

激光与光电子学进展

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

侯红玲*, 郝海凌, 吕瑞虎, 赵永强, 王长乾

陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001

摘要 为提高碳纤维复合材料的激光切割质量,采用响应面法以切缝入口宽度、热影响区宽度和切缝锥角为响应指标,建立了各响应指标的数学模型。然后分析了各激光参数的交互作用对响应指标的影响规律,以各响应指标最小化为目标,得到参量优化组合为激光功率 755 W,切割速度 20 mm/s,离焦量 -0.6 mm,气压 0.7 MPa,并获得了响应指标的预测值。在参量优化组合下进行了激光切割试验,得到了响应指标切缝入口宽度、热影响区宽度和切缝锥角与预测值的差值分别为 12.73 μm 、6.55 μm 和 0.12°,均在预测值的波动范围内,证明了参量优化组合的有效性。采用参量优化组合的激光切割试件比优化前的试件胶接拉伸剪切强度提高了 22.86%,表明了参量优化组合后,不但改善激光切割质量,而且降低了激光切割对材料的力学性能影响。

关键词 激光光学; 激光切割; 碳纤维复合材料; 参量优化; 响应面法

中图分类号 TB33 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1314005

Parameter Optimization and Performance Test of Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Response Surface Method

Hou Hongling*, Hao Hailing, Lü Ruihu, Zhao Yongqiang, Wang Changqian

School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China

Abstract To improve the laser cutting quality of carbon fiber reinforced plastics, the response surface method was used to establish a mathematical model of each response index with slit entrance width, heat-affected zone width, and kerf taper angle as the response indexes. Thereafter, the influence law of the interaction of each laser parameter on the response indexes was analyzed, and the parameter optimization combination was obtained to minimize each response index using 755 W laser power, 20 mm/s cutting speed, -0.6 mm focus position, and 0.7 MPa air pressure. The predicted values of the response indexes were obtained. Next, the laser cutting test was conducted under the parameter optimization combination, and the differences between the response indexes slit entrance width, heat-affected zone width, and kerf taper angle and predicted values were 12.73 μm , 6.55 μm , and 0.12°, which were within the fluctuation range of the predicted values, proving the effectiveness of the parameter optimization combination. The laser-cut specimens with the parameter optimization combination increased the glued tensile shear strength by 22.86% compared with the specimens before the optimization. The parameter optimization combination improves the laser cutting quality and reduces the impact of laser cutting on the mechanical properties of the material.

Key words laser optics; laser cutting; carbon fiber reinforced plastics; parameter optimization; response surface method

1 引言

碳纤维复合材料具有高强度、高刚性、良好的抗疲劳性、抗震性以及质量轻等显著优点,在航空航天等领域的应用日益广泛^[1-2],世界先进飞机结构已经出现复

合材料化的趋势。其中:空客 A350 由 53% 碳纤维复合材料组成,主要用于蒙皮、机身、翼梁等;空客 A380 的中央机翼、后缘与后舱壁等也采用碳纤维复合材料制造。在导弹武器领域,高性能碳纤维复合材料主要用于导弹弹头、发动机壳体以及轴承等重要部件^[3-4]。

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-08-17; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-466)、陕西省教育厅专项科研计划项目(18JK0148)

通信作者: *xjtuhhl@163.com

因此碳纤维复合材料的加工技术研究也是必不可少的,大多数研究是针对机械加工方式进行优化,也出现了电火花加工、超高压磨料水射流切割等加工方法,它们都各有特点,如采用传统的机械加工方法刀具磨损严重,还会出现碳纤维材料分层等问题^[5]。激光加工技术可消除刀具磨损、材料分层以及加工效率低等问题,在碳纤维复合材料加工行业中被认为是最具有应用前景的一种加工技术^[6]。但作为一种热加工方式,难免会对材料产生热影响作用,造成热损伤从而影响加工质量,因此通过优化激光切割工艺参数来减少热影响、提高切割质量的研究是必要的。

如今国内外研究学者对激光切割碳纤维复合材料中热损伤问题和不同温度对材料力学性能影响展开了相关研究。Ohkubo等^[7]采用热重分析(TGA)和差热分析(DTA)对碳纤维复合材料激光切割热影响进行了相关研究,验证了热影响区的存在致使基体被烧蚀回缩和纤维拔出的可能性。Petković等^[8]针对激光功率、切割速度和气体压力对热影响区的影响作用,采用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)方法对三种激光参量下获得的激光切割数据进行处理,结果表明,切割速度对热影响区的影响最大,气体压力对热影响区的影响最小。Cao等^[9-10]在温度为16~200℃条件下进行碳纤维复合材料性能测试,结果表明,抗拉强度随温度的升高而降低。朱德志等^[11]通过皮秒激光加工碳纤维复合材料,研究分析了不同激光参量对加工质量的影响,发现填充间距对热影响区有较大影响。王奔等^[12]通过高温剪切试验,得出碳纤维复合材料在达到玻璃化转变温度前,随温度的升高剪切强度逐渐降低,当温度接近玻璃化转变温度时,剪切强度最低。本文采用响应面法以激光功率、气体气压、切割速度和离焦量作为影响因子,以最小切缝入口宽度、最小热影响区宽度和最小切缝锥角作为切割质量的响应指标,建立数学模型,进行工艺参数优化,并将确定的最优切割工艺参数进行试验验证,以减少热影响,提高激光切割质量。

2 试验及方法

2.1 试验设备及材料

本次试验采用YN-CFB1320-2000型光纤激光切割机如图1所示,该设备的最大激光功率为3300 W,功率可调整范围为10%~100%,波长范围为900~1200 nm,定位精度可达±0.01 mm,最大定位速度为140 m/min,机床体积为2900 mm×1300 mm×1850 mm,加工幅面(长×宽)为2000 mm×600 mm,辅助气体为氮气,使用环境为室温,切割的最大厚度为5 mm。该试验材料选碳纤维复合材料,其中基体为9A-16环氧树脂基体,增强体碳纤维为东丽T300,纤维单丝直径为0.7 μm,纤维束体积含量为68%,铺层角度为[0°/90°₂/0°₂/90°],总厚度为1.5 mm。



图1 鼎点激光切割设备

Fig. 1 Dingdian laser cutting equipment

2.2 试验设计

激光切割碳纤维复合材料的质量评价指标主要包括纤维拔出长度、切缝宽度、切缝锥角和热影响区(HAZ)等。切割质量的影响因素主要有激光功率、气压、切割速度和离焦量。为使各参量之间的交互作用对切割质量的影响更接近实际加工工况,本文采用Design-Expert软件进行响应面试验设计。每个因素取3个水平,以(-1,0,1)进行编码,0为中心试验点,-1和+1分别为设置的最小值和最大值。以激光功率A、切割速度B、离焦量C和气压D作为影响因子,切缝入口宽度 ϕ 、热影响区宽度H、切缝锥角 θ 作为响应指标,设计水平编码如表1所示。为了解激光切割不同参量之间的交互作用对切割质量评价指标影响的显著性和影响规律,基于前期正交试验所获得的最佳水平组合(激光功率800 W、切割速度25 mm/s、离焦量-1 mm、气压0.6 MPa)为该响应面试验设计的中心试验点,进行试验设计,共计30次试验,其中析因试验24组,中心试验点6组。

表1 水平编码表

Table 1 Horizontal coding table

Factor	X	Level		
		-1	0	1
Power /W	X_1	700	800	900
Speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	X_2	20	25	30
Focus position /mm	X_3	-1.5	-1	-0.5
Air pressure /MPa	X_4	0.5	0.6	0.7

3 试验结果与讨论

3.1 试验结果

在本试验中,参数组合都切割出长度为70 mm的切缝,并以10 mm为单位做等距标记,图2为切缝等距标记示意图,采用JVC300T型全自动视频测量仪,测量每个标记点对应的响应指标,取均值后得到试验结果。

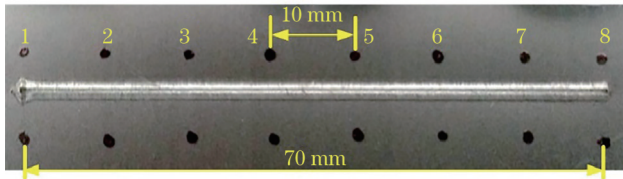


图 2 切缝等距标记示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equal distance marking for cutting seam

3.2 试验结果分析

3.2.1 目标响应的预测函数

通过试验获取测量指标数据,并以获得最小切缝入口宽度 ϕ_{\min} 、最小热影响区宽度 H_{\min} 和最小锥角 θ_{\min}

为目标进行多目标优化,建立拟合因子与响应值之间的多元二次回归拟合方程。

$$f = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} \gamma_i^2 + \sum_{i < j}^n \alpha_{ij} \gamma_i \gamma_j + \lambda, \quad (1)$$

式中: f 为响应指标; α_0 、 α_i 、 α_{ii} 、 α_{ij} 为回归系数; γ_i 、 γ_j 为变量; λ 为误差。

根据表 2 的试验结果建立 3 个目标响应的预测函数,如表 3 所示。并由预测值与真实值分布(图 3)可以看出,切缝入口宽度、HAZ 宽度和切缝锥角的模型预测值和真实值各点均紧邻直线分布,说明模型与实际结果拟合较好,目标响应的预测函数具有一定的可靠性。

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

Number	X_1	X_2	X_3	X_4	A/W	$B/(mm \cdot s^{-1})$	C/mm	D/MPa	$\phi/\mu m$	$H/\mu m$	$\theta/(^\circ)$
1	-1	-1	0	0	700	20	-1.0	0.6	452.45	1352.04	3.81
2	1	-1	0	0	900	20	-1.0	0.6	507.74	1859.20	3.62
3	-1	1	0	0	700	30	-1.0	0.6	436.78	1293.72	4.89
4	1	1	0	0	900	30	-1.0	0.6	489.90	1732.96	4.28
5	0	0	-1	-1	800	25	-1.5	0.5	489.96	1538.62	4.79
6	0	0	1	-1	800	25	-0.5	0.5	456.20	1383.18	4.66
7	0	0	-1	1	800	25	-1.5	0.7	466.92	1346.88	4.57
8	0	0	1	1	800	25	-0.5	0.7	444.60	1311.16	4.17
9	-1	0	0	-1	700	25	-1.0	0.5	475.02	1356.32	4.91
10	1	0	0	-1	900	25	-1.0	0.5	514.42	1923.40	4.43
11	-1	0	0	1	700	25	-1.0	0.7	452.84	1306.32	4.46
12	1	0	0	1	900	25	-1.0	0.7	488.94	1712.05	4.11
13	0	-1	-1	0	800	20	-1.5	0.6	477.83	1481.56	4.28
14	0	1	-1	0	800	30	-1.5	0.6	456.43	1393.00	4.65
15	0	-1	1	0	800	20	-0.5	0.6	472.25	1353.00	3.52
16	0	1	1	0	800	30	-0.5	0.6	446.74	1303.00	4.58
17	-1	0	-1	0	700	25	-1.5	0.6	477.32	1395.80	4.91
18	1	0	-1	0	900	25	-1.5	0.6	518.88	1877.56	4.56
19	-1	0	1	0	700	25	-0.5	0.6	458.40	1266.80	4.51
20	1	0	1	0	900	25	-0.5	0.6	496.88	1803.35	4.21
21	0	-1	0	-1	800	20	-1.0	0.5	487.90	1481.75	3.88
22	0	1	0	-1	800	30	-1.0	0.5	462.30	1398.23	4.60
23	0	-1	0	1	800	20	-1.0	0.7	456.35	1362.10	3.49
24	0	1	0	1	800	30	-1.0	0.7	446.70	1284.50	4.36
25	0	0	0	0	800	25	-1.0	0.6	461.08	1339.36	4.11
26	0	0	0	0	800	25	-1.0	0.6	463.50	1381.36	4.18
27	0	0	0	0	800	25	-1.0	0.6	469.80	1346.45	4.12
28	0	0	0	0	800	25	-1.0	0.6	472.23	1339.23	4.16
29	0	0	0	0	800	25	-1.0	0.6	469.56	1348.56	4.09
30	0	0	0	0	800	25	-1.0	0.6	471.62	1336.35	4.15

表 3 目标响应的预测函数

Table 3 Prediction function of target response

Parameter	Prediction function
Cutting entrance width	$\phi=468.27+21.99A-9.63B-9.35C-10.78D+14.89A^2-7.12B^2$
HAZ width	$H=1352.98+244.7A-40.35B-51.07C-63.20D-16.97AB-40.33AD+29.92CD+204.70A^2+26.50C^2+20.32D^2$
Kerf taper angle	$\theta=4.13-0.19A+0.39B-0.17C-0.17D-0.10AB+0.17BC-0.06CD+0.17A^2-0.16B^2+0.26C^2+0.14D^2$

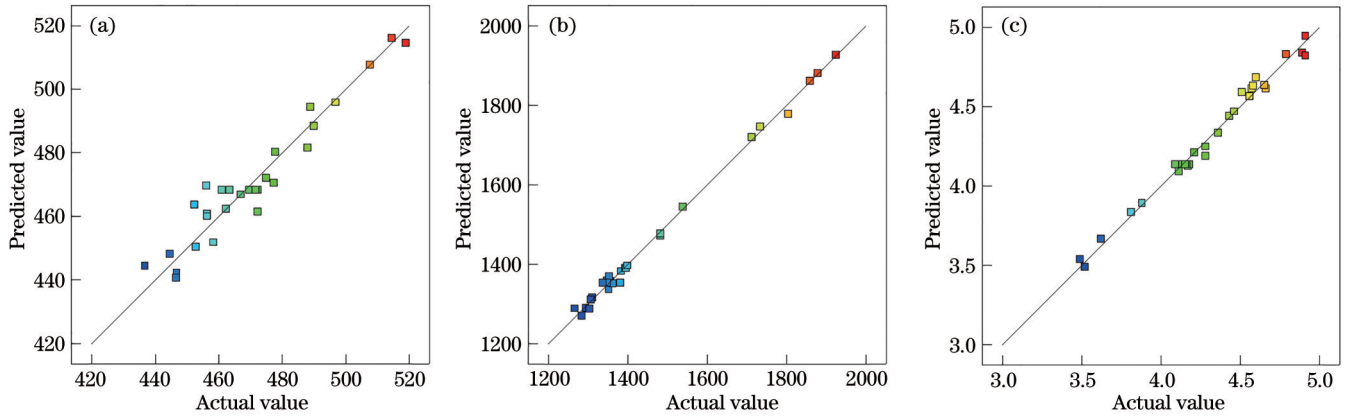


图 3 预测值与真实值分布图。(a)切缝入口宽度;(b)HAZ宽度;(c)切缝锥角

Fig. 3 Distributions of predicted and actual values. (a) Cutting entrance width; (b) HAZ width; (c) kerf taper angle

3.2.2 切缝入口宽度响应面分析

由图 4 中的响应曲面和等高线图可知:随着激光功率的增大,切缝入口宽度逐渐增大,这是因为激光功率增大,材料吸收能量增加,向切缝两侧传递能量更多,材料去除范围扩展,切缝入口呈增大趋势;随着激光切割速度的降低,切缝入口宽度逐渐增大,这是因为

切割速度降低,材料吸收能量增多,材料去除范围增大。然而当切割速度小到一定程度后,切缝宽度趋于平衡,这是因为切割速度较低时,激光能量瞬间使材料融化气化,切缝宽度扩展到一定范围后,激光能量直接通过切缝散失未能作用到材料上,因此对切缝宽度的影响程度趋于稳定。

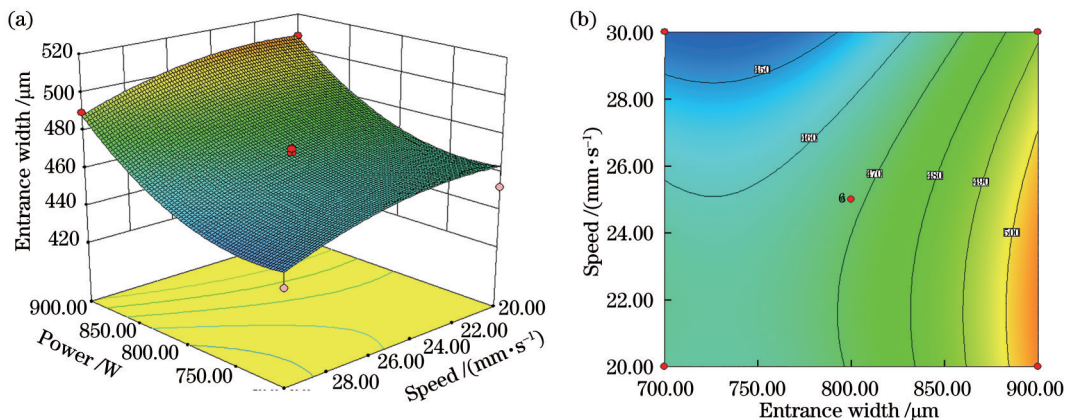


图 4 激光功率与切割速度的交互作用对切缝入口宽度的影响。(a)响应曲面;(b)等高线图

Fig. 4 Influence of interaction between laser power and cutting speed on slit entrance width. (a) Response surface; (b) contour map

3.2.3 HAZ 宽度响应面分析

由图 5 中响应曲面和等高线图可知:材料吸收能量随激光功率的增大而增加,向切缝两侧传递的能量增多,树脂烧蚀气化区域增大,导致 HAZ 宽度增大;单位时间内材料吸收激光能量随切割速度的增加而减少,向切缝两侧向传递的能量减少,对材料产生的热影响作用降低。在保证切割质量的情况下,降低了激光

功率,提高了扫描速度,减少了材料吸收的激光能量,使切缝两侧传递的能量减少,减小了激光切割对材料的热影响作用,获得了较小的 HAZ 宽度范围。

3.2.4 切缝锥角响应面分析

由图 6 中响应曲面和等高线图可知:单位时间内材料吸收的激光能量随激光功率的增大而增多,对材料厚度方向上传递的能量增加,相应地,材料的去除率

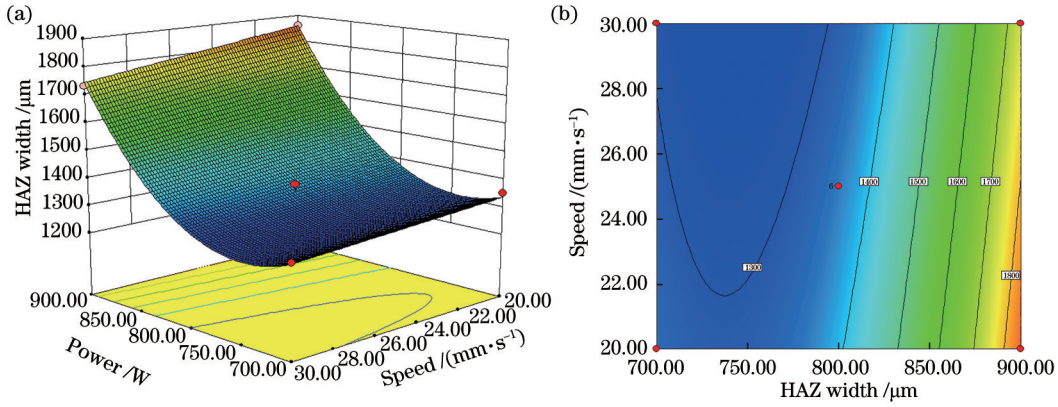


图 5 激光功率和切割速度的交互作用对 HAZ 宽度的影响。(a)响应曲面;(b)等高线图

Fig. 5 Influence of interaction between laser power and cutting speed on HAZ width. (a) Response surface; (b) contour map

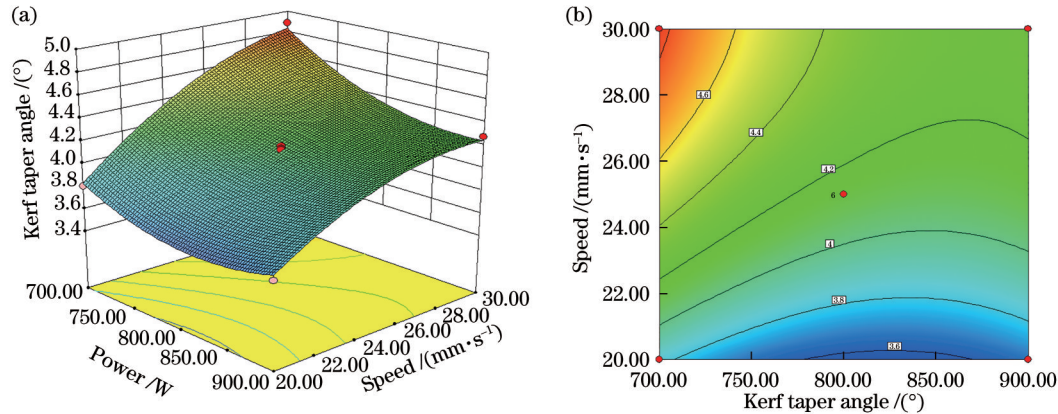


图 6 激光功率和切割速度的交互作用对切缝锥角的影响。(a)响应曲面;(b)等高线图

Fig. 6 Influence of interaction between laser power and cutting speed on kerf taper angle. (a) Response surface; (b) contour map

增大,能量在材料厚度方向上持续积累,使材料背面和正面的切缝宽度趋近,因此切缝锥角随激光功率的增大有所减小;切缝锥角随切割速度的增大而增大,且功率较小时,切割速度对切缝锥角的影响程度较大,这是因为材料吸收能量随切割速度增加而减少,对材料厚度方向上传递的能量减少,材料的去除率降低,切缝出口宽度减小幅度大于切缝入口宽度减小幅度,因此切缝锥角随切割速度的增加有所增大。

激光功率的增大,使得材料对激光能量的敏感

程度提升,相比于激光功率较高的情况,当激光功率较低时,单位时间内材料吸收能量较少,而速度的增加进一步减少了能量的吸收,因此在材料厚度方向上传递的能量越少,对出口材料的去除率越低,切缝锥角越大。

3.2.5 参量优化

以切缝入口宽度 ϕ 、热影响区宽度 H 和切缝锥角 θ 三个参量最小化为目标,进行多目标优化,得到参量优化组合和指标预测值及其误差波动范围,如表4所示。

表 4 参量优化组合及指标预测

Table 4 Parameter optimization combination and index prediction

Parameter optimization combination				Index prediction		
Power /W	Speed /(mm·s ⁻¹)	Focus position /mm	Air pressure /MPa	Predictor	Predicted value	Fluctuation range
755	20	-0.6	0.7	ϕ / μ m	445.02	± 22.01
				H / μ m	1299.58	± 42.68
				θ /(°)	3.39	± 0.18

4 试验验证

4.1 激光切割质量试验验证

采用参量优化组合:A=755 W,B=20 mm/s,

$C=-0.6$ mm, $D=0.7$ MPa,进行激光切割试验验证,得到最优组合切割效果如图7所示。根据表5参量优化组合试验测量结果及误差,可知测量结果为 $\phi=457.75$ μ m、 $H=1306.13$ μ m和 $\theta=3.51^\circ$,分别与预测

值的误差为 12.73 μm 、6.55 μm 和 0.12°。其中测取结果与预测值虽存在一定误差,但差值均在预测值的波

动范围内,预测结果与试验结果基本吻合,因此验证了参量优化组合的有效性。

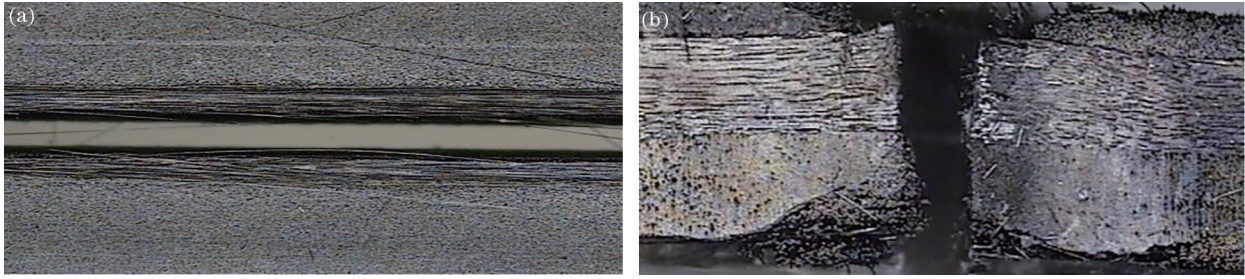


图 7 最优组合切割效果。(a)正面;(b)切缝锥角

Fig. 7 Optimal combination cutting effect. (a) Positive; (b) kerf taper angle

表 5 参量优化组合试验测量结果及误差
Table 5 Measurement results and error of parameter optimization combination test

Parameter	$\psi / \mu\text{m}$	$H / \mu\text{m}$	$\theta / (^\circ)$
Measurement results	457.75	1306.13	3.51
Deviation from predicted value	12.73	6.55	0.12

4.2 胶接拉伸剪切强度试验验证

对于复合材料连接方式通常有机械连接和胶接两种方式,胶接能够保证结构的完整性、避免机械连接的应力集中,能显著降低结构的质量,在复合材料连接方面的应用较为广泛^[13-14],因此采用胶接方式,对碳纤维复合材料激光切割试件,进行胶接拉伸剪切强度试验。

4.2.1 碳纤维复合材料胶接试件制备和试验方案设计

碳纤维复合材料胶接试验按 GB/T33334—2016

试验标准,分别采用响应面设计试验的中心试验点参量组合和优化后的参量组合,进行激光切割制备两组试件,每组 6 个共 12 个试件,试件长度 $L=100\text{ mm}$ 、宽度 $W=25\text{ mm}$ 、搭接长度 $L_0=12.5\text{ mm}$ 、夹持部位距离黏结端 $R=50\text{ mm}$ 、胶黏剂厚度 $H=0.2\text{ mm}$ 。试件表面按 GB/T21526—2008 规定处理,用细砂纸横向打磨至表面有均匀的划痕,纵向打磨至划痕去除,环向打磨使所有划痕去除。试验采用 Kafuter 强力结构胶进行试件的胶接,为便于控制胶层厚度,先将直径 0.2 mm 的铁丝置于搭接面,然后进行胶接,并及时清理被挤压出的胶体。图 8 为试件胶接和胶层厚度控制示意图。待胶接后的试件常温固化 24 h 后,进行两组激光参量切割试件的胶接拉伸剪切强度对比试验,试验设备采用 WDW-100 型复合力学试验机,在平行于搭接面的轴向,施加 5 mm/min 速度载荷。

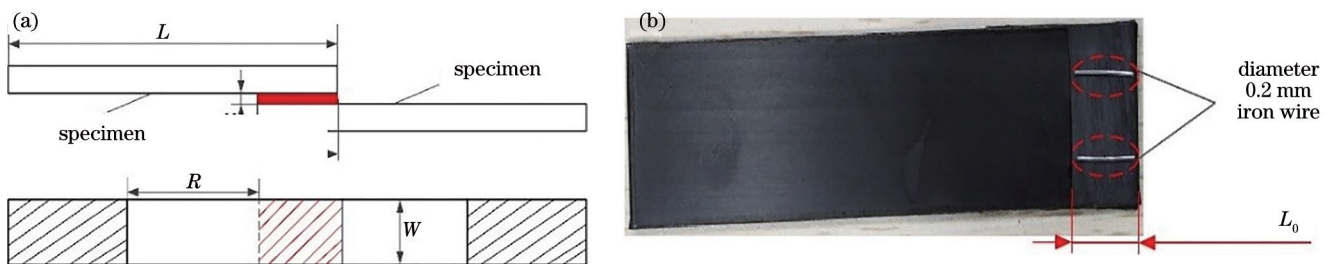


图 8 试件胶接和胶层厚度控制示意图。(a)试件胶接;(b)胶层厚度控制

Fig. 8 Schematic diagram of specimen bonding and adhesive layer thickness control. (a) Specimen bonding;

(b) adhesive layer thickness control

4.2.2 胶接拉伸剪切强度试验结果对比分析

通过胶接拉伸剪切试验,记录每组测试结果,得到表 6 胶接拉伸剪切破坏的最大负荷,可以看出,采用优

化后的激光参量组合切割获得胶接试件的拉伸剪切破坏的最大负荷,整体上大于中心试验点切割试件的拉伸剪切破坏的最大负荷。

表 6 胶接拉伸剪切破坏的最大负荷
Table 6 Maximum load of glued tensile shear damage

Experimental group	Central test point			Parameter optimization combination			
	Serial number	1	2	3	1	2	3
Maximum load /N	4316	3116	4384	4852	4870	4790	
Average /N		3938.67			4837.33		

根据测得破坏的最大负荷均值,计算得到两组拉伸剪切强度为

$$\tau = \frac{F_m}{(W \times L_0)}, \quad (2)$$

式中: τ 为拉伸剪切强度; F_m 为剪切破坏的最大负荷; W 为胶接区宽度; L_0 为胶接区长度。

根据式(2)计算解得中心试验点试件拉伸剪切强度为 12.6 MPa,优化参量组合试件拉伸剪切强度为 15.48 MPa。通过对比计算,可以得到采用优化参量

组合的激光切割试件,比采用中心试验点的激光切割试件拉伸剪切强度增大 22.86%,说明激光切割会对材料的力学性能产生影响,也进一步说明了激光切割参量优化的重要性。

通过观察试验结果发现:采用中心试验点的激光切割试件,在胶接后的破坏形式中,有两组为胶接区域的材料分层破坏,一组为粘胶剂破坏;采用参量优化组合的激光切割试件,胶接后的破坏形式均为粘胶剂破坏,胶接拉伸剪切试件破坏形式如图 9 所示。

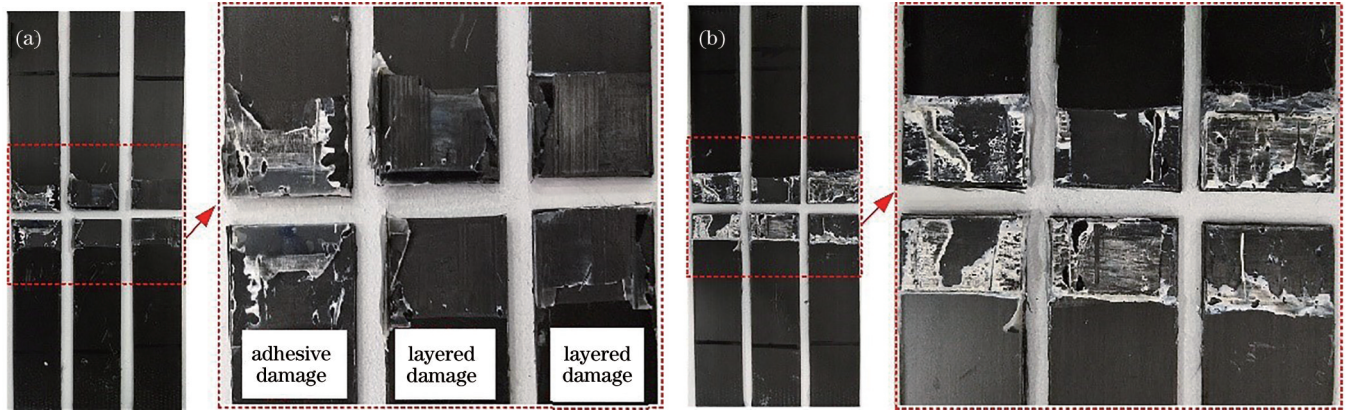


图 9 胶接拉伸剪切试件破坏形式。(a)中心试验点试件;(b)参量优化组合试件

Fig. 9 Failure mode of bonded tensile shear specimen. (a) Central test point specimen; (b) parameter optimization combination specimen

结合激光切割对材料的热影响和胶接拉伸剪切试件破坏形式进行分析,当材料吸收激光能量后,会向内部进行传递,使树脂热解黏结性降低,从而导致碳纤维复合材料层间剪切强度的降低。采用中心试验点进行激光切割,对材料的热影响程度大于参量优化组合切割对材料的热影响程度,因此在进行胶接拉伸剪切时,层间剪切强度降低较明显,所能承受的载荷较低,材料最终出现分层破坏的现象。通过参量优化组合进行激光切割的试件受热影响程度较小,对层间剪切强度的影响较小,在进行胶接拉伸剪切时,结果均为胶黏剂的破坏。

5 结 论

本文采用响应面法进行试验设计,得到各响应指标的数学模型和预测值与实际值之间的关系,表明了模型与实际结果拟合效果较好。通过对响应曲面与等高线图进行分析,得到各激光参量的交互作用对响应指标的影响规律。对 ψ_{\min} 、 H_{\min} 和 θ_{\min} 进行优化,得到最优参量组合为 $A=755\text{ W}$ 、 $B=20\text{ mm/s}$ 、 $C=-0.6\text{ mm}$ 、 $D=0.7\text{ MPa}$ 。

对最优参量组合进行激光切割试验验证,指标预测结果与试验结果基本吻合,差值均在指标预测值的波动范围内,采用优化参量组合的激光切割试件,比采用中心试验点的激光切割试件胶接拉伸剪切强度提高了 22.86%,均说明了优化参量组合对切割质量影响的重要性。

参 考 文 献

- [1] 刘强. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J]. 科技与企业, 2015(22): 221.
Liu Q. Application of carbon fiber composites in aerospace field[J]. Science-Technology Enterprise, 2015 (22): 221.
- [2] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
Li W, Guo Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(3): 201-212.
- [3] 王军照. 碳纤维复合材料在航空领域中的应用现状及改进[J]. 今日制造与升级, 2020(8): 48-49.
Wang J Z. Current status and improvement of carbon fiber composites in aerospace applications[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2020(8): 48-49.
- [4] 彭金涛, 任天赋. 碳纤维增强树脂基复合材料的最新应用现状[J]. 中国胶粘剂, 2014, 23(8): 48-52.
Peng J T, Ren T B. The latest application status of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. China Adhesives, 2014, 23(8): 48-52.
- [5] 张学聪, 赵全忠, 戴晔, 等. 皮秒激光切割PBO纤维增强复合材料[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002004.
Zhang X C, Zhao Q Z, Dai Y, et al. Cutting of PBO fiber reinforced composites by picosecond lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002004.
- [6] Stock J W, Zaeh M F, Spaeth J P. Remote laser cutting of CFRP: influence of the edge quality on fatigue strength [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8963: 89630T.

- [7] Ohkubo T, Tsukamoto M, Sato Y. Numerical simulation of combustion effects during laser processing of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(3): 196.
- [8] Petković D, Nikolić V, Milovančević M, et al. Estimation of the most influential factors on the laser cutting process heat affected zone (HAZ) by adaptive neuro-fuzzy technique[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 12-15.
- [9] Cao S H, Wu Z S, Wang X. Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(4): 315-330.
- [10] Cao S H, Wu Z S. Tensile properties of FRP composites at elevated and high temperatures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2008, 11: 963-970.
- [11] 朱德志, 胡俊. 皮秒激光加工碳纤维复合材料工艺试验[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(20): 54-59.
Zhu D Z, Hu J. Experimental study on picosecond pulsed laser machining of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(20): 54-59.
- [12] 王奔, 杨博文. 切削温度对碳纤维复合材料剪切性能影响研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(5): 23-26.
Wang B, Yang B W. Effect of cutting temperature on shear property of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(5): 23-26.
- [13] 许昶, 刘志明. 碳纤维复合材料FJF胶接接头失效仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2020, 37(1): 199-205.
Xu C, Liu Z M. Numerical study on the failure of CFRP flat-joggle-flat bonded joints[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(1): 199-205.
- [14] 张少锋, 张博, 罗琴, 等. 复合材料单搭胶结接头剪切试验及应力分析[J]. *环境技术*, 2017, 35(6): 39-44.
Zhang S F, Zhang B, Luo Q, et al. Shear tests and stress analysis of single lap adhesive joint of composite material[J]. *Environmental Technology*, 2017, 35(6): 39-44.