

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.005

基于响应面法的铝合金角接激光焊工艺优化

王健强, 邢健, 贾正, 赵而远

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章选用板材厚度为 2 mm 的 5754 铝合金, 采用角接的搭接形式, 开展激光熔焊焊接试验。以激光功率 P 、焊接速度 v 、离焦量 Z 为试验参数, 以焊接接头的最大拉力 F 为响应指标, 建立响应面分析的数学模型。研究表明: 激光功率、焊接速度、离焦量对最大拉力均有明显影响。激光功率越大, 焊接速度和离焦量越小, 最大拉力越大。分析所建立的数学模型, 确定较优工艺区间, 结合焊缝成形的宏观形貌, 获取最优工艺参数组合。最大拉力相比于试验组中的最优组提升 5.55%。

关键词:5754 铝合金; 响应面法; 激光焊接; 工艺优化; 接头质量

中图分类号:TG456.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)04-0458-06

Optimization of laser welding process for aluminum alloy fillet joints based on response surface methodology

WANG Jianqiang, XING Jian, JIA Zheng, ZHAO Eryuan

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In this paper, 5754 aluminum alloy with a plate thickness of 2 mm was selected, and by using fillet joint as the lap joint form, the laser fusion welding test was carried out. Taking the laser power P , welding speed v , and defocus Z as the experimental parameters, and the maximum tensile strength F of the welded joint as the response index, a mathematical model for response surface analysis was established. The results show that the laser power, welding speed, and defocus have obvious effects on the maximum tensile strength. The greater the laser power, the smaller the welding speed and defocus, the greater the maximum tensile strength. The established mathematical model was analyzed to determine the optimal process range, and combined with the macroscopic appearance of weld formation, the optimal process parameters were obtained. Compared with the optimal group in the test group, the maximum tensile strength was increased by 5.55%.

Key words: 5754 aluminum alloy; response surface methodology; laser welding; process optimization; joint quality

0 引言

当下汽车行业, 轻量化已经成为了科学家和工程师们关注的焦点。降低汽车质量, 可以有效降低车辆能耗, 大大减少有害气体的排放, 保护环境。使用轻质材料, 特别是铝合金材料在减轻车体质量方面的效果最为显著。铝合金作为轻量化

材料主要有耐腐蚀性好、成本低廉、易于加工制作的三大特点^[1], 因此其在汽车领域的应用日益广泛, 对于铝合金材料在车身结构中的应用研究也越来越多。激光焊接技术通过聚焦激光束的能量, 形成高能量激光脉冲, 照射在材料表面进行焊接。与传统焊接技术相比, 激光焊接既能保证较快的焊接速度, 同时又具有较小的焊接宽度、焊接

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-04-23

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目(202103a05020024)

作者简介: 王健强(1964—), 男, 浙江宁波人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师。

热影响区宽度和焊接变形量^[2-3]。激光焊接能适应不同接头形式、不同厚度以及不同材料类型的汽车车身部件焊接,满足汽车车身制造的柔性化需求^[4]。

文献[5]选用3 mm厚7075铝合金板进行光纤激光焊接,选取激光焊接头的外观成形质量作为评价标准,采用响应面法分析焊接参数对焊接质量的影响,结果表明:焊接功率、焊接速度对焊缝成形系数和焊缝截面积的影响较大,离焦量对焊缝成形系数的影响较大;文献[6]研究5052铝合金激光焊接接头组织和性能,结果表明铝合金激光焊接接头显微硬度在焊缝区最高,热影响区最低,随着激光功率的增加,铝合金激光焊接接头抗拉强度先增加后降低;文献[7]研究激光功率、两个对焊板之间的间隙以及振荡幅度等参数对5052-H32和6061-T6异种铝合金激光焊接的影响,并将激光功率和振幅的值相对于极限抗拉强度和焊缝形状进行了优化;文献[8]建立一个瞬态三维热流模型,模拟AA2024铝合金深熔激光焊接过程中的传热和熔池动力学,并进行数值模拟和无量纲分析,以研究驱动力对熔池动力学和几何结构的影响,通过改变输入参数(激光功率、焊接速度等)定量分析温度驱动的表面张力及其对熔池几何形状的影响;文献[9]以1.2 mm厚6016-T4车用铝合金板材为研究对象,研究不同焊接速度对搭接、T型接头的熔池尺寸和焊缝成形的影响,研究烘烤对接头性能的影响,并建立有限元模型进行焊接温度场数值模拟;文献[10]采用单激光焊和激光填丝焊研究6 mm厚5A06铝合金中厚板的焊接性,结果表明:激光填丝焊的焊缝鱼鳞纹更加均匀,单激光焊焊缝熔宽更小且有咬边的现象,焊接接头的抗拉强度和显微硬度均低于母材的抗拉强度和显微硬度,激光填丝焊的抗拉强度、伸长率和显微硬度均值均优于单激光焊的,激光填丝焊焊缝区的等轴枝晶晶粒更细,熔合区的柱状晶数量占比更小。

目前,学者们用响应面法对5754铝合金角接形式的激光焊工艺研究较少,角焊相比叠焊,搭接面积更小,在白车身焊接中能进一步节省材料,降低车身的质量。为研究不同工艺参数对铝合金角焊的接头质量影响,本文以激光功率、焊接速度、离焦量为试验参数,以焊接接头的最大拉力为响应指标,建立响应面分析的数学分析模型。利用模型分析各因素影响规律,找到最优工艺参数并试验验证。试验结果可为5754铝合金焊接提供

参考,具有一定指导意义。

1 试验材料及设备

试验材料为尺寸2 mm×100 mm×40 mm的5754铝合金。焊接前使用体积分数为95%的酒精清洗,氢氧化钠溶液浸泡以除去表面杂质,然后在干燥箱中进行干燥处理。样件的化学成分见表1所列。

元素	w
Mn	0.50
Si	0.40
Cr	0.30
Mg	2.60~3.60
Zn	0.20
Ti	0.15
Cu	0.10
Al	95.75~94.75

试验中采用的激光器为武汉锐科公司生产的C6000X光纤激光器,其最大输出功率为6 kW,连续输出,激光波长为(1 080±5) nm,采用芯径为0.1 mm光纤进行传输;焊接机器人为KUKAR60Hal六轴机器人,额定负载60 kg,最大作用范围为2 033 mm。

激光焊接头为卡门哈斯生产的摆动激光焊接头,本试验中在焊接时控制激光沿焊接方向圆弧摆动。采用WDW-50微机控制电子式万能试验机进行拉力测试。

样件连接形式如图1所示。研究的3个工艺参数分别为激光功率 P 、焊接速度 Z 和离焦量 v 。对5754铝合金进行焊接试验,选择激光的摆动形式为圆弧摆动,重叠率为35%,激光垂直照射焊接处,焊缝长度为25 mm。

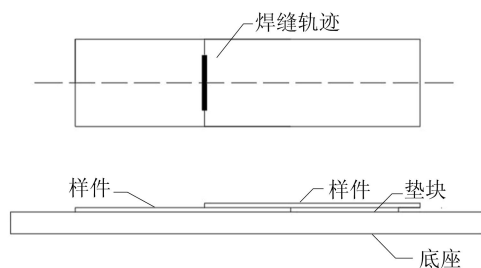


图1 样件连接形式

使用拉力试验机进行拉力测试,样件的装夹形式如图2所示,上位机记录拉力测试过程中的最大拉力。



图2 板件夹持装置

2 试验方法

2.1 因素水平确定

离焦量为 0, 焊接速度为 100 mm/s 选择试焊功率 3 600、3 800、4 000、4 200、4 500、4 700 W。其中焊接功率为 4 700 W 时, 焊缝背面出现焊透的现象。选择激光功率为 4 000 W, 离焦量为 0, 调整焊接速度为 80、90 mm/s 进行试焊。其中在 80 mm/s 时, 焊缝背面出现焊透的现象。选择激光功率 4 400 W、焊接速度 90 mm/s、离焦量 -1 mm 进行试焊, 发现焊缝背面有轻微焊透。由此设计三因素水平, 激光功率 4 000~4 300 W, 焊接速度 90~110 mm/s, 离焦量 -1~1 mm。通过 Design-Expert 软件对焊接参数进行编码转换, 最终各因素值见表 2 所列。

表2 因素水平

影响因素	水平 1	水平 2	水平 3
P/W	4 000	4 150	4 300
$v/(mm/s)$	90	100	110
Z/mm	-1	0	1

2.2 响应面回归模型

目前构造响应面的方法主要有多项式、指数函数和对数函数拟合等近似方法。多项式近似模型可处理相当广泛的非线性问题, 在实际应用中, 可以采用多项式近似模型进行分析。回归模型使用不同阶次的多项式近似表达响应指标与设计变量之间的关系, 函数表达式简单、计算量小、收敛速度快^[11]。但是高阶的多项式模型, 存在许多未确定的系数, 试验次数大, 计算效率低, 而低阶的二次多项式模型, 既满足了非线性特征, 试验次数还相对较少。

结合 Design-Expert 中 Fit summary 模块提供的不同阶次多项式模型拟合结果的系统评估, 本文最终以接头最大拉力 F 作为响应指标, 对

3 个自变量激光功率、焊接速度、离焦量进行二次多项式拟合, 二次多项式方程^[12]可表示为:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{i=1, j=1, i < j}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^m b_{jj} x_j^2 \quad (1)$$

其中: y 为试验响应; x 为试验因素; b_0 为方程常数项; b_i 为一次项系数; b_{ij} 为交叉项系数; b_{jj} 为二次项系数; i 和 j 为试验因素编号; m 为试验因素个数。

模型公式主要由常数项、一次项、交叉项及平方项组成, 一次项为影响试验因素的主效应, 交叉项与平方项为交互效应。通过方差分析对模型中的每一项进行回归显著性检验, 确定模型各因素显著性, 通过各项拟合系数来评估响应面模型精度。再结合模型的响应面曲面图, 分析各因素影响规律, 获得优化参数区间, 模拟实验数据, 由此确定较优的工艺参数。

3 结果与分析

3.1 回归模型

使用 Design-Expert 软件确定试验方案, 采用 Box-Behnken 设计, 共 17 组试验, 并按照随机方式均衡排列试验顺序, 以避免系统误差。其中有 5 组参数相同, 作为中心试验组用以估计试验误差。每组进行 3 次焊接拉力测试, 计算平均值作为最大拉力的结果值以减小试验误差。试验结果见表 3 所列。

表3 17 组试验结果

编号	P/W	$v/(mm/s)$	Z/mm	F/kN
1	4 150	100	0	3.44
2	4 150	100	0	3.38
3	4 300	110	0	2.54
4	4 000	110	0	1.21
5	4 150	100	0	3.72
6	4 300	110	0	3.07
7	4 150	100	0	3.76
8	4 000	100	1	1.69
9	4 150	110	1	1.97
10	4 150	100	0	3.45
11	4 150	110	-1	2.62
12	4 150	90	-1	5.22
13	4 300	100	-1	4.72
14	4 150	90	1	4.43
15	4 300	90	0	4.96
16	4 000	90	0	3.72
17	4 000	100	-1	2.15

根据响应值统计结果, 通过 Design-Expert

软件对表 3 中数据进行拟合,建立数学模型为:

$$F = 3.55 + 0.82A - 1.25B - 0.44C + 0.023AB - 0.3AC + 0.035BC - 0.55A^2 + 0.1B^2 - 0.095C^2 \quad (2)$$

其中, A、B、C 分别表示激光功率、焊接速度、离焦量的数值大小。

点击 Design-Expert 软件的 ANOVA 模块直接生成模型的方差分析数据,结果见表 4 所列, K 为统计特征量,即由模型(变量)引起的均方和残差(或误差)的均方之比,当 K 值大于某一临界值时,表明模型(变量)是显著的。N 值为可靠性统计检验值,表示 K 值小于某一临界值的概率,一般情况下, N 值小于 0.05 时,认为模型(变量)是显著的。分析表 4 中的 N 值,模型的 N 值小于 0.05,说明模型是显著的,具有较高的适应性和可靠性。A、B、C 和 AC 的 N 值小于 0.05,表示 A、B、C 和 AC 对响应目标值的影响显著。N 值的失拟检验值为 0.146 2,即对 K 值的不匹配度有 14.62% 的失拟可能性。该模型的复相关系数 R^2 和调整复相关系数 R_{adj}^2 分别为 0.770 4、0.955 3,这 2 个数值较高且接近(差小于 0.2),说明误差对模型的影响不显著模型能充分说明工艺过程^[11]。信噪比为 22.701,大于 4。以上模型检验均表明建立的模型是可行的,即为试验研究所要得到的模型。

表 4 回归模型分析结果

来源	平方和	自由度	均方	K 值	N 值
模型	21.070	9	2.340	39.000	<0.000 1
A	5.310	1	5.310	88.510	<0.000 1
B	12.480	1	12.480	207.780	<0.000 1
C	1.580	1	1.580	26.240	0.001 4
AB	0.002	1	0.002	0.034	0.859 5
AC	0.350	1	0.350	5.900	0.045 5
BC	0.005	1	0.005	0.082	0.783 4
A ²	1.260	1	1.260	21.020	0.002 5
B ²	0.046	1	0.046	0.770	0.408 4
C ²	0.038	1	0.038	0.630	0.452 4
残值	0.420	7	0.060		
失拟项	0.300	3	0.099	3.190	0.146 2
纯误差	0.120	4	0.031		
总失误	21.490	16			

3.2 响应面分析

接头最大拉力的散点分布图如图 3 所示,试验值比较接近模型预测值,表明模型能较好的预测试验结果。

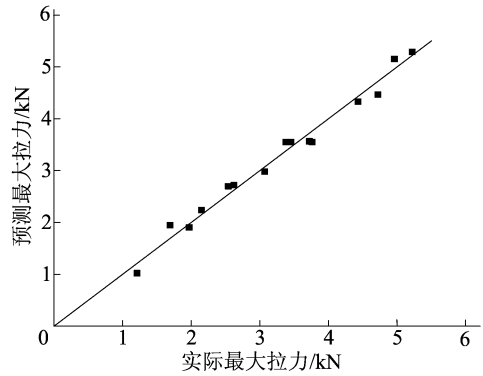


图 3 散点分布图

单因素扰动曲线如图 4 所示,最大拉力随着激光功率的增加先较快增加后缓慢增加,随着焊接速度和离焦量的增加而减小。

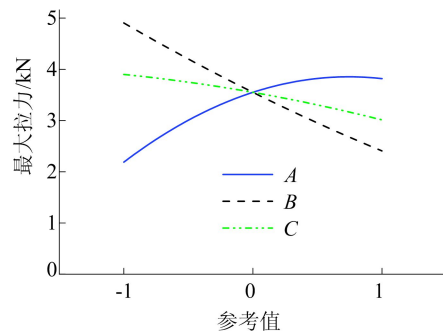


图 4 单因素扰动曲线

3 个因素本质上是影响熔池的熔深熔宽尺寸,合适的熔池尺寸可以增加焊缝处的有效面积,起到较好的连接作用。激光功率过低,单位面积热输入量过低,焊缝处于未熔透状态,样件只有接头表面会被融化,内侧金属通过热传导的形式达不到熔点,无法形成有效焊缝,容易产生应力集中,抗拉强度较差。激光功率的增加会直接导致焊接处的热输入增加,焊接过程中形成的熔池的体积增加,因此拉伸时的受力截面积增加,使接头的最大拉力增加。但是过高的激光功率,会导致焊缝热输入量太大而造成过度熔透,出现飞溅、凹陷等缺陷,影响接头的力学性能。焊接速度与热输入量成反比,用较小的焊接速度,则相同时间内输入到熔池的热量相对较多,熔池体积增加,接头的力学性能提高。但是伴随着焊接速度的降低,焊缝也会产生各种缺陷,因此控制焊缝在一个合理的范围很重要。离焦量的变化会影响焊缝上激光点的直径大小,当离焦量较小时(负离焦量),聚焦点在工件平面的下方,会使激光在熔池内部的热功率高于工件表面,提高了激光的穿透能力,

使熔池熔深增加,接头力学性能提高,但较大的负离焦容易导致熔池过深,焊缝可能塌陷甚至背部焊透。随着离焦量的增加,聚焦点在工件平面上方(正离焦量),激光的热输入量逐渐降低,使焊缝质量下降,力学性能降低。

不同因素间交互作用响应图如图 5 所示。

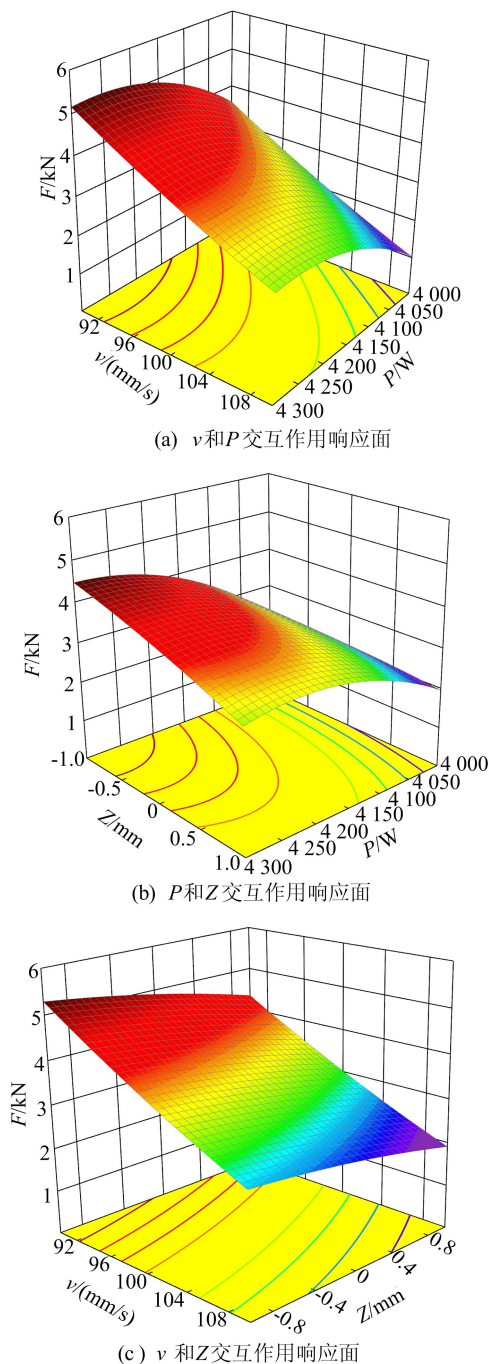


图 5 不同因素间交互作用响应图

焊接速度和激光功率对接头最大拉力的交互影响如图 5a 所示,颜色越深表示影响越显著,曲面图在大功率、低焊速时的颜色较深。即 P 为

4 150~4 300 W, v 为 90~95 mm/s 时,最大拉力较大。离焦量和激光功率对接头最大拉力的影响如图 5b 所示,曲面图在大功率、小离焦量时颜色较深,即 P 为 4 225~4 300 W, Z 为 $-1 \sim -0.50$ mm 时,最大拉力较大,但总体上曲面图颜色较浅,交互影响作用较小。焊接速度和离焦量对接头最大拉力的交互影响作用如图 5c 所示,在低焊速、小离焦量时,曲面图颜色较深,即 v 为 90~95 mm/s, Z 为 $-1 \sim -0.25$ mm 时,最大拉力最大, v 为 100~110 mm/s 时,离焦量的改变对最大拉力影响不大。

3.3 工艺参数优化与试验验证

结合上述分析,综合考虑确定优化工艺区间: P 为 4 150~4 300 W, v 为 90~95 mm/s, Z 为 $-1 \sim -0.50$ mm。采用 Design-Expert 软件进行数据模拟,通过分析得到一组较优工艺参数为: $P=4 300$ W, $v=90.65$ mm/s, $Z=-0.97$ mm。结合实际操作,调整最优工艺参数为: $P=4 300$ W, $v=90$ mm/s, $Z=-1$ mm。进行试验验证,焊接 3 组,发现有一组焊缝在工件背面出现轻微焊透现象,焊缝存在缺陷。再将 P 降低为 4 250 W,其他两工艺参数值保持不变进行试验,焊缝形貌良好且焊缝背面无背透现象。进行拉力测试,最大拉力结果为 5.51 kN。由于正式试验前进行的试焊,已经将工艺参数区间约束在了一个比较合理的范围内,因此编 12 号试验组参数取值已经接近最优工艺参数,对比 12 号试验组参数和最优工艺参数下的结果,最优工艺参数最大拉力仍有 5.55% 的提高。

4 结 论

1) 基于响应面法,分析 17 组试验,利用 Design-Expert 软件建立了不同激光功率、焊接速度、离焦量下 5754 铝合金角接焊接头质量(最大拉力)的统计模型。

2) 分析得到激光功率、焊接速度、离焦量及其两两因素交互作用下对接头最大拉力的影响规律。激光功率、焊接速度、离焦量对最大拉力均有明显影响。利用所建立的模型得到较优焊接参数区间: P 为 4 150~4 300 W, v 为 90~95 mm/s, Z 为 $-1 \sim -0.50$ mm。

3) 确定最优工艺参数为: $P=4 250$ W, $v=90$ mm/s, $Z=-1$ mm。拉伸测试结果最大拉力 $F=5.51$ kN,相比于 17 组试验结果中的最优组,最大拉力提升了 5.55%。

[参 考 文 献]

- [1] 汤蓉蓉,唐学帮. 铝合金汽车轻量化与焊接技术探究[J]. 机电工程技术,2021,50(12):105-107,121.
- [2] 吴雁,肖礼军,孙士学,等. 激光在铝合金焊接中的应用研究进展[J]. 热加工工艺,2021,50(15):1-5,11.
- [3] 陈亚斌,徐世兴,谭淑芹,等. 铝合金激光焊接技术研究[J]. 现代制造技术与装备,2020,56(8):36-37.
- [4] 王瑜舒,乐时,耿韶宁,等. 汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J]. 中国激光,2022,49(12):184-201.
- [5] 丁亚茹,陈芙蓉,杨帆,等. 响应面法分析 7075 铝合金激光焊接参数对焊接质量的影响规律[J]. 材料导报,2021,35(2):2103-2108,2114.
- [6] 续敏,李向荣,杨化林. 5052 铝合金激光焊接接头组织和性能研究[J]. 热加工工艺,2017,46(1):236-237,242.
- [7] RAMIARION H, BARKA N, MIRAKHORLI F, et al. Parameter optimization for laser welding of dissimilar aluminum alloy: 5052-H32 and 6061-T6 considering wobbling technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 118(11/12): 4195-4211.
- [8] DUGGIRALA A, KALVETTUKARA P, ACHERJEE B, et al. Numerical simulation of the temperature field, weld profile, and weld pool dynamics in laser welding of aluminium alloy[J]. Optik, 2021, 247: 167990.
- [9] 王前进. 6016-T4 铝合金板材激光焊接工艺及数值模拟研究[D]. 长沙:湖南大学,2020.
- [10] 陶亚平. 不同激光焊方法对 5A06 铝合金中厚板组织及性能的影响[J]. 焊接技术,2022,51(9):25-28,144.
- [11] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
- [12] 余杰,蔡创,谢佳,等. 基于响应面法的低碳贝氏体钢激光电弧复合焊接工艺参数优化[J]. 中国激光,2022,49(16):179-188.
- [13] 汪磊,张彰,张宪忠,等. 污水处理厂中全氟化合物的污染研究[J]. 环境科学学报,2011(7):1363-1368.
- [14] 陈敏,徐师,张大超,等. 高级氧化工艺降解选矿废水应用研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2017,8(6):86-91.
- [15] 尚红卫. 臭氧氧化技术在水处理中的应用研究[J]. 煤炭技术,2011(6):218-219.
- [16] 孙海杰,陈凌霞,李晓艳,等. BiOI/ZrO₂ 光催化降解甲基橙性能研究[J]. 河南科学,2019,37(1):54-58.
- [17] 张利强. 芬顿在污水处理中的应用现状及发展趋势[J]. 科技创新与应用,2017,12:115-116.
- [18] RUSSO M, IERVOLINO G, VAIANO V, et al. Non-thermal plasma coupled with catalyst for the degradation of water pollutants; a review[J]. Catalysts, 2020, 10(12): 1438-1457.
- [19] DENG R, HE Q, YANG D, et al. Enhanced synergistic performance of nano-Fe⁰-CeO₂ composites for the degradation of diclofenac in DBD plasma[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406(15): 1-11.
- [20] VAN H T, NGUYEN L H, HOANG T K, et al. Heterogeneous Fenton oxidation of paracetamol in aqueous solution using iron slag as a catalyst; degradation mechanisms and kinetics [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 18: 670-681.
- [21] BRIGANTE M, DELLAGRECA M, PREVITERA L, et al. Degradation of hydrochlorothiazide in water[J]. Environmental Chemistry Letters, 2005, 2(4): 195-198.
- [22] BUENO M J, GOMEZ M J, HERRERA S, et al. Occurrence and persistence of organic emerging contaminants and priority pollutants in five sewage treatment plants of Spain; two years pilot survey monitoring[J]. Environ Pollut, 2012, 164: 267-273.
- [23] ARMAKOVIC S J, ARMAKOVIC S, CETOJEVIC-SIMIN D D, et al. Photocatalytic degradation of 4-amino-6-chlorobenzene-1,3-disulfonamide stable hydrolysis product of hydrochlorothiazide; detection of intermediates and their toxicity[J]. Environ Pollut, 2018, 233: 916-924.
- [24] HUANG X, LIU L, XI Z, et al. One-pot solvothermal synthesis of magnetically separable rGO/MnFe₂O₄ hybrids as efficient photocatalysts for degradation of MB under visible light [J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 231: 68-74.
- [25] WU H, FAN J, LIU F, et al. Degradation of tetracycline in aqueous solution by persulphate assisted gas-liquid dielectric barrier discharge[J]. Water and Environment Journal, 2021, 1: 1-11.
- [26] SLAMANI S, ABDELMALEK F, GHEZZAR M R, et al. Initiation of Fenton process by plasma gliding arc discharge for the degradation of paracetamol in water [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2018, 359: 1-10.
- [27] QIN H, YANG Y, SHI W, et al. Heterogeneous Fenton degradation of ofloxacin catalyzed by magnetic nanostructured MnFe₂O₄ with different morphologies [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2021, 125(48): 1-13.
- [28] ANSARI M, HOSSEIN MAHVI A, HOSSEIN SALMANI M, et al. Dielectric barrier discharge plasma combined with nano catalyst for aqueous amoxicillin removal; Performance modeling, kinetics and optimization study, energy yield, degradation pathway, and toxicity [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 251(15): 253-270.

(责任编辑 吴亮)

(责任编辑 吴亮)