 7 可以发现,添加 0.03mol/L 氯化钠的甲基橙废水的脱色率远大于没有添加电解质的甲基橙

废水,添加氯化钠的甲基橙废水脱色率可达 85.05%,而没添加氯化钠的甲基橙废水脱色率仅为 23.85%.这可能是因为氯化钠提高了废水的导电性.

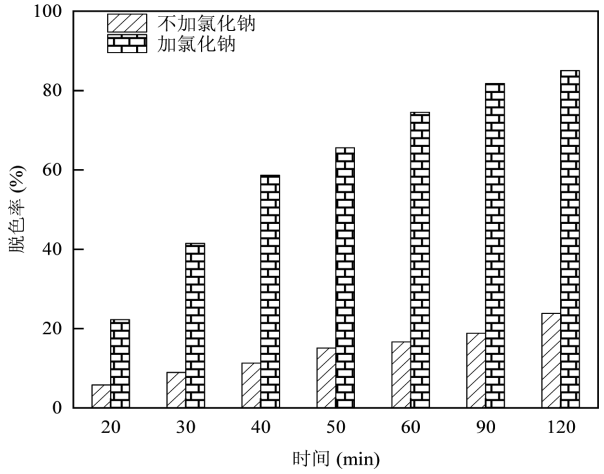


图 7 氯化钠对甲基橙废水脱色率的影响

Fig.7 Effect of NaCl on the decolorization rate of methyl orange wastewater

同时,在电解过程中 Cl^-在阳极会被氧化生成氯气(Cl_2),氯气与水进一步反应生成次氯酸(HClO)和盐酸(HCl)[49],其中次氯酸是强氧化剂,可有效氧化甲基橙,提高甲基橙的降解效率.当使用金属铝作为阳极时,氯化钠的加入能促进电极溶解,生成更多Al^{3+},这些离子在废水中水解生成氢氧化铝等胶体物质,具有强吸附性,可吸附废水中的甲基橙,有助于甲基橙的去除.

2.7 TENG 单元数量对甲基橙废水降解的影响

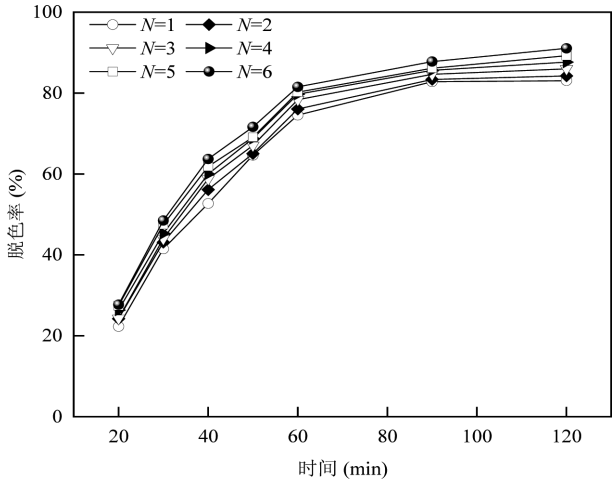


图 8 TENG 单元数量对甲基橙废水脱色率的影响

Fig.8 Effect of TENG units on decolorization rate of methyl orange wastewater

从图 8 可以看出,随着 TENG 单元数量的增多,甲基橙废水的脱色率逐渐增大,当 TENG 单元数量是 1 时,甲基橙废水的脱色率是 85.05%,当 TENG 单元数量是 6 时,脱色率是 91.05%,脱色率提高了 6%.这可能是因为 TENG 数量越多,电流强度越大,加快了溶液中电子转移的速度,从而提高了甲基橙废水的脱色率,电催化降解甲基橙的最优电流是 0.03A[47],然而单个 TENG 可提供的最大电流仅为 2.15 μA,因此在场地允许的情况下,通过增大 TENG 数量可提高电流强度,进而加快电子转移速度,提高甲基橙的去除能力.

2.8 TENG 降解甲基橙废水的动力学分析

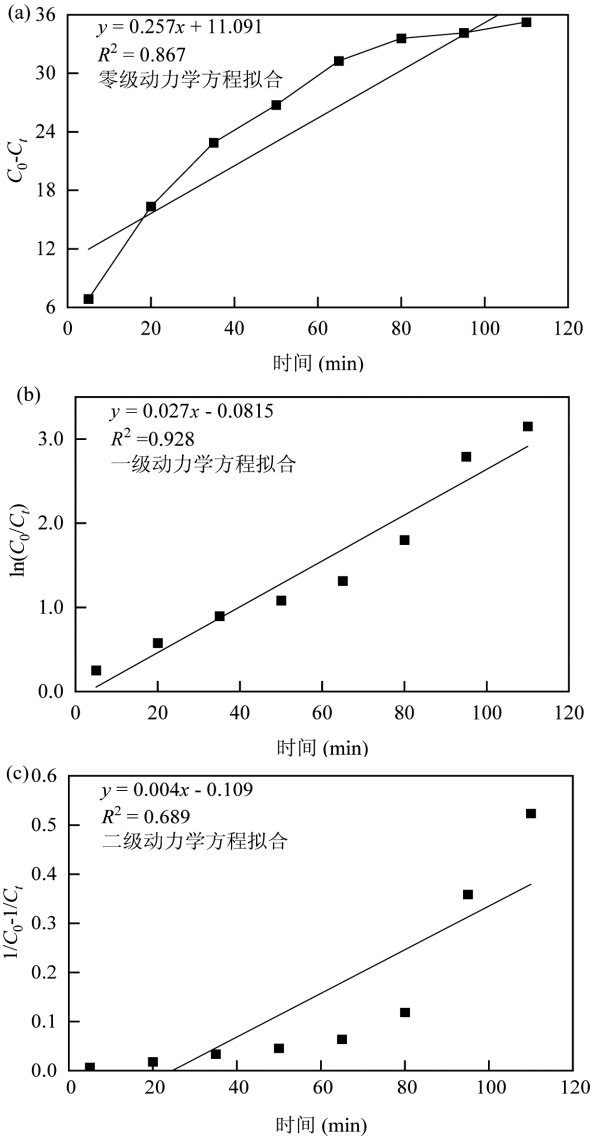


图 9 甲基橙废水降解的动力学方程

Fig.9 The kinetic equations of methyl orange wastewater degradation

如图 9 所示,零级动力学方程,一级动力学方程,二级动力学方程 R^2 分别为 0.867,0.928,0.689,可见甲基橙废水的降解过程更符合一级动力学反应模型,其拟合方程为 $\ln(C_0/C_t)=0.027t-0.0815$,说明甲基橙的降解速率与其初始浓度相关.

3　结论

3.1　采用达到一级 A 标准的二沉出水制备的 TENG 单元输出电压最高可达 23.52V,输出电流最高可达 2.15μA.以 TENG 作为降解甲基橙装置的外接电源,降解 60mg/L 的甲基橙废水,脱色率可达 81.04%.

3.2　TENG 对不同浓度的甲基橙废水降解,pH 值均呈现增大的趋势.铝电极对甲基橙废水的脱色效果最好,脱色率为 83.21%,不锈钢电极的稳定性最好.

3.3　添加 0.03mol/L 氯化钠的甲基橙废水脱色率可达 85.05%,而没添加氯化钠的甲基橙废水脱色率仅为 23.85%.TENG 单元数量从 1 升高到 6 个时,脱色率从 85.05%升高到 91.05%.

3.4　TENG 作为外接电源降解甲基橙废水的反应符合一级动力学方程:$\ln(C_0/C_t)=0.027t-0.0815$,甲基橙废水降解速率与其初始浓度有关.

参考文献:

[1] 代冬梅,徐　睿,王玉军,等.电絮凝处理牛仔布印染废水 [J]. 环境工程学报, 2014,8(7):2947-2951.
Dai D M, Xu R, Wang Y J, et al. Treatment of denim dyeing and printing wastewater by electric flocculation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineerin, 2014,8(7):2947-2951.

[2] 张　亮,周姝岑,李　攀,等.电絮凝-微纳米气泡臭氧氧化工艺处理高盐印染废水的研究 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(2):639-647.
Zhang L, Zhou S C, Li P, et al. Study on treatment of high-salt printing and dyeing wastewater by electroflocculation-micro-nano bubble ozoneoxidation process [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(2):639-647.

[3] 詹君翔,李　敬,许建平,等.高压脉冲电絮凝法处理印染废水研究 [J]. 能源与环境, 2015,(3):65-67.
Zhan J X, Li J, Xu J P, et al. Study on treatment of dyeing wastewater by high-voltage pulsed electrocoagulation method [J]. Energy and Environment, 2015,(3):65-67.

[4] 侯俭秋,李碧方.钛基金属氧化物电极制备及降解甲基橙研究 [J]. 化学研究与应用, 2018,30(11):1861-1864.
Hou J Q, Li B F. Preparation and electrocatalytic oxidation of Ti-based metal-oxideelectrodes for methyl orange [J]. Chemical Research and Application, 2018,30(11):1861-1864.

[5] Wang X B, Li X, Xie Y, et al. Enhancing anaerobic digestion of actual papermaking wastewater with addition of Fenton sludge [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024,63:105520.

[6] Qiu Y B, Wu S F, Xia L, et al. Ionic resource recovery for carbon neutral papermaking wastewater reclamation by a chemical self-sufficiency zero liquid discharge system [J]. Water Research, 2023, 229:119451.

[7] Kumar S A, Govindhan T, Selvakumar K, et al. Fabrication of N-doped ZnO for evaluation of photocatalytic degradation of methylene blue, methyl orange and improved supercapacitor efficiency under redox-active electrolyte [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2025,186:109052.

[8] Stojadinović S, Perković M, Radić N. Ta_2O_5 coatings modified with CdS, ZnO, and Dy_2O_3 particles prepared by plasma electrolytic oxidation of tantalum for the photocatalytic degradation of methyl orange [J]. Solid State Sciences, 2024,156:107661.

[9] Channe V D, Maske R G, Yadav P R, et al. Exploring additive/metal free benzimidazolium based ionic liquid entangled porphyrin for efficient degradation of methyl orange and p-nitrophenol under visible radiations [J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2025,19:100499.

[10] 王诗生,张梦梦,盛广宏,等.磁性生物炭吸附水中甲基橙的作用机制—基于密度泛函理论与实验研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4596-4605.
Wang S S, Zhang M M, Sheng G H, et al. Adsorption mechanism of methyl orange by using the magnetic biochar —Based on density functional theory andbatch adsorption experiment study [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4596-4605.

[11] 孔令国,王　玲,薛建军.负载型三维粒子电极降解甲基橙模拟废水研究 [J]. 中国环境科学, 2010,(4):516-521.
Kong L G, Wang L, Xue J J. Process of methyl orange simulated wastewater degraded by supported bipolar three-dimension particle electrodes [J]. China Environmental Science, 2010,(4):516-521.

[12] 徐　斌,张书陵,高月香,等.石墨烯三维电极-电 Fenton 系统降解甲基橙 [J]. 中国环境科学, 2020,40(10):4385-4394.
Xu B, Zhang S L, Gao Y X, et al. Degradation of methyl orange by graphene three-dimensional electrode-electro Fenton system [J]. China Environmental Science, 2020,40(10):4385-4394.

[13] 陈意民,李金花,李龙海,等.脉冲电絮凝处理难降解印染废水的研究 [J]. 环境科学与技术, 2009,32(9):144-147.
Chen Y M, Li J H, Li L H, et al. Experimental study on degradation of dyeing wastewater by pulse electro-coagulation [J]. Environmental Science & Technology, 2009,32(9):144-147.

[14] 边朝阳.电絮凝处理模拟放射性废水和印染废水研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2022.
Bian C Y. Study on the treatment of simulated radioactive wastewaterand printing and dyeing wastewater by electrocoagulation [D]. Chendu: Chengdu University of Technology, 2022.

[15] 陈　炜,张宇东,蔡珺晨,等.壳聚糖负载磺化酞菁钴催化过硫酸盐降解甲基橙的研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):157-163.
Chen W, Zhang Y D, Cai J C, et al. Degradation of methyl orange by chitosan microsphere supported cobalt tetrasulfophthalocyanine activated persulfate [J]. China Environmental Science, 2019,39(1): 157-163.

[16] 都林娜,李　刚,卢晓明,等. *Enterobacter* sp. CV-v 对甲基橙的脱色

特性与条件优化 [J]. 中国环境科学, 2014,34(12):3175-3181.
Du L N, Li G, Lu X M, et al. Characteristics of methyl orange decolorization by Enterobacter sp. CV-v and parameter optimization [J]. China Environmental Science, 2014,34(12):3175-3181.

[17] Tang H D, Zhang W J, Meng Y, et al. Investigation onto the performance and mechanism of visible light photodegradation of methyl orange catalyzed by M/CeO_2 (M=Pt, Ag, Au) [J]. Materials Research Bulletin, 2021,144:111497.

[18] Bai H M, He P, Chen J C, et al. Fabrication of Sc2O3-magneli phase titanium composite electrode and its application in efficient electrocatalytic degradation of methyl orange [J]. Applied Surface Science, 2017,401:218-224.

[19] 郑敏华.电絮凝法处理含镍电镀废水的试验研究 [J]. 能源与环境, 2024,(5):101-103.
Zheng M H, Experimental study on treatment of nickel-containing electroplating wastewater by electrocoagulation method [J]. Energy and Environment, 2024,(5):101-103.

[20] 周润娟,徐建平,张 明.响应曲面法优化絮凝处理印染废水研究 [J]. 给水排水, 2011,37(11):139-143.
Zhou R J, Xu J P, Zhang M, Printing and dyeing wastewater flocculation treatment optimization by response surface methodology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011,37(11):139-143.

[21] 罗嘉豪,金 鑫,唐茂森,等.基于电絮凝工艺的洗衣废水深度处理与再生利用 [J]. 中国给水排水, 2024,40(23):84-90.
Luo J H, Jin X, Tang M S, et al. Advanced treatment and recycling of laundry wastewater utilizing electrocoagulation process [J]. China Water & Wastewater, 2024,40(23):84-90.

[22] 孙秀君,张志众,刘 伟,等.铝电极电絮凝法处理机械加工含乳化液废水技术研究 [J]. 唐山学院学报, 2024,37(6):10-13.
Sun X J, Zhang Z Z, Liu W, et al. Research on the treatment technology of emulsion wastewater from mechanical processing by electric flocculation with aluminum electrode [J]. Journal of Tangshan University, 2024,37(6):10-13.

[23] 孔丝纺,周兴风,欧阳帆,等.电子电镀废水的脱色-吸附絮凝处理工艺研究 [J]. 电镀与涂饰, 2023,42(23):70-77.
Kong S F, Zhou X F, Ouyang F, et al. Study on treatment of wastewater generated during electroplating of electronic product by flocculationin combination of decolorization and adsorption [J]. Electroplating & Finishing, 2023,42(23):70-77.

[24] Wang Y T, Wang Y H, Xiong Z Z, et al. A novel “Snowflake” -rGO-CuO for ultrasonic degradation of rhodamine and methyl orange [J]. Nano Materials Science, 2024,6:365-373.

[25] Wang L, Li T, Tao L L, et al. A novel copper-doped porous carbon nanospheres film prepared by one-step ultrasonic spray pyrolytic of sugar for photocatalytic degradation of methyl orange [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,158:79-86.

[26] Bousmaha M, Kharroubi N, Bezzerrouk M A, et al. Efficient removal of amoxicillin and methyl orange with antibacterial activity assessment via nanostructured ZnO coatings synthesized by ultrasonic spray pyrolysis method [J]. Ceramics International, 2024,50:23784-23793.

[27] 李明玉,尚 薇,王心乐,等.光电化学协同催化降解甲基橙的研究 [J]. 中国环境科学, 2009,(5):512-517.
Li M Y, Shang W, Wang X L, et al. The degradation of methyl orange with photo-electro-chemical synergistic catalysis system [J]. China Environmental Science, 2009,(5):512-517.

[28] 乐 波,麻敏华,陶 媛,等.直流电絮凝法处理印染废水的研究 [J]. 高电压技术, 2005,31(10):49-51.
Yue B, Ma M H, Tao Y, et al. Study on treatment of dyeing wastewater by DC electrocoagulation method [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10):49-51.

[29] 岳文清,倪 月,孙则朋,等.改性钛基 PbO_2 电极对有机污染物的降解性能——以甲基橙和 4-硝基苯酚为例 [J]. 中国环境科学, 2022, (2):706-716.
Yue W Q, Ni Y, Sun Z P, et al. Degradation of organic pollutants by modified titanium based PbO_2 electrode: Taking methyl orange and 4-nitrophenol asexamples [J]. China Environmental Science, 2022, (2):706-716.

[30] 李春庚,甄 新,李亚丽,等.印染废水染料降解技术研究进展 [J]. 应用化工, 2022,51(5):1439-1444.
Li C G, Zhen X, Li Y L, et al. Advances in dye degradation technology of printing and dyeing wastewater [J]. Applied Chemical Industry, 2022,51(5):1439-1444.

[31] Lin S Q, Chen X Y, Wang Z L. Contact electrification at the liquid - solid interface [J]. Chemical Reviews, 2022,122:5209-5232.

[32] Wang Z L, Jiang T, Xu L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks [J]. Nano Energy, 2017,39:9-23.

[33] Zhai H, Ding S, Chen X Y, et al. Advances in solid - solid contacting triboelectric nanogenerator for ocean energy harvesting [J]. Materials Today, 2023,65:166-188.

[34] Wang Z L, Wang A C. on the origin of contact electrificationg [J]. Materials Today, 2019,30:34-51.

[35] Cai C C, Luo B, Liu Y H, et al. Advanced triboelectric materials for liquid energy harvesting and emerging application [J]. Materials Today, 2022,52:299-326.

[36] Superhydrophobic liquid-solid contact triboelectric nanogenerator as a droplet sensor for biomedical applications [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2020,12:40021-40030.

[37] Sun C Z, Guo X Y, Ji R, et al. Strong tribocatalytic dye degradation by tungsten bronze $Ba_4Nd_2Fe_2Nb_8O_{30}$ [J]. Ceramics International, 2021, 47:5038-5043.

[38] Liu L, Qiao W Y, Gao Y K, et al. Improving degradation efficiency of organic pollutants through a self-powered alternating current electrocoagulation system [J]. Acs Nano, 2021,15(12):19684.

[39] Djandja O S, Yin L X, Wang Z C, et al. From wastewater treatment to resources recovery through hydrothermal treatments of municipal sewage sludge: A critical review [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021,151:101-127.

[40] Xu W H, Zheng H X, Liu Y, et al. A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density [J]. Nature, 2020, 578(7795):392-396.

[41] Sun M M, Zhao Y Z, Ge H H. Electrocatalytic degradation of methyl orange using nano-Fe_3O_4supported on conductive carbon black as particle electrode [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022,17:220822.

[42] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法 [M]. 第 4 版.北京:中国

环境科学出版社, 2002.

[43] Ma, H M, Xi B D, Chen Y Z, et al. A droplet-based eletriccity generators (DEGs) system for harvesting secondary effluent energy [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025-05-10, https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.05.020.

[44] 刘　坚,李　健,陈哲元,等.印染废水处理系统运行性能评估方法 [J]. 印染助剂, 2025,42(6):51-54.
Liu J, Li J, Chen Z Y, et al. Evaluation method of operation performance of printing anddyeing wastewater treatment system [J]. Textile Auxiliaries, 2025,42(6):51-54.

[45] Song Y Z, Chen Z, Gui L, et al. Fabrication and electrocatalytic performance of a two dimensional ß-PbO_2 macroporous array for methyl orange degradation [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019,14:7790-7810.

[46] Sun M M, Wang C X. The application of ferrous and graphitic N modified graphene-based composite cathode material in the bio-electro-Fenton system driven by sediment microbial fuel cells to degrade methyl orange [J]. Heliyon, 2024,10:e24772.

[47] Kalpana S, Niranjana P T, Anantharamaiah P N. Nanostructured $Zn_{0.1}Co_{2.9}O_4$ material: Synthesis, characterization and its applications for energy storage and electrocatalytic dye degradation [J]. Materials Today: Proceedings, 2023,89:100-104.

[48] 谭　竹,杨朝晖,徐海音,等.铝铁电极联用电絮凝法处理 Cu-EDTA 络合废水 [J]. 环境工程学报, 2014,8(8):3167-3173.
Tan Z, Yang Z H, Xu H Y, et al. Removal of Cu-EDTA from aqueous solution by electrocoagulation using Al and Fe electrodes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014,8(8):3167-3173.

[49] 王鸿辉,马明洁,冯　婕,等.电解质对甲基橙电催化氧化性能影响研究 [J]. 化学工程师, 2018,(4):33-36.
Wang H H, Ma M J, Feng J, et al. Effects of electrolyte on the electrocatalytic oxidation performance of methyl orange [J]. Chemical Engineer, 2018,(4):33-36.

作者简介：马红梅(1988-),女,甘肃庆阳人,兰州交通大学博士研究生,主要从事水污染控制工程及污水资源化研究.发表论文 2 篇.288142362@xbmu.edu.cn.