

基于激光空化技术的酸性黑溶液降解特性研究

刘澳, 顾嘉阳, 罗春晖, 童照鹏, 戴子杰, 任旭东

Study on degradation characteristics of acid black solution based on laser cavitation technology

引用本文:

刘澳, 顾嘉阳, 罗春晖, 童照鹏, 戴子杰, 任旭东. 基于激光空化技术的酸性黑溶液降解特性研究[J]. [激光技术](#), 2023, 47(5): 613–619.

LIU Ao, GU Jiayang, LUO Chunhui, et al. Study on degradation characteristics of acid black solution based on laser cavitation technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(5): 613–619.

您可能感兴趣的其他文章

1. 异种金属氧化物辅助激光刻蚀蓝宝石的研究

引用本文: 杨富理, 袁根福, 李浩. 异种金属氧化物辅助激光刻蚀蓝宝石的研究[J]. [激光技术](#), 2021, 45(6): 756–761.

2. 美国陆军车载战术激光武器发展分析

引用本文: 黄沛, 曹国辉, 张海晶, 等. 美国陆军车载战术激光武器发展分析[J]. [激光技术](#), 2022, 46(6): 817–822.

3. CO₂激光诱导液滴射流等离子体的实验研究

引用本文: 陈子琪, 王新兵, 左都罗. CO₂激光诱导液滴射流等离子体的实验研究[J]. [激光技术](#), 2016, 40(6): 888–891.

4. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究

引用本文: 张俊, 张为国. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 25–31.

5. 激光目标回波模拟器能量标定装置研究

引用本文: 孟庆安, 樊红英, 薛亮平, 等. 激光目标回波模拟器能量标定装置研究[J]. [激光技术](#), 2022, 46(6): 802–807.

文章编号: 1001-3806(2023)05-0613-07

基于激光空化技术的酸性黑溶液降解特性研究

刘 澳, 顾嘉阳, 罗春晖, 童照鹏, 戴子杰, 任旭东*
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究激光技术在废水降解领域中的应用, 采用激光诱导空化技术对酸性黑溶液进行降解, 通过紫外分光光度计对降解后的溶液进行分析表征, 获得激光能量和溶液初始质量浓度对降解能力的影响; 结合空泡动力学理论和空化化学效应, 揭示了激光空化降解酸性黑溶液的机理。结果表明, 随着激光能量的增加, 初始质量浓度为 20 mg/L 的酸性黑溶液的降解率从 0.78% 逐步增加到 27.28%; 在 100 mJ 激光能量下, 当溶液中酸性黑溶液的初始质量浓度从 5 mg/L 提升至 20 mg/L 时, 降解率从 98.55% 降低至 7.63%; 激光能量越高, 降解率越大; 初始质量浓度过大, 则激光空化难以对酸性黑溶液进行降解。该研究推进了激光空化降解染料等有机废水技术的发展。

关键词: 激光技术; 降解率; 激光空化; 初始质量浓度; 激光能量

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.05.006

Study on degradation characteristics of acid black solution based on laser cavitation technology

LIU Ao, GU Jiayang, LUO Chunhui, TONG Zhaopeng, DAI Zijie, REN Xudong
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to realize the application of laser technologies in the field of wastewater degradation, laser-induced cavitation technology was employed to degrade acid black solution in this work. The degraded solution was analyzed and characterized by an ultraviolet spectrophotometer, and the effects of laser energy and the solution initial concentration on the degradation capacity were obtained. The mechanisms of laser cavitation degradation of acid black solution were revealed based on the combination of the theory of bubble kinetics and the chemical effect of cavitation. The results show that with the increase of laser energy, the degradation rate of acid black solution with an initial concentration of 20 mg/L gradually increases from 0.78% to 27.28%. Under the laser energy of 100 mJ, the degradation rate of the acid black solution decreases from 98.55% to 7.63% as the initial concentration increases from 5 mg/L to 20 mg/L. The higher the laser energy, the greater the degradation rate. It is difficult for laser cavitation to degrade the acidic black solution if the initial concentration is too large. This research promotes the development of organic wastewater technologies such as laser cavitation to degrade dyes.

Key words: laser technique; degradation rate; laser cavitation; initial mass concentration; laser energy

引 言

印染废水^[1]的水量较大, 水中的有机物污染物含

量较高, 一直是我国难处理的工业废水之一。其中染料废水等有机废水具有光解稳定性和耐化学氧化性的特点^[2], 极难降解且毒性很大, 传统的物理^[3]、化学^[4]和生物^[5]等降解技术难以处理^[6]。

空化是指液体中空泡的形成、生长及溃灭现象, 其中空泡溃灭形成的微射流和冲击波会释放高强度的能量, 产生羟自由基($\cdot\text{OH}$)氧化剂^[7-9]。20 世纪末, 有部分学者就开始研究空化降解技术在水污染处理中的作用, 并取得了一定进展。GOGATE 等人^[10]报道了基于碘化钾氧化反应的空化效率评估。VICHARE 等人^[11]通过使用多孔板研究了阳离子染料罗丹明 B 的降解。SHEN 等人^[12]通过空化水射流化学效应中

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A20138; 51975261); 中国博士后科学基金资助项目(2021M700059); 江苏省六大人才高峰创新团队资助项目(2019TD-KTHY-005); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(21KJB460013); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX21_3326)

作者简介: 刘 澳(1999-), 男, 大学本科生, 现主要从事激光诱导空化方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: renxd@ujs.edu.cn

收稿日期: 2022-08-09; 收到修改稿日期: 2023-01-11

的热效应和氧化效应,初步研究空化射流对有机污染物的降解。SHI 等人^[13]通过分析超声空化降解效应的影响因素,提出了可以将超声波技术与其它技术相结合,从而对各类废水进行降解处理。

然而,当前对于空化降解技术的研究局限于水力空化与超声空化,降解成本高以及效率低等问题亟待解决,且难降解较高质量浓度的污水。激光空化技术起步较晚,其原理为:激光聚焦于液体中,击穿水形成等离子体^[14-15],激光聚焦区压力急剧上升并对外膨胀,从而导致泡内压力急剧下降,形成空泡。相关学者对激光诱导空泡的脉动特性^[16-17]和强化机制^[18-20]进行了研究,但利用激光空化来降解有机染料废水的技术很少有报道,而利用激光空化降解有机染料废水的研究也未有过多报道,与水力空化和超声空化降解相比,激光空化降解技术具有装置简单、可控性好、无需接触即可降解废水且成本低、环保无污染等优点,在染料废水处理领域具有广阔的应用前景。

本文作者以酸性黑溶液作为研究对象来模拟染料废水,设计了激光空化降解装置,研究不同激光能量下以及不同初始质量浓度下酸性黑溶液的降解率。对降解后的溶液进行检测,获得酸性黑溶液最佳降解工艺参量,并分析激光空化降解的机理。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。由纳秒激光发射器(Nd:YAG 双波长固体激光器,勤德光电科技有限公司)、3 维移动平台、反射镜、凹透镜、凸透镜、试管、激光能量计(NIM-E1000,中国计量科学研究院)、高速摄像机(V2512-144G, Phantom, USA)、光纤光源等组成。试管底部放置有黑色橡胶圈以截留激光能量,提高空

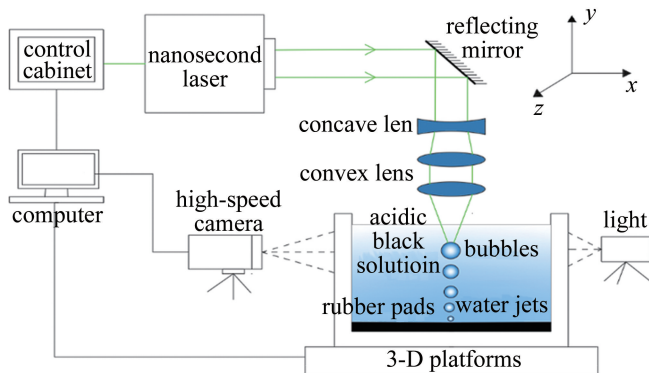


图 1 激光空化降解系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a laser cavitation degradation system

化效率。为了观察激光诱导空泡的脉动过程,利用高速摄像机以 400000 帧/s 的速率记录空化气泡的膨胀与收缩状态。本次实验中激光的脉冲频率为 1 Hz,脉冲宽度为 8 ns,激光聚焦直径为 0.5 mm。

1.2 实验分析

质量浓度和降解率是激光空化降解的主要参量。配制一系列标准酸性黑溶液,基于朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律^[21],采用紫外分光光度计分析测量酸性黑溶液的吸光度。发现其最大吸收波长是 622.5 nm。根据吸光度 A 和所配置的酸性黑溶液质量浓度 ρ 绘制质量浓度-吸光度标准曲线,如图 2 所示。

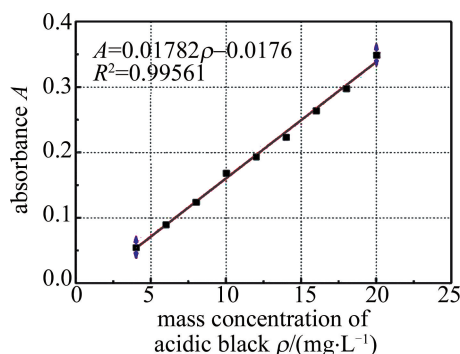


图 2 酸性黑溶液质量浓度与吸光度的关系

Fig. 2 Relationship of mass concentration of acid black solution and absorbance

通过测定酸性黑溶液的吸光度 A ,即可计算其对应的质量浓度 ρ :

$$A = 0.01782\rho - 0.0176 \quad (1)$$

其相关系数 $R^2 = 0.99561$,降解的程度定义为去除的百分比,可以通过下式计算:

$$W = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, W 为酸性黑溶液的降解程度, ρ_0 为酸性黑溶液的初始质量浓度, ρ 为激光空化降解后溶液的质量浓度。因此,可以得出其解率计算公式:

$$W = \frac{A_0 - A_i}{A_0 + 0.0176} \times 100\% \quad (3)$$

式中, A_0 为溶液初始吸光度, A_i 为激光空化降解后第 i 次测量的溶液的吸光度。

2 结果与讨论

2.1 激光空化降解实验

图 3 为激光空化降解后不同激光能量和初始质量浓度下的酸性黑溶液的质量浓度。从图 3a 和图 3c 可以看出,酸性黑溶液的质量浓度随激光空化的进行而

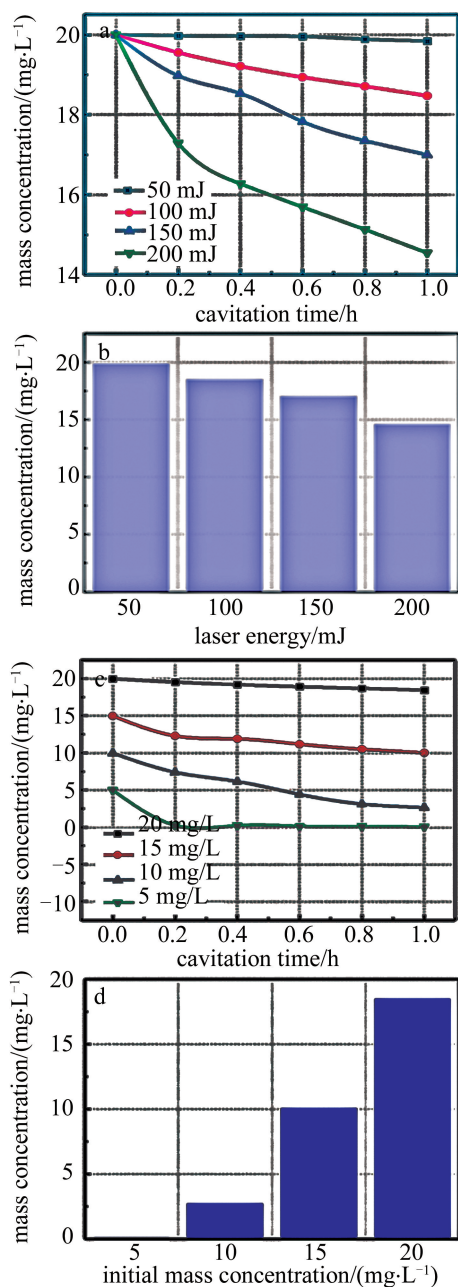


图3 a—20 mg/L 初始质量浓度下,酸性黑溶液的降解过程 b—20 mg/L 初始质量浓度下,降解 1 h 后的质量浓度 c—100 mJ 激光能量下,酸性黑溶液的降解过程 d—100 mJ 激光能量下,降解 1 h 后的质量浓度

Fig. 3 a—degradation process of acid black solution under initial mass concentration of 20 mg/L b—mass concentration of acid black solution after degradation for 1 h under initial mass concentration of 20 mg/L c—degradation process of acid black solution under 100 mJ laser energy d—mass concentration of acid black solution after degradation for 1 h under 100 mJ laser energy

降低。激光空化可以诱导空泡并产生·OH 自由基。在激光空化过程中,由于溶液中的酸性黑分子越来越多地被·OH 自由基氧化,酸性黑溶液的质量浓度不断降低。然而,不同激光能量和初始质量浓度导致激

光空化后的酸性黑溶液质量浓度变化在每段时间中有明显的差异。在图 3b 中,激光空化 1 h 后溶液的质量浓度为 19.84 mg/L、18.47 mg/L、17.00 mg/L 和 14.54 mg/L,分别对应的激光能量为 50 mJ、100 mJ、150 mJ 和 200 mJ。在图 3d 中,酸性黑溶液的质量浓度为 0.07 mg/L、2.68 mg/L、10.04 mg/L 和 18.47 mg/L,分别对应初始质量浓度 5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L 和 20 mg/L。图 4 为初始质量浓度为 20 mg/L 和 100 mJ 激光能量时,酸性黑溶液的颜色随激光空化时间的变化。可以观察到,溶液的颜色由蓝黑色褪色,液体变得浑浊。这些实验结果验证了激光空化降解酸性黑的可行性。

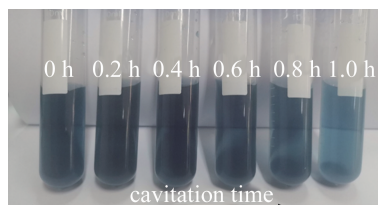


图4 酸性黑溶液的颜色随激光空化时间的变化

Fig. 4 Color changes of acid black solution with laser cavitation time

2.2 激光能量对降解率的影响

激光能量是激光空化的关键参量。配置 500 mL 初始质量浓度为 20 mg/L 的模拟酸性黑废水,探究激光能量对激光空化降解的影响。在质量浓度为 20 mg/L 的酸性黑溶液中,使用 50 mJ、100 mJ、150 mJ、200 mJ 4 种不同的激光能量,分别进行 1 h 的激光空化降解实验,并记录每个时间点的降解率,结果如图 5a 所示。每个空化时间段内,激光空化的降解程度随激光能量的增加而提高。从图 5b 可以看出,4 种不同的激光能量下酸性黑溶液在 1 h 的降解率分别为 0.78%、7.63%、15.01%、27.28%,当激光能量从 50 mJ 增加到 200 mJ 时,1 h 空化时间的降解率增加了 26.5%。

图 6 为激光空化降解 1 h 后酸性黑溶液在不同激光能量下的颜色。可以看出,酸性黑溶液的颜色随激光能量的增加而逐渐变浅。特别是在激光能量为 200 mJ 时,溶液颜色接近透明。

降解效率并不是随着激光能量的提升而越来越好的,激光诱导空泡技术存在能量阈值,在能量阈值范围内的降解效率随着激光能量的增加而增加;而超出了能量阈值,激光诱导空泡就会形成空泡串而不是单空泡,此时的降解效率是随着激光能量的增加而减小。随着激光的不断辐射,污水的温度会升温,但污水的温度仅会上升 10 °C ~ 20 °C。污水的降解率和激光能量

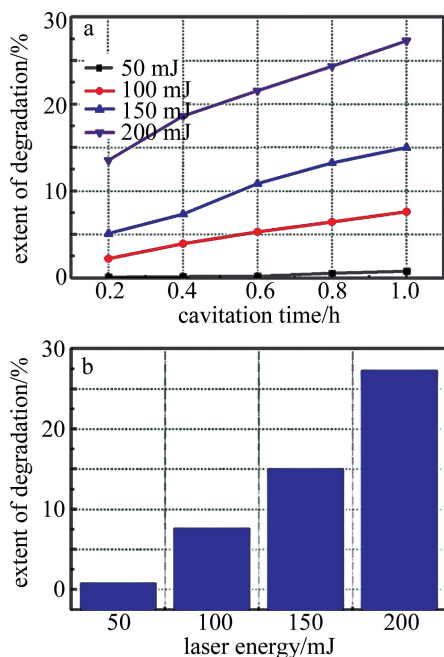


图5 a—激光能量对酸性黑溶液降解率的影响 b—激光空化降解1 h后,不同激光能量下的酸性黑溶液最终降解率

Fig. 5 a—effect of laser energy on the degradation process of acid black solution b—final degradation rate of acid black solution after laser cavitation degradation for 1 h with laser energy

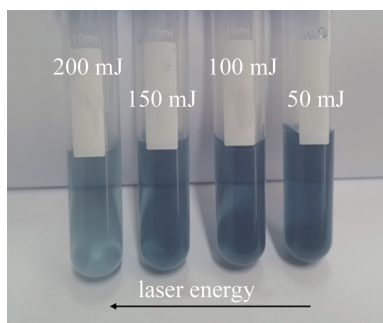


图6 不同激光能量下降解1 h后酸性黑溶液颜色的变化

Fig. 6 Color change of acid black solution after degradation for 1 h under different laser energy

与空泡的最大半径相关,温度的升高对于激光能量不会有影响,而对于空泡半径的影响也非常小,可以忽略不计,所以实验中温度的变化对于降解几乎没有影响。

2.3 初始质量浓度对降解率的影响

初始质量浓度是影响空化降解的重要因素之一。本节中研究了初始质量浓度对100 mJ激光能量下酸性黑溶液降解程度的影响,配置初始质量浓度分别为5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L和20 mg/L的酸性黑溶液来模拟酸性黑废水,使用激光空化降解设备进行1 h的降解,记录结果如图7所示。图7a显示了降解1 h过程中4种初始质量浓度条件下酸性黑溶液质量浓度的变化趋势,在降解的各个时间段中,酸性黑溶液的降

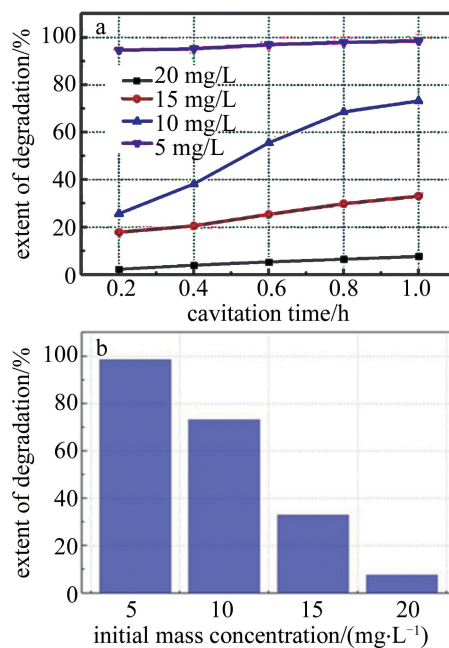


图7 a—初始质量浓度对酸性黑溶液降解率的影响 b—激光空化降解1 h后,不同初始质量浓度下酸性黑溶液的最终降解率

Fig. 7 a—acid black solution degradation rate under different initial mass concentration b—final degradation rate of acid black solution with different initial mass concentration after degradation for 1 h

解率与其初始质量浓度成反比。图7b中给出了酸性黑溶液在4种不同质量浓度下的最终降解程度分别为98.55%、73.21%、33.07%和7.63%。图7a中的结果表明,降解程度随空化时间的增加而增加。此外,降解程度随质量浓度的增加而降低,初始质量浓度为5 mg/L时降解率最大,且此时酸性黑溶液基本被完全降解。

图8为激光空化降解1 h后酸性黑溶液在不同初始质量浓度下的颜色。初始质量浓度较高的酸性黑溶液颜色在激光空化降解后呈现蓝黑色,这意味着当酸性黑溶液的初始质量浓度较高时,降解程度较低。酸性黑溶液在不同质量浓度下的颜色变化与降解程度趋

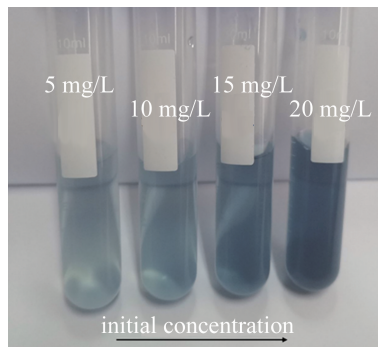


图8 不同质量浓度酸性黑溶液降解1 h后颜色的变化

Fig. 8 Color change of acid black solution with different mass concentrations after degradation for 1 h

势基本吻合。

2.4 降解速度

研究了不同激光能量和初始质量浓度下酸性黑溶液的降解速度,降解速度 v 可用下式表示:

$$v = (\rho_0 - \rho)V/t \quad (4)$$

式中, V 为酸性黑溶液的体积, t 为降解时间。

联立(1)式~(4)式可得:

$$v = \frac{A_0 - A_i}{0.01782t_i}V \quad (5)$$

式中, t_i 为 i 次测量的实验操作时间。

图 9 为激光空化降解后不同激光能量和初始质量浓度下酸性黑溶液的降解速度。从图 9a 可以看出,酸性黑的降解速度随着降解时间的增加而先上升后下降,在 20 mg/L 酸性黑溶液中,降解速度的最大值随激光能量的增大而增加。如图 9b 所示,初始质量浓度除 20 mg/L 外,酸性黑溶液在 0.2 h 空化时间内的降解速度显著上升,降解速度的最大值随初始质量浓度的增加而减小,降解时间相应延长。

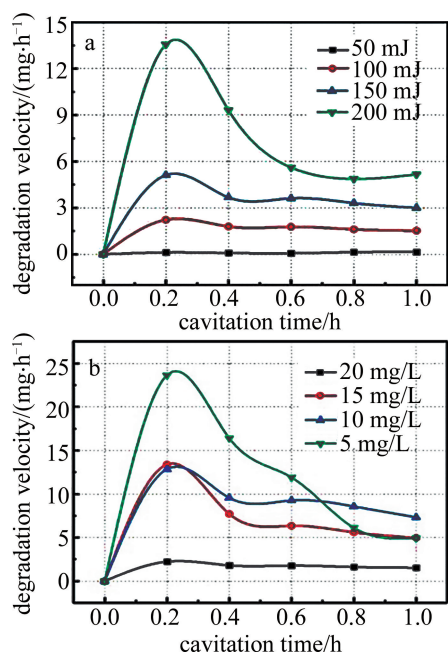


图 9 不同激光能量和初始质量浓度下,酸性黑溶液的降解速度随时间的变化

Fig. 9 Degradation rate of acid black solution vs. time under different laser energy and initial mass concentration

2.5 降解动力学

研究了不同激光能量和初始质量浓度下酸性黑溶液的降解动力学。上述实验表明,除激光能量 50 mJ 和初始质量浓度 20 mg/L 外,酸性黑溶液的质量浓度随空化时间呈指数级下降,相关函数如下:

$$\rho = \rho_0^{-kt} \quad (6)$$

式中, k 为降解程度常数。

根据(6)式计算出各散点数值,做出拟合曲线,如图 10a 和图 10b 所示。在对数坐标中,空化时间与酸性黑溶液质量浓度比值的函数关系可近似看作线性。结果表明,激光空化对酸性黑溶液的降解遵循伪 1 阶动力学,酸性黑溶液质量浓度的比值随激光空化降解的进展而不断减小。

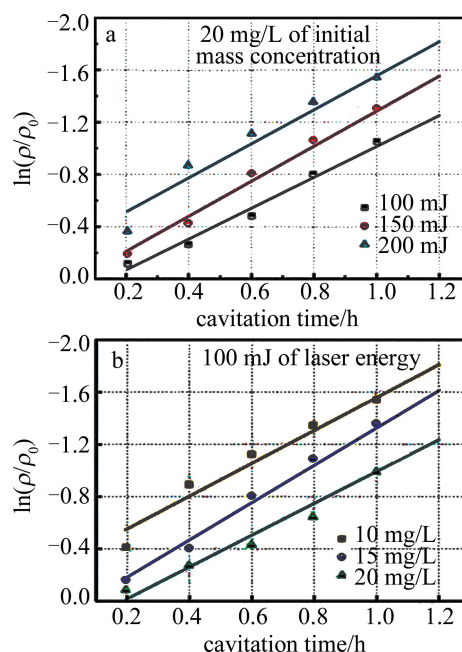


图 10 不同实验条件下 $\ln(\rho_0/\rho)$ 拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of $\ln(\rho_0/\rho)$ under different experiments

2.6 激光空化降解机理

结合激光诱导空泡的动力学特性,来研究激光空化降解酸性黑溶液的机理。作为一种新型的高级氧化工艺^[22],激光空化的降解过程可以从·OH 自由基的氧化和热分解中来分析。图 11 是激光能量为 150 mJ 下第 1 次脉动周期激光诱导空泡的序列图。可以观察到,当激光的功率密度超过酸性黑溶液的击穿阈值时,局部液体被分解成等离子腔体并继续吸收激光能量,迅速膨胀变大,形成空化泡,经历几次“膨胀-收缩”的周期性脉动过程,直至空泡能量耗尽,最终溃灭。在溃灭时释放出大量的能量,导致局部高温高压等极端环境,同时产生冲击波和水射流,酸性黑分子在这种极端的环境下被破坏。激光诱导空化过程中,通过空化泡溃灭过程具有的活化效应,水分子被直接破坏或者裂解为强氧化剂形成自由基(·OH 和·H 等),如(7)式所示。此外,激光空化在酸性黑溶液中引起物理和化学效应。气泡坍塌产生的冲击波和水射流撕裂了水分

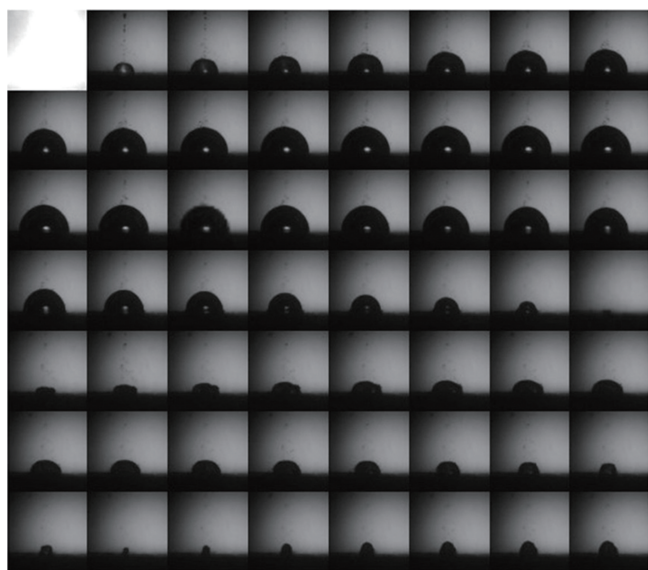
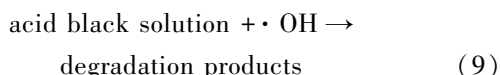
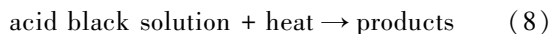


图 11 激光能量为 150 mJ 时近壁面的空泡脉动序列图

Fig. 11 Sequence diagrams of cavitation pulsation near wall surface under laser energy of 150 mJ

子,再次产生自由基($\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{H}$ 等), $\cdot\text{OH}$ 自由基作为强氧化剂扩散到酸性黑溶液中氧化酸性黑分子。 $\cdot\text{H}$ 自由基是一种强还原剂,不参与激光空化中酸性黑溶液的降解。



激光空化降解酸性黑溶液的过程可分为 3 个部分,如图 12 所示。图中,AB 为酸性黑溶液分子。第一部分:激光入射到酸性黑溶液中,水分子撕裂成 $\cdot\text{OH}$ 自由基和 $\cdot\text{H}$ 自由基, $\cdot\text{OH}$ 自由基氧化酸性黑分子,同时,激光聚集点附近的高温高压环境使酸性黑分子被热分解;第二部分:空泡溃灭释放的冲击波和水射流再次使水分子撕裂生成羟基,酸性黑分子被羟基再次氧化;第三部分:由于激光空化已经持续了一段时间,

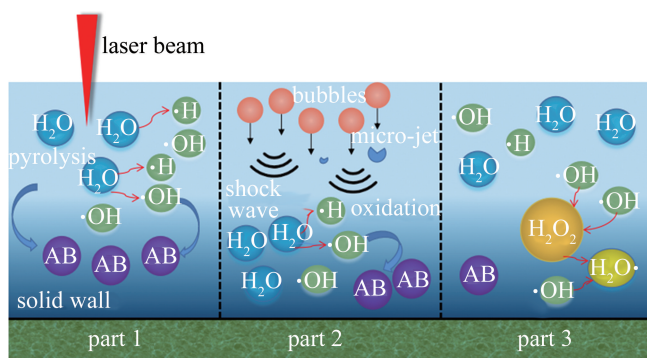


图 12 激光空化降解机理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of laser cavitation degradation mechanism

$\cdot\text{OH}$ 自由基的含量过多,酸性黑分子显著减少, $\cdot\text{OH}$ 自由基将自我反应成 H_2O_2 分子或者与 $\cdot\text{H}$ 自由基反应重组为 H_2O 分子, H_2O_2 还可与 $\cdot\text{OH}$ 自由基反应,生成的 $\cdot\text{O}_2\text{H}$ 自由基的氧化率远低于 $\cdot\text{OH}$ 自由基。因此,在激光空化降解的第三部分,降解效率明显降低。

3 结论

本文作者提出一种激光空化降解酸性黑溶液的方法,从原理和实验方面研究了激光能量、溶液初始质量浓度对降解率和降解速率的影响。结果表明:随着激光能量的增加,酸性黑溶液的降解率显著增加;然而随着酸性黑溶液初始质量浓度的增加,游离羟自由基的量保持不变,导致降解率减小;酸性黑溶液的平均降解速率率先增大再减小的趋势,但是由于激光能量和初始质量浓度不同,达到最大平均降解速率的时间段也存在差异;激光空化过程中空泡经历 3 次脉动,激光击穿液体和空泡第 1 次溃灭释放的冲击波和水射流撕裂水分子并产生羟自由基,将酸性黑分子氧化成二氧化碳和水。

激光空化降解是一项污水处理的新技术,具有非接触式、降解能力强、降解效率高以及降解能耗低等优势,符合当前双碳的国家发展战略,具有广阔的应用前景。作者所做的工作对激光空化降解技术的进一步发展具有重要意义,但仍有许多不足之处需要改进,后续将对激光空化降解进行更深入的研究。

参考文献

- [1] JING X J, CAI D N, LI B, *et al.* Progress in the deep treatment technology of printing and dyeing wastewater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(6): 13-19(in Chinese).
景新军,蔡大牛,李斌,等. 印染废水深度处理技术进展[J]. *水处理技术*, 2022, 48(6): 13-19.
- [2] ARSLAN A I, BALCIOGLU I A. Degradation of remazol black B dye and its simulated dyebath wastewater by advanced oxidation processes in heterogeneous and homogeneous media[J]. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, 2006, 117(1): 38-42.
- [3] CHU W. Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge[J]. *Water Research*, 2001, 35(13): 3147-3152.
- [4] MALIK P K. Dye removal from wastewater using activated carbon developed from sawdust: Adsorption equilibrium and kinetics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 113(1/3): 81-88.
- [5] AN H, YI Q, GU X, *et al.* Biological treatment of dye wastewaters using an anaerobicoxic system[J]. *Chemosphere*, 1997, 33(12): 2533-2542.
- [6] BEHNAJADY M A, MODIRSHAHLA N, TABRIZI S B, *et al.* Ultrasonic degradation of rhodamine B in aqueous solution: Influence of operational parameters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008,

- 152(1): 381-386.
- [7] HENGLEIN A. Sonochemistry: Historical developments and modern aspects[J]. *Ultrasonics*, 1987, 25(1): 6-16.
- [8] CRUM L A. Comments on the evolving field of sonochemistry by a cavitation physicist[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1995, 2(2): S147-S152.
- [9] WANG X, WANG J, GUO P. Chemical effect of swirling jet-induced cavitation; degradation of rhodamine B in aqueous solution[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, 15(4): 357-363.
- [10] GOGATE P R, SHIRGAONKAR I Z, SIVAKUMAR M, *et al.* Cavitation reactors; Efficiency assessment using a model reaction[J]. *Aiche Journal*, 2010, 47(11): 2526-2538.
- [11] VICHARE N P, GOGATE P R, PANDIT A B. Optimization of hydrodynamic cavitation using a model reaction[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2000, 23(8): 683-690.
- [12] SHEN Y H, DENG S Sh, ZHANG P F. Pilot study of cavitations water jet degradation principle[J]. *GuiZhou Chemical Industry*, 2007(1): 25-27(in Chinese).
沈银华, 邓松圣, 张攀锋. 空化射流降解机理研究[J]. *贵州化工*, 2007(1): 25-27.
- [13] SHI Y H. Ultrasonic cavitation degradation of cefixime in water[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2019, 45(10): 157-158(in Chinese).
史雅慧. 超声空化降解水中头孢克圪的研究[J]. *化工设计通讯*, 2019, 45(10): 157-158.
- [14] LUO J F, SONG Sh J, WANG P Q, *et al.* Study on removal mechanism of micro-/nano-particles on silicon surface by laser plasma[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 567-571(in Chinese).
罗锦锋, 宋世军, 王平秋, 等. 激光等离子体对硅表面微纳粒子除去机理研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(4): 567-571.
- [15] SUN Ch W, BU Y, WANG Y H, *et al.* Spatial characteristics of spectral intensity of laser induced plasma[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2130001(in Chinese).
孙晨薇, 步扬, 王远航, 等. 激光诱导等离子体光谱空间分布特性[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2130001.
- [16] ZHAO R, XU R Q, SHEN Z H. Experimental investigation of the collapse of laser-generated cavitation bubbles near a solid boundary[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(5): 968-972.
- [17] LI Sh Y, WU R H, WANG X Y, *et al.* Effect of ambient pressure on bubble oscillation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0314002(in Chinese).
李胜勇, 吴荣华, 王晓宇, 等. 环境压强对空泡脉动特性的影响[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0314002.
- [18] REN X D, HE H, TONG Y Q. Experimental investigation on dynamic characteristics and strengthening mechanism of laser-induced cavitation bubbles[J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2016, 32: 218-223.
- [19] MAO W P, DING W, ZHANG Zh Y, *et al.* Detection and experiment of shock cavitations of laser electrochemical composite processing[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 753-758(in Chinese).
毛卫平, 丁伟, 张朝阳, 等. 激光电化学复合加工的冲击空化检测及试验[J]. *激光技术*, 2014, 38(6): 753-758.
- [20] JIANG Y J, ZHANG Zh Y, HUANG L, *et al.* Experiment study of laser thermal-mechanical enhanced electrochemical deposition[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 660-664(in Chinese).
姜雨佳, 张朝阳, 黄磊, 等. 激光热力强化电化学沉积试验研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 660-664.
- [21] YE H, ZHANG J X, MEI H P, *et al.* Quantitative analysis of aluminum in alloy steel by laser ablation absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1011004(in Chinese).
叶浩, 张骏昕, 梅海平, 等. 基于激光烧蚀吸收光谱的合金钢中铝元素的定量分析[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1011004.
- [22] HUANG H. Advanced oxidation process selection for advanced treatment of industrial wastewater in chemical industry park[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(10): 142-144(in Chinese).
黄华. 化工园区工业废水深度处理高级氧化工艺选择[J]. *广州化工*, 2020, 48(10): 142-144.