

激光与光电子学进展

TC4 与 PBTCF30 的激光直接连接工艺优化

梁怀志, 李成杰, 黄滔, 王霄*, 刘会霞

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为了满足金属与聚合物在工业轻量化中的连接需求,采用半导体连续激光器对钛合金 TC4 和碳纤增强聚合物 PBTCF30 材料进行激光连接实验研究。通过在钛合金表面进行织构预处理,可使接头在激光连接后获得机械铆接从而提高其强度;将接头剪切强度和预处理时间作为响应,并根据两响应与相关工艺参数之间的关系,利用响应曲面法建立数学模型,分析了织构扫描直径、织构扫描间距、织构扫描次数、激光连接功率和激光连接速度对接头剪切强度及预处理时间的交互式影响,最后通过加速粒子群优化(APSO)算法获得最优解。结果表明,对接头强度影响最大的三个参数组合为:扫描间距-扫描次数、扫描次数-连接速度、连接速度-连接功率。模型验证及优化结果验证表明,所建模型的预测值与实验值吻合较好,模型可靠。

关键词 激光技术; 表面织构预处理; 工艺参数优化; 响应曲面法; 加速粒子群优化

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222605

Optimization of Laser Direct Connection Process between TC4 and PBTCF30

Liang Huaizhi, Li Chengjie, Huang Tao, Wang Xiao*, Liu Huixia

College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China

Abstract In order to meet the connection requirements of metal and polymer in industrial lightweight, the laser connection experiment of titanium alloy TC4 and carbon fiber reinforced polymer PBTCF30 is carried out using a semiconductor continuous laser. By performing texture pretreatment on the surface of titanium alloy, the joint can be mechanically riveted to improve its strength. The joint shear strength and pretreatment time are taken as the responses, and the mathematical model is established using the response surface method according to the relationship between the two responses and the relevant process parameters. The interactive effects of the texture-scanning diameter, texture-scanning spacing, texture-scanning times, laser connection power, and laser connection speed on the joint shear strength and pretreatment time are analyzed. Finally, the optimal solution is obtained using the accelerated particle swarm optimization (APSO) method. The results show that the three parameters that have the greatest influence on the joint strength are: scanning spacing-scanning times, scanning times-connection speed, and connection speed-connection power. The validation of the model and the optimization results show that the predicted value of the model is consistent with the experimental value, and the reliability of the proposed model is confirmed.

Key words laser technology; surface texture pretreatment; process parameter optimization; response surface method; accelerated particle swarm optimization

1 引言

当前,我国正向着“2030年实现碳达峰”和“2060年实现碳中和”的发展目标稳步前进,绿色发展、可持续发展为其重要指导方针,因此我国在环境保护及节能减排方面提出了更加严格的要求,而进行结构轻量化

设计制造是实现减少能源消耗、提高能源使用效率、降低碳排放的重要途径^[1-3]。热塑性聚合物材料因具有强度高、成本低、易加工、耐腐蚀等优点受到越来越多的关注^[4-6],为了更好地发挥出轻量化合金与热塑性聚合物这两种材料的优势,两者之间的连接势在必行^[7]。传统的聚合物与金属连接方法有机械紧固与黏

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-10-26; 录用日期: 2022-11-16; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)

通信作者: *wx@ujs.edu.cn

合剂粘结。机械紧固工艺会增加结构件重量,不利于构件轻量化且会产生应力集中降低接头强度且密封效果不好^[8]。胶接连接的方法在异种材料之间使用较多,胶接应力集中小、密封效果好且不易发生变形,但胶接接头质量受服役环境影响较大,胶质随时间延长容易老化,导致连接件连接强度降低甚至发生失效、损坏^[9-10]。目前,新型热连接工艺有感应连接、摩擦焊接、超声波连接和激光连接。感应连接具有密封性好、强度高、效率高等优点,但感应连接的磁性填料易引起应力集中^[11];摩擦焊接不适用于形状复杂的零件连接,且连接后可能会产生孔洞等缺陷^[12];超声波连接多用于较薄的片状零件的焊接,且超声波会破坏复合材料内部纤维结构^[13]。与其他连接工艺相比,激光直接连接由于其焊接接头质量稳定、不易随时间延长发生老化、焊接精度高、热变形小、焊接速度快,且适用于多种接头形式,易实现自动化连接^[14-16],成为解决轻量化合金与热塑性聚合物连接这一问题的有效途径与研究热点^[17-18],是满足聚合物与金属异质连接结构件在航空航天制造等领域实际应用最具潜力的连接方法。

针对激光连接金属与碳纤增强聚合物,目前国内外学者主要围绕焊接工艺参数、温度场模拟、连接机理等方面展开研究。Acherjee^[19]利用 ANSYS 有限元程序计算瞬态温度场,通过执行 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 中的子程序实现激光束的多程移动,研究了激光功率、焊接速度、焊接道数和线能量等工艺变量对焊接温度场的影响。Ai 等^[20]通过建立三维瞬态数值模型来预测焊缝几何形状和气孔的形成,并通过建立模型研究了激光功率和焊接速度对温度场、熔池和液流的影响。也有学者通过在金属表面进行织构处理,使接头形成铆接连接进而提高接头强度,但并未对激光连接涉及到的工艺参数进行综合分析优化,因此研究结果不能最大程度地为实际工业应用提供指导。本文以钛合金 TC4 和碳纤增强聚合物 PBTCF30 为研

究对象,首先对 TC4 表面进行表面织构处理,再通过激光直接连接的方法对 PBTCF30 与处理后的 TC4 进行焊接。

先用皮秒激光器对钛合金 TC4 表面进行织构处理,再使用半导体连续激光器将其与碳纤增强聚合物 PBTCF30 进行激光直接连接。分别以接头剪切强度与预处理时间作为优化准则,综合考虑焊接工艺参数与织构预处理工艺参数,将接头剪切强度与预处理时间作为响应,并根据相关工艺参数与接头剪切强度的关系利用响应面法建立相关参数与响应之间的数学模型,通过分析相关参数与响应之间的交互式影响来进行优化,以此获得最佳的工艺参数组合。

2 激光直接连接工艺及工艺参数分析

2.1 试样准备与实验设备

本文所使用的钛合金材料为 Ti-6Al-4V,牌号为 TC4,规格为 40 mm×20 mm×1 mm,碳纤增强型聚合物为由 PBT 为基体和体积比为 30% 的短碳纤维构成,材料规格为 50 mm×20 mm×2 mm。本文金属表面织构处理采用的激光微加工系统为苏州德龙激光股份有限公司的 PX100II-A 型皮秒激光器,该设备最大理论输出功率为 70 W,光斑直径为 22 μm,所配三轴运动台分辨率为 0.01 mm,脉冲宽度小于 12 ps,频率可调范围为 0.2~50 MHz,波长有 1064 nm 和 532 nm 两种类型可供选择,本文所用激光波长为 1064 nm。本文使用 ZQ-990L 标准型万能拉力试验机对接头剪切强度进行测试实验。

2.2 表面织构及激光直接连接工艺

为了提高 TC4 与 PBTCF30 激光直接连接剪切强度,在钛合金待连接表面进行激光表面织构处理,以便激光连接形成铆接连接。表面织构预处理采用皮秒脉冲激光器,织构区尺寸为 20 mm×3 mm,激光表面织构预处理示意图如图 1 所示。本文研究的表面织构预处

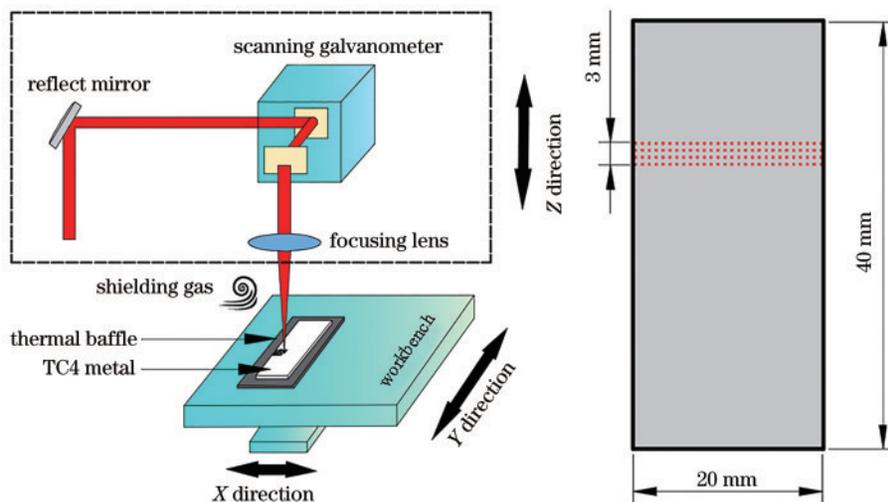


图 1 激光表面织构预处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser surface texture pretreatment

理工艺参数为织构扫描直径、织构扫描间距、织构扫描次数,共 3 个工艺参数。在固定织构区域内调整织构扫描直径与织构扫描间距,来获得不同的织构密度;通过调整织构扫描次数,来获得不同织构深度。其余扫描参数固定不变,其中功率为 25 W,速度为 300 mm/s,跳

转速度为 3000 mm/s,频率为 200 kHz,离焦量为 0(光斑直径为 0.02 mm)。图 2 给出了织构扫描直径为 0.06 mm、织构扫描间距为 0.3 mm、织构扫描次数为 55 次时钛合金表面织构形貌,从图中可以看出,表面处理

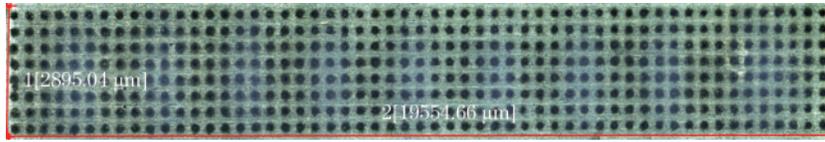


图 2 表面织构处理后的钛合金表面外观形貌

Fig. 2 Surface appearance of titanium alloy after surface texture treatment

采用 200 型光纤耦合连续半导体激光器对 TC4 与 PBTCF30 进行激光直接连接,图 3 给出了激光直接连接 TC4 与 PBTCF30 的原理示意图。在进行激光直接连接实验前,首先对金属表面进行表面织构处理,然后采用搭接连接的方式,将钛合金 TC4 材料置于上层,未做织构处理的表面朝上,最后使用连续激光辐照 TC4 上表面,在织构区域范围内沿直线移动,上层钛合金材料在吸收激光能量后将其转化为热能传导至下层 PBTCF30 材料,待温度达到聚合物熔点后,熔融状

态的聚合物在夹紧力的作用下,流入 TC4 下表面所制备微孔造型内,形成连接。本文研究的激光直接连接工艺参数为激光连接速度、激光连接功率,共 2 个工艺参数。通过调整激光连接功率与激光连接速度的大小,来改变 PBTCF30 焊接部位的温度,进而改变 PBTCF30 焊接部位的熔化与流动情况。其他工艺参数为固定值,其中激光离焦量为 0(光斑直径为 0.9 mm),夹具夹紧强度为 0.5 MPa。图 4 给出了织构处理后激光连接及局部放大原理图。

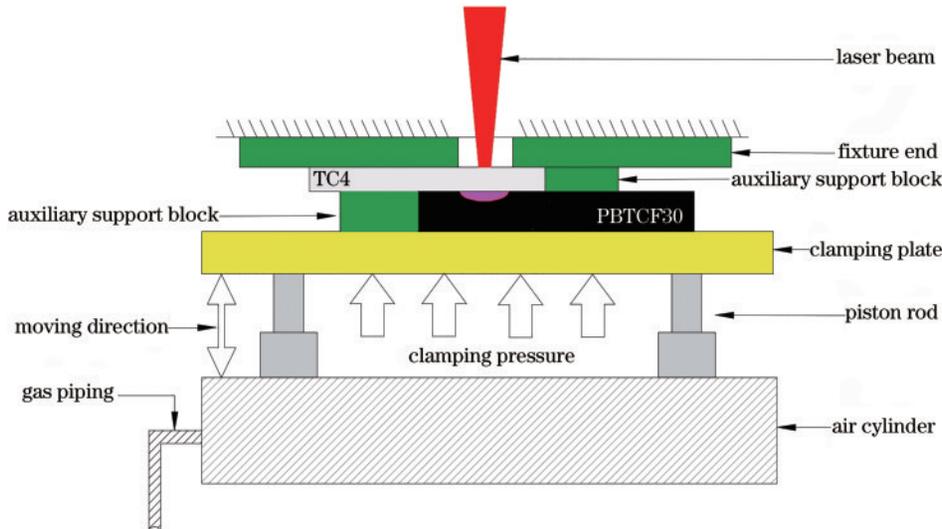


图 3 激光直接连接 TC4 与 PBTCF30 的原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser direct connection between TC4 and PBTCF30

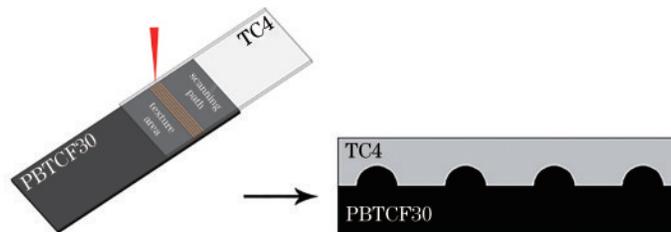


图 4 织构处理后激光连接及局部放大原理图

Fig. 4 Schematic diagram of laser connection and local enlargement after texture treatment

2.3 连接机理及拉伸失效分析

PBTCF30 材料在熔融状态能够充分填充 TC4 表

面微孔造型,使得机械铆接效应显著增强,是接头剪切强度增大的主要因素。但连接功率过高会导致

PBT30 内部分解现象加剧^[21],产生较大尺寸气泡且当微孔织构过深时,孔内气体无法及时逸出,易在连接界面处形成孔隙,对接头剪切强度的提升产生影响^[22];经 X 射线光电子能谱(XPS)分析证明,在激光直接连接 TC4 与 PBT30 的过程中,金属中所含 Ti 元素会与增强型聚合物内部的 C、O 等元素在连接处形成 Ti-O、Ti-C 化学键,使得二者可以在连接时形成在机械铆接和化学连接共同作用下的高剪切强度接头^[23]。图 5 为检测到的钛合金表面不同溅射时间下的 Ti2p 高倍谱图。根据现有研究结果^[24-25]和美国国家标准与技术研究院(NIST)图谱库并结合 C1s 和 O1s 轨道分析,在结合能为 454.9 eV 与 455.9 eV 处分别有 Ti-C 和 Ti-O 化学键生成。

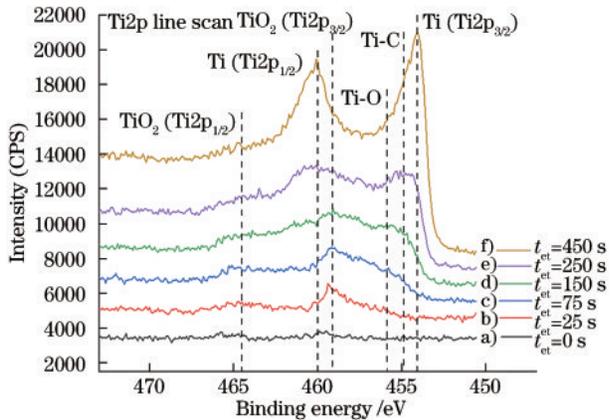


图 5 拉伸后的 TC4 表面不同蚀刻时间下的 Ti2p 高倍率能谱图
Fig. 5 High magnification energy spectra of Ti2p on stretched TC4 surface at different etching time

对金属表面预处理的连接试样进行拉伸实验,激光连接件失效主要包括三种形式,即连接界面失效、连接界面处被连接件断裂和连接件未连接处断裂。由于 TC4 与 PBT30 的连接剪切强度远低于被连接件本身抗拉强度,因此二者间失效仍发生在连接界面处,连接参数为 60 W 和 4 mm/s。图 6 为织构处理后的拉伸失效图,从图中可以看出,在 TC4 表面织构区域内残留明显的聚合物组分。

使用显微镜观测金属表面连接处的局部放大形貌,发现金属表面除残留聚合物和短碳纤维外,预处理中所制备的微孔造型已被聚合物填充且呈现凸起结构。这是由于在连接过程中熔融聚合物流入金属表面微孔,形成可靠接头。

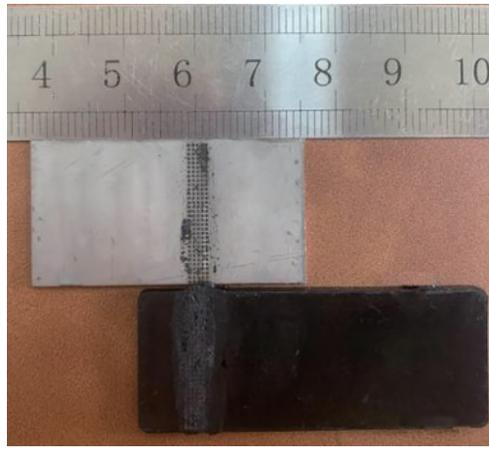


图 6 织构处理后的拉伸失效图
Fig. 6 Tensile failure diagram after texture treatment

3 激光连接实验设计及连接工艺数学模型建立

3.1 激光连接实验设计

通过响应面法来进行实验设计建模和优化,实验参数采用旋转中心复合设计(CCRD)的方法进行设计。实验设计中输入变量包括表面织构预处理工艺参数(织构扫描直径、织构扫描间距、织构扫描次数)与激光直接连接工艺参数(激光扫描速度和激光连接功率)共 5 个工艺参数,实验设计采用 5 因素 5 水平,各工艺参数取值范围如表 1 所示。基于表 1,利用 Design-Expert 软件进行实验方案设计,另选取激光直接连接的接头剪切强度(Joint shear strength)和对应织构的预处理时间(Pretreatment time)作为响应,并将对应的表面织构预处理所需时间及拉伸测试得到的接头剪切强度填入表 2 中。

表 1 工艺参数的取值范围
Table 1 Value range of process parameters

Code	Input parameter	Unit	Level				
			-2	-1	0	1	2
A	Scanning diameter	mm	0.06	0.14	0.22	0.30	0.38
B	Scanning spacing	mm	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
C	Scanning times	—	35	45	55	65	75
D	Connection speed	mm·s ⁻¹	2	3	4	5	6
E	Connection power	W	45	50	55	60	65

表 2 实验方案和结果

Table 2 Experimental scheme and results

Run order	Standard order	Input parameter value					Response value	
		A /mm	B /mm	C	D / (mm·s ⁻¹)	E /W	Joint shear strength / MPa	Pretreatment time /s
1	21	0.14	0.4	65	3	60	10.20	166
2	33	0.06	0.5	55	4	55	8.69	58

表 2 (续)

Run order	Standard order	Input parameter value					Response value	
		A /mm	B /mm	C	D /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	E /W	Joint shear strength / MPa	Pretreatment time /s
3	48	0.22	0.5	55	4	55	12.50	122
4	2	0.30	0.4	45	3	50	9.22	151
5	32	0.30	0.6	65	5	60	10.02	127
6	37	0.22	0.5	35	4	55	9.85	78
7	9	0.14	0.4	45	5	50	7.25	116
8	5	0.14	0.4	65	3	50	10.25	166
9	27	0.14	0.6	45	5	60	10.55	56
10	7	0.14	0.6	65	3	50	10.55	81
11	29	0.14	0.4	65	5	60	8.25	166
12	20	0.30	0.6	45	3	60	10.55	89
13	17	0.14	0.4	45	3	60	10.22	116
14	18	0.30	0.4	45	3	60	9.20	151
15	3	0.14	0.6	45	3	50	10.50	56
16	19	0.14	0.6	45	3	60	11.50	56
17	22	0.30	0.4	65	3	60	10.75	217
18	14	0.30	0.4	65	5	50	7.55	217
19	12	0.30	0.6	45	5	50	8.58	89
20	6	0.30	0.4	65	3	50	10.35	217
21	45	0.22	0.5	55	4	55	13.02	122
22	28	0.30	0.6	45	5	60	10.56	89
23	50	0.22	0.5	55	4	55	11.85	122
24	42	0.22	0.5	55	4	65	11.35	122
25	1	0.14	0.4	45	3	50	9.56	116
26	41	0.22	0.5	55	4	45	9.35	122
27	4	0.30	0.6	45	3	50	10.52	89
28	24	0.30	0.6	65	3	60	10.85	127
29	39	0.22	0.5	55	2	55	11.35	122
30	23	0.14	0.6	65	3	60	11.00	81
31	11	0.14	0.6	45	5	50	8.00	56
32	8	0.30	0.6	65	3	50	10.56	127
33	16	0.30	0.6	65	5	50	7.85	127
34	31	0.14	0.6	65	5	60	9.55	81
35	40	0.22	0.5	55	6	55	8.20	122
36	49	0.22	0.5	55	4	55	12.00	122
37	10	0.30	0.4	45	5	50	7.30	151
38	15	0.14	0.6	65	5	50	7.55	81
39	30	0.30	0.4	65	5	60	8.85	217
40	34	0.38	0.5	55	4	55	8.55	157
41	36	0.22	0.7	55	4	55	9.85	72
42	46	0.22	0.5	55	4	55	11.53	122
43	47	0.22	0.5	55	4	55	12.80	122
44	26	0.30	0.4	45	5	60	8.52	151
45	433	0.22	0.5	55	4	55	12.30	122
46	44	0.22	0.5	55	4	55	13.20	122
47	35	0.22	0.3	55	4	55	8.30	248
48	25	0.14	0.4	45	5	60	8.55	116
49	38	0.22	0.5	75	4	55	9.85	167
50	13	0.14	0.4	65	5	50	7.15	166

3.2 基于 RSM 的激光直接连接工艺参数建模

根据实验设计数据及结果,通过 Design Expert 软件建立相关工艺参数与织构预处理时间和接头剪切强度之间的数学模型,并进行方差分析。

3.2.1 织构预处理时间数学模型的建立

通过 Design Expert 软件中的分析拟合步骤得到其二阶非线性多项式响应面模型,织构预处理时间 T 对应的编码方程式与实际值方程式分别为

$$T = 122.42 + 21.45*A - 38.50*B + 22.35*C - 0.8750*A*B + 3.63*A*C - 6.63*B*C - 4.15*A^2 + 8.97*B^2 - 0.4*C^2 - 0.525*D^2 - 0.525*E^2, \quad (1)$$

$$T = 102.58 + 358.91*A - 894.06*B + 4.99*C + 4.2*D + 2.31*E - 109.375*A*B + 4.53125*A*C - 6.625*B*C - 648.4375*A^2 + 897.5*B^2 - 0.004*C^2 - 0.525*D^2 - 0.021*E^2. \quad (2)$$

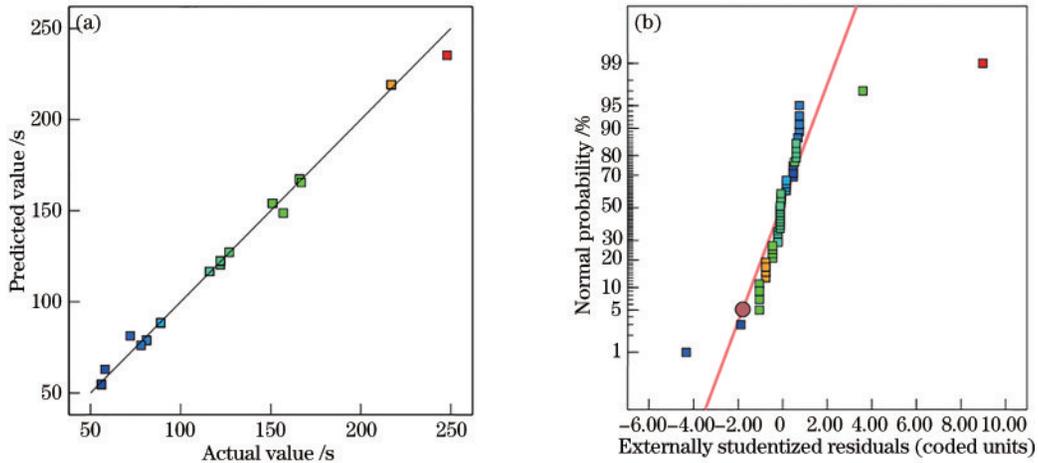


图7 预处理时间模型。(a)实验值与预测值对比图;(b)模型的合适性

Fig. 7 Pretreatment time model. (a) Comparison diagram of experimental and predicted values; (b) suitability of model

3.2.2 接头剪切强度数学模型的建立

在 Design-Expert 软件中进行方差拟合分析,得到

激光直接连接接头剪切强度的二阶多项式响应面模型,接头剪切强度 S 的编码方程式和实际值方程式分别为

$$S = 12.3 + 0.008*A + 0.4655*B + 0.0175*C - 0.9*D + 0.5095*E - 0.0006*A*B + 0.1237*A*C + 0.13*A*D - 0.0513*A*E - 0.1987*B*C + 0.0925*B*D + 0.1425*B*E - 0.1806*C*D - 0.0331*C*E + 0.3394*D*E - 0.8219*A^2 - 0.7081*B^2 - 0.5144*C^2 - 0.5331*D^2 - 0.3894*E^2, \quad (3)$$

$$S = -72.35215 + 48.68203*A + 67.04094*B + 0.741594*C - 0.194688*D + 1.46578*E - 0.078125*A*B + 0.154688*A*C + 1.625*A*D - 0.128125*A*E - 0.19875*B*C + 0.925*B*D + 0.285*B*E - 0.018062*C*D - 0.000662*C*E + 0.067875*D*E - 128.41797*A^2 - 70.81250*B^2 - 0.005144*C^2 - 0.533125*D^2 - 0.015575*E^2. \quad (4)$$

通过方差分析计算得出,接头剪切强度响应模型的 F 分布检验值为 31.39, P 值小于 0.0001。而当 P 值小于 0.0001 时,表明模型拟合比较理想,因此本文的接头剪切强度数学模型是可靠的。模型的信噪比为 19.0049,其远大于 4,表明模型具有较好的预测性。另外,接头强度响应模型的拟合度为 0.9558,其拟合

修正系数和预测拟合度系数分别为 0.9254 和 0.8783,两系数值十分接近,说明相关工艺参数与连接强度之间的模型是可靠的。连接强度对应的实验数据与预测数据的对比图及模型的合适性如图 8 所示。图中数据表明,实验所得结果和模型的预测值十分接近,模型可靠^[26]。

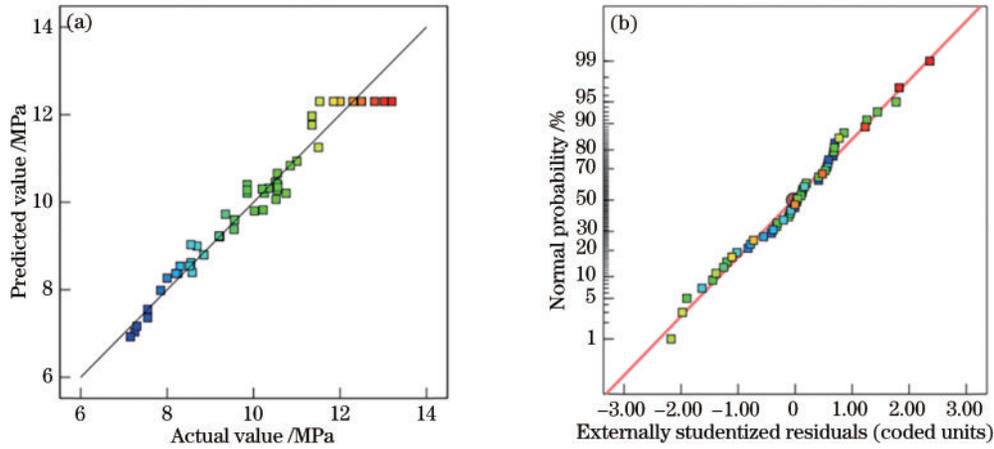


图 8 接头剪切强度模型。(a)实验值与预测值对比图;(b)模型的合适性

Fig. 8 Joint shear strength model. (a) Comparison diagram of experimental and predicted values; (b) suitability of model

4 连接工艺参数对预处理时间和接头剪切强度的交互式影响分析

4.1 工艺参数对预处理时间的影响

图 9 给出了各工艺参数对预处理时间的中位影响趋势。从图中可以看出,织构扫描直径(A)、织构扫描次数(C)对预处理时间的影响都是随着设定水平的增加而增大;织构扫描间距(B)对预处理时间的影响变化最大且与 A、C 因素相反,随着水平的增大呈现下降趋势。另外,对于连接时所用参数连接速度(D)和连接功率(E),织构预处理时间不随其变化而变化,所以呈现一条水平直线。

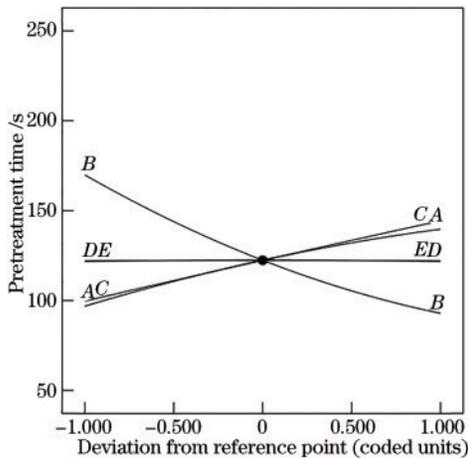


图 9 工艺参数对预处理时间的影响曲线

Fig. 9 Influence curve of process parameters on pretreatment time

4.2 工艺参数对连接强度的影响

接头剪切强度的响应模型表明,在连接过程中,织构扫描直径(A)、织构扫描间距(B)、织构扫描次数(C)、激光连接速度(D)和激光连接功率(E)这 5 个输入工艺参数之间具有一定的交互式影响,5 个参数之

间两两组合,共计 10 组。根据接头剪切强度模型的方差分析表可知,10 种组合中 B-C、C-D 及 D-E 这 3 个组合的交互影响更加显著,因此后面将分别对这 3 组工艺参数组合的交互式影响展开分析与讨论。

从图 10 可知,各输入工艺参数对接头剪切强度的中位影响趋势,其中扫描直径(A)、扫描间距(B)和扫描次数(C)这 3 个工艺参数的影响趋势十分相似,均是先随着工艺参数水平的增加而增大,超过一定阈值后出现一定水平的降低;随着连接速度(D)水平的增加,强度响应值从平缓状态逐渐越来越低且下降幅度越来越大;随着连接功率(E)水平的增加,强度响应值越来越

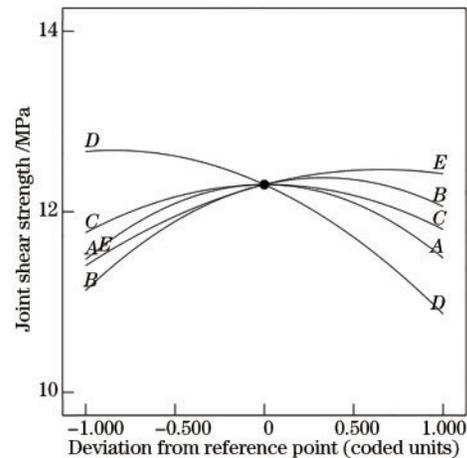


图 10 工艺参数对接头剪切强度的影响曲线

Fig. 10 Influence curve of process parameters on joint shear strength

越大且上升幅度越来越小,最终趋于平缓。

图 11(a)为预处理织构的扫描间距和扫描次数对接头剪切强度的交互式影响图。从图中可以看出,在织构扫描次数为 55 次、扫描间距为 0.5 mm 附近时,接头剪切强度趋近最大值。当表面织构的扫描次数和扫描间距分别从 35 次、0.3 mm 增加至 55 次和 0.5 mm

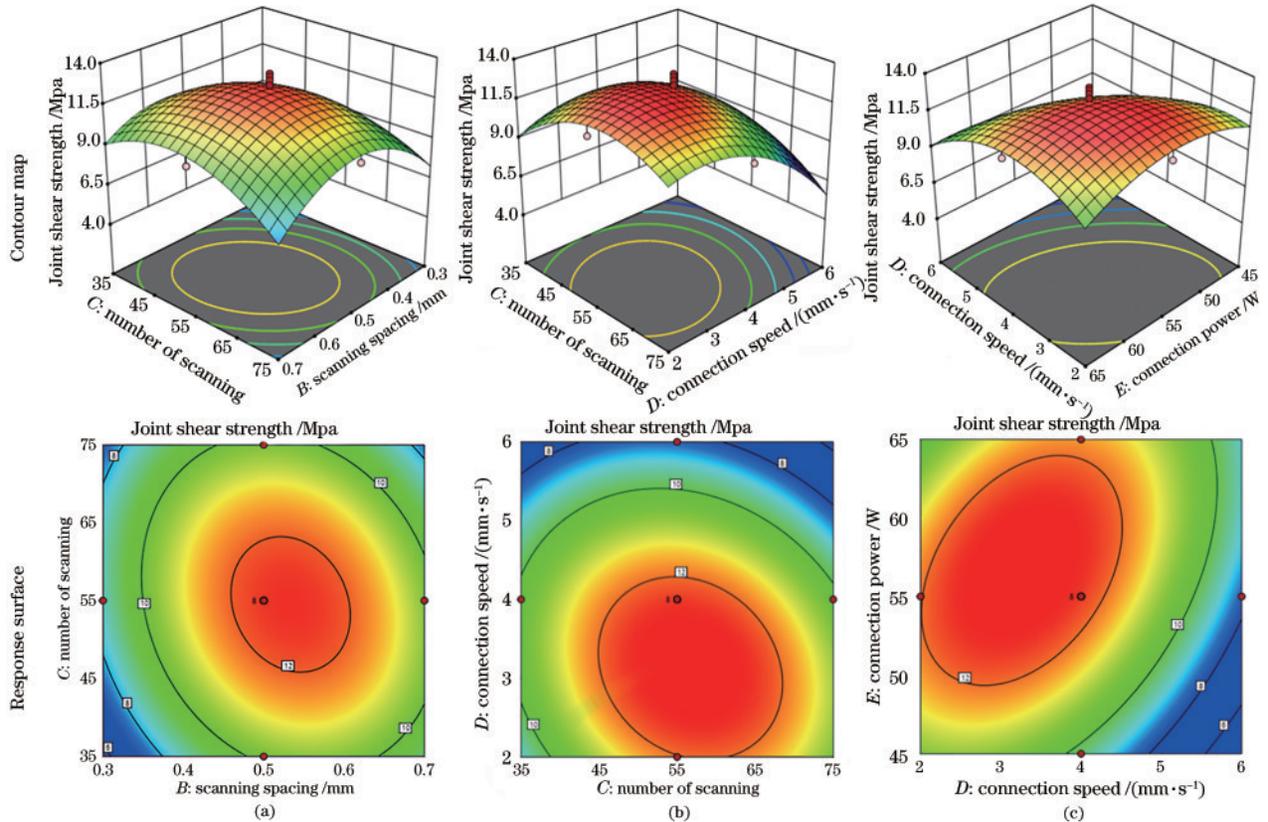


图 11 各因素对连接强度的交互式影响。(a)扫描间距和扫描次数;(b)扫描次数和连接速度;(c)连接速度和连接功率

Fig. 11 Interactive influence of various factors on connection strength. (a) Scanning spacing and number of sanning; (b) number of sanning and connection speed; (c) connection speed and connection power

时,接头剪切强度逐渐增加;当扫描次数和扫描间距分别超过 55 次和 0.5 mm 并继续增加时,接头强度开始降低。这是因为,随着扫描次数和扫描间距逐渐增大时,既扩大了微孔尺寸又提升了钛合金 TC4 表面与 PBTCF30 材料的接触传热面积,使得更多的熔融材料可以流入织构内,机械铆接更加显著。但是,当织构次数越来越大,微孔尺寸逐渐变大,孔内气体因受热逃逸会阻碍熔融状态的材料流入孔内,对形成机械铆接效应产生影响。同时,当扫描间距越来越大时,织构的密度逐渐减小,机械铆接效应减弱,降低接头剪切强度。

图 11(b)为 TC4 表面织构扫描次数和半导体连续激光器的连接速度对接头剪切强度的交互式影响图。图中显示,接头剪切强度最大时对应的织构扫描次数大约为 55 次,激光的连接速度在 3.5 mm/s 左右。当扫描次数由 35 次增大到 55 次或者激光连接速度从 6 mm/s 下降到 3.5 mm/s 时,接头剪切强度呈现逐渐增大的趋势;而当扫描次数持续增大到 75 次或者连接速度持续下降到 2 mm/s 时,接头剪切强度都会有小幅度的下降。由于扫描次数增大和连接速度减小,钛合金表面单位面积吸收热量增大,钛合金表面的沟槽尺寸也逐渐增大,沟槽内流入了更多的熔融 PBTCF30 材料,使得机械铆接效应越强,因此接头剪切强度明显增强;但是,当织构扫描次数过多时,微孔深度更大,孔

内气体的逃逸不利于 PBTCF30 的流入,对机械铆接产生影响。然而,连接速度过慢,会导致聚合物局部温度过高,分解现象加剧,形成大尺寸气泡,从而降低了连接强度。

图 11(c)为半导体连续激光器的连接速度及连接功率对接头剪切强度的交互式影响图,图中显示,接头剪切强度达到最大时,对应的连接功率约为 60 W,连接速度约为 3.5 mm/s。随着激光连接功率从 45 W 持续增加到 60 W 或者激光连接速度从 6 mm/s 降低至 3.5 mm/s 时,接头剪切强度呈现逐渐增大的趋势;当激光连接功率从 60 W 增加到 65 W 或者激光连接速度从 3.5 mm/s 降至 2 mm/s,接头剪切强度都会有小幅度的下降。这是由于连接功率增大以及连接速度减小,聚合物焊接部位温度升高,有助于聚合物的熔化和流动^[27],随着连接更加充分,接头剪切强度也随之增大。而激光功率过高、连接速度过慢都会导致聚合物单位面积内吸收的热量增多,进而导致聚合物产生热分解现象,产生大量气泡,破坏接头的连接质量。

5 连接工艺参数优化

5.1 APSSO 优化方法

2008 年, Yang 介绍了一种加速粒子群优化 (APSSO) 算法, 该算法是一种仅使用全局极值来进行

迭代优化收敛的简化算法,其核心中速度及位移更新公式分别为

$$V_i^{t+1} = V_i^t + \alpha [\text{rand}() - 0.5] + \beta (zbest - X_i^t), \quad (5)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}. \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)中可得位移公式为

$$X_i^{t+1} = (1 - \beta)X_i^t + \beta * zbest + \alpha [\text{rand}() - 0.5], \quad (7)$$

式中:rand()为介于(0,1)之间的随机常数;zbest为粒子的全局极值; α 的取值范围为0.1~0.4; β 的取值范围为0.1~0.7。一般取 $\alpha=0.2, \beta=0.5$;当然,为减少迭代中解的随机性, α 取值也可以如下式所示的单调函数:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\gamma t}, \quad (8)$$

$$\alpha = \alpha_0 \gamma^t, \quad (0 < \gamma < 1), \quad (9)$$

式中, α_0 的取值范围为0.5~1;当 $\gamma=0.7, \alpha_0=1$,迭代次数 $t \in [0, 10]$ 时, α 值可由下式得出:

$$\alpha = 0.7^t. \quad (10)$$

在APSO计算过程中,主要包括以下两个阶段:

1)初始化阶段。确定输入参数个数,即粒子维度。确定各参数位置、速度取值范围和初始种群中粒子个数和最大迭代次数。

2)迭代循环阶段。根据速度及位移核心公式迭代计算各粒子适应度值(fitness),其中个体历史极值的适应度值记为 fitnessgbest,全局最优解对应的适应度

值记为 fitnesszbest。在循环过程中,各粒子新一代速度及位置大小应及时调整,保证粒子各值在初始阶段限定范围内。

5.2 优化求解及验证

为获得最大连接强度和以最小预处理时间成本的方式下获得较强连接强度,进行单目标优化与多目标优化。优化准则分别如下:

优化准则 I:单目标优化——在仅考虑激光连接参数及织构预处理参数的条件下获得最大的连接强度。

优化准则 II:多目标优化——在预处理所需时间较短的情况下,得到较大的连接强度。

在优化前设置各所选变量和响应取值范围。在准则 I 条件下进行优化得到:将APSO算法的初始种群设为 100,将最大迭代次数设置为 50 次,粒子在第 6 代时寻得最优结果,此时预测连接强度为 12.74 MPa,预处理时间为 125.48 s,优化结果见表 3。在准则 II 条件下进行优化得到:将APSO算法的设初始种群设为 200,将最大迭代次数为 100 次,粒子在第 16 代时寻得最优结果,此时预测连接强度为 12.15 MPa,预处理时间为 75.95 s。相较于第 I 准则对应的单目标优化下的 12.74 MPa 和 125.48 s,预测连接强度下降了 4.6%,预处理时间减少了 39.5%,优化结果见表 4。

表 3 基于准则 I 的优化结果

Table 3 Optimization results based on criterion I

Type	No	A /mm	B /mm	C	D / (mm·s ⁻¹)	E /W	Joint shear strength /MPa	Pretreatment time /s
Single	1	0.2283	0.5313	58.4051	3.2403	56.9845	12.7406	125.4769

表 4 基于准则 II 的优化结果

Table 4 Optimization results based on criterion II

Type	No	A /mm	B /mm	C	D / (mm·s ⁻¹)	E /W	Joint shear strength /MPa	Pretreatment time /s
Multi	1	0.1663	0.5919	49.3482	3.2486	58.2796	12.1542	75.9517

分别对基于APSO算法的第 I 和第 II 准则下的工艺参数优化结果进行验证,并将实验结果分别列于表 5 和表 6 中。

从表 5 可以看出,使用APSO算法对准则 I 进行验证时,设置连接功率为 56.98 W、连接速度为

3.24 mm/s、织构扫描直径为 0.23 mm、扫描间距为 0.53 mm、扫描次数取整为 57 次时,得到的连接强度为 11.80 MPa,预处理时间为 128 s,与预测值之间存在的误差分别为 7.4% 和 2.0%。工艺参数优化后,接头连接强度相比于未优化前的最大值,提升了 12.1%。

表 5 优化准则 I 的结果验证

Table 5 Result verification of optimization criterion I

Type	A /mm	B /mm	C	D / (mm·s ⁻¹)	E /W	Joint shear strength /MPa			Pretreatment time /s		
						Actual	Predicted	σ	Actual	Predicted	σ
Single	0.23	0.53	57	3.24	56.98	11.80	12.741	7.4	128	125.477	2.0

表 6 优化准则 II 的结果验证

Table 6 Result verification of optimization criterion II

Type	A /mm	B /mm	C	D / (mm·s ⁻¹)	E /W	Joint shear strength /MPa			Pretreatment time /s		
						Actual	Predicted	σ	Actual	Predicted	σ
Multi	0.17	0.59	49	3.25	58.28	11.50	12.154	5.0	70	75.952	7.8

从表 6 可以看出,使用 APSO 算法对准则 II 进行验证时,设置连接功率为 58.28 W、连接速度为 3.25 mm/s、织构扫描直径为 0.17 mm、扫描间距为 0.59 mm、扫描次数取整为 49 次时,得到的连接强度为 11.55 MPa,预处理时间为 70 s,与预测值之间存在的误差值分别为 5.0% 与 7.8%。

在第 II 优化准则考虑预处理时间时,连接强度实测值相较于第 I 准则下降了 2.5%,预处理时间实测值减少了 45.3%。

6 结 论

本文主要结论如下:

1) 织构扫描直径、扫描间距和扫描次数均是先随着工艺参数水平的提高呈现先增加后减小的趋势;随着连接速度水平的提高,强度响应值从平缓状态逐渐越来越低且下降幅度越来越大;随着连接功率水平的提高,强度响应值越来越大且上升幅度越来越小,最终趋于平缓;织构扫描间距对预处理时间的影响最大,预处理时间随其水平的增大呈现下降趋势。另外,对于连接时所用参数连接速度和连接功率,织构预处理时间不随其变化而变化,所以呈现一条水平直线;

2) 连接功率超过一定数值以及连接速度过慢都会导致聚合物焊接部位温度过高,使聚合物热分解加剧,产生大量气泡,严重影响接头质量;

3) 扫描间距-扫描次数、扫描次数-连接速度、连接速度-连接功率这三个组合对接头强度的交互式影响最显著;

4) 预处理时间与连接强度模型数据及优化分析结果显示,实验所得数据与模型数据十分接近,表明模型是可靠的。

参 考 文 献

- [1] 刘国伟. 中国等 57 国将在 2030 年实现碳达峰 各国携手迈向碳中和[J]. 环境与生活, 2021(1): 8-23.
Liu G W. China and other 57 countries will join hands with peak carbon dioxide emissions countries to become carbon neutral by 2030[J]. Green Living, 2021(1): 8-23.
- [2] Zhang X S, Chen Y J, Hu J L. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [3] Zhang D W, Zhang Q, Fan X G, et al. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: applications and outlook[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(1): 44-54.
- [4] Chen Z, Huang Y, Han F L, et al. Numerical and experimental investigation on laser transmission welding of fiberglass-doped PP and ABS[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 1-8.
- [5] 刘敬元, 王琦, 韩东志, 等. CFRTP/Al 非接触超声辅助激光连接工艺研究[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(2): 3-8.
Liu J Y, Wang Q, Han D Z, et al. Study on CFRTP/Al

non-contact ultrasonic assisted laser joining process[J]. Fiber Composites, 2021, 38(2): 3-8.

- [6] 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): 1202004.
Wang Y, Shu L S, Geng S N, et al. Status and development trend of laser welding technology for automotive body[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1202004.
- [7] 刘东雷, 刘辉辉, 李品, 等. PBT 与 A5052 铝合金的激光直接连接工艺参数建模分析与优化[J]. 热加工工艺, 2021, 50(23): 123-129.
Liu D L, Liu H H, Li P, et al. Modeling analysis and optimization of laser direct bonding process parameters between PBT and A5052 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(23): 123-129.
- [8] 檀财旺, 苏健晖, 冯紫微, 等. 金属与塑料激光连接的研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 85-94.
Tan C W, Su J H, Feng Z W, et al. Research status and development on laser joining of metal to plastic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 85-94.
- [9] Reitz V, Meinhard D, Ruck S, et al. A comparison of IR- and UV-laser pretreatment to increase the bonding strength of adhesively joined aluminum/CFRP components [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 96: 18-27.
- [10] 周利, 秦志伟, 刘杉, 等. 热塑性树脂基复合材料连接技术的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3177-3183.
Zhou L, Qin Z W, Liu S, et al. Progress on joining technology of thermoplastic resin matrix composites[J]. Materials Reports, 2019, 33(19): 3177-3183.
- [11] Amancio-Filho S T, dos Santos J F. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: recent developments and trends[J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(8): 1461-1476.
- [12] Lambiase F, Paoletti A, Grossi V, et al. Improving energy efficiency in friction assisted joining of metals and polymers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 379-389.
- [13] Lionetto F, Mele C, Leo P, et al. Ultrasonic spot welding of carbon fiber reinforced epoxy composites to aluminum: mechanical and electrochemical characterization [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 144: 134-142.
- [14] 邹贵生, 桂成群, 王扬. “激光高性能连接技术与装备”专题前言[J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802000.
Zou G S, Gui C Q, Wang Y. Preface to the topic “laser high performance connection technology and equipment” [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(8): 0802000.
- [15] Chen Y J, Yue T M, Guo Z N. A new laser joining technology for direct-bonding of metals and plastics[J]. Materials & Design, 2016, 110: 775-781.
- [16] Zhang Z, Tan X H, Zhang J, et al. Suppression of shrinkage porosity in laser-joining of CFRP and steel using a laser surface modification process “Surfi-Sculpt®” [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 85: 184-192.
- [17] Wu J, Lu S, Wang H J, et al. A review on laser transmission welding of thermoplastics[J]. The International

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(7): 2093-2109.
- [18] 冯紫微, 周宝升, 张涛, 等. 铝合金与 CF/PA66 激光直接连接工艺及化学成键研究[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1303002.
Feng Z W, Zhou B S, Zhang T, et al. Investigation on laser direct joining of aluminum alloy-CF/PA66 and chemical bonding mechanism[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1303002.
- [19] Acherjee B. 3-D FE heat transfer simulation of quasi-simultaneous laser transmission welding of thermoplastics [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(10): 466.
- [20] Ai Y W, Zheng K, Shin Y C, et al. Analysis of weld geometry and liquid flow in laser transmission welding between polyethylene terephthalate (PET) and Ti6Al4V based on numerical simulation[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 99-108.
- [21] 徐洁洁, 王栋, 肖荣诗, 等. 纤维增强热塑性树脂基复合材料与金属激光连接研究进展[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 73-86, 102.
Xu J J, Wang D, Xiao R S, et al. Laser joining of fiber reinforced thermoplastic composites and metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 73-86, 102.
- [22] 龚郡, 魏昕, 钟世杰, 等. 基于排气通道的车身镀锌板激光叠焊工艺[J]. 激光技术, 2022, 46(1): 94-98.
Gong J, Wei X, Zhong S J, et al. Laser welding process of body galvanized sheet based on exhaust passage[J]. Laser Technology, 2022, 46(1): 94-98.
- [23] Jiao J K, Xu Z F, Wang Q, et al. CFRTP and stainless steel laser joining: Thermal defects analysis and joining parameters optimization[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 170-176.
- [24] 李静. 聚苯乙烯与钛激光透射连接机理、工艺与数值模拟研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
Li J. Joining mechanism, process study and numerical simulation on laser transmission joining of polystyrene and Ti[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [25] Georgiev D G, Baird R J, Newaz G, et al. An XPS study of laser-fabricated polyimide/titanium interfaces[J]. Applied Surface Science, 2004, 236(1/2/3/4): 71-76.
- [26] 刘保光, 王霄, 刘伟, 等. 激光透射点焊车用材料 PMMA 的工艺优化[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503004.
Liu B G, Wang X, Liu W, et al. Process optimization of laser transmission spot welding using material PMMA for automotive industry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0503004.
- [27] Acherjee B. Laser transmission welding of polymers-a review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 421-443.