

## 激光与光电子学进展

平顶激光辐照 CF/PEEK 复合材料熔凝过程  
有限元仿真王孟洁<sup>1,2</sup>, 王菲<sup>1,2\*</sup>, 张承双<sup>3\*\*</sup>, 金才植<sup>1,2</sup>, 包艳玲<sup>3</sup>, 张承灏<sup>1,2</sup>, 刘冬<sup>1,2</sup>, 吴静<sup>1,2</sup>, 苏忠民<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528400;<sup>3</sup>西安航天复合材料研究所, 陕西 西安 710065

**摘要** 为了阐明平顶激光辐照下碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)的熔凝特性,构建了方形平顶激光束的数学模型和CF/PEEK复合材料的几何模型,利用COMSOL有限元仿真软件,计算仿真了方形平顶激光辐照CF/PEEK的加热过程和停止加热后的冷却过程。其中,方形平顶激光功率密度为5 MW/m,平顶区域功率占比为94.37%,加热15 ms使CF/PEEK的表面温度达到370℃左右。在沿碳纤维轴向方向上,辐照区域内温差0.5℃以内,辐照区域边缘温差1℃左右;在沿碳纤维径向方向上,辐照区域内温度曲线呈现波浪状,波峰与波谷的温差为4℃,辐照区域边缘温差为5℃左右。在CF/PEEK凝固过程中,会有小型熔池区域出现,并且存在较大的固液共存区。

**关键词** 激光技术; 激光原位成型; 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料; 温度场; 相场

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230510

## Study on Melting Kinetics of CF/PEEK Composites Irradiated by Flat Top Laser

Wang Mengjie<sup>1,2</sup>, Wang Fei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Chengshuang<sup>3\*\*</sup>, Jin Caizhi<sup>1,2</sup>, Bao Yanling<sup>3</sup>,  
Zhang Chenghao<sup>1,2</sup>, Liu Dong<sup>1,2</sup>, Wu Jing<sup>1,2</sup>, Su Zhongmin<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup>College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China;<sup>2</sup>Zhongshan Research Institute, Changchun University of Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China;<sup>3</sup>Xi'an Aerospace Composite Materials Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China

**Abstract** In order to clarify the melting and solidification characteristics of CF/PEEK irradiated by a flat top laser, the mathematical model of the square flat top laser beam and the geometric model of CF/PEEK composites are constructed in this paper. The heating process of the square flat top laser irradiated CF/PEEK and the cooling process after the heating is stopped are calculated and simulated using the COMSOL finite element simulation software. The square flat top laser power density is 5 MW/m, and the power ratio of the flat top area is 94.37%. The surface temperature of CF/PEEK reaches about 370℃ after heating for 15 ms. The temperature difference within the irradiation area along the axial direction of carbon fiber is within 0.5℃, and the temperature difference at the edge of the irradiation area is about 1℃. The temperature curve in the irradiation area along the radial direction of the carbon fiber is wavy, with the temperature difference between the wave crest and the wave trough of 4℃, and the temperature difference at the edge of the irradiation area of about 5℃. In CF/PEEK solidification process, there will be small molten pool area and large solid-liquid coexistence area.

**Key words** laser technology; laser *in situ* forming; carbon fiber reinforced PEEK composite; temperature field; phase field

## 1 引言

碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料作为热塑性碳纤维复合材料(CFRTP),具有优异的耐热性、耐化学性、力学性能,良好的可回收性,以及加工周期短等

特点,在航空航天领域具有广阔的应用前景。基于CFRTP的激光辅助自动铺放技术可以实现高效率地制造复合材料结构件,构件铺放时可一次成型,后续不用再进入热压罐,也就是“激光原位成型”,且成型过程不受零件尺寸与形状、加工场地的限制,因此这项技术将

收稿日期: 2023-01-15; 修回日期: 2023-02-07; 录用日期: 2023-03-07; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金-航天先进制造联合基金重点项目(U1937201)、吉林省重点研发计划项目(20200401100GX)

通信作者: \*feewang@163.com; \*\*3425756@qq.com; \*\*\*zmsu@nenu.edu.cn

成为未来制造航空航天复合材料结构件的重要技术<sup>[1]</sup>。

在激光原位成型过程中,涉及的物理过程较为复杂<sup>[2]</sup>,激光辐照到 CF/PEEK 复合材料上,由于 PEEK 对激光具有高透射性,大部分激光透过 PEEK 被碳纤维吸收,碳纤维温度升高,由光能转变为热能,然后碳纤维将温度传递给 PEEK,PEEK 温度达到相变温度,发生相变。

为了研究激光辐照下 CFRTTP 的加热过程,Grove<sup>[3]</sup>通过对 APC-2 预浸料在激光原位成型过程中建立二维热传导模型,研究了原位成型过程中激光加热功率与铺放速度之间的关系。Tumkor 等<sup>[4]</sup>针对连续 CFRTTP 原位成型过程中铺层的温度场利用有限差分法建立数学模型,求出原位成型过程中铺层温度场随时间变化的情况。Hassan 等<sup>[5]</sup>对连续 CFRTTP 原位成型过程铺层经历的温度历程进行三维瞬态热分析,并对仿真模拟结果与铺放试验结果之间存在的误差进行分析。Stokes-Griffin 等<sup>[6]</sup>研究了 CF/PEEK 复合材料的黏合,得知在加热阶段超过无限熔化温度的前提下,固结温度低于熔点时会发生黏结,这保证了在黏合之前完全无定形的熔体。Deignan 等<sup>[7]</sup>将纤维摩擦和熔体黏度考虑在一个模型中研究 CF/PEEK 复合材料在熔化和凝固过程中的应力应变响应关系,为改进原位铺放模型提供了一种思路。

为了研究不同工艺参数对激光辐照碳纤维复合材料的影响,宋清华等<sup>[8]</sup>通过对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料铺放过程进行仿真模拟,得到铺放速度和激光功率对铺放结果的影响,并用实验进行验证。Cao 等<sup>[9]</sup>研究了 CF/PEEK 复合材料放置的热传递过程中的温度场模型,揭示了加热温度与基体温度场之间的映射关系。Tan 等<sup>[10]</sup>建立激光扫描 CFRP 的三维传热模型,得到了

CFRP 的熔化温度范围随扫描速度的增加先增大后减小。Kou 等<sup>[11]</sup>构建非线性二维瞬态传热模型,描述了一种新型的温度闭环控制近红外激光热源,得到的温度历程和实验结果十分吻合,并且预测了激光辅助铺放过程中的结晶度的演变规律。Lee 等<sup>[12]</sup>通过对 CF/PEEK 复合材料铺放过程进行仿真分析,利用生死单元法得到了不同铺层的温度历程,并且通过实验仪器测量铺层温度,通过数值模拟和实验结果相结合的方式,建立了不同工艺参数对 PEEK 晶体形貌的影响。

原位成型过程中要保证加热温度均匀,相较于高斯光束利用平顶光束加热是更优的选择,目前还没有学者针对平顶激光加热 CF/PEEK 复合材料原位成型过程进行相关研究。在激光原位成型过程中,为了满足预浸带宽度和铺放方向上的温度均匀分布。本文采用方形平顶激光加热 CF/PEEK 复合材料,揭示 CF/PEEK 复合材料在熔凝过程中的温度场和相场演变规律,为后续利用方形平顶激光原位成型 CF/PEEK 复合材料提供理论依据。

## 2 平顶激光加热 CF/PEEK 模型的建立

为了研究平顶激光辐照 CF/PEEK 的熔凝动力学特性,本文构建方形平顶激光加热 CF/PEEK 模型,对温度场和相场的分布特性和演变规律进行研究分析。

### 2.1 CF/PEEK 几何模型

本文设碳纤维与 PEEK 的体积比为 60%,可构建 CF/PEEK 的等效几何模型为  $74.8 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m} \times 34 \mu\text{m}$  的长方体,中间分布着直径为  $6 \mu\text{m}$  的碳纤维,相邻碳纤维的间距为  $0.8 \mu\text{m}$ ,得到的等效几何模型如图 1 所示。

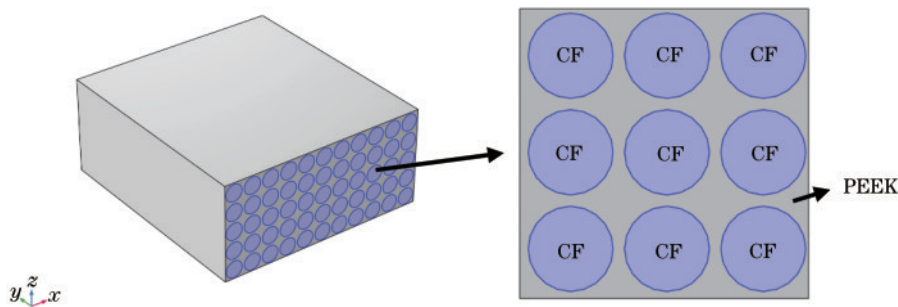


图 1 CF/PEEK 几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CF/PEEK geometric model

### 2.2 平顶激光数学模型

假设辐照 CF/PEEK 复合材料表面的激光束的光

场分布为方形平顶分布(图 2),对应的表达式为

$$q_1 = q_0 \cdot \exp \left\{ - \frac{\left\{ \max \left[ \text{abs} \left( x - x_c \right) - \frac{l}{2}, 0 \right] \right\}^2 + \left\{ \max \left[ \text{abs} \left( y - y_c \right) - \frac{l}{2}, 0 \right] \right\}^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (1)$$

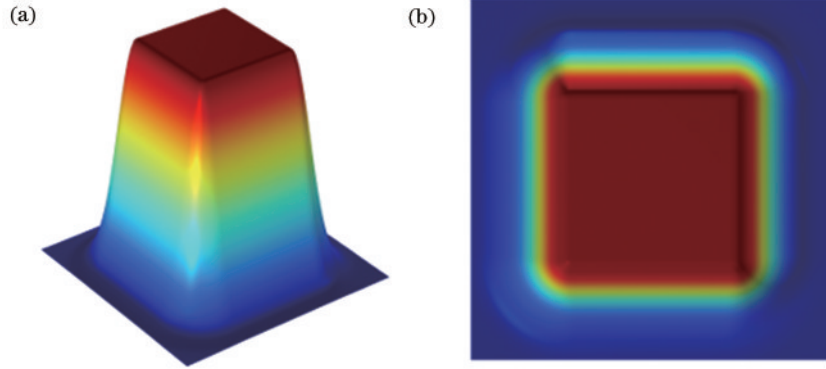


图 2 平顶激光示意图。(a)三维视图;(b)二维视图

Fig. 2 Schematic diagram of flat top laser. (a) 3D view; (b) 2D view

式中: $q_0$ 是平顶激光的激光功率密度; $x_c, y_c$ 分别是平顶激光的光斑中心的  $x$  和  $y$  坐标; $l$ 为方形平顶光斑的边长; $\sigma$ 为平顶系数。

如图 3 所示,激光辐照 CF/PEEK 复合材料时,会有一部分激光被反射,透射的部分照射到碳纤维上,也是部分被吸收,并且碳纤维之间存在间隙,还有一部分光线照射到间隙中,忽略在碳纤维之间多次反射的激光以及照射到碳纤维间隙的激光,得到表层碳纤维实际吸收的激光能量为

$$Q_1 = Q \cdot \tau \cdot \frac{d}{D + d} \cdot \alpha, \quad (2)$$

式中: $Q$ 为入射激光能量; $\tau$ 为 PEEK 的透射率为 0.6; $d$ 为碳纤维之间的间距为  $0.8 \mu\text{m}$ ; $D$ 为碳纤维的直径为  $6 \mu\text{m}$ ; $\alpha$ 为碳纤维对激光的吸收系数 0.9。

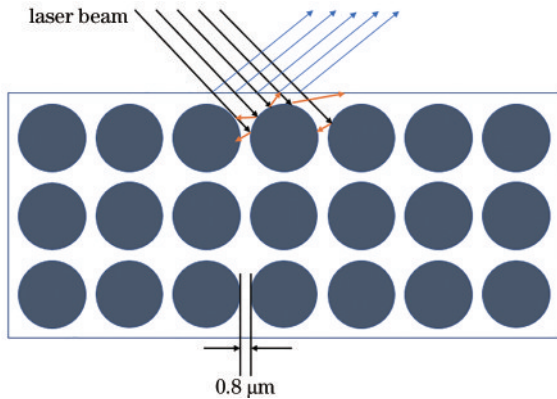


图 3 激光辐照 CF/PEEK 复合材料示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser irradiation CF/PEEK composite materials

### 2.3 传热模型

在碳纤维吸收激光后,根据热力学定律,建立 CF/PEEK 的三维热传递模型,模型的热传递方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_1, \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为材料的密度; $C_p$ 为材料的恒压热容; $k_x, k_y$ 和

$k_z$ 分别为  $x, y$  和  $z$  方向的传热系数; $Q_1$ 为碳纤维实际吸收的热量。

CF/PEEK 与空气存在对流传热,对流传热的公式为

$$q_2 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T), \quad (4)$$

式中: $h$ 为传热系数; $T_{\text{ext}}$ 为外界环境温度。

在加热熔化的过程中可以认为熔化存在于一个短暂的温度区间,相变过程中存在一个糊状区域,当温度升高超过相变温度时,材料会发生相变,由固相转变为液相。在凝固过程中,温度低于相变温度,材料会发生相变,由液相转变为固相。模型中设置相指示器,其中, $\theta_1$ 代表固体, $\theta_2$ 代表液体。相变方程为

$$C_p = \theta_1 C_{p,1} + \theta_2 C_{p,2} + L_{1 \rightarrow 2} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}, \quad (5)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 + \theta_2}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}}{\theta_1 C_{p,1} + \theta_2 C_{p,2}}, \quad (7)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2, \quad (8)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1, \quad (9)$$

式中: $\rho$ 为糊状温度区间材料密度; $k$ 为糊状温度区间材料热导率; $\theta_1$ 和  $\theta_2$ 分别为相 1、2 的体积分数; $L_{1 \rightarrow 2}$ 为相 1 到相 2 的潜热; $\alpha_m$ 为处理相变的平滑函数。

为了仿真激光辐照 CF/PEEK 过程中温度场分布和相变过程演变规律,需要对这个过程做出一定的假设,仿真假设如下:1) 在激光辐照 CF/PEEK 表面上,CF/PEEK 受到的激光冲击力造成的影响进行忽略;2) 被 PEEK 吸收的部分激光能量进行忽略;3) 不考虑激光在碳纤维之间的多次反射;4) 在 PEEK 相变过程中,不考虑流体的非等温流动造成的影响。

### 2.4 边界条件

Dirichlet 边界条件:设初始温度为 298 K。

Neumann 边界条件:确定加载的方形平顶激光。

在激光原位成型过程中,一般采用几十至几百瓦功率的激光束在 0.2 s 内即可完成熔融过程,如图 4 所示,设置厚度为实际 CF/PEEK 复合材料层的 1/5,对应设激光功率密度为 5 MW/m,平顶区域的功率占比为

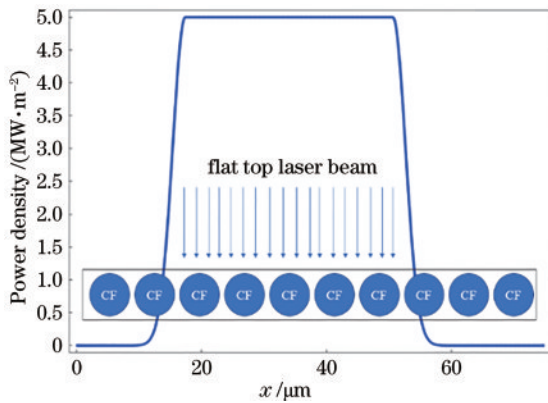


图4 平顶光斑辐照CF/PEEK示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flat top spot irradiation CF/PEEK  
94.37%, 为了方便研究, 取光斑边长正好辐照5根碳纤维的宽度  $34.4 \mu\text{m}$ 。

Robin 边界条件: 用来确定外界环境温度以及物体表面与周边环境的对流系数。模拟室温情况下平顶

激光对CF/PEEK的加热过程, 物体周围与外界环境存在热对流, 设置其对流系数为  $10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

## 2.5 网格的划分

采用四面体网格和三角形网格相结合的方法进行划分网格, 设置细化, 得到909624个四面体网格, 167474个三角形网格, 平均网格质量为0.6575。

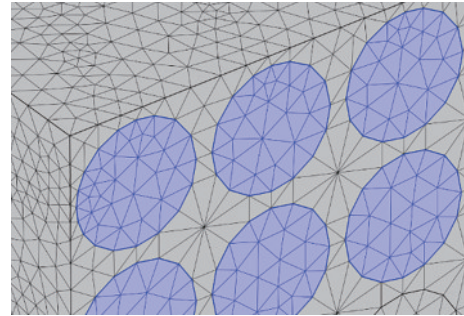


图5 网格划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of grid division

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material parameters	Density $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Specific heat capacity $C_p / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Thermal conductivity $k / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	latent heat $L / (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	Phase transition temperature / $^{\circ}\text{C}$	Poisson's ratio
Carbon fiber	1760	795	Axial direction 84 Radial direction 8.4	43000	3500	0.20
PEEK	1300	1200	0.2	1000	343	0.35

## 3 仿真结果与分析

利用COMSOL多物理场有限元仿真软件计算仿真方形平顶激光辐照CF/PEEK复合材料的加热过程和停止加热后的冷却过程。

### 3.1 温度场分布特性

为了研究方形平顶激光加热CF/PEEK的温度场分布特性, 选择CF/PEEK复合材料温度  $343^{\circ}\text{C}$  和  $370^{\circ}\text{C}$ ,  $343^{\circ}\text{C}$  是材料发生相变的温度,  $370^{\circ}\text{C}$  是CF/PEEK复合材料成型的最佳温度, 分别对辐照区域为  $343^{\circ}\text{C}$  附近和  $370^{\circ}\text{C}$  附近进行研究。

从图6(a)中截取线1和线2两条水平方向上的线段以及线3和线4两条垂直方向上的线段, 其中, 线1和4经过碳纤维径向圆心, 线2和3不经过碳纤维。分别得到  $t=10 \text{ ms}$  和  $t=15 \text{ ms}$  时, 线1、2、3和4的温度分布图, 如图6(b)和(c)所示。对于图6(a), 由于方形平顶激光具有对称性, 所以温度场分布呈现对称分布。因为碳纤维轴向传热系数大于径向传热系数, 所以温度场分布呈现出y方向上温度升高区域大。

对于图6(b), 当  $t=10 \text{ ms}$  时, 由于激光辐照CF/PEEK能量主要被顶层碳纤维吸收, 然后由碳纤维向四周传递热量, 所以线1和2温度分布呈现从上向下逐渐递减, 并且表面PEEK温度没有顶层碳纤维温度高。由于碳纤维的传热系数大于PEEK, 温度在整根碳纤

维中传递得快, 所以线1是呈现波浪状温度分布, 其中温度相等区域是碳纤维, 而线2温度变化趋势呈阶梯状, 并且在局部温度最高点对应距离碳纤维最近的点。当  $t=15 \text{ ms}$  时, 线1和2的整体温度分布趋势和  $t=10 \text{ ms}$  时基本一致, 但是, 表面PEEK和顶层碳纤维的温度相等, 热量在顶层碳纤维上面积累, 使表层PEEK的温度和顶层碳纤维的温度相等。

对于图6(c), 当  $t=10 \text{ ms}$  时, 线3温度分布呈现阶梯状, 线4温度分布呈现波浪状, 对于线1和2从中间向两侧温度逐渐降低, 并且在激光辐照区域温度下降梯度小, 在激光辐照区域外温度下降梯度大。对于线1, 两个阶梯之间曲线存在凹陷, 在加热过程中, PEEK的温度是由碳纤维传递的, 距离碳纤维越近PEEK温度越高, 在两根碳纤维的中间区域, 两根碳纤维的中点的PEEK温度最低, 所以在阶梯之间曲线存在凹陷。当  $t=15 \text{ ms}$  时, 线3分布仍然呈现阶梯状, 而线4分布整体呈现抛物线状, 这是因为随着温度的升高, PEEK之间存在温度梯度, 由于温度不均匀而进行热传递, 使PEEK之间的温度变化减小, 对应的线4的分布整体呈现抛物线状。

图7为在激光辐照CF/PEEK的过程中激光辐照中心的温度随时间变化的曲线。在激光加热过程中, 温度逐渐升高, 达到熔点附近时, 由于PEEK发生相变吸收热量, 所以  $t=9 \text{ ms}$  到  $t=11 \text{ ms}$  中间斜率变小, 温

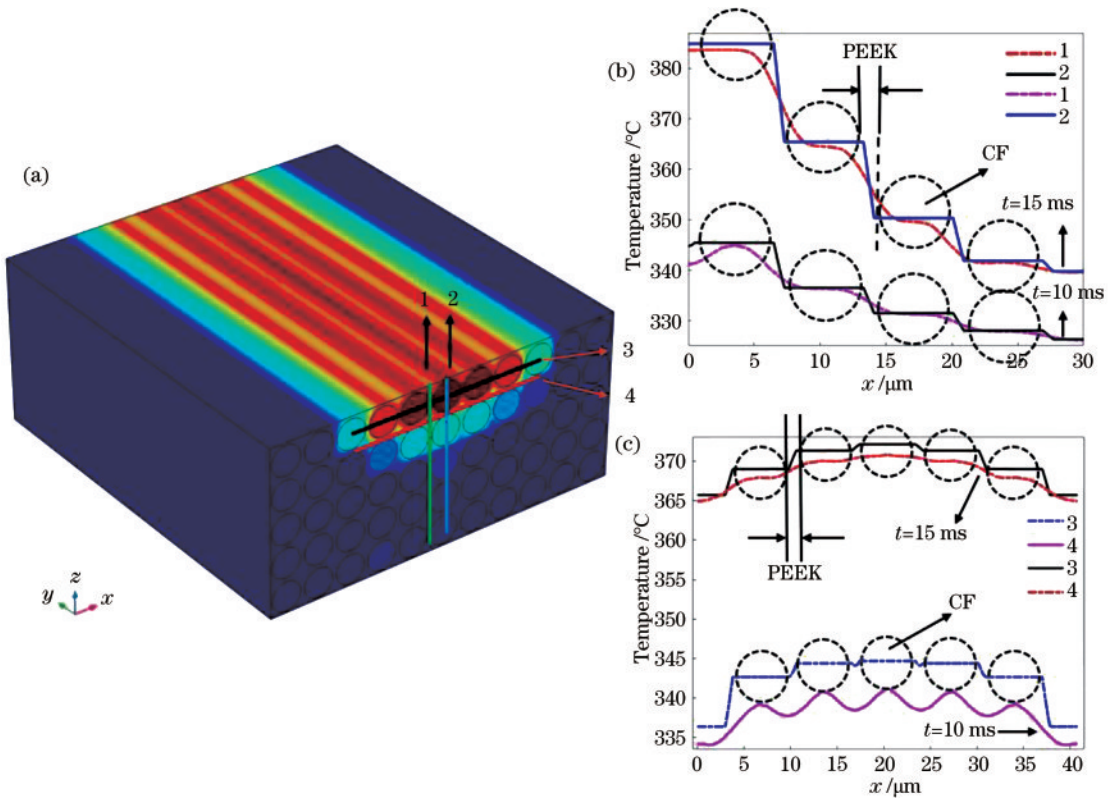


图 6 激光辐照 CF/PEEK 温度场分布图。(a) 温度场示意图；(b) 线 1 和 2 的温度分布图 ( $t=10\text{ ms}$  和  $t=15\text{ ms}$ )；(c) 线 3 和 4 的温度分布图 ( $t=10\text{ ms}$  和  $t=15\text{ ms}$ )

Fig. 6 Temperature field distribution diagram of laser irradiation CF/PEEK. (a) Schematic diagram of temperature field; (b) temperature distribution diagram of lines 1 and 2 ( $t=10\text{ ms}$  and  $t=15\text{ ms}$ ); (c) temperature distribution diagram of lines 3 and 4 ( $t=10\text{ ms}$  and  $t=15\text{ ms}$ )

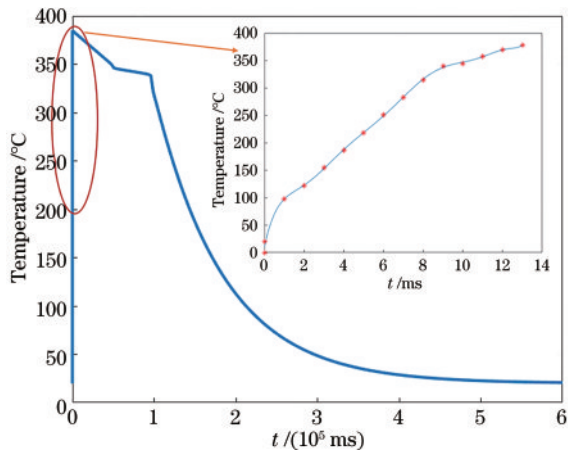


图 7 激光辐照表面中心随时间增加温度变化图

Fig. 7 Temperature change diagram of laser irradiated surface center with time

度升高的变慢,随后温度升高变快。在温度达到  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$  时停止加热,CF/PEEK 在自然对流下缓慢冷却,在凝固相变过程中,由于相变放热,温度下降缓慢。随后温度逐渐下降直至室温,整个过程约  $10\text{ min}$ 。

### 3.2 熔-凝过程中相场演变规律

为了研究激光辐照下 CF/PEEK 的熔凝特性,本

文对 CF/PEEK 的相场进行研究。因为碳纤维传热系数具有各向异性,所以在熔凝演变过程中,分别研究轴向和径向相场演变规律,最后总结得到 CF/PEEK 整体的熔-凝相场演变规律。

图 8 为在熔化过程中  $t_1\sim t_4$  四个时刻的不同切面的相变图。可以看出,在加热过程中,最上层碳纤维吸收激光,碳纤维先整体温度升高,而后经过热传导使周围的 PEEK 温度升高,在 PEEK 达到熔点后开始发生相变,从固相转变为液相,随着时间的推移和温度的升高,CF/PEEK 由上至下逐层由固相转变为液相。

图 9 为凝固过程的四个时刻  $t_1\sim t_4$  的 XOZ 和 YOZ 切面的凝固相变图,设置两条等值线,将 PEEK 划分三部分:熔池区域、固液共存区域和完全凝固区域。可以看出,在凝固过程中熔池区域随着时间增加,逐渐变小,并且会分出小的熔池区域,此时存在较大的固液共存区。这是因为在凝固过程中,由于碳纤维的传热系数大,从碳纤维周围开始先发生凝固相变,在碳纤维间隙中的 PEEK 就会分出小的熔池区域。在凝固过程中熔池区域周围温度略低于熔点,因此会形成较大的固液共存区。

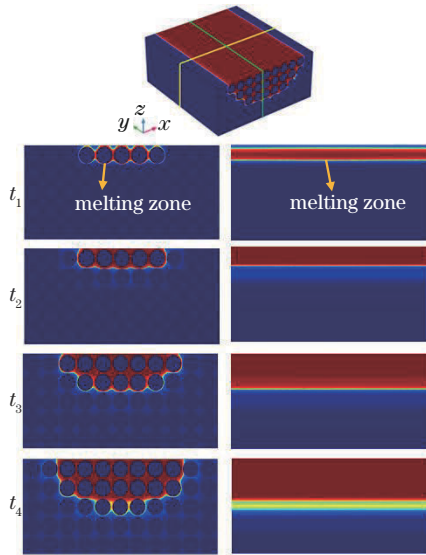


图 8 熔融相场

Fig. 8 Melting phase field

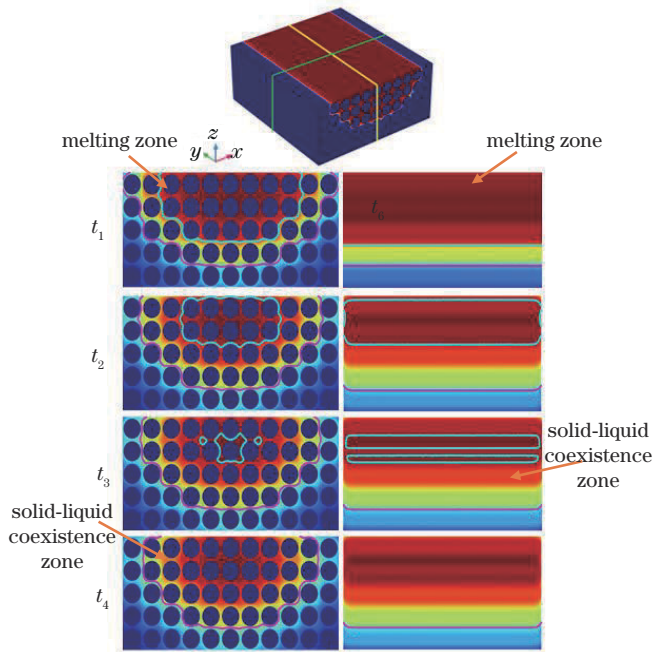


图 9 凝固相场

Fig. 9 Solidification phase field

## 4 结 论

本文利用多物理场有限元软件 COMSOL 对平顶激光辐照 CF/PEEK 熔凝过程的温度场和相变过程分布特性及演变规律进行了研究,构建了方形平顶激光的数学模型,建立了 CF/PEEK 的几何模型,根据热力学第一定律得到传热过程的数学方程,基于热传递边界条件进行求解,得到平顶激光辐照 CF/PEEK 温度场和相场的演变规律。

温度场规律:在沿碳纤维轴向方向上,从中间向两侧温度逐渐递减,在激光辐照区域最高温度与最低温

差为  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在激光辐照区域边缘温差为  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右;在沿碳纤维径向方向上,温度分布曲线为波浪状,辐照区域波峰与波谷的温差为  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在辐照区域边缘温差为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

相场规律:在激光加热过程中,从碳纤维周围的 PEEK 先开始熔化,然后从上向下逐层发生从固相到液相的相变过程。停止加热的冷却过程,从四周向中间发生从液相到固相的相变过程,在凝固过程中从一个熔池区域分裂成多个小型熔池区域,并且存在较大的固液共存区。

通过温度场分布可以得知,利用平顶激光辐照 CF/PEEK 复合材料时,在辐照区域内温差很小,并且在辐照区域边缘的温差也只有  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这对于激光原位成型过程来说,辐照的目标区域可以精准地控制辐照区域温度的近似均匀,能够有效消除由于激光光源带来的温度分布不均匀的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Chen J P, Fu K K, Li Y. Understanding processing parameter effects for carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by laser-assisted automated fibre placement (AFP)[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 140: 106160.
  - [2] Ding H, Guo Y C, Wang Z C. Study on laser irradiation temperature field of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Materials Research Express, 2020, 7(3): 035306.
  - [3] Grove S M. Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic[J]. Composites, 1988, 19(5): 367-375.
  - [4] Tumkor S, Turkmen N, Chassapis C, et al. Modeling of heat transfer in thermoplastic composite tape lay-up manufacturing[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001, 28(1): 49-58.
  - [5] Hassan N, Thompson J E, Batra R C, et al. A heat transfer analysis of the fiber placement composite manufacturing process[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2005, 24(8): 869-888.
  - [6] Stokes-Griffin C M, Compston P. Investigation of sub-melt temperature bonding of carbon-fibre/PEEK in an automated laser tape placement process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 84: 17-25.
  - [7] Deignan A, Figiel Ł, McCarthy M A. Insights into complex rheological behaviour of carbon fibre/PEEK from a novel numerical methodology incorporating fibre friction and melt viscosity[J]. Composite Structures, 2018, 189: 614-626.
  - [8] 宋清华, 刘卫平, 陈吉平, 等. 碳纤维增强聚苯硫醚复合材料激光加热原位成型过程中的温度场[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 283-292.
- Song Q H, Liu W P, Chen J P, et al. Temperature field for laser heating of carbon fiber reinforced polyphenyl sulphide matrix composite in an automated fiber placement

- process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36 (2): 283-292.
- [9] Cao Z L, Dong M J, Liu K L, et al. Temperature field in the heat transfer process of PEEK thermoplastic composite fiber placement[J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4417.
- [10] 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.
- [11] Kou Z Q, Xiao J, Huan D J, et al. Optimization of thermal model and prediction of crystallinity during the laser-assisted tape winding process[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2021, 40(15/16): 606-618.
- [12] Lee A, Wynn M, Quigley L, et al. Effect of temperature history during additive manufacturing on crystalline morphology of PEEK[J]. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2022, 4: 100085.