

激光与光电子学进展

激光切割碳纤维复合材料热影响区分析及参数优化

陈建林, 王续跃*

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 为了减小激光切割碳纤维复合材料热影响区的宽度, 采用响应曲面法的 Box-Behnken 试验设计, 以激光入口处的热影响区宽度为响应, 建立了激光入口处热影响区宽度的回归方程。研究了激光功率、扫描速度、辅助气体压力、焦点位置等因素以及其交互作用对响应的影响。根据回归方程和实际的切割效果优化了工艺参数。试验结果表明, 激光入口处热影响区宽度影响因素的重要程度依次为激光功率、扫描速度、焦点位置、辅助气体压力。最佳工艺参数为激光功率 170 W、扫描速度 1.5 m/min、辅助气体压力为 0.6 MPa, 焦点置于试件上表面。对最佳工艺参数进行试验验证, 结果表明, 激光入口处热影响区宽度为 486.13 μm , 回归方程的预测平均误差为 5.3%。

关键词 激光切割; 碳纤维复合材料; 热影响区; 参数优化

中图分类号 TB33 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230576

Analysis of Heat-Affected Zone and Optimization of Parameters for Laser-Cut Carbon Fiber Composites

Chen Jianlin, Wang Xuyue*

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China

Abstract To minimize the heat-affected zone (HAZ) width in laser-cut carbon fiber composites, the Box-Behnken experimental design was employed using the response surface method to establish a regression equation for the HAZ width at the laser entrance. The effects of laser power, scanning speed, auxiliary gas pressure, focus position, and their interactions on the response surface were investigated. The process parameters were optimized based on the regression equation and actual cutting results. The experimental results show that the laser power, scanning speed, focus position, and auxiliary gas pressure are the most important factors affecting the HAZ width at the laser inlet. The optimal process parameters are a laser power of 170 W, a scanning speed of 1.5 m/min, an auxiliary gas pressure of 0.6 MPa, and a focus on the upper surface of the specimen. The experimental results show that the HAZ width at the laser inlet was 486.13 μm , with an average error of 5.3% for the regression equation.

Key words laser cutting; carbon fiber composites; heat-affected zone; process parameter optimization

1 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有比强度高、可设计性好、损伤安全性高等优点^[1], 广泛应用于航空航天、汽车工业、体育用品等领域^[2]。虽然 CFRP 通常采用近净成型技术进行制造, 但必要时仍需要进行切割、开槽、钻孔来满足使用和装配要求^[3]。

机械加工 CFRP 过程中刀具磨损严重, 试件容易产生毛刺、分层、撕裂等缺陷。磨料水射流加工 CFRP, 会造成材料吸湿、分层。加工效率低、刀具和电极损耗严重, 也限制了超声加工和电火花加工

CFRP 的发展^[4]。近几年, 激光加工技术发展迅速^[5-7], 激光加工没有刀具磨损和切削力, 可以在较短的时间内实现材料复杂形状的加工^[8]。因此, 激光加工 CFRP 具有广阔的发展前景。然而, 碳纤维和树脂基体的热物理性能存在明显差异^[9], 激光切割 CFRP 的过程中会产生热影响区(HAZ)^[10]。因此, 消除或减少热影响区是激光加工 CFRP 的主要挑战。

针对激光切割 CFRP 产生的热影响区, 国内外许多学者进行了大量的试验研究。De Iorio 等^[11]研究了激光扫描速度对 CFRP 单向板热影响区宽度的影响, 试验表明, 随着扫描速度增加, 热影响区宽度呈指数规

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-04-03; 录用日期: 2023-04-07; 网络首发日期: 2023-04-17

通信作者: *wbzdz@dlut.edu.cn

律下降,当扫描速度由 0.12 m/min 增加至 0.48 m/min 时,热影响区宽度下降了 55.6%。Rahman 等^[12]研究了激光焦点位置对 CFRP 热影响区的影响,结果表明,焦点位置对热影响区影响较大,当焦点距离材料上表面 0.2 mm 增加至 1.6 mm 时,热影响区宽度增加了 37.5%。Leone 等^[13]使用光纤激光切割 CFRP 薄板,方差分析结果表明,激光功率和扫描速度均是影响热影响区宽度的显著因素。Niino 等^[14]研究了激光扫描速度对 CFRP 内部热影响区的影响,试验表明,扫描速度会显著影响材料侧壁的切割质量,当扫描速度由 0.05 m/s 增加至 3.6 m/s 时,热影响区宽度由 1900 μm 下降至 180 μm 。Sato 等^[15]研究了空气和氮气对激光切割 CFRP 热影响区的影响,结果表明,氮气通过抑制碳纤维的氧化和热积累,可以有效抑制热影响区扩展,使用氮气时材料的热影响区宽度比使用空气减小了 96.25%。Li 等^[16]研究了纤维铺设角度对激光切割 CFRP 热影响区的影响,结果表明,热影响区大小与纤维取向高度相关,纤维 $\pm 45^\circ$ 铺设时,热影响区宽度达到最小值 707 μm 。

虽然激光切割 CFRP 取得了一些积极的成果,但是,激光切割 CFRP 的热影响区是多因素共同作用的结果,目前仍缺乏连续激光切割 CFRP 过程中因素交互作用对热影响区的影响和工艺参数优化的研究。因此,本文采用响应曲面法的 Box-Behnken 试验设计,拟合了激光入口处热影响区宽度的回归方程。通过方差分析和统计分析,得出了各工艺参数对 HAZ 宽度的影响程度,最后,基于该方程对工艺参数进行优化。为控制激光加工 CFRP 的热影响区提供一定的参考。

2 试验条件与方法

2.1 试验设备

试验设备采用正天激光生产的 YLR 二极管泵浦掺镱光纤激光器,输出波长为 1064 nm,最大输出功率为 750 W,通过数控系统控制激光器与工件的相对运动,如图 1 所示。将喷嘴与试件上表面之间的高度设置为 1.5 mm,以确保切割顺利进行。由于氧气会加剧切割过程中材料的氧化,增加热影响区宽度^[17],因此,辅助气体采用氮气,气体的喷嘴采用单层圆形喷嘴,喷嘴直径 1.5 mm。试验后通过日本 KEYENCE 公司生产的 VHX-600 型超景深显微镜观测试件的热影响区。

2.2 试验材料

试验材料为多层 CFRP 板,基体为环氧树脂 AG-80,增强相为东丽 T300 碳纤维,铺层顺序为 $90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ$,共 16 层,板厚为 2 mm,碳纤维的体积分数为 70%。CFRP 常温下的参数如表 1 所示。为了更好地研究试件的热影响区,激光的扫描方向与试件表面碳纤维铺设方向相互垂直。所有试验均进行单次切割,切割长度为 40 mm。

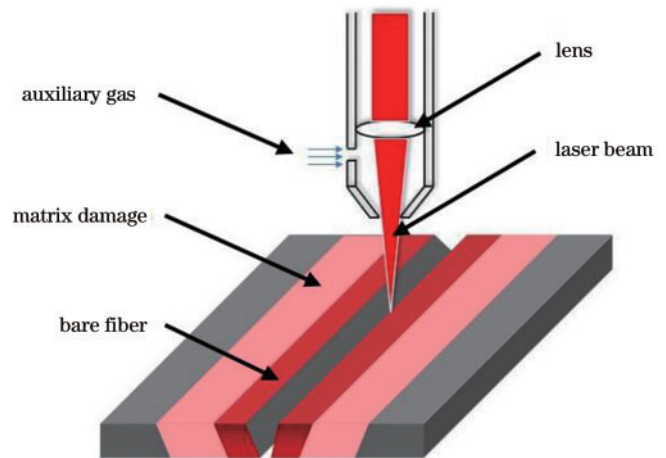


图 1 激光切割 CFRP 示意图

Fig. 1 Diagram of laser cutting CFRP

表 1 CRRP 材料参数

Table 1 CRRP material parameters

Parameter	Fiber	Matrix
Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.76	1.30
Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	84(axial), 8.4(radial)	0.2
Specific heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	795	1200
Coefficient of linear expansion / (10^{-6}K^{-1})	-0.41	57

2.3 试验方法

影响激光切割 CFRP 热影响区的因素较多,如激光波长、激光功率、扫描速度、辅助气体的种类、辅助气体压力、激光焦点位置等。激光切割 CFRP 的热影响区是多种因素共同作用的结果。因此,研究上述因素对激光切割 CFRP 热影响区的影响,需要进行大量的试验,这会耗费大量的财力物力,并且无法判断因素影响的显著程度。

响应曲面法是优化随机过程的统计学试验方法。目标是寻找试验指标与各因子间的定量规律,找出各因子水平的最佳组合,可以显著减少试验次数,在多元线性回归的基础上主动收集数据,以获得具有较好性质的回归方程。响应曲面法的 Box-Behnken 设计与中心复合设计相比,Box-Behnken 的试验次数更少,不存在轴向点,参数水平设置不会超过安全范围。

利用 Minitab 软件进行四因素两水平(激光功率、扫描速度、辅助气体压力、焦点位置)的 Box-Behnken 试验设计。首先进行单因素试验,结果表明,当功率低于 150 W 时,无论速度怎么变化,都无法直接切透 CFRP。为了获得更小的热影响区,试验确定各个因子的高低水平如表 2 所示。其次进行 Box-Behnken 试验,对试验结果进行统计分析和方差分析,找到影响显著的因素,Box-Behnken 试验表如表 3 所示。最后,拟

表 2 Box-Behnken 试验因素水平
Table 2 Box-Behnken test factor levels

Factor	Low-level	Central point	High level
Power /W	150	450	750
Speed /($m \cdot min^{-1}$)	1.5	2.75	4
Nitrogen pressure /MPa	0.4	0.5	0.6
Focal position /mm	-2	0	2

合激光入口处的热影响区宽度的回归方程,基于该方程对工艺参数进行优化。由于部分参数组合无法切透材料,因此,选取激光入口处的热影响区宽度作为测量指标。

3 分析与讨论

3.1 试件表面热影响区形貌分析

图 2(a)为激光切割 CFRP 光束入口处的热影响区形貌。可以看出,试件表面出现明显的热影响区,包括基体分解、纤维拔出、树脂重铸层等。这些缺陷是激光切割过程中的高温和辅助气体共同作用的结果。当聚焦后的激光束照射到试件表面时,CFRP 吸收能量,随后能量在试件内部传导。由于采用垂直切割的方式,碳纤维的轴向热导率远高于径向,因此,热量会迅速向切缝两侧垂直扩展。碳纤维的气化点远高于树脂基体,激光聚焦处温度急剧升高,碳纤维和树脂基体同时气化,形成切缝。热量向切缝两侧传递,由于辅助气体的冷却作用,温度下降速度较快,低于碳纤维的气化点,此时,树脂基体分解,造成纤维裸露,如图 2(b)所示。当温度进一步降低时,软化的树脂基体在辅助气体的作用下,冷却后重新凝固,形成了树脂重铸层。此外,试件吸收激光能量,大量的热量传递至切缝两侧,高温产生的热应力和辅助气体的吹除作用造成了切口

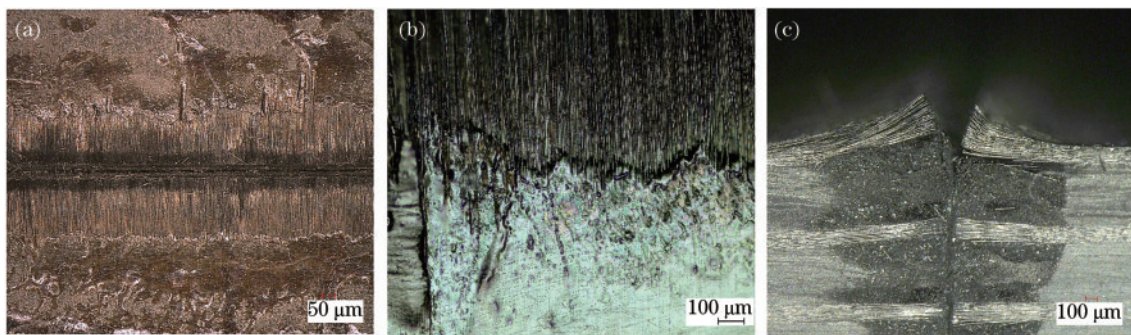


图 2 激光切割 CFRP 形貌。(a)整体形貌;(b)纤维裸露;(c)材料分层

Fig. 2 Laser cutting of CFRP morphology. (a) Global morphology; (b) bare fiber; (c) material layering

当固定扫描速度为 2.75 m/min、辅助气体压力为 0.5 MPa、焦点位于试件上表面时,分别采用 150 W、450 W、750 W 的功率切割 CFRP,热影响区形貌如图 3 所示。由图 3 可知,激光入口处试件的热影响区宽度随着功率的增加而增大。这是因为扫描速度一定、功率增加时,激光的能量密度增加,试件吸收的能量增加,热影

表 3 Box-Behnken 试验表
Table 3 Box-Behnken test table

Standard sequence	Running sequence	Power	Speed	Gas pressure	Focal position
27	1	450	2.75	0.5	0
16	2	450	4.00	0.6	0
18	3	750	2.75	0.4	0
19	4	150	2.75	0.6	0
3	5	150	4.00	0.5	0
4	6	750	4.00	0.5	0
20	7	750	2.75	0.6	0
22	8	450	4.00	0.5	-2
17	9	150	2.75	0.4	0
21	10	450	1.50	0.5	-2
7	11	450	2.75	0.4	2
24	12	450	4.00	0.5	2
12	13	750	2.75	0.5	2
5	14	450	2.75	0.4	-2
14	15	450	4.00	0.4	0
13	16	450	1.50	0.4	0
26	17	450	2.75	0.5	0
25	18	450	2.75	0.5	0
23	19	450	1.50	0.5	2
10	20	750	2.75	0.5	-2
2	21	750	1.50	0.5	0
15	22	450	1.50	0.6	0
1	23	150	1.50	0.5	0
6	24	450	2.75	0.6	-2
11	25	150	2.75	0.5	2
9	26	150	2.75	0.5	-2
8	27	450	2.75	0.6	2

处的材料分离、上翘,如图 2(c)所示。

响区宽度扩大。当固定激光功率为 450 W、辅助气体压力为 0.5 MPa、焦点位于试件上表面时,分别采用 1.5 m/min、2.75 m/min、4 m/min 的扫描速度切割 CFRP,热影响区形貌如图 4 所示。由图 4 可知,功率一定、扫描速度增加时,激光与试件的作用时间减少,试件吸收的能量减少,从而减小了试件的热影响区宽度。

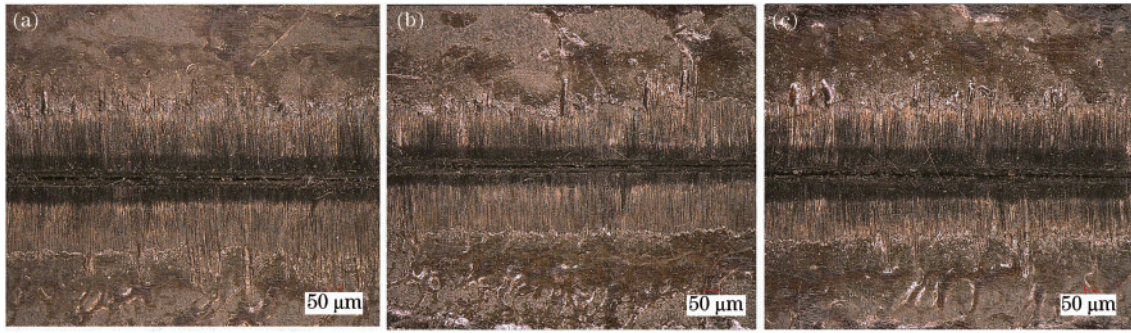


图 3 不同功率下试件表面热影响区形貌。(a)150 W;(b)450 W;(c)750 W

Fig. 3 Morphology of HAZ on the specimen surface under different powers. (a) 150 W; (b) 450 W; (c) 750 W

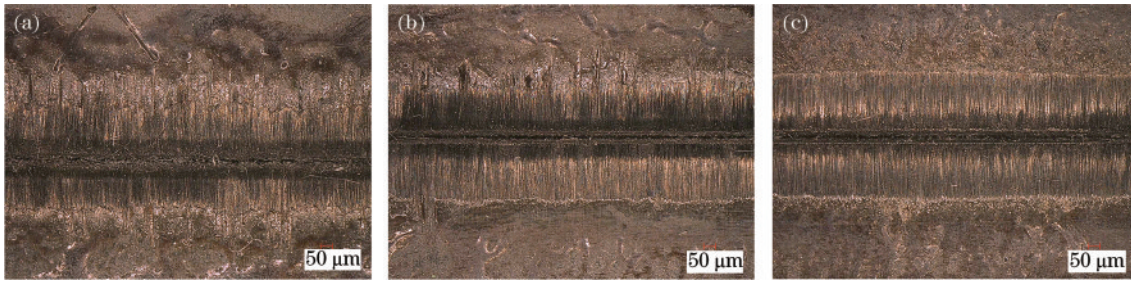


图 4 不同扫描速度下试件表面热影响区形貌。(a)1.5 m/min;(b)2.75 m/min;(c)4 m/min

Fig. 4 Morphology of HAZ on the specimen surface at different scanning speeds. (a) 1.5 m/min; (b) 2.75 m/min; (c) 4 m/min

此外,激光焦点的位置会影响试件表面光斑的大小,这会对试件表面的树脂去除宽度产生影响。激光焦点与试件表面的位置关系如图 5 所示:当激光焦点恰好落在试件表面时,离焦量为 0,光斑面积最小;当激光焦点位于试件内部时,离焦量为负值;当激光焦点

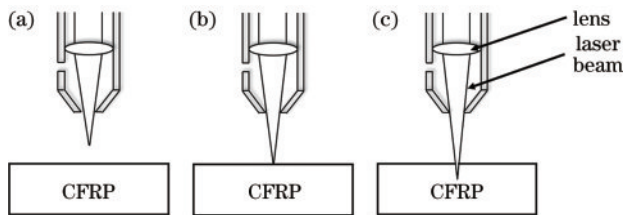


图 5 焦点与工件位置关系

Fig. 5 Relationship between focus and artifact position

位于试件上方时,离焦量为正值。当离焦量不为 0 时,焦点位置距离试件上表面越远,光斑面积越大。当固定激光功率为 450 W、扫描速度为 2.75 m/min、辅助气体压力为 0.5 MPa 时,分别采用 -2 mm、0 mm、2 mm 的离焦量切割 CFRP,热影响区形貌如图 6 所示。由图 6 可知,离焦量由 -2~2 mm 变化,试件表面的树脂去除宽度先减小后增大。这是由于激光焦点位于试件上表面时,光斑面积最小,激光能量最为集中,激光直接作用区域的面积最小,因此,树脂去除宽度最小。当激光焦点远离试件上表面时,光斑面积增大,虽然激光能量强度变低,但这也会导致很大面积的加热,所达到的温度仍然能使树脂熔化,因此,焦点距离试件上表面越远,树脂去除范围就越大。

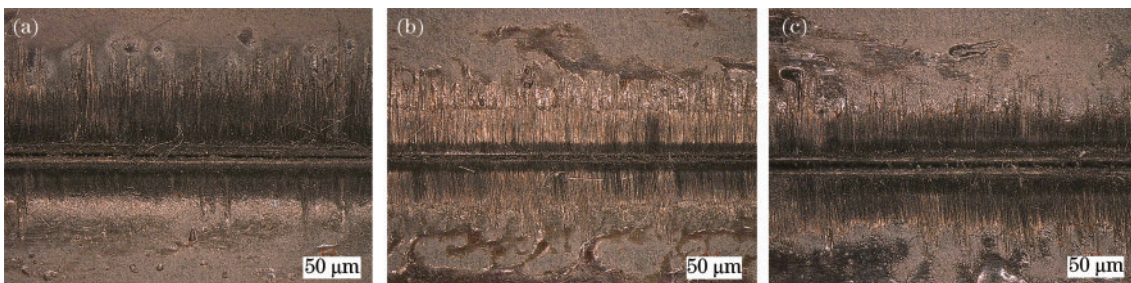


图 6 不同焦点位置下试件表面热影响区形貌。(a)-2 mm;(b)0 mm;(c)2 mm

Fig. 6 Morphology of HAZ on the specimen surface at different focal positions. (a) -2 mm; (b) 0 mm; (c) 2 mm

当固定激光功率为 450 W、扫描速度为 2.75 m/min、辅助气体压力为 0.5 MPa、激光焦点位于试件上表面时,分别采用 0 MPa、0.4 MPa、0.8 MPa 的辅助气体切

割 CFRP,热影响区形貌如图 7 所示。切割过程中没有使用辅助气体,试件的热影响区十分明显,切缝两侧基体损伤严重。使用辅助气体后,基体的损伤区域减

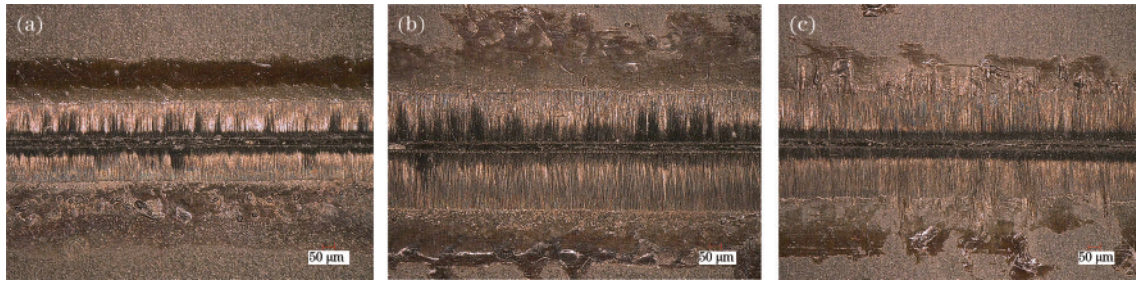


图 7 不同气体压力下试件表面热影响区形貌。(a) 0 MPa; (b) 0.4 MPa; (c) 0.8 MPa

Fig. 7 Morphology of HAZ on the specimen surface under different air pressures. (a) 0 MPa; (b) 0.4 MPa; (c) 0.8 MPa

少,纤维裸露区域增加。但是,随着辅助气体压力增加,试件的热影响区宽度没有明显的变化,当辅助气体压力为 0.8 MPa 时,纤维拔出更加严重。这是由于切缝两侧的树脂分解,碳纤维裸露,裸露的碳纤维没有树脂基体的束缚,过高的辅助气体压力会将裸露的碳纤维吹出,从而使裸露的碳纤维更为杂乱。

3.2 试件截面热影响区形貌分析

激光切割 CFRP 的截面如图 8 所示。由图 8 可知,试件截面的热影响区有以下几种形态:最大热影响区(HAZ_{max})在试件顶部、最大热影响区在试件底部、最大热影响区在试件内部。当速度一定时,功率增加,最大热影响区位置由试件内部下降至试件底部。这是由于功率较低时,激光的能量密度较低,从试件表

面到试件内部能量逐渐衰减,因此,最大热影响区在试件的上表面。随着功率的增加,激光能量密度增加,激光入口和出口由于辅助气体的冷却作用和与空气的热对流作用,热影响区宽度较小。对于试件内部来说,激光能量在碳纤维直径方向上进行传导,但是,碳纤维的径向热导率很低,且试件内部受到辅助气体的冷却作用较弱,试件内部积累的热量较多,因此最大的热影响区在试件内部。随着功率继续增加,激光能量进一步增大,由于辅助气体的冷却作用,试件表面的热影响区宽度增加较小,但是,激光出口处试件出现了明显的烧蚀现象,辅助气体冷却作用减弱,导致试件底部的热影响区宽度增加。因此,热影响区呈现上窄下宽的形状。

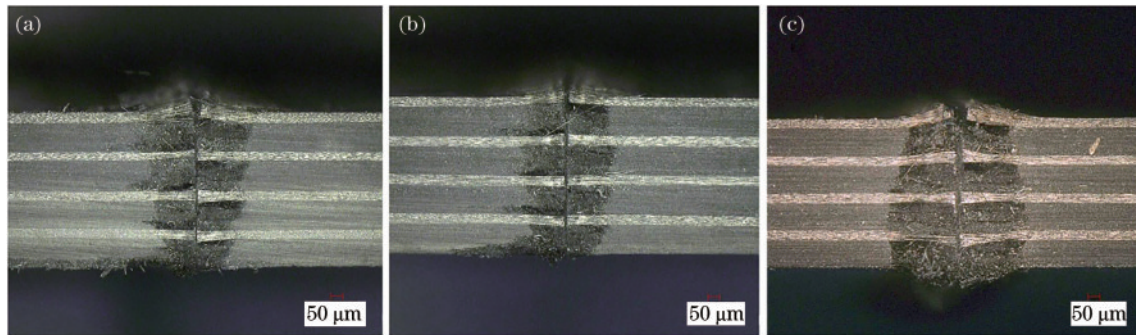


图 8 试件横截面热影响区形貌。(a) HAZ_{max} 位于试件上表面; (b) HAZ_{max} 位于试件内部; (c) HAZ_{max} 位于试件下表面

Fig. 8 Morphology of the heat-affected zone of specimen cross section. (a) HAZ_{max} on the top; (b) HAZ_{max} on the inside; (c) HAZ_{max} at the bottom

激光切割 CFRP 断面热影响区如图 9 所示。从图中可以清楚地观察到切割断面热影响区形貌。在靠近激光入口处,碳纤维分布杂乱,部分纤维拔出。这是由于高温作用,碳纤维周围的树脂分解,纤维裸露,树脂基体的束缚作用减小,经过高压辅助气体作用,原本排列规则的纤维分布杂乱。纤维的末端有重新冷却凝结的树脂。这是由于切割过程中温度很高,经过辅助气体的吹除作用,软化的树脂一部分被吹出,吹至切缝两侧,另一部分被吹至切缝内部,由于辅助气体的冷却作用,软化的树脂附着在纤维上,重新冷却凝结。如图 9(b) 所示,在切割断面中,发现了孔洞、裂纹等缺陷。这是由于试件中部分纤维分布不够均匀,在高温

和热应力的作用下,纤维较少的位置树脂分解较多,经过辅助气体的冷却后,树脂基体会收缩,因此,形成了大小不一的孔洞和裂纹。此外,如图 9(c) 所示,在远离激光入口处发现了较为平整的切割断面和末端膨胀的碳纤维。这是由于切缝处的温度很高,在常压下碳没有液相,当温度达到碳的熔点时,碳会直接气化,在激光切割过程中,切缝处温度迅速升高,试件内部的压力会急剧增加,在这种高温高压的环境下,碳可能出现了熔融状态,出现熔融状态的纤维与周围的纤维发生融合,经过辅助气体的作用,纤维之间发生粘连融合,形成比较光滑的切割断面^[18]。这种现象可以有效地减少试件的分层和纤维拔出,有助于提高切割质量。

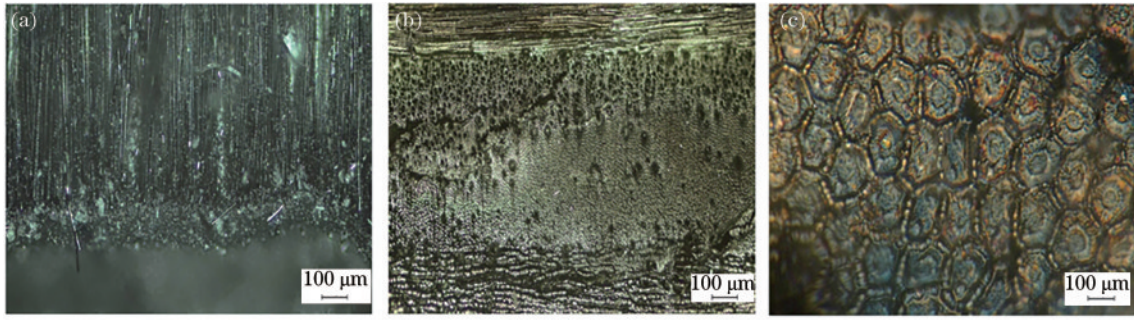


图 9 试件切割断面热影响区形貌。(a)纤维拔出;(b)空洞和裂纹;(c)纤维粘连

Fig. 9 Morphology of HAZ of the specimen cut section. (a) Fiber pulling out; (b) holes and cracks; (c) fibrous adhesion

3.3 工艺参数优化

利用 Minitab 软件,拟合激光入口处热影响区宽度回归方程,对激光入口处的热影响区宽度进行了统计学分析和方差分析,得到影响热影响区宽度的重要因素,并对热影响区宽度进行预测,找到使激光入口处热影响区最小的参数组合。

表 4 为热影响区宽度的方差分析结果。表中: Adj_{ss} 为调整平方和,表示对距离均值的变异或离差的度量,是对模型不同分量变异大小的度量; Adj_{ms} 为调整均方和,由 Adj_{ss} 除以自由度得来; F 值等于组间平均方差除以组内平均方差,其值如果远大于 1,则说明其对应项具有统计学意义,为显著。在 F 分布中,每一个

表 4 热影响区宽度方差分析表

Table 4 Variance analysis of heat-affected zone width

Source	Adj_{ss}	Adj_{ms}	F	P
Model	1049610	74972	32.95	0.000
Linearity	789956	197489	86.80	0.000
Power	665862	665862	292.65	0.000
Speed	112456	112456	49.43	0.000
Pressure	1106	1106	0.49	0.499
Focal position	10532	10532	4.63	0.053
Square term	250839	62710	27.56	0.000
Power×power	92365	92365	40.60	0.000
Speed×speed	55780	55780	24.52	0.000
Pressure×pressure	26867	26867	11.81	0.005
Focal position×focal position	36201	36201	15.91	0.002
Error	27303	2275	-	-
Misfit	26664	2666	8.34	0.112
Pure error	639	320	-	-
Total	1076914	-	-	-

表 5 热影响区宽度试验值与拟合值对比

Table 5 Comparison of test and fitting values for the width of the heat-affected zone

Power / W	Speed / (m·min ⁻¹)	Pressure / MPa	Focal position / mm	Actual value / μm	Fitting value / μm	Relative error / %
150	1.50	0.5	0	514.50	488.31	5.1
450	2.75	0.5	0	887.39	850.54	4.2
750	4.00	0.5	0	801.18	765.82	4.4

F 值对应一个 P 值, F 值越大, P 值越小,但在方差分析中,通常以 $P < 0.05$ 来考察 F 值是否足够大,即 $P < 0.05$ 时,拒绝原假设,即组间差异有统计学意义,或者模型中对应特征显著项。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的前提下, $P < 0.05$ 说明该因素显著,反之,不显著。由表 4 可知:模型的 $P < 0.05$,说明模型有效;失拟的 P 值为 0.623 大于 0.05,说明模型没有失拟,模型可用。 R^2 是扣除了回归方程中包含项数的影响的相关系数,可以更准确地反映模型的好坏。 R^2_{adj} 和 R^2 越相近且值越接近于 1,说明模型的拟合效果越好。由 Minitab 给出拟合后模型 R^2_{adj} [R-sq(调整)] 和 R^2 (R-sq) 的值如图 10 所示, R^2_{adj} 和 R^2 分别为 96.65% 和 95.16%,说明模型的拟合程度较高,预测准确度可以达到 92.45%。

R-sq	R-sq (调整)	R-sq (预测)
96.65%	95.16%	92.45%

图 10 模型汇总

Fig. 10 Model summary

试件表面热影响区宽度的拟合公式为

$$W_{HAZ-Entry} = -1807 + 2.101A + 282.5B + 7002C - 14.81D - 0.001462A^2 - 65.5B^2 - 7098C^2 - 20.60D^2, \quad (1)$$

式中: $W_{HAZ-Entry}$ 为激光入口处热影响区宽度; A 为激光功率; B 为扫描速度; C 为辅助气体压力; D 为焦点位置。

对拟合的方程进行试验验证。回归方程拟合值和试验值如表 5 所示。预测的相对误差分别为 5.1%、4.2%、4.4%,说明该模型可以较为准确地预测试件表面热影响区宽度。

由表 4 可知,对于试件上表面的热影响区宽度,影响显著的主要是因素项和因素的平方项。这与试验结果是相对应的。图 11 为标准化效应的 Pareto 图,响应为激光入口处热影响区宽度,显著性水平 $\alpha=0.05$,图中, A 为激光功率, B 为扫描速度, C 为辅助气体压力, D 为焦点位置。标准化 Pareto 图可以判断因素对响应的影响显著程度,标准化效应数值越大,影响越显著。由图 11 可知,对激光入口处热影响区宽度影响因素重要程度依次为激光功率、扫描速度、功率平方项、速度平方项、焦点位置平方项、辅助气体压力平方项、焦点

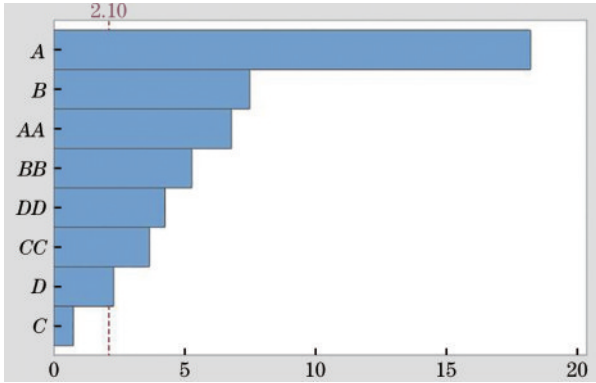


图 11 标准化效应 Pareto 图

Fig. 11 Pareto diagram of the standardization effect

位置,而辅助气体压力影响不显著。

由于试件的热影响区宽度是衡量激光切割 CFRP 的重要指标,因此,根据拟合结果寻找单次切割能切透试件的最佳参数组合,使试件的热影响区宽度最小。由图 12(a)可知:当速度一定时,功率增加,试件表面能量增加,试件的热影响区宽度增加;当功率一定时,速度增加,试件的热影响区宽度逐渐减小,这是因为速度增加,能量与试件的接触时间变短,试件表面单位长度的能量降低,热影响区宽度减低。由图 12(b)可知,辅助气体压力的变化对于试件热影响区宽度的影响很小。此外,由图 12(d)可知,当功率和焦点位置不变,速度为 4 m/min 时,随着辅助气体压力增加,试件的热影响区宽度有上升趋势。这是因为速度较高时,能量与试件的作用时间比较短,虽然能量较低,但是树脂的分解温度很低,试件吸收能量,树脂软化、分解,被高压辅助气体快速吹除,使纤维暴露的面积增加。因此,热影响区宽度呈上升趋势。当速度为 1.5 m/min 时,随着辅助气体压力的增加,热影响区宽度有上升趋势。这是因为速度降低,能量与试件的作用时间增加,热影响区已经超过辅助气体覆盖的区域,因此,热影响区宽度呈下降趋势。此外,由图 12(c)、(e)、(f)可知,针对 2 mm 的 CFRP 材料,在其他参数一定时,将激光焦点置于试件上表面可以使热影响区宽度达到最小。

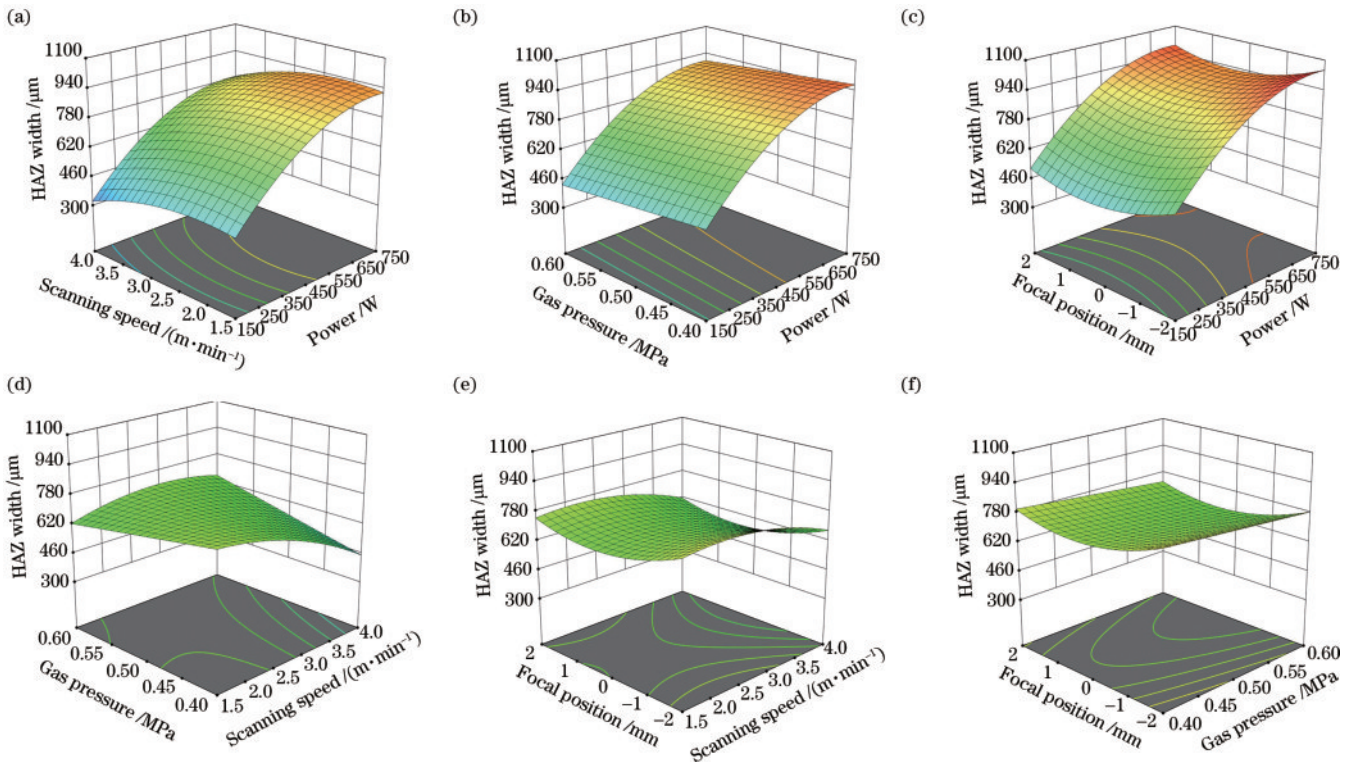


图 12 响应面图。(a)功率和速度交互作用对 HAZ 的影响;(b)功率和气体压力交互作用对 HAZ 的影响;(c)功率和焦点位置对 HAZ 的影响;(d)速度和气体压力交互作用对 HAZ 的影响;(e)速度和焦点位置交互作用对 HAZ 影响;(f)气体压力和焦点位置交互作用对 HAZ 影响

Fig. 12 Response surface diagram. (a) Effect of power and velocity interaction on HAZ; (b) effect of power and gas pressure interaction on HAZ; (c) effect of power and focus position interaction on HAZ; (d) effect of velocity and gas pressure interaction on HAZ; (e) effect of velocity and focus position interaction on HAZ; (f) effect of gas pressure and focus position interaction on HAZ

由上述分析可知,激光焦点置于试件上表面时,可以使激光入口处的热影响区宽度最小化,辅助气体压力增加,冷却效果提升,但是,当辅助气体压力超过 0.6 MPa 时,切缝周围的纤维拔出现象明显,会降低切割质量。此外,扫描速度较高时,热影响区宽度最小,但是,过高的速度会导致试件无法被切透。因此,根据响应曲面图 and 实际切割情况得到的最优参数为激光功率 170 W、扫描速度 1.5 m/min、辅助气体压力 0.6 MPa,焦点置于试件表面。试验测得,热影响区宽度为 486.13 μm ,热影响区宽度的拟合平均误差为 5.3%。

4 结 论

本文主要运用响应曲面法的 Box-Behnken 试验设计,拟合了激光入口处的回归方程,模型与实际结果拟合效果较好,预测平均误差为 5.3%。统计分析结果表明,激光功率、扫描速度和焦点位置对激光入口处的热影响区宽度影响显著,辅助气体影响不显著。热影响区最小的最优参数组合为激光功率 170 W、扫描速度 1.5 m/min、辅助气体压力为 0.6 MPa,焦点置于试件上表面,最小热影响区宽度为 486.13 μm 。

参 考 文 献

- [1] Alam P, Mamalis D, Robert C, et al. The fatigue of carbon fiber-reinforced plastics-a review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 555-579.
- [2] Luo Y F. Research objectives and development direction of advanced composite materials[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2013, 38(4): 1-10.
- [3] Pan C T, Hocheng H. Evaluation of anisotropic thermal conductivity for unidirectional FRP in laser machining[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(11): 1657-1667.
- [4] Habib S S. Modeling of electrical discharge machining of CFRP material through an artificial neural network technique[J]. *Journal of Machinery Manufacturing and Automation*, 2014, 3(1): 22-31.
- [5] 马修泉,王力波,朱政武,等.厚板高功率激光切割重铸层微观组织研究[J].*中国激光*, 2023, 50(4): 0402015. Ma X Q, Wang L B, Zhu Z W, et al. The microstructure of the recast layer during high-power laser cutting of thick plates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(4): 0402015.
- [6] 梁晗,赵树森,姜璐,等.碳纤维复合材料激光热-机械剥蚀机制研究[J].*中国激光*, 2022, 49(10): 1002405. Liang H, Zhao S S, Jiang L, et al. The mechanism of laser thermo-mechanical ablation of carbon fiber composites[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002405.
- [7] 侯红玲,郝海凌,吕瑞虎,等.基于响应面法碳纤维复合材料激光切割工艺参数优化及性能试验[J].*激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1314005. Hou H L, Hao H L, Lü R H, et al. Parameter optimization and performance test of laser cutting of carbon fiber-reinforced plastics based on the response surface method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1314005.
- [8] Fan J W, Zhao Y, Pan R, et al. Optimization of laser processing parameters on the width of the heat-affected zone of carbon fiber-reinforced polymer[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2022, 45(2): 131-137.
- [9] El-Hofy M H, El-Hofy H. Laser beam machining of carbon fiber-reinforced composites: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(9): 2965-2975.
- [10] Tagliaferri V, Di Ilio A, Visconti C. Laser cutting of fibre-reinforced polyesters[J]. *Composites*, 1985, 16(4): 317-325.
- [11] De Iorio I, Leone C, Lopresto V, et al. Short-pulse Nd:YAG laser cutting of a CFRP sheet[J]. *World Journal of Engineering*, 2010, 7: 289-290.
- [12] Rahman N A, Saidi W, Rahim E A, et al. The effect of laser focal point distance on carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) cutting performance[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 315: 778-782.
- [13] Leone C, Genna S, Tagliaferri V. Fiber laser cutting of CFRP thin sheets by the multi-pass scan technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 53: 43-50.
- [14] Niino H, Harada Y, Fujisaki A. Thermal damage of carbon fiber-reinforced plastic by IR fiber laser irradiation [J]. *Journal of Laser Micro*, 2017, 12(3): 235-238.
- [15] Sato Y, Tsukamoto M, Matsuoka F, et al. The thermal effect on CFRP ablation with a 100-W class pulse fiber laser using a PCF amplifier[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 417: 250-255.
- [16] Li M J, Li S, Yang X J, et al. The effect of lay-up configuration and processing parameters on surface quality during fiber laser cutting of CFRP laminates[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(1): 623-635.
- [17] Negarestani R, Li L, Sezer H K, et al. Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(5): 553-566.
- [18] Oh S, Lee I, Park Y B, et al. Investigation of cut quality in fiber laser cutting of CFRP[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 129-140.