

## 碳纤维增强复合材料与钛合金激光连接仿真

景若木, 徐洁洁, 肖荣诗, 黄婷\*

北京工业大学材料与制造学部高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

**摘要** 为了研究不同工艺参数对 TC4 钛合金与连续编织碳纤维增强聚醚醚酮基复合材料(CFPEEK)的激光焊接接头的影响规律,并对焊接工艺窗口进行预测,使用 ABAQUS 软件建立基于热传导的有限元仿真模型,计算 TC4 钛合金/CFPEEK 激光焊接接头的温度场分布。针对 CFPEEK 中连续编织碳纤维的实际铺层情况,在建模时对复合材料进行分层处理,将碳纤维层视为正交性质的材料。在此基础上探究了激光功率、焊接速度、光斑尺寸对焊缝熔化深度及宽度的影响规律,计算结果与实际试验结果吻合度较高,激光功率、焊接速度、光斑尺寸等工艺参数均对接头结合处的温度有较大影响。经过多组参数的计算,得到了 TC4 钛合金/连续编织 CFPEEK 激光连接的预测工艺窗口。结果表明,所建立的有限元模型能够有效模拟连续编织 CFPEEK 与 TC4 钛合金激光连接的温度场分布,对实际试验有一定指导意义,可降低试验成本。

**关键词** 激光技术; 激光连接; 碳纤维增强复合材料; TC4 钛合金; 数值模拟

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221001

## 1 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)是目前最先进的复合材料之一,其中连续编织碳纤维增强聚醚醚酮基复合材料(CFPEEK)具有优良的力学性能以及尺寸稳定、耐腐蚀、耐水解、耐高温等特点,在航空航天领域有广泛的应用<sup>[1]</sup>。钛合金具有比强度高、抗拉强度高以及耐腐蚀等优点,在航空工业中的用量占比越来越高<sup>[2]</sup>。在现代航空工业装备的轻量化结构设计制造中,CFRP 与钛合金的接头在飞机机身后部、活动机翼、进气道等结构中的应用越来越广泛<sup>[3]</sup>,CFRP 与钛合金的有效连接变得至关重要。

目前,CFRP 与金属材料的连接主要有机械连接、胶接、焊接等方法,其中机械连接、胶接等方式存在应力集中、工艺周期长、易老化等问题<sup>[4]</sup>。国内外学者采用钎焊、搅拌摩擦焊、超声波焊等技术开展复合材料与金属连接的研究,其中激光焊接/连接具有工艺周期短、热影响区小、柔性高等优点,在异种材料连接方面具有显著优势<sup>[5-7]</sup>,受到广泛关注<sup>[8-13]</sup>。激光连接主要是利用激光束照射金属材料表面,热量向下传导至金属与复合材料的界面处,复材表面的树脂发生熔化,熔融树脂填充金属和复合材料的界面形成连接接头。因此,激光连接过程中界面处的温度至关重要,是影响接头质量的重要因素。界面处温度应高于树脂的熔融温度并低于其热解温度,避免低温造成树脂未熔或高温

热解引起接头气孔等缺陷<sup>[14]</sup>。此外,钛元素对异种材料界面的结合性和分布特征也有一定影响<sup>[14]</sup>。目前,主要通过大量的激光连接试验获得满足界面温度要求的工艺参数<sup>[15-17]</sup>。例如,Wang 等<sup>[18]</sup>进行 AA2060/CFRP 激光连接试验研究时,通过改变激光功率(1~5 kW)、焊接速度(5~140 mm/s)确定了激光连接工艺窗口,获得了实现无缺陷连接接头的优化工艺参数。

工艺探索试验费时费力,通过模拟来预测金属与复合材料激光连接的温度场,可以为实际试验选择合适的工艺参数,节省工艺试验的时间成本,获得优异的接头质量<sup>[19-21]</sup>。例如,Rodríguez-Vidal 等<sup>[22]</sup>建立了有限元模型,对 DP1000 双相钢和玻璃纤维增强 PA6 基复合材料激光连接温度场进行模拟计算,得到了连接过程中复合材料一侧达到的最高温度,并依此将参数划分为不同区域,获得了激光连接的工艺窗口。Wang 等<sup>[23-26]</sup>主要以聚苯硫醚(PPS)为基底的 CFRP 与不锈钢之间的激光连接进行了一系列的研究,建立了 CFRP/不锈钢数值模拟模型,根据模拟计算结果探究了激光功率、焊接速度以及光斑直径对焊缝熔化宽度、焊接深度的影响规律。Jiao 等<sup>[27-28]</sup>在 CFRP 与 7075 铝合金的激光连接研究中,对激光搅拌焊接的温度场进行了仿真分析,进一步明确了激光搅拌焊接对减少接头气孔的作用。在钛合金与 CFPEEK 激光连接方面,Tan 等<sup>[29-31]</sup>针对短碳纤维增强复合材料与 TC4 的激光连接进行了研究,探讨了激光扫描速度、离焦量等参数

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-08-21; 录用日期: 2022-09-07; 网络首发日期: 2022-09-21

基金项目: 北京市自然科学基金-北京市教育委员会科技发展计划重点项目(KZ202010005011)

通信作者: \*huangting@bjut.edu.cn

对异质接头强度的影响。激光连接温度场模拟结果表明,由于熔融树脂的增加,连接宽度随着激光直径的增大而增大,与实际接头界面处焊缝宽度的变化规律一致。

目前大多数模拟工作将CFRP视为各向同性的均质材料。与短碳纤维增强复合材料相比,连续编织纤维增强复合材料在纤维分布方式、树脂与纤维比例等方面均有很大差别,均质材料的假设条件不再适用。可对连续编织纤维层与树脂层进行分层处理,假设编织纤维层与树脂层厚度一致且碳纤维层各向同性<sup>[23-26]</sup>。由于实际情况中纤维铺层与树脂层厚度不同,纤维铺层方向也不同,为了进一步提高计算精确性,本文使用ABAQUS软件建立了TC4/CFPEEK激光连接的三维有限元分析模型,对典型激光连接参数

下接头的温度场分布进行计算,并进行实际连接试验对比模拟结果,验证该模型的准确性,最后通过模型预测激光连接工艺窗口。

## 2 有限元数值模拟模型

金属与复合材料的激光连接是基于激光热传导模式(图1)的,激光照射在金属表面,金属吸收激光能量并将热量向下传递,当足够的热量传递到金属与复合材料的接触面时,复材表面的树脂熔化,在压力作用下填充金属和复材界面,形成激光连接接头。相比激光圆形光斑,矩形光斑的能量分布更均匀,可获得更大焊缝宽度和更好的力学性能<sup>[18]</sup>,故采用矩形光斑作为热源。如图1所示, $l$ 和 $w$ 分别为光斑的长度和宽度, $F$ 为装卡压力。

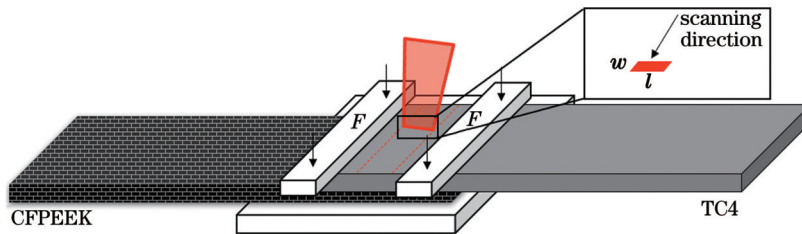


图1 TC4/CFPEEK激光连接示意图

Fig. 1 Schematic of TC4/CFPEEK laser joining

图2(a)为连续编织CFPEEK的表面形貌,可以看出,碳纤维层由 $0^\circ$ 与 $90^\circ$ 方向排布的纤维交叉编织而成,因此在建立三维模型时,将碳纤维层视为水平方向与垂直方向热物理性质相差较大的正交材料。

由复合材料的截面[图2(b)]可知,碳纤维层与PEEK树脂层交替铺放。其中,聚醚醚酮(PEEK)层的平均厚度为0.1 mm,碳纤维层的平均厚度为0.2 mm。

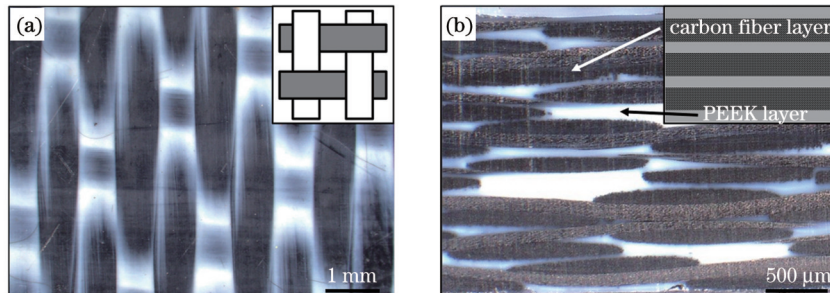


图2 CFPEEK形貌图。(a)表面;(b)截面

Fig. 2 Microstructures of CFPEEK. (a) Surface; (b) cross section

根据以上原理以及实际试验中的工况,在有限元模型中作出如下假设:

- 1) TC4钛合金与CFPEEK的初始温度以及环境温度均为 $25^\circ\text{C}$ ;
- 2) 忽略焊接过程中TC4钛合金的熔池流动情形;
- 3) CFPEEK中的树脂层厚度一致,纤维层厚度一致,且树脂层为各向同性的均质材料,纤维层为正交性质的材料;
- 4) 矩形光斑的能量均匀分布,且作用在TC4钛合金表面;
- 5) TC4钛合金与CFPEEK之间不存在装配间隙。

对于各向同性的连续介质,模型中材料随温度变化的热导率已由材料属性给出,可视为常数,并且不存在内热源,热传导的偏微分方程可简化为

$$\begin{cases} \frac{\delta t}{\delta \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \\ \alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为导温系数; $\lambda$ 为材料导热系数; $\rho$ 为材料密度; $c$ 为材料比热容; $t$ 为温度; $\tau$ 为时间。考虑到实际激光连接试验中夹具与TC4钛合金之间、CFPEEK与金属

基板之间均存在热传导,且其他部分与周围空气存在对流换热,在模型中采用第三类边界条件:

$$-\lambda \left( \frac{\delta t}{\delta n} \right)_w = h(t_w - t_f), \quad (2)$$

式中: $\delta t/\delta n$ 为温度梯度; $h$ 为表面换热系数; $t_f$ 为环境温度; $t_w$ 为边界面温度。

激光热源通过 Fortran 软件实现加载及移动,矩形光斑的热流密度函数为

$$Q = \frac{AP}{lw}, \quad (3)$$

式中: $P$ 为激光功率; $A$ 为 TC4 钛合金对激光的吸收率,由分光光度计测试确定为 40%。为了提高模拟结果的精确性,同时兼顾计算效率,网格大小采用梯度划分,如图 3(a)所示,接头中心加载的热源区域的网格尺寸最小,其余区域的网格尺寸逐渐增大。TC4 模块中光斑辐照区域的网格大小为  $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times$

$0.25 \text{ mm}$ ,热源加载区域两侧的搭接区域的网格大小为  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,其余部分的网格大小为  $1.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  [图 3(b)]。图 3(c)为 CFPEEK 的网格划分。PEEK 层、碳纤维层的网格高度与其厚度相同,由图 2(b)可知分别为  $0.1 \text{ mm}$  和  $0.2 \text{ mm}$ ;网格的长宽尺寸与 TC4 模块保持一致。具体网格划分如下:CFPEEK 模块中光斑照射宽度区域的网格大小为  $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.10 \text{ mm}$  (PEEK 层) 和  $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.20 \text{ mm}$  (碳纤维层),两侧的搭接区域的网格尺寸为  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}/0.2 \text{ mm}$ ,其余部分的网格尺寸为  $1.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}/0.2 \text{ mm}$ 。根据 CFPEEK 中碳纤维层的编织特点,将其设置为正交材料,模型水平方向(即  $x$ 、 $z$  方向)为纤维轴向,垂直方向( $y$  方向)为纤维径向,据此设置碳纤维层的热导率。有限元模型中所用到的参数如表 1 所示。

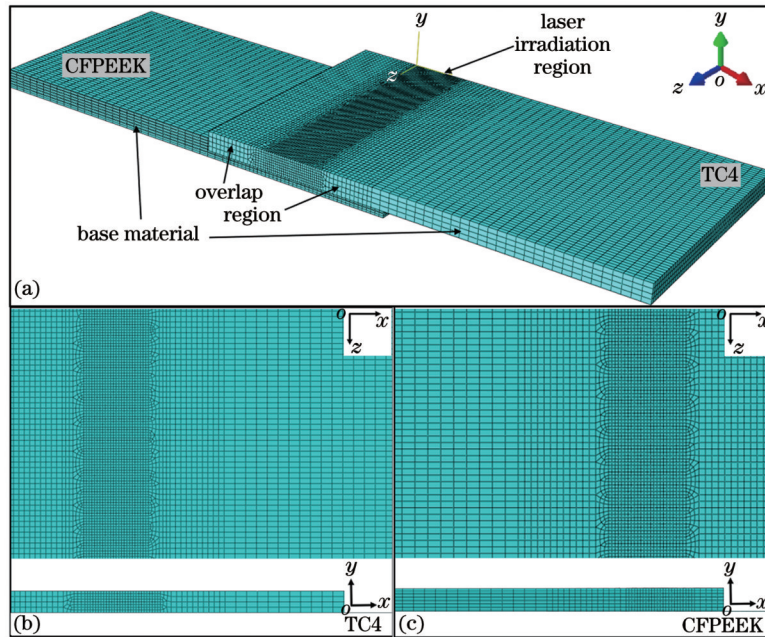


图 3 有限元模型。(a)三维模型;(b)CFPEEK 网格划分;(c)TC4 网格划分

Fig. 3 Finite element model. (a) Three-dimensional model; (b) CFPEEK grid division; (c) TC4 grid division

表 1 有限元模拟中的主要参数

Table 1 Main parameters used in finite element simulation

| Material                     | Temperature / $^{\circ}\text{C}$ | Thermal conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | Density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | Melting temperature and pyrolysis temperature / $^{\circ}\text{C}$ |
|------------------------------|----------------------------------|---|--|---|--|
| TC4                          | 25                               | 15.5  | 0.56   | 4.4   | Melting: 1690  |
|                              | 1050                             | 25  | 0.80   | —   |  |
|                              | 1690                             | 35.6  | 1.23   | —   |  |
|                              | 1710                             | 32.4  | 9.21   | 4   |  |
|                              | 1720                             | 30  | 0.97   | —   |  |
| PEEK <sup>[32]</sup>         | —                                | 0.25  | 2.2  | 1.3   | Melting: 343<br>Pyrolysis: 500                                     |
| Carbon fiber <sup>[33]</sup> | —                                | 10 (axial direction)<br>1 (radial direction)                                  | 0.71   | 1.76  | —  |

### 3 模型验证

#### 3.1 试验材料与激光参数

TC4 钛合金和 CFPEEK 的尺寸分别为  $60\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  和  $60\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。试验前使用丙酮去除 TC4 钛合金表面油污,使用无水乙醇去除 CFPEEK 表面污渍,然后置于干燥箱内在  $100\text{ }^\circ\text{C}$  下保温 6 h。激光连接试验采用光纤激光器,激光波长为  $1070\text{ nm}$ ,准直镜焦距为  $200\text{ mm}$ 。通过积分镜进行光束整形,得到矩形光斑,积分镜焦距为  $200\text{ mm}$ ,光斑尺寸为  $0.6\text{ mm} \times 5.8\text{ mm}$ 。为防止激光反射至光路,将激光光束倾斜  $15^\circ$ 。试验时采用氩气(流量为  $25\text{ L/min}$ )对激光作用区进行保护。在激光功率为  $3500\text{ W}$ 、焊接速度为  $5\sim 40\text{ mm/s}$  时进行激光连接试验,将实际连接结果与对应参数下的模拟结果进行对比,以验证模型的准确性。

#### 3.2 试验结果及模拟结果

试验结果表明,当激光功率为  $3500\text{ W}$  时,焊接速度( $v$ )在  $10\sim 35\text{ mm/s}$  之间可以形成外观良好的接头。图 4 所示的焊缝中心线截面的温度场云图( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=15\text{ mm/s}$ )显示,由于 TC4 钛合金的热导率较低,当上方的钛合金达到最大熔深时,热量传导严重滞后,此时正下方的复材温度未能达到熔点,即在激光扫描过程中 TC4 与 CFPEEK 不能同时达到最大熔深,因此将两种材料的试验和模拟结果分别进行对比。

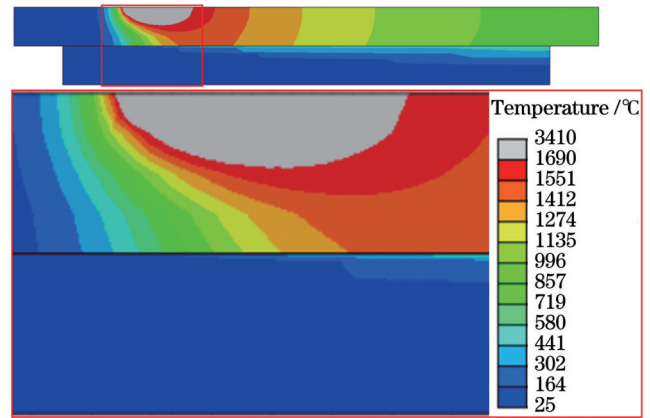


图 4 焊缝中心线截面的温度场云图( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=15\text{ mm/s}$ )  
Fig. 4 Temperature field of weld centerline section ( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=15\text{ mm/s}$ )

图 5 所示为 TC4 钛合金与 CFPEEK 的实际熔深与温度场云图对比( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=10\sim 20\text{ mm/s}$ )。根据 TC4 钛合金的熔点( $1690\text{ }^\circ\text{C}$ )以及 PEEK 树脂的熔化温度( $343\text{ }^\circ\text{C}$ )分别设置云图显示温度上限,即可得到 TC4 的熔深以及 CFPEEK 模块中树脂的熔化区域。TC4 钛合金一侧的实际熔池深度与模拟计算所得的结果较为接近。对于复合材料一侧,在实际样品横截面中可以看出,熔化后的树脂由原来的浅色变为深色,并且在 PEEK 层中存在凝固时产生的气泡,据此判

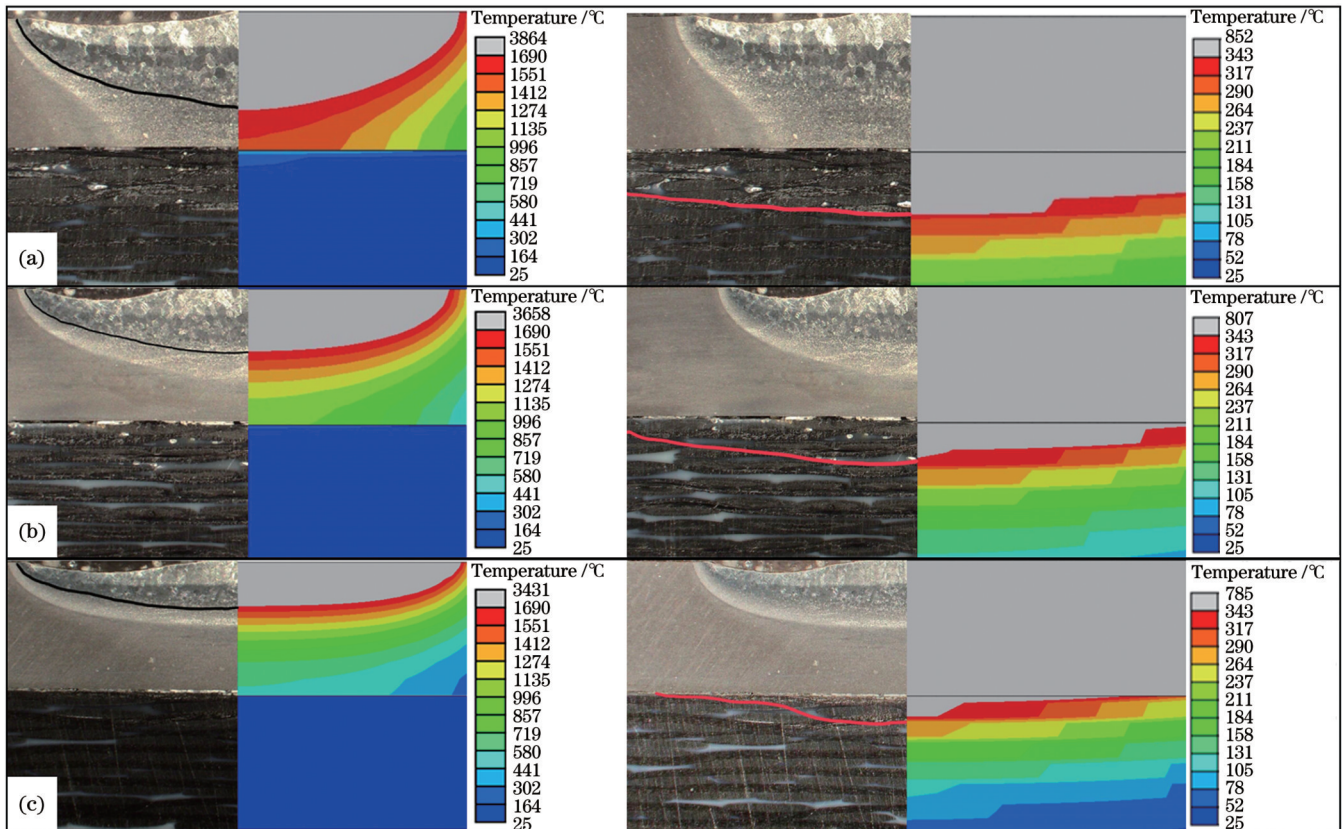


图 5 TC4(左)与 CFPEEK(右)的实际熔深与模拟熔深的对比( $P=3500\text{ W}$ )。(a)  $v=10\text{ mm/s}$ ; (b)  $v=15\text{ mm/s}$ ; (c)  $v=20\text{ mm/s}$   
Fig. 5 Comparison between experimental depth and simulated melting depth for TC4 (left) and CFPEEK (right) ( $P=3500\text{ W}$ ). (a)  $v=10\text{ mm/s}$ ; (b)  $v=15\text{ mm/s}$ ; (c)  $v=20\text{ mm/s}$

断CFPEEK中树脂的实际熔化深度与计算结果相近。

将TC4/CFPEEK激光连接接头拉断,接头断口CFPEEK表面形貌如图6(a)所示,可以清晰地看到复材表面的熔化区域。图6(b)~(g)为焊接速度为10~35 mm/s时CFPEEK实际熔化区域与对应位置的温度场云图,复合材料表面的实际树脂熔化宽度与云图中复材表面在343℃以上的区域宽度相近,进一步证

明模拟计算结果与实际试验结果吻合良好。图7表明,在激光功率为3500 W、焊接速度为10~35 mm/s的参数范围内,复合材料表面树脂熔化宽度的计算值和试验值均吻合较好。计算值和试验值的微小差别主要是由于模型没有考虑表层熔化树脂在夹具压力作用下的流动以及TC4钛合金的熔池流动对热量传导产生的影响。

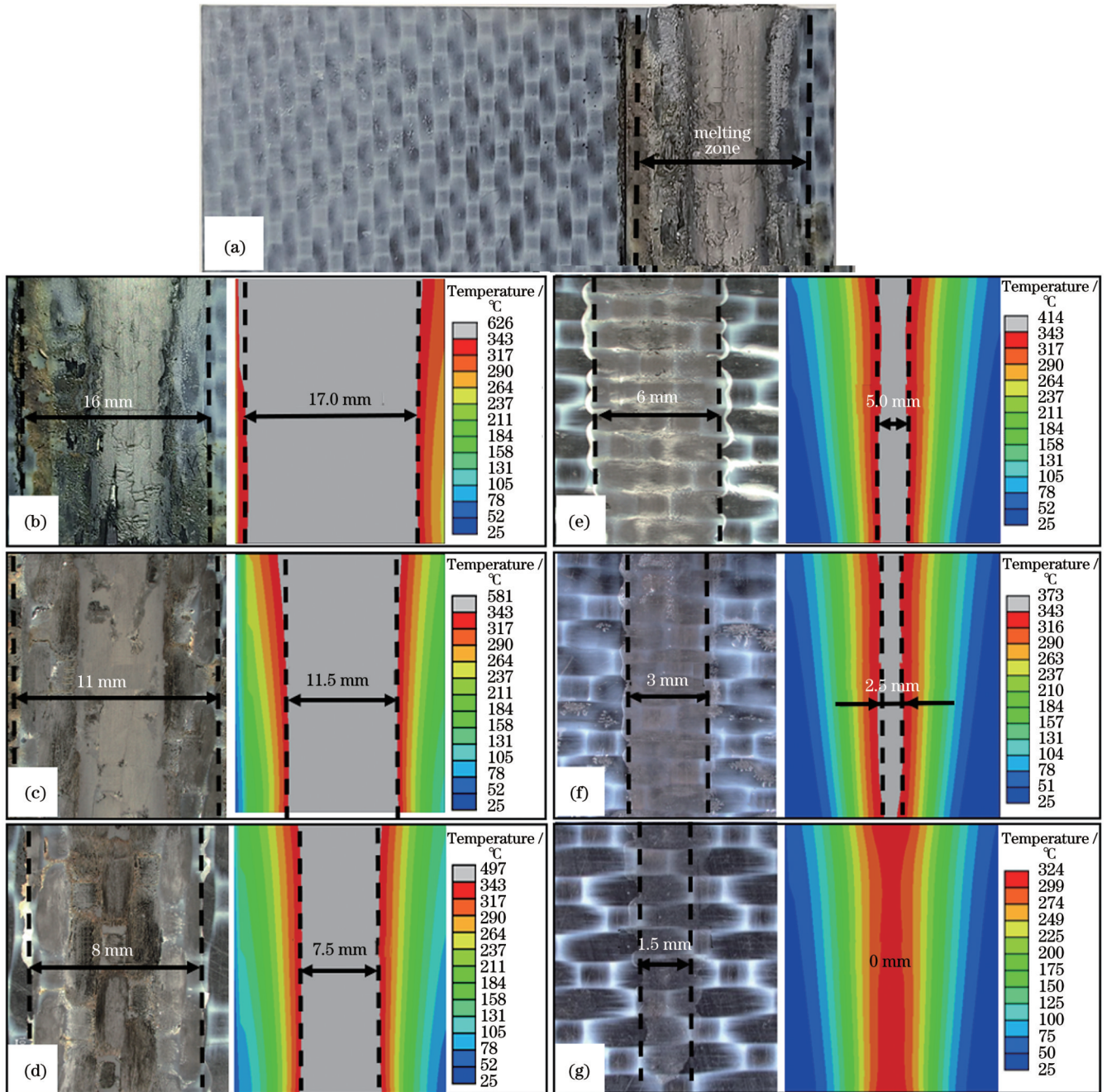


图6 CFPEEK表面实际熔化区域与对应的温度场云图( $P=3500\text{ W}$ )。(a)激光连接接头断口处的CFPEEK表面形貌;(b) $v=10\text{ mm/s}$ ;(c) $v=15\text{ mm/s}$ ;(d) $v=20\text{ mm/s}$ ;(e) $v=25\text{ mm/s}$ ;(f) $v=30\text{ mm/s}$ ;(g) $v=35\text{ mm/s}$

Fig. 6 Actual melting area on CFPEEK surface and corresponding temperature field cloud image ( $P=3500\text{ W}$ ). (a) Surface morphology of CFPEEK at fracture of laser joint; (b)  $v=10\text{ mm/s}$ ; (c)  $v=15\text{ mm/s}$ ; (d)  $v=20\text{ mm/s}$ ; (e)  $v=25\text{ mm/s}$ ; (f)  $v=30\text{ mm/s}$ ; (g)  $v=35\text{ mm/s}$

综合以上试验与模拟结果分析,数值模拟计算所得的温度场分布与试验结果吻合良好,此有限元模型

可为TC4/CFPEEK激光连接的工艺试验提供指导。

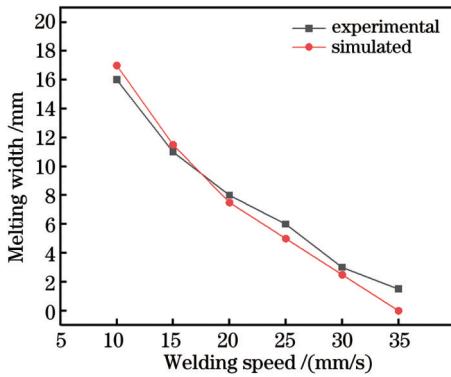


图7 CFPEEK表层树脂熔宽的试验值与计算值

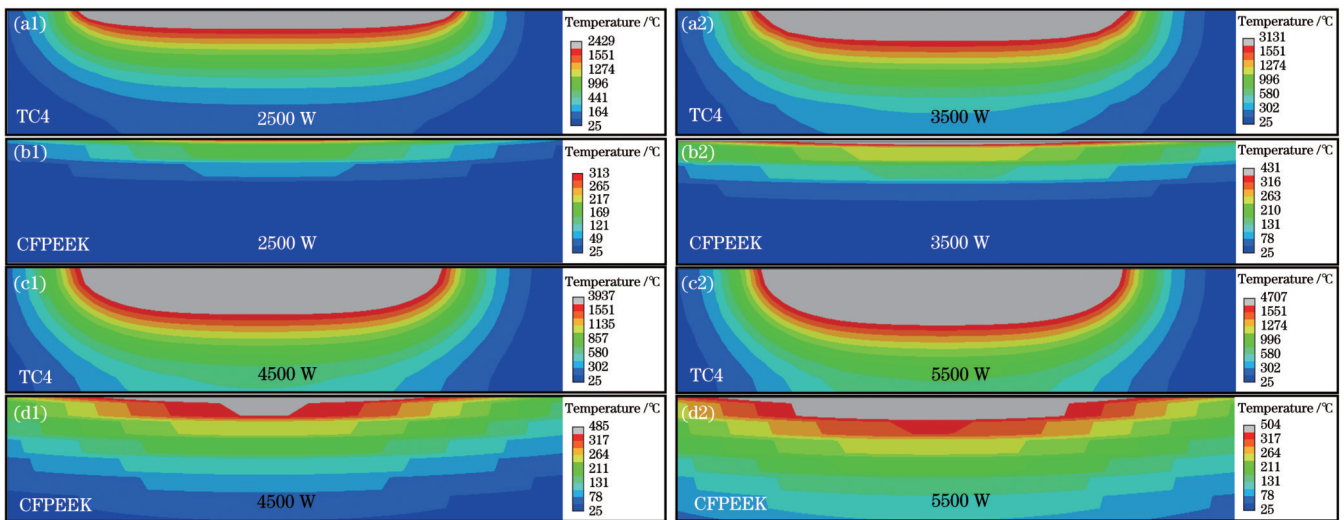
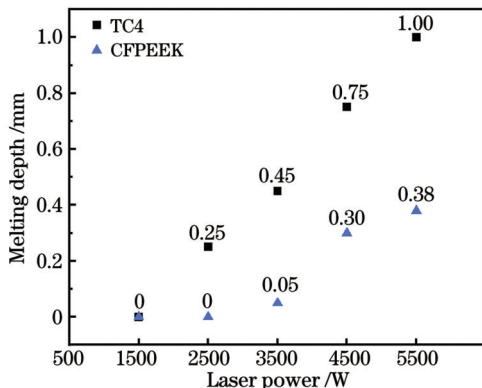
Fig. 7 Experimental and simulated resin melting width on CFPEEK surface

## 4 模拟结果及讨论

### 4.1 激光功率对焊缝的影响

在相同焊接速度下,增大激光功率,焊接线能量增加,焊缝获得的热输入增加。当焊接速度为 25 mm/s,

光斑尺寸为 0.6 mm×5.8 mm 时, TC4 钛合金与 CFPEEK 在激光功率为 1500~5500 W 时的温度场分布如图 8 所示,由此获得的熔化深度随激光功率的变化规律如图 9 所示。随着激光功率的增加,TC4 钛合金和 CFPEEK 的熔化深度均增加,CFPEEK 表层树脂的熔化区域逐渐增大。当激光功率为 1500 W 和 2500 W 时,热输入过小,接头结合面的热量不足,CFPEEK 表面树脂未达到熔点,熔化深度为 0 mm;当激光功率为 3500 W 时,树脂熔深为 0.05 mm,表层仅有少量树脂发生熔化,此时满足形成接头的条件但接头强度较低;当激光功率为 4500 W 时,熔深为 0.30 mm,由于碳纤维层的厚度为 0.2 mm,可知表层树脂全部熔化,此时满足形成接头的条件且接头强度较高;当激光功率为 5500 W 时,熔深为 0.38 mm,此时第二层树脂也发生熔化,树脂熔化量充足,但是 CFPEEK 达到树脂热分解温度(500 °C)的深度为 0.05 mm,说明表层有部分树脂发生热分解,引起的接头气孔等缺陷将降低接头强度。

图8 不同激光功率下 TC4 与 CFPEEK 的温度云图( $v=25$  mm/s)Fig. 8 Temperature fields of TC4 and CFPEEK under different laser powers ( $v=25$  mm/s)图9 不同激光功率下 TC4 与 CFPEEK 的熔化深度( $v=25$  mm/s)Fig. 9 Melting depths of TC4 and CFPEEK under different laser powers ( $v=25$  mm/s)

在图 10(a)所示路径上,由焊缝中心向两侧每隔 2 mm 设置一个取样点,分别提取各点的温度循环数据,再选取各点在热循环过程中的最高温度,得到图 10(b)所示的结合面处 CFPEEK 表层树脂的最高节点温度分布曲线,可以进一步说明激光功率对热输入的影响。当激光功率为 1500 W 和 2500 W 时,热输入不足,整个结合面的树脂最高温度均在熔点以下;当激光功率为 3500 W 时,CFPEEK 表面达到熔点以上温度的宽度为 4.5 mm,小于光斑长度 5.8 mm;当激光功率为 4500 W 时,CFPEEK 表面达到熔点以上温度的宽度为 7.5 mm,并且最高温度低于热分解温度,此时接头处于适当的热输入工况下;当激光功率为 5500 W 时,CFPEEK 表面达到熔点以上温度的宽度为 9.0 mm,并且达到树脂热分解温度(500 °C)以上的宽度为 5.0 mm,

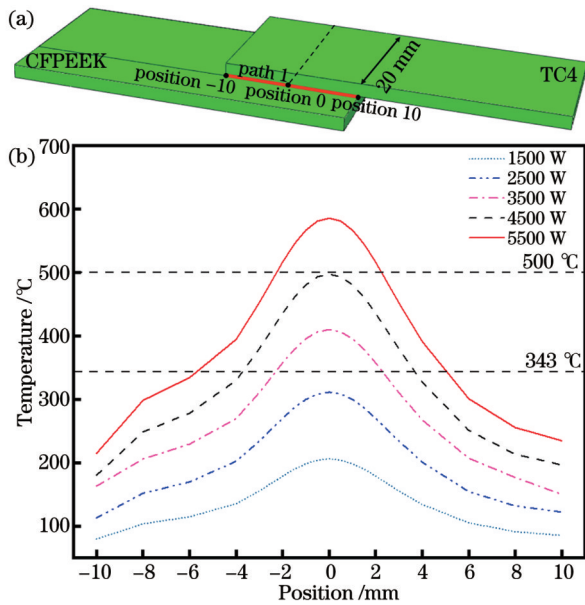


图10 CFPEEK表层的树脂温度分布。(a)温度数据提取路径示意图;(b)不同激光功率下CFPEEK表层树脂温度分布( $v=25$  mm/s)

Fig. 10 Temperature distributions of resin on CFPEEK surface. (a) Schematic of temperature data extraction; (b) temperature distributions of resin on CFPEEK surface under different laser powers ( $v=25$  mm/s)

即有部分树脂发生热分解,热输入过大。

由以上结果可以看出,在相同的焊接速度与光斑尺寸下,激光功率越高,热输入越大,CFPEEK的熔深越深,熔化宽度越大,即熔化量越大。当焊接速度为25 mm/s、光斑尺寸为 $0.6\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$ 时,3500 W与4500 W的激光功率可使接头获得适当的热输入,形成较高质量的接头。

#### 4.2 焊接速度对焊缝的影响

在相同激光功率下,增大焊接速度,焊接线能量减少,焊缝获得的热输入减少。在激光功率为3500 W,光斑尺寸为 $0.6\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$ 的条件下,TC4钛合金与CFPEEK在焊接速度为5~40 mm/s时的温度场云图如图11所示,熔化深度随焊接速度的变化规律如图12所示。当焊接速度为5 mm/s时,TC4钛合金的熔化深度达到2 mm,即整个板材完全熔透,CFPEEK表面树脂温度接近 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ,远高于树脂热分解温度,更深层的树脂也发生了熔化;当焊接速度为10 mm/s时,CFPEEK熔化深度为0.92 mm,考虑碳纤维层厚,此时复材中四层树脂发生了熔化;当焊接速度分别为15、20、25、30 mm/s时,CFPEEK熔化深度分别达到0.41、0.31、0.05、0.01 mm,即分别有2、2、1、1层树脂发生熔化;当焊接速度达到35 mm/s及以上时,复材中树脂均未发生熔化。

图13为焊缝中心CFPEEK表面同一节点在不同焊接速度下的温度循环曲线。由于TC4钛合金较低的导热率,当焊接速度较高时,该点的温升速率较低,

随着焊接速度的降低,该点的最高温度升高,温升速度加快,能够在更短时间内达到熔化温度,并且能在熔化温度以上保持更长的时间,吸收更多热量,即有更多树脂发生熔化。

在搭接宽度范围内,按图10(a)所示位置取不同速度下CFPEEK表层树脂的最高节点温度(图14),随着焊接速度的增加,CFPEEK表层树脂的熔化宽度逐渐减小,直至热输入过小,表层树脂无法熔化。当焊接速度为5 mm/s时,整个搭接面的树脂都发生了热分解,强烈的热分解会产生大量气体,导致焊缝出现较严重缺陷。随着焊接速度增加至10 mm/s,整个搭接区域CFPEEK表层均达到树脂熔点温度,但是达到热分解温度的区域宽度也达到10 mm,进一步增加焊接速度至15 mm/s,CFPEEK表层达到树脂热分解温度以上的宽度仍有6 mm,此时热输入仍过大。当焊接速度为20~30 mm/s时,适中的热输入使表层树脂熔化,同时不发生热分解。当焊接速度达到35 mm/s及以上时,整个搭接区域的树脂温度均不能达到熔点,树脂不能熔化,即无法形成接头。

由以上结果可以看出,在相同激光功率及光斑尺寸下,焊接速度越低,复材树脂熔化深度以及熔化宽度均增大,熔化量增大。当激光功率为3500 W、光斑尺寸为 $0.6\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$ 时,20~30 mm/s是较为合理的焊接速度范围。

#### 4.3 光斑大小对焊缝的影响

为了获得光斑大小的影响情况,结合实际试验工况中的光斑尺寸调节范围,将光斑大小设为 $1.2\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$ ,并与 $0.6\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$ 光斑的温度场分布进行对比。当激光功率为3500 W、焊接速度为20 mm/s时,两种光斑尺寸下焊缝中心CFPEEK表面节点温度曲线如图15所示。当光斑宽度为0.6 mm时,CFPEEK表面温度介于树脂熔点和热分解温度之间;当光斑宽度为1.2 mm时,由于激光功率不变,光斑尺寸增加,因此能量密度降低,CFPEEK表面温度未达到树脂的熔化温度。图16为按图10(a)所示位置提取到的两种光斑尺寸下沿搭接宽度方向的CFPEEK表层树脂温度分布,可以看出,在相同激光功率和焊接速度下,随着光斑尺寸的增大,能量密度减小,焊缝中心的温度降低。当光斑宽度为0.6 mm时,表层树脂熔化宽度为8 mm,仅有少量树脂热分解,形成了接头。当光斑宽度为1.2 mm时,由于能量密度减小,结合面没有足够热量,树脂温度未达到熔化温度,无法形成接头。

#### 4.4 TC4钛合金与CFPEEK的激光连接工艺窗口

根据PEEK树脂的熔化温度与热分解温度,定义CFPEEK表面温度小于 $343\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况为热输入不足情况,此时不能形成接头;CFPEEK表面温度为 $343\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况为适当热输入情况,此时可以获得良好的接头;CFPEEK表面温度高于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况为过量

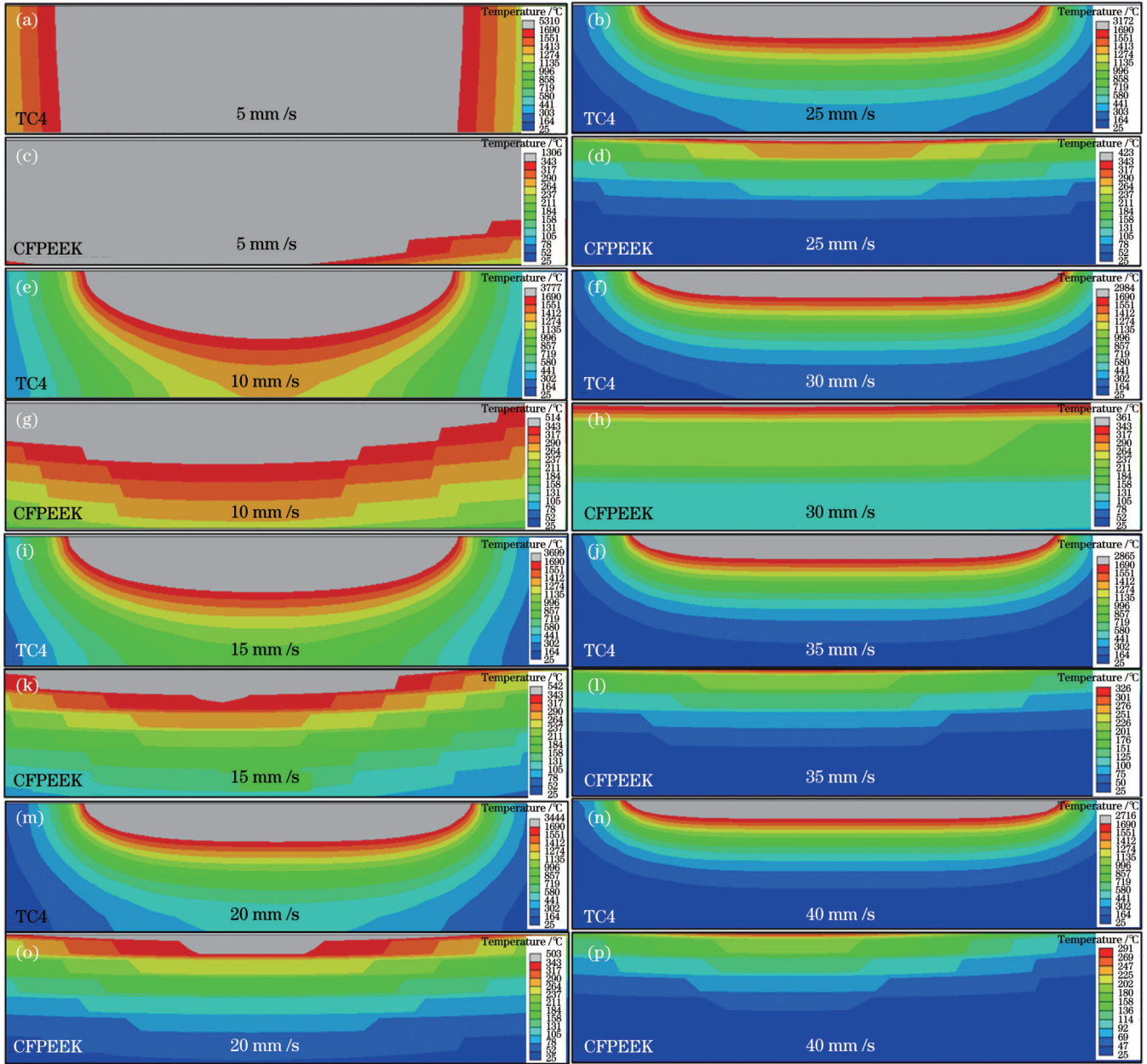


图 11 不同焊接速度下的温度场云图 ( $P=3500\text{ W}$ )

Fig. 11 Temperature fields under different welding speeds ( $P=3500\text{ W}$ )

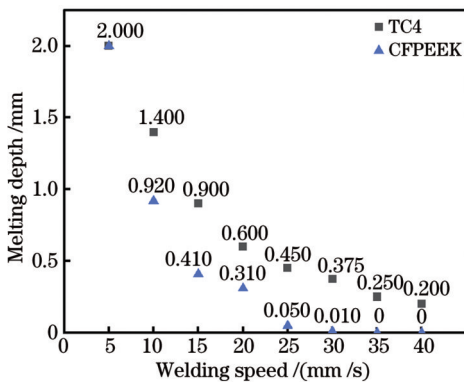


图 12 不同焊接速度下 TC4 与 CFPEEK 的熔化深度 ( $P=3500\text{ W}$ )

Fig. 12 Melting depths of TC4 and CFPEEK under different welding speeds ( $P=3500\text{ W}$ )

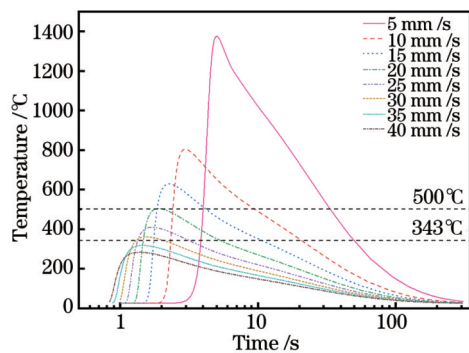


图 13 不同焊接速度下焊缝中心 CFPEEK 表面的节点温度曲线 ( $P=3500\text{ W}$ )

Fig. 13 Temperature curves of nodes located at welding centerline on CFPEEK surface under different welding speeds ( $P=3500\text{ W}$ )



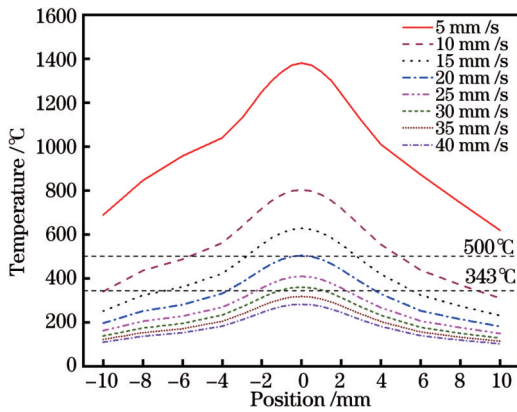


图 14 不同焊接速度下沿搭接宽度方向的 CFPEEK 表层树脂温度分布 ( $P=3500\text{ W}$ )

Fig. 14 Temperature distributions of resins on CFPEEK surface along lap width direction under different welding speeds ( $P=3500\text{ W}$ )

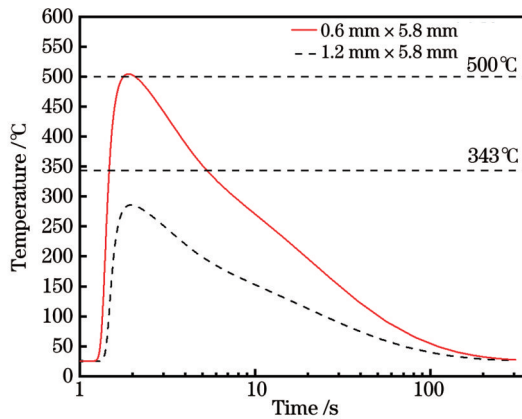


图 15 不同光斑尺寸下焊缝中心 CFPEEK 表面的节点温度曲线 ( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=20\text{ mm/s}$ )

Fig. 15 Temperature curves of nodes located at welding centerline on CFPEEK surface under different beam sizes ( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=20\text{ mm/s}$ )

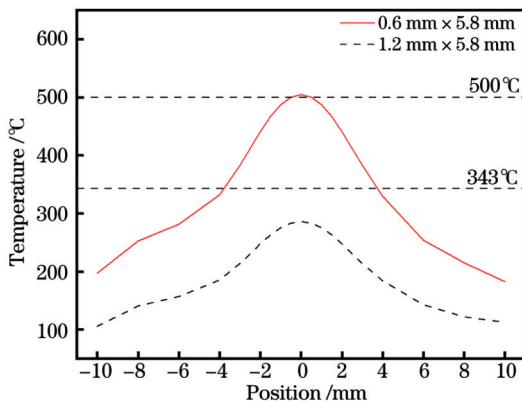


图 16 不同光斑尺寸下沿搭接宽度方向的 CFPEEK 表层树脂温度分布 ( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=20\text{ mm/s}$ )

Fig. 16 Temperature distributions of resins on CFPEEK surface along lap width direction under different beam sizes ( $P=3500\text{ W}$ ,  $v=20\text{ mm/s}$ )

热输入情况,此时接头中存在气孔等缺陷,影响接头质量。由此得到的 TC4 钛合金与 CFPEEK 的激光连接

工艺窗口如图 17 所示。在相同光斑尺寸下,随着激光功率的提高,得到适当热输入的焊接速度范围变大,因此提高激光功率可以实现更快速度的焊接。采用更小的光斑尺寸 ( $0.6\text{ mm} \times 5.8\text{ mm}$ ),能够形成良好接头的工艺窗口更大。当激光功率相同时,在更小的光斑尺寸下可以通过更高的焊接速度来完成激光连接,连接效率更高。

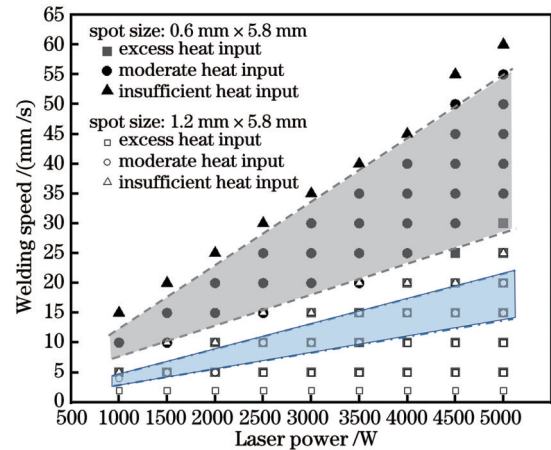


图 17 TC4 与 CFPEEK 的激光连接工艺窗口

Fig. 17 Laser joining process window for TC4 and CFPEEK

## 5 结 论

根据实际试验工况以及 TC4 钛合金/CFPEEK 激光连接的机理,建立了三维模型。对 CFPEEK 进行分层处理,提高了模型的计算准确性,试验验证了模拟计算的可靠性,得到了关键参数对温度场的影响及激光连接工艺窗口,具体结论如下:

1) 根据 CFPEEK 的连续编织碳纤维铺层方式,对 PEEK 树脂、碳纤维进行分层处理,并将碳纤维视为正交性质的材料。经过实际激光焊接试验验证可知,改进模型得到的温度场结果与实际焊接试验结果吻合良好,为 TC4 钛合金与 CFPEEK 的激光连接工艺试验提供了指导,降低了试错成本。

2) 根据不同激光连接参数下的模拟结果,发现 TC4 钛合金/CFPEEK 异质接头对热输入敏感,激光功率、焊接速度以及光斑尺寸对接头温度场分布有明显影响。在相同焊接速度下,激光功率越高,热输入越大,CFPEEK 树脂的熔化量越大,熔深越深。在相同激光功率下,焊接速度越快,热输入越小,CFPEEK 熔深及熔宽越小,树脂的熔化量越少。增大光斑尺寸 ( $1.2\text{ mm} \times 5.8\text{ mm}$ ) 会降低辐照到 TC4 钛合金表面的能量密度,接头结合面的热输入减少。相比于较小的光斑尺寸 ( $0.6\text{ mm} \times 5.8\text{ mm}$ ),在相同激光功率下,需要降低焊接速度才能熔化足够的树脂以形成接头。

3) 依据 PEEK 树脂的熔化温度与热分解温度,经过不同参数组合下的模拟计算,得到了两个光斑尺寸下的 TC4 钛合金/CFPEEK 的激光连接工艺窗口。在

同一光斑尺寸下,随着激光功率的提高,能够得到适当热输入的焊接速度窗口变大,可实现高功率高效率连接。在相同激光功率和焊接速度下,随着光斑尺寸的增大,能量密度降低,焊缝中心的温度降低。使用更小的光斑可以得到更高的能量密度,可在更高的焊接速度下完成激光连接,工艺窗口更大,连接效率更高。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 李亚江, 刘坤. 钛合金在航空领域的应用及其先进连接技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(16): 34-37.  
Li Y J, Liu K. Application and advanced bonding technology of titanium alloy in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(16): 34-37.
- [3] Li J, Zhang K F, Li Y, et al. Influence of interference-fit size on bearing fatigue response of single-lap carbon fiber reinforced polymer/Ti alloy bolted joints[J]. Tribology International, 2016, 93: 151-162.
- [4] 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.
- [5] 程智伟, 祁百鑫, 张桐, 等. 3D-GH3536/R-GH3128 光纤激光对接焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202013.  
Cheng Z W, Qi B X, Zhang T, et al. Research on 3D-GH3536/R-GH3128 fiber laser butt welding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202013.
- [6] 杜欣, 祁百鑫, 赵振家, 等. Ta-10W 难熔合金光纤激光焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602006.  
Du X, Qi B X, Zhao Z J, et al. Process research on fiber laser welding of Ta-10W refractory alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602006.
- [7] 黄婷, 杜伟哲, 苏坤, 等. 深空探测卫星准直器跨尺度栅格结构的激光精密微焊接技术与装备[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002402.  
Huang T, Du W Z, Su K, et al. Laser microwelding technology and equipment for cross-scale collimator grid of deep-space exploration satellite[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002402.
- [8] Wang P C, Xu Z Q, Liu X F, et al. Regulating the interfacial reaction of  $\text{Sc}_2\text{W}_3\text{O}_{12}/\text{AgCuTi}$  composite filler by introducing a carbon barrier layer[J]. Carbon, 2022, 191: 290-300.
- [9] Zhang L X, Zhang B, Sun Z, et al. Preparation of graded double-layer materials for brazing C/C composite and TC4[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 823: 153639.
- [10] Annett K, Maurice L, Robert P, et al. Thermal direct joining of metal to fiber reinforced thermoplastic components[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(2): 022421.
- [11] Katayama S, Kawahito Y. Laser direct joining of metal and plastic [J]. Scripta Materialia, 2008, 59(12): 1247-1250.
- [12] Lambiasi F, Genna S. Experimental analysis of laser assisted joining of Al-Mg aluminium alloy with Polyetheretherketone (PEEK) [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 265-274.
- [13] Huang C, Wang X, Wu Y W, et al. Experimental study of laser direct joining of metal and carbon fiber reinforced nylon[J]. Key Engineering Materials, 2014, 620: 42-48.
- [14] Tan X H, Zhang J, Shan J G, et al. Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 35-43.
- [15] Yan Y T, Lin J H, Liu T, et al. Corrosion behavior of stainless steel-tungsten carbide joints brazed with AgCuX (X = In, Ti) alloys[J]. Corrosion Science, 2022, 200: 110231.
- [16] Yan Y T, Liu T, Lin J H, et al. Interaction between the third alloying element and the interfacial structure of AgCu-alloy brazed heterogeneous metal integration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 883: 160933.
- [17] 邹祺, 叶逸云, 焦俊科, 等. 碳纤维增强热固性复合材料-钛合金激光连接接头性能分析[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 171-184.  
Zou Q, Ye Y Y, Jiao J K, et al. Performance analysis of carbon fiber reinforced thermalsetting composite-titanium alloy laser joint [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 171-184.
- [18] Wang D, Xu J J, Huang T, et al. Effect of beam shaping on laser joining of CFRP and Al-Li alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107336.
- [19] 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  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  based on numerical simulation[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 99-108.
- [20] 王强, 焦俊科, 咎少平, 等. 接触热导率对 CFRTP/不锈钢激光直接连接温度场的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402002.  
Wang Q, Jiao J K, Zan S P, et al. Effect of thermal contact conductance on temperature field of CFRTP/stainless steel laser direct joining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402002.
- [21] 王强, 焦俊科, 王飞亚, 等. CFRP 与不锈钢激光焊接的有限元分析[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 853-859.  
Wang Q, Jiao J K, Wang F Y, et al. Finite element analysis of CFRP and stainless steel laser welding[J]. Laser Technology, 2016, 40(6): 853-859.
- [22] Rodriguez-Vidal E, Lambarri J, Soriano C, et al. A combined experimental and numerical approach to the laser joining of hybrid polymer-metal parts[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 835-844.
- [23] Wang F Y, Jiao J K, Wang Q, et al. A research on CFRP and stainless steel joining with fiber lasers[J]. ICALEO, 2015(2015): 709-715.
- [24] Sheng L Y, Jiao J K, Du B N, et al. Influence of processing parameters on laser direct joining of CFRTP and stainless steel[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 2530521.
- [25] Sheng L Y, Wang F Y, Wang Q, et al. Shear strength optimization of laser-joined polyphenylene sulfide-based CFRTP and stainless steel[J]. Strength of Materials, 2018, 50(5): 824-831.
- [26] Jiao J K, Wang Q, Wang F Y, et al. Numerical and experimental investigation on joining CFRTP and stainless steel using fiber lasers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 362-369.
- [27] Jiao J K, Jia S H, Xu Z F, et al. Laser direct joining of CFRTP and aluminium alloy with a hybrid surface pre-treating method [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 173: 106911.
- [28] 贾少辉, 贾剑平, 焦俊科, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料/铝合金激光搅拌焊接实验及仿真研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702006.  
Jia S H, Jia J P, Jiao J K, et al. Experimental and numerical studies on laser stir welding of carbon fiber reinforced thermal polymers/aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702006.
- [29] Tan C W, Su J H, Zhu B H, et al. Effect of scanning speed on laser joining of carbon fiber reinforced PEEK to titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106273.
- [30] Su J H, Tan C W, Wu Z L, et al. Influence of defocus distance on laser joining of CFRP to titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 106006.
- [31] Tan C W, Su J H, Feng Z W, et al. Laser joining of CFRTP to titanium alloy via laser surface texturing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 103-114.
- [32] 姚凤英, 郑俊, 戚名璧, 等. 聚醚醚酮(PEEK)及其碳纤维复合材料

料的热分解动力学研究[J]. 塑料, 1989, 18(3): 40-44.

Yao F Y, Zheng J, Qi M B, et al. Dynamics study of heat decomposition of PEEK and carbon fiber composite[J]. *Plastics*, 1989, 18(3): 40-44.

[33] Zhao Y F, Song L L, Li J L, et al. Multi-scale finite element analyses of thermal conductivities of three dimensional woven composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(6): 1525-1542.

## Simulation Study of Laser Joining for Carbon Fiber Reinforced Plastics and Titanium Alloys

Jing Ruomu, Xu Jiejie, Xiao Rongshi, Huang Ting\*

*High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Lab, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

### Abstract

**Objective** Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and titanium alloys are used in modern equipment owing to their high specific strength, corrosion resistance, and fatigue resistance. Heterogeneous joints consisting of CFRP and metals are widely used in the aerospace industry. Laser joining of CFRP and metals has recently attracted significant interest owing to its high joining efficiency and superior joining quality compared to mechanical joining, adhesive bonding, ultrasonic welding, etc. Because the process is both time-consuming and labor-intensive, the accurate prediction of appropriate process parameters is highly desired. In this study, a realistic three-dimensional finite element model is developed for the numerical simulation of the temperature field during the laser joining of carbon-fiber reinforced polyetheretherketone matrix composites (CFPEEK) with a poly ether ether ketone (PEEK) resin matrix and TC4 titanium alloy, and the laser joining process is investigated.

**Methods** A fiber laser with a laser wavelength of 1070 nm and collimator focal length of 200 mm is used in the laser joining experiment (Fig. 1). A rectangular spot is obtained by beam shaping using an integrating mirror, with a focal length of 200 mm and a spot size of 0.6 mm × 5.8 mm. The laser power is 3500 W, and the welding speed ranges from 5 mm/s to 40 mm/s. The dimensions of the TC4 titanium alloy and CFPEEK are 60 mm × 30 mm × 2 mm and 60 mm × 25 mm × 2 mm, respectively. The CFPEEK is composed of a PEEK matrix and carbon fibers. The carbon fiber layers are alternately layered with PEEK layers and have a 0°/90° cross-weave (Fig. 2). The PEEK layer is 0.1 mm thick on average, and the carbon fiber layer is 0.2 mm thick on average.

**Results and Discussions** A three-dimensional model of laser joining of TC4/CFPEEK is established based on the fact that laser-induced heat input is transferred to the bonding interface via heat conduction and actual experimental conditions. The grid size is graded to improve the simulation accuracy while maintaining computational efficiency (Fig. 3). Importantly, in the CFPEEK module, the PEEK layer thickness (0.1 mm) is uniform for an isotropic homogeneous material, and the fiber layer thickness is uniform (0.2 mm) for an orthotropic material with a large difference in the thermophysical characteristics between the radial and axial directions. The thermal and physical parameters of the TC4 and CFPEEK used in the simulation are listed in Table 1. It is worth noting that the thermal conductivity of TC4 is relatively low, and it is therefore difficult to obtain the maximum melting depth in both TC4 and CFPEEK simultaneously (Fig. 4); thus, the experimental and simulation results of TC4 and CFPEEK are compared separately. The results reveal that the temperature field distribution obtained by the numerical simulation agrees well with the experimental results (Figs. 5–7). Our developed model is then used to estimate the temperature field distribution as a function of laser power (Figs. 8–10), welding speed (Figs. 11–14), and beam size (Figs. 15 and 16). Finally, a simulation-predicting laser joining process window is provided to guide the parameter selection for laser joining of TC4 and CFPEEK (Fig. 17).

**Conclusions** Considering the carbon fiber and resin distributions in CFPEEK, a more realistic finite element model for the laser joining of CFPEEK and TC4 is developed. In this model, CFPEEK is composed of carbon fiber layers and resin layers that vary in thickness. The resin layer is isotropic, whereas the carbon fiber layer is orthogonal. This model is used to investigate the effects of laser parameters on the temperature field of the joint. The accuracy of the model is confirmed by the experimental results, and the process window for laser-joining CFPEEK and TC4 is predicted.

**Key words** laser technique; laser joining; carbon-fiber reinforced plastics; TC4 titanium alloy; numerical simulation