

## 基于表面微结构的钛合金与 CFRP 激光连接研究

刘一凡<sup>1,2</sup>, 周宝升<sup>3</sup>, 张涛<sup>3</sup>, 牛得田<sup>3</sup>, 王世嘉<sup>2</sup>, 苏健晖<sup>1,2</sup>, 宋晓国<sup>1,2</sup>, 檀财旺<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;<sup>2</sup>哈尔滨工业大学(威海)山东特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209;<sup>3</sup>国家高速列车青岛技术创新中心, 山东 青岛 266108

**摘要** 钛合金与碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)的异质复合接头在航空航天和交通等领域具有广阔的应用前景。激光连接钛合金与 CFRP 具有效率高的优点,但整体连接强度较低。本文开展了表面变宽度网格微结构 TC4 与 CFRP 激光连接工艺以及连接界面强化机理的研究,研究结果显示:随着微结构宽度增大,CFRP 在 TC4 表面的接触情况由不润湿变成润湿,当微结构宽度为 0.2 mm 时,接触角最小,为 49.91°,此时的润湿性最好;表面微结构显著提高 TC4 表面对熔化 CFRP 的吸附能力,促进了界面的机械嵌合作用;接头的拉剪力最高可达 2596 N,较未处理接头提高了约 154%;接头的断裂形式除了界面断裂及内聚断裂外,还存在 TC4 表面氧化物的剥离,佐证了 TC4 与 CFRP 界面结合强度的提升;界面上还生成了新的化学键合。微结构能增加界面接触面积并实现表面改性,促进 CFRP 与 TC4 在高温下发生化学连接,从而进一步提高接头强度。

**关键词** 激光技术; 激光连接; 微结构; 润湿性; 机械嵌合; 化学连接

**中图分类号** TG456.7

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1803001

## 1 引言

钛合金以其较高的比强度、耐腐蚀性被广泛应用于航空工业中<sup>[1-3]</sup>。碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有高的比模量且耐冲击,已成为主要承力构件的可替换材料<sup>[4-5]</sup>。钛合金和 CFRP 的连接不仅可以满足工业轻量化要求,还能扩大异质复合材料结构的应用领域。然而,受限于两种材料热物理性能及微观结构的较大差异,实现两种材料的高强度连接较为困难<sup>[6]</sup>。

目前,应用于钛合金与 CFRP 的连接工艺主要有铆接<sup>[7]</sup>、胶接<sup>[8]</sup>、搅拌摩擦焊<sup>[9-10]</sup>和激光连接<sup>[11-12]</sup>。铆接工艺不仅不利于构件的轻量化,还会产生应力集中,降低接头强度;胶接接头易老化,且无法实现大面积连接;搅拌摩擦焊对设备的刚性要求较高;激光连接具有柔性好、效率高的特点,但连接区域较窄,接头强度较低<sup>[13-15]</sup>。因此,如何实现钛合金与 CFRP 的高强度激光连接成为国内外的研究热点。

2008 年, Katayama 等<sup>[16]</sup>利用激光透射焊首次实现了不锈钢与聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的连接。随后,他们利用热传导焊成功实现了镁合金与 PET 的连接<sup>[17]</sup>。哈尔滨工业大学及江苏大学学者<sup>[18-21]</sup>研究

了激光功率、激光扫描速度等对 CFRP 与钛合金接头性能的影响,结果发现:随着热输入的增加,接头处树脂的熔化宽度增加,接头强度逐渐提高;但当热输入过高时,塑料会发生分解,从而使得接头强度降低。同时,他们在接头界面处发现了高温作用下生成的 Ti—C 和 Ti—O 化学键以及 CTi<sub>0.42</sub>V<sub>1.58</sub> 等化合物,这些都有利于接头强度的提高。可见,可以通过促进界面机械嵌合及化学键合来实现钛合金与 CFRP 的高强度连接。

国内外针对机械嵌合及化学键合的强化机理开展了大量研究。Kwon 等<sup>[22]</sup>采用砂纸打磨方法来增加铝合金表面的润湿吸附能力,使其与 CFRP 的胶接强度提高了 5 倍左右(与未打磨相比)。Heckert 等<sup>[23]</sup>先利用激光对金属表面进行预处理(在金属表面加工出不同尺寸的微结构),再将预处理的金属与玻璃纤维增强热塑性塑料进行激光连接,结果表明,金属表面微结构对复合接头的剪切强度具有重要影响。激光毛化工艺是一种表面处理手段,通过激光烧蚀金属表面制造出微米级结构不仅可以提高金属表面的粗糙度,还可以改变金属表面的化学状态,促进接头界面两侧材料实现化学连接。可以采用激光毛化工艺在金属表面制造微结构来实现接头强度的提高。Rodríguez-Vidal

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-01-17; 录用日期: 2022-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(52074097)、山东省优秀青年基金(ZR2021YQ30)、国家高速列车技术创新中心研发计划(CXKY-02-02(2020))

通信作者: \*tancaiwang@163.com

等<sup>[24]</sup>先利用纳秒脉冲激光器在低合金钢 HC420 表面制备网格结构,然后将其与玻璃纤维增强聚酰胺 6 (PA6-GF30)进行激光连接,接头的最高承载载荷由低合金钢表面未作处理时的 700 N 提高到 4000 N。国内学者<sup>[25-26]</sup>在铝合金表面制造微结构后再将其与 CFRP 进行激光连接,也发现界面结合强度明显提升。Lambiase 等<sup>[27]</sup>采用搅拌摩擦焊对表面制备微结构的钛合金与聚醚醚酮(PEEK)进行了连接试验,结果发现界面结合强度较表面预处理前提高了近 2 倍。这表明,在金属表面制备微结构有利于其与 CFRP 的连接。鉴于此,本团队先在 Ti-6Al-4V 钛合金(TC4)表面加工出不同宽度的微结构,再将其与 CFRP 进行激光连接,然后研究了微结构宽度对接头强度的影响,并分析了微结构对 TC4/CFRP 激光连接接头的强化机理。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

选用 TC4 板材与 CFRP 进行焊接试验,其中:TC4 试样的尺寸为 50 mm×30 mm×1.5 mm,其化学成分如表 1 所示;CFRP 由 PEEK 树脂基体与体积分数为 30%的短切碳纤维组成,其熔点及汽化温度分别为 340 °C 和 460 °C,尺寸为 50 mm×25 mm×2 m。试验前,将 TC4 板材与 CFRP 板材置于丙酮酒精混合溶液中进行超声清洗,以去除其表面的油污;然后将处理后的 CFRP 板材置于 80 °C 烘干箱内烘干

2 h,将处理后的 TC4 板材置于由蒸馏水、硝酸、氢氟酸按体积比为 80:15:5 配制成的混合酸液中 60 s,以去除 TC4 表面的氧化膜,将清理干净后的 TC4 板材吹干,备用。

表 1 TC4 板材的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 sheet

Element	Mass fraction / %
Fe	0.3
Al	5.5
V	3.5
C	≤0.1
Ti	Balance

### 2.2 表面微结构的制备

利用 SP-070P-A-EP-Z-F-Y 脉冲光纤纳秒激光系统,采用图 1 所示的激光毛化工艺对 TC4 板材进行表面微结构的制备。依据前期的试验探索,设定表面微结构为网格形貌,如图 1 所示,微结构之间的间距为 1 mm,微结构宽度为 0.1~0.5 mm,在每条微结构网格线中填充多条等距扫描线,以获得理想的微米级沟槽。微结构的宽度通过调节扫描线的数量来控制。通过前期参数优化,本团队获得了可加工出较好微结构形貌的激光毛化工艺参数,如表 2 所示。微结构制备完成后,将 TC4 板材置于丙酮酒精混合溶液中超声清洗 2 min,以去除微结构内部因激光烧蚀作用而生成的金属残渣。

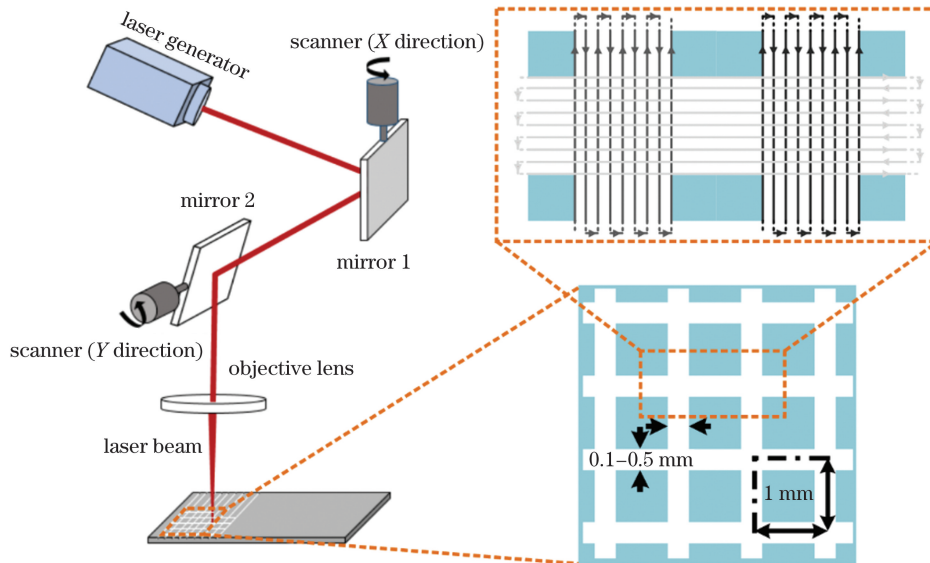


图 1 纳秒激光制备微结构的原理以及微结构网格形貌示意图

Fig. 1 Principle of nanosecond laser texturing and grid pattern of micro-texture

表 2 纳秒激光在 TC4 表面制备微结构的工艺参数

Table 2 Parameters employed in laser texturing TC4 sheet surface

Process parameter	Value
Frequency /kHz	200
Laser power /W	70
Defocus distance /mm	0
Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	300
Depth of micro-texture /μm	110
Width of micro-texture /mm	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

### 2.3 激光连接工艺

采用 IPG-6000 光纤激光系统对 TC4 与 CFRP 的搭接结构进行激光连接, 设置搭接宽度为 20 mm。图 2 所示为激光连接示意图。为保证界面紧密接触, 采用气缸紧固搭接接头, 气缸提供 0.5 MPa 的界面压力。为了得到表面成形效果良好的 TC4/CFRP 激光连接接头, 焊接试验采用表 3 所示的预试验优化后的激光连接工艺参数, 连接过程中采用纯度为 99.99% 的氩气进行侧吹保护, 以防止接头被氧化。

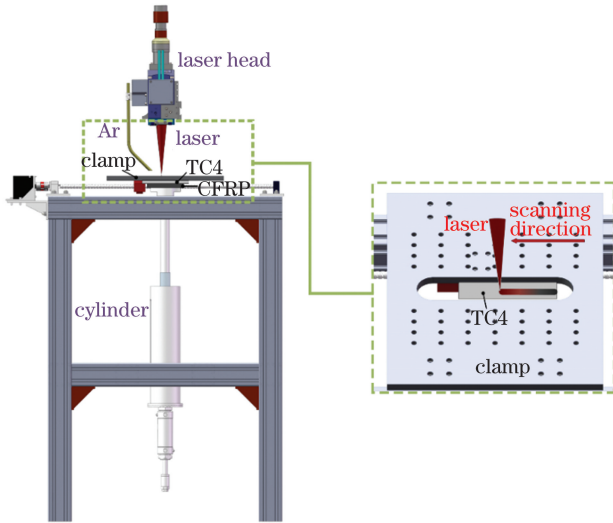


图 2 TC4 与 CFRP 激光连接示意图

Fig. 2 Schematic of laser joining of CFRP to TC4

表 3 TC4 与 CFRP 的激光连接工艺参数

Table 3 Parameters of TC4 and CFRP laser joining

Process parameter	Value
Laser power / W	750
Scanning speed / (m·min <sup>-1</sup> )	0.8
Laser beam diameter / mm	0.95
Flow rate of argon gas / (L·min <sup>-1</sup> )	20

### 2.4 分析测试方法

采用 DSX510 光学数码显微镜观察 TC4 表面微织构的形貌以及接头界面的形貌, 并分析 TC4 表面毛化处理后的粗糙度。利用 RHTH 50/5018S 高温润湿角测量系统对熔化的 CFRP 中的 PEEK 在 TC4 基体上的接触角进行测量, 以表征表面的润湿性。采用 Instron 5967 室温力学测试系统对 TC4/CFRP 接头进行拉剪测试, 示意图如图 3 所示。在 TC4 与 CFRP 板材装夹边缘安装两枚垫片, 以保证拉剪力与接头平行。拉伸速度为 0.5 mm/min。每组参数下测试三组试件, 以保证测试结果的准确性。采用 Image J 软件计算断裂界面上树脂-碳纤维混合物的黏接比率, 以分析断口的断裂形式以及黏接比率对连接强度的影响规律。采用 DSX510 光学数码显微镜和场发射扫描电子显微镜对 TC4/CFRP 接头的界面、断口进行观察, 采用扫描电子显微镜附带的能谱仪(EDS)对界面和断口

上的元素分布进行分析; 利用 X 射线光电子能谱仪(XPS)对界面上化学键的种类进行确定。

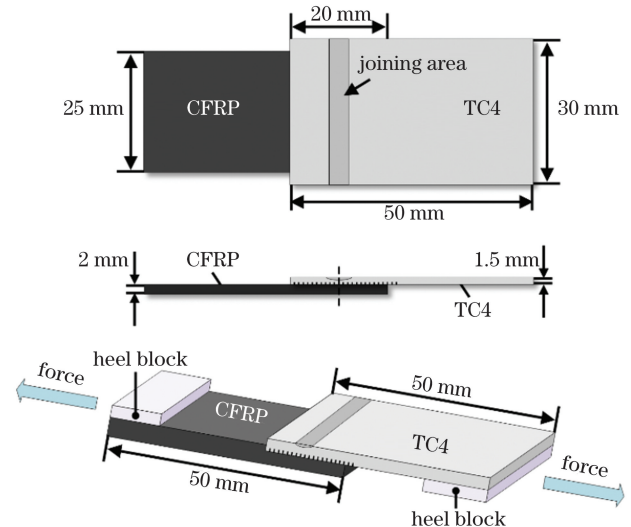


图 3 TC4/CFRP 激光连接接头的拉剪示意图

Fig. 3 Schematic of tensile-shear testing on TC4/CFRP laser bonded joint

## 3 试验结果与分析

### 3.1 微织构的三维形貌及润湿性分析

图 4 为 TC4 表面不同宽度的激光毛化微织构的三维形貌, 与未进行毛化的较光滑 TC4 表面相比, 其表面状态的改变比较明显, 粗糙度明显增加。当纳秒激光扫描 TC4 表面时, 金属基质受热熔化的同时伴随着金属的蒸发, 因此, 经毛化处理的金属板材表面及微织构周围形成了毛刺、金属重熔层及金属氧化层。通过测量微织构的深度及宽度后发现, 当改变微织构宽度时, 本次试验所采用的激光毛化工艺可以使微织构深度保持为 110 μm, 微织构具有较高的尺寸精度。

图 5 为 TC4 表面经纳秒激光毛化制备不同宽度微织构所引起的表面粗糙度的变化。未经毛化处理的 TC4 表面, 其  $R_a$  及  $R_z$  分别为 0.084 μm 和 0.228 μm; 而经激光毛化处理, TC4 表面烧蚀出了微织构, 可以获得更高的粗糙度<sup>[28]</sup>。微织构的引入使得 TC4 表面粗糙度显著增大, 且随着微织构宽度的增加呈现先升高后降低的趋势。当微织构宽度为 0.2 mm 时, 表面粗糙度可达到最大值,  $R_a$  及  $R_z$  分别为 1.377 μm 和 3.51 μm, 较未处理 TC4 表面粗糙度提高了 15 倍左右。图 6 为熔化的 CFRP 基质在不同 TC4 表面状态下的接触角。TC4 表面经激光毛化制备微织构后, 润湿性显著改善, 表面由不润湿状态转变为润湿状态。随着网格宽度的增加, 熔化的 CFRP 基质(PEEK)在 TC4 表面的接触角呈先降低后升高的趋势。这表明微织构改变了 TC4 的表面状态, 产生了毛细效应, 使熔融的 PEEK 基质在 TC4 表面呈扩展趋势, 从而增大了界面接触面积, 促进了 TC4 基质对融化 CFRP 基质的吸附能力, 也促进了 CFRP 基质在 TC4 表面的润

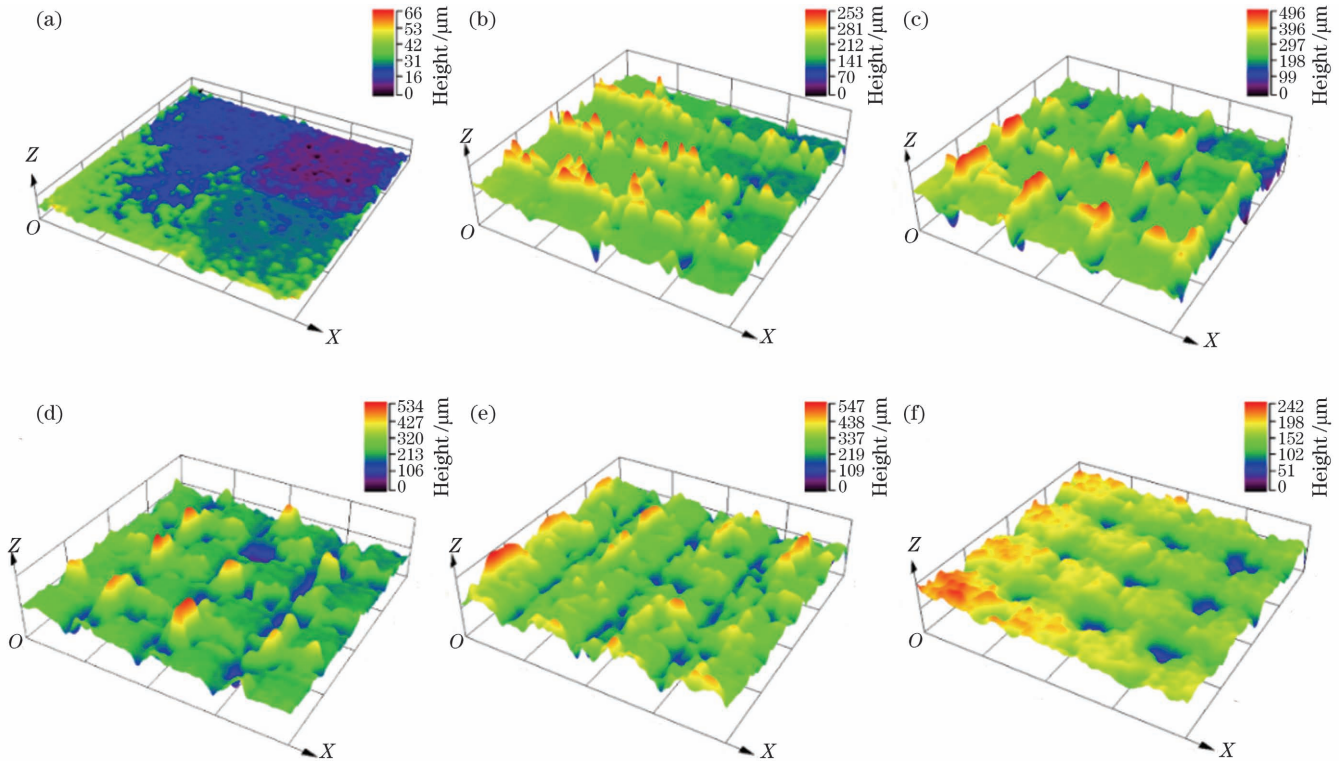


图 4 TC4 表面不同宽度微结构的三维形貌。(a)未处理 TC4 表面;(b)微结构宽度为 0.1 mm;(c)微结构宽度为 0.2 mm;(d)微结构宽度为 0.3 mm;(e)微结构宽度为 0.4 mm;(f)微结构宽度为 0.5 mm

Fig. 4 Three-dimensional morphologies of micro-texture with various widths on TC4 surface. (a) Untreated TC4; (b) micro-texture width of 0.1 mm; (c) micro-texture width of 0.2 mm; (d) micro-texture width of 0.3 mm; (e) micro-texture width of 0.4 mm; (f) micro-texture width of 0.5 mm

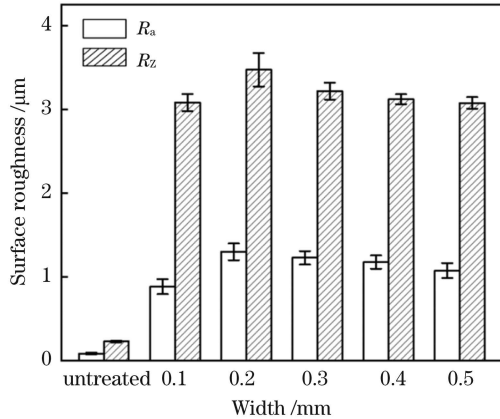


图 5 不同微结构宽度下 TC4 表面的粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of TC4 with different micro-texture widths

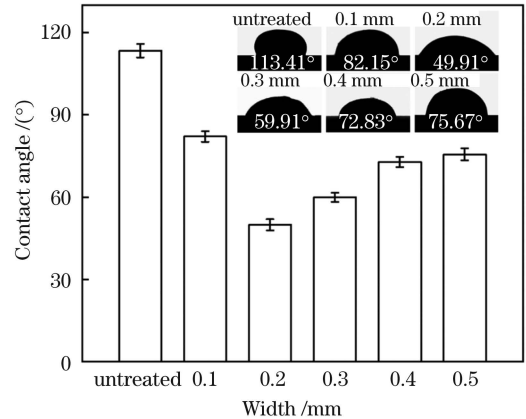


图 6 熔化的 CFRP 在不同宽度微结构 TC4 表面的接触角  
Fig. 6 Contact angle of melted CFRP on TC4 surface with various micro-texture widths

湿。当微结构宽度为 0.5 mm 时,网格的毛细效应减弱,此时表现为接触角增大。当微结构宽度为 0.2 mm 时,接触角达到最小值,为 49.91°,此时的表面润湿性最好。

### 3.2 TC4/CFRP 接头的宏观形貌

图 7 为典型 TC4/CFRP 激光连接接头的宏观形貌,因采用的是优化后的激光连接工艺参数,因此接头成形良好。如图 7(a)所示,TC4 表面未发现烧蚀、气孔等缺陷,TC4 熔池宽度均匀。在 CFRP 背面也未发现由于过热而产生的烧蚀气孔、烧穿等热缺陷,如

图 7(b)所示。由于采用相同的激光工艺参数,本次试验中的其他激光连接接头与图 7 所示形貌大体相似,均未发现宏观缺陷。

### 3.3 微观组织及界面分析

不同 TC4 表面状态下典型激光连接接头界面的形貌如图 8 和图 9 所示。在 TC4 表面引入微结构后,熔化的 CFRP 在界面压力作用下嵌入微结构内部,使界面的机械嵌合效果更加显著。当微结构宽度为 0.1 mm 和 0.2 mm 时,熔化的 CFRP 可以完全填充于微结构内部,如图 8(b)~(c)所示。当微结构宽度

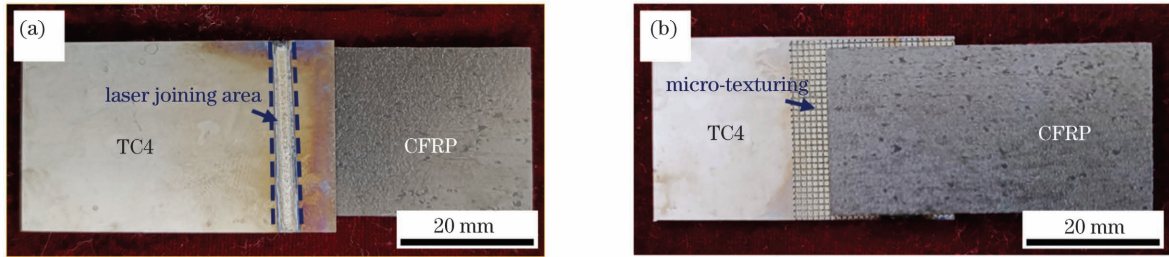


图 7 典型 TC4/CFRP 激光连接接头的形貌。(a) 正面; (b) 反面

Fig. 7 Macroscopic morphologies of typical laser joined joint of CFRP to TC4. (a) Top view; (b) back view

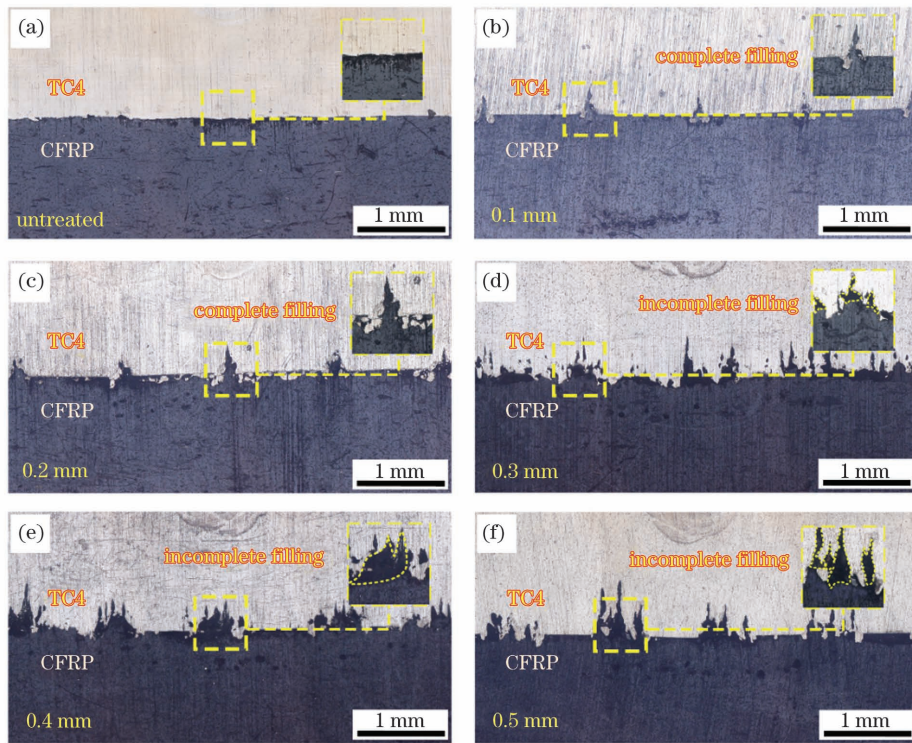


图 8 不同 TC4 表面状态下典型 TC4/CFRP 激光连接接头界面的形貌。(a) 未处理 TC4 表面; (b) 微织构宽度为 0.1 mm; (c) 微织构宽度为 0.2 mm; (d) 微织构宽度为 0.3 mm; (e) 微织构宽度为 0.4 mm; (f) 微织构宽度为 0.5 mm

Fig. 8 Optical morphologies of typical laser joined TC4/CFRP joints near interface with various micro-texture widths.

(a) Untreated TC4; (b) micro-texture width of 0.1 mm; (c) micro-texture width of 0.2 mm; (d) micro-texture width of 0.3 mm; (e) micro-texture width of 0.4 mm; (f) micro-texture width of 0.5 mm

为 0.2 mm 时,熔化的 CFRP 在 TC4 表面的嵌合效果最好,这与 TC4 表面的粗糙度及润湿性有关,此时表面的润湿状态最佳,粗糙度最大,如图 5 和图 6 所示。当 TC4 表面微织构的宽度过大时,CFRP 在 TC4 表面的润湿性降低,TC4 表面对熔化 CFRP 的吸附能力变差,熔化的 CFRP 不能完全填充于 TC4 表面微织构内,如图 8(d)~(f)所示。由图 9(a)、(c)可以看出,微织构的引入使得界面的机械嵌合效果更加显著,在合适的微织构内部,熔化的 CFRP 可以实现完全填充,这是界面机械嵌合增强的宏观表现。通过对有无微织构调控下 TC4/CFRP 激光连接局部区域内的元素分布进行分析可以发现,在连接界面区域均出现了元素扩散层,如图 9(b)、(d)所示。这表明,在激光扫描作用下,界面处较高的温度促进了 C、Ti 元素的扩散,形成了新的化合物层。而且,在微织构的引入下,该元素

扩散层厚度由无微织构时的  $10 \mu\text{m}$  增加到  $21 \mu\text{m}$ 。这是因为在界面高温作用下,微织构的引入增加了界面的接触面积,钛合金中的较高活性元素与 CFRP 中元素的反应活度增加,形成的化合物层厚度随之增加。类似的化合物层在苏轩等<sup>[29]</sup>的研究中也被发现。这表明微织构化 TC4/CFRP 界面上不仅存在机械嵌合作用,还可能存在化学连接。

为进一步鉴定在激光连接热作用下 TC4 与 CFRP 中的高分子结构是否发生了键合,对 0.2 mm 宽微织构调控下的 TC4/CFRP 连接界面进行化学键合分析,分析结果如图 10 所示。在微织构调控的 TC4/CFRP 激光连接接头界面的 Ti2p 轨道上检测到了 6 种化学键合,分别为钛元素的氧化物  $\text{TiO}_2$  的双轨道标准键合(键能分别为 458.5 eV 和 464.77 eV)、Ti 元素与空气中的 O 元素在微织构制备时的高温(或

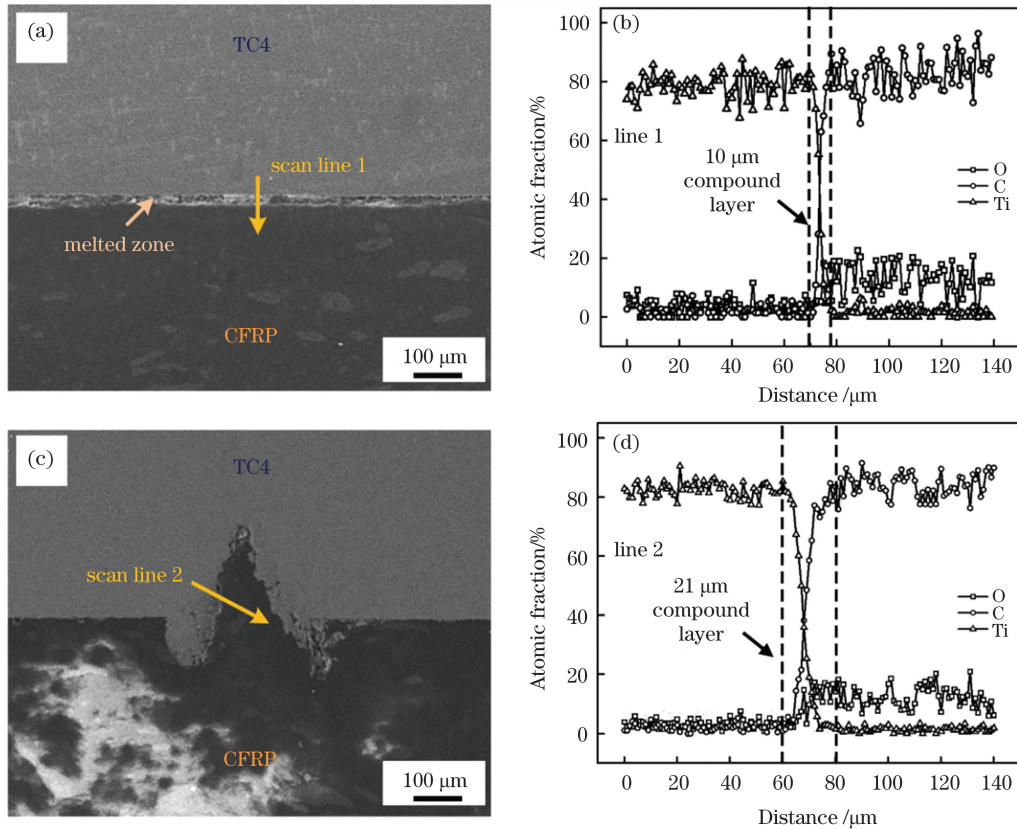


图 9 TC4/CFRP 激光连接接头的扫描电镜形貌及元素分布。(a)(b)未处理 TC4;(c)(d)微织构化 TC4  
 Fig. 9 SEM morphologies and elements distributions of typical laser joined TC4/CFRP joint. (a)(b) Untreated TC4;  
 (c)(d) micro-textured TC4

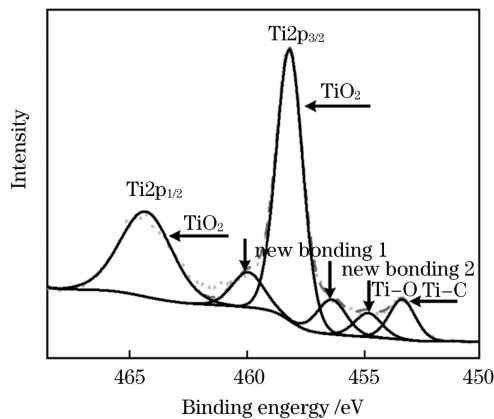


图 10 微织构调控下 TC4/CFRP 激光连接接头界面 Ti2p 轨道的 XPS 键合分析拟合结果

Fig. 10 Fitting curves of Ti2p XPS peaks of TC4/CFRP laser joining interface with laser micro-texture

界面高温)作用下与 CFRP 基质接触形成的 Ti—O 键(键能为 454.8 eV)、Ti 元素在界面高温作用下与 CFRP 中的 C 元素形成的 Ti—C 键(键能为 453.8 eV),以及 TC4/CFRP 在热作用下形成的新化学键合(键能分别为 456.8 eV 和 459.7 eV)。这说明,在激光连接 TC4 与 CFRP 时,TC4 基体与 CFRP 在界面高温作用下发生了化学键合。

### 3.4 力学性能

由于 TC4 与 CFRP 激光连接接头不规则,无法判

断实际连接区域的面积,因此采用相同尺寸试件的剪切力作为连接强度的评定指标。如图 11 所示,相比于未经毛化处理的 TC4/CFRP 连接接头,毛化后的 TC4/CFRP 连接接头的剪切力显著提高,且随着激光毛化微织构宽度的增加呈先升高后降低的趋势,这与如图 5、6 所示的 TC4 表面润湿性及表面粗糙度的变化趋势相符。当微织构宽度为 0.2 mm 时,剪切力达到最高值,为 2596 N,较 TC4 表面未处理的连接构件的剪切力提高了大约 154%。此时,TC4 表面的润湿性及粗糙度均最高。当微织构宽度较窄时,织构虽被

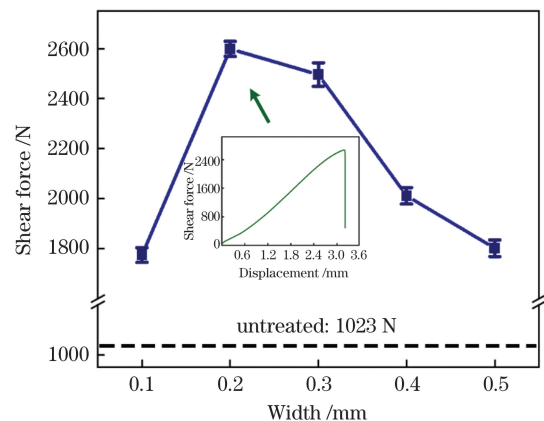


图 11 不同微织构宽度下 TC4/CFRP 激光连接接头的剪切力  
 Fig. 11 Shear fore of TC4/CFRP joint with various micro-texture widths

完全填充,但实际的接触面积较小,因此强度较低;当微织构较宽时,TC4 表面的粗糙度及润湿性均有所降低,导致熔化的 CFRP 不能完全填充于织构内部,如图 8(d)~(f)所示,因此强度有所降低。

图 12 为典型 TC4/CFRP 激光连接接头中 TC4 侧与 CFRP 侧断口的三维形貌。通过对比 TC4 侧及 CFRP 侧的断口形貌可以发现,在连接区局部位置,TC4 及 CFRP 表面都较为光滑。这表明该连接区在

拉剪力作用下发生界面断裂。在激光扫描区两侧可以发现大量树脂-碳纤维混合物黏附于 TC4 侧断口表面,这表明该区域的断裂位置为 CFRP 基质内部,其主要断裂形式为内聚断裂。为探究内聚断裂与界面断裂对连接强度的影响,定义内聚断裂的面积与整体黏接面积的比值为树脂-碳纤维混合物的黏接比率。通过分析不同微织构宽度下断口中树脂-碳纤维混合物黏接比率的统计结果可以发现,树脂-碳纤维混合物黏接比率的变化

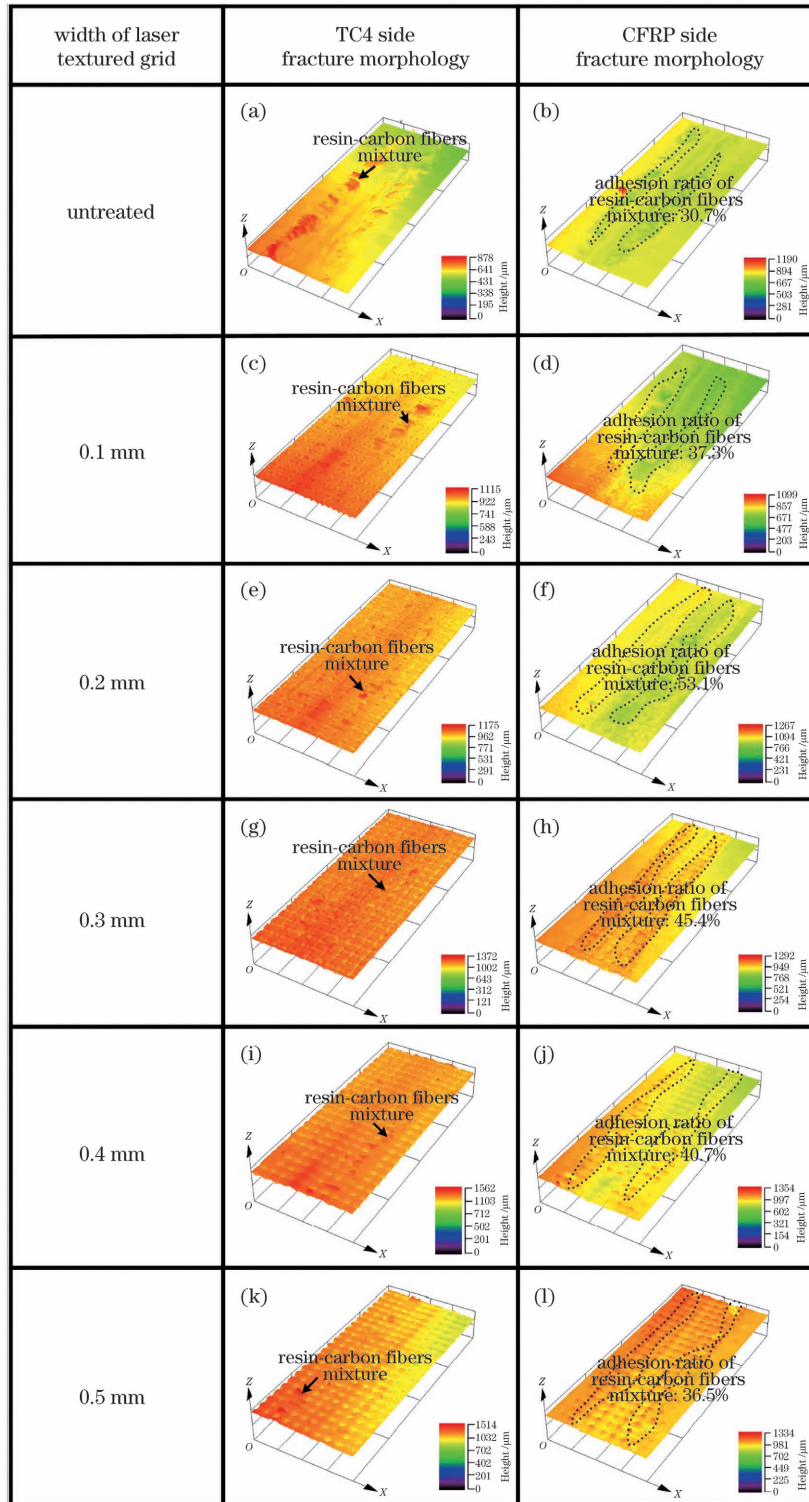


图 12 TC4/CFRP 激光连接接头断口的三维形貌

Fig. 12 Three-dimensional fracture images of typical TC4/CFRP joint

趋势与强度的变化趋势相同,当微织构宽度为 0.2 mm 时,黏接比率达到最大值,为 53.1%。图 13 为 TC4/CFRP 激光连接接头典型断口的 SEM 形貌及元素分布,进一步佐证了界面处发生的断裂是界面断裂及 CFRP 基质内聚断裂。除此之外,在 CFRP 断口侧发现

了网格状黏结物,通过分析该局部位置的元素分布发现,网格状黏结物主要为 TC4 表层基质,如图 13(b)、(d)所示。这表明,界面断裂机制除了界面断裂与内聚断裂外,还存在 TC4 氧化物从基体剥离的现象,这也是微织构的引入使结合强度提高的又一重要表现。

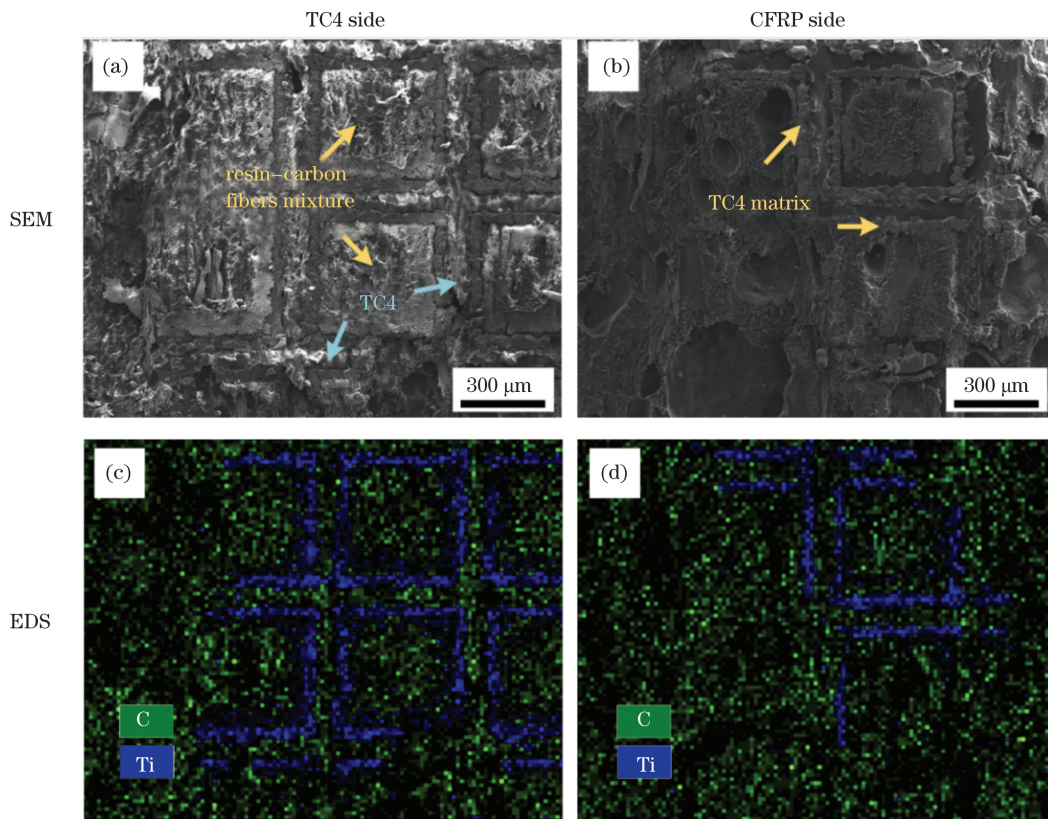


图 13 典型 TC4/CFRP 激光连接接头断口的扫描电镜形貌及元素分布

Fig. 13 Scanning electron microscopy (SEM) images and element distributions of typical TC4/CFRP joint fracture

### 3.5 连接机理

综上,可将纳秒激光毛化制备的表面有微织构的 TC4 与 CFRP 的激光连接机理总结为图 14。当激光扫描 TC4 表面时,热量经 TC4 基体内部传导至连接界面,使 CFRP 基质受热熔化;熔化的 CFRP 在激光毛化的 TC4 表面润湿铺展,并在界面压力作用下填充于 TC4 表面微织构内部。在合适的微织构宽度下,熔化的 CFRP 可在 TC4 内部完全填充,增加界面的接触面积,从而提升连接强度。当微织构宽度较大时,局部熔化的 CFRP 不能完全填充于 TC4 基体内部,因此界面接触面积减小。同时,在界面高温作用下,CFRP 内部元素向 TC4 基质内部扩散,并与 TC4 内部的活性元素 Ti 等形成新的化学键合。试件冷却后,机械嵌合现象及化学键合便被保留下来。

## 4 结 论

本团队采用激光热导连接工艺实现了 TC4 与 CFRP 的连接,并通过在 TC4 表面制备网格形貌微织构来提高 TC4 与 CFRP 的结合强度。通过分析微织构宽度对 TC4/CFRP 接头的影响以及界面的连接机理,得到如下结论:

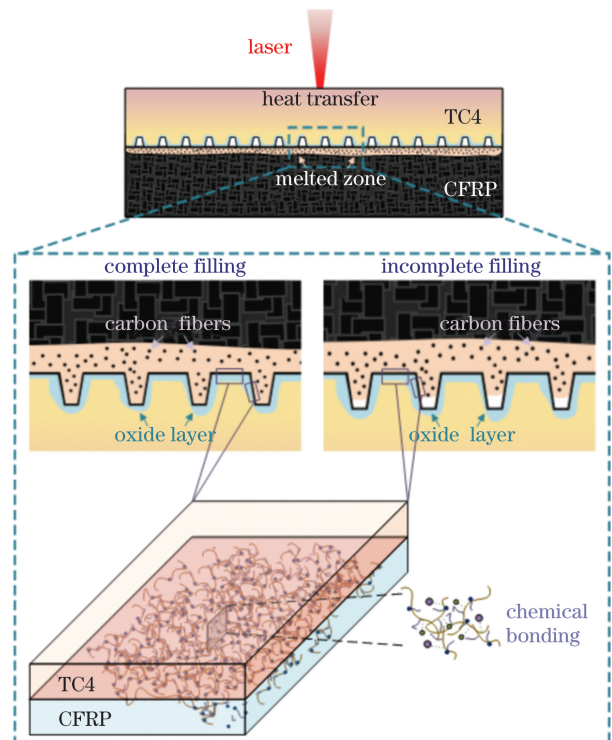


图 14 连接机理示意图

Fig. 14 Schematic of laser joining mechanism



1) 微织构的引入提高了 TC4 表面的粗糙度以及熔化的 CFRP 在 TC4 表面的润湿性。TC4 表面的粗糙度较原始 TC4 表面提高了 15 倍左右, 熔化的 CFRP 在其表面由不润湿状态改变为接触角约为  $50^\circ$ , 显著增大了界面接触面积, 促进了机械嵌合作用。但当微织构过窄或过宽时, 受表面粗糙度及润湿性的影响, 会发生界面接触面积减小并且熔化的 CFRP 未完全填充微织构等情况, 在一定程度上限制了接头强度的提高。

2) 微织构引入前后, TC4/CFRP 激光连接接头的剪切力分别为 1023 N 和 2596 N (微织构宽度为 0.2 mm 时), 后者较前者提高了约 154%。

3) 断口表现为界面断裂与 CFRP 基质内聚断裂的混合断裂模式。微织构的引入增加了界面接触面积。在拉剪力作用下, 局部 TC4 表面的氧化物会从基体上剥离, 这也是强度提高的又一重要表现。

4) TC4 与 CFRP 的连接机理除了机械嵌合外, 还包括界面连接区域的化学键合, 说明界面处还存在化学连接。采用纳秒激光毛化工艺制备微织构也可在一定程度上对 TC4 表面进行化学改性, 促进化学连接, 从而进一步提高接头强度。

### 参 考 文 献

- [1] 窦恩惠, 肖美立, 柯林达, 等. 热处理对激光选区熔化成形 TC11 钛合金组织性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602117.  
Dou E H, Xiao M L, Ke L D, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective-laser-melted TC11 titanium alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602117.
- [2] Xu J Y, Ji M, Davim J P, et al. Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills [J]. Composite Structures, 2020, 234: 111727.
- [3] 蔡小叶, 胡家齐, 程宗辉, 等. 飞机进气口格栅激光选区熔化成形技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1714007.  
Cai X Y, Hu J Q, Cheng Z H, et al. Selective laser melting technology applied into aircraft air inlet protective grilling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714007.
- [4] 邹田春, 李龙辉, 刘志浩, 等. 搭接长度对 CFRP-Al 双搭接接头应力分布和失效模式的影响[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 224921.  
Zou T C, Li L H, Liu Z H, et al. Effect of overlap length on strain distribution and failure law of CFRP-Al double lap joint [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 224921.
- [5] 曲日华, 王立岩, 关冲, 等. 碳纤维增强尼龙 66 复合材料的热性能[J]. 塑料, 2020, 49(6): 45-49.  
Qu R H, Wang L Y, Guan C, et al. Carbon fiber reinforced nylon 66 thermal properties of composite[J]. Plastics, 2020, 49(6): 45-49.
- [6] 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.
- [7] Cao Y J, Cao Z Q, Zuo Y J, et al. Numerical and experimental investigation of fitting tolerance effects on damage and failure of CFRP/Ti double-lap single-bolt joints [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78: 461-470.
- [8] Ingram C, Ramani K. The effect of sodium hydroxide anodization on the durability of poly(etherketoneetherketoneketone) adhesive bonding of titanium [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1997, 17(1): 39-45.
- [9] Huang Y X, Meng X C, Xie Y M, et al. Joining of carbon fiber reinforced thermoplastic and metal via friction stir welding with co-controlling shape and performance [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 112: 328-336.
- [10] Wu L H, Xiao B L, Nagatsuka K, et al. Achieving strong friction lap joints of carbon-fiber reinforced plastic and metals by modifying metal surface structure via laser-processing pretreatment [J]. Composite Structures, 2020, 242: 112167.
- [11] 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.
- [12] 叶逸云, 贾少辉, 焦俊科, 等. 铝合金/碳纤维增强热塑性复合材料的激光对接焊研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002003.  
Ye Y Y, Jia S H, Jiao J K, et al. Aluminum alloy/carbon fiber reinforced thermoplastic laser butt welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002003.
- [13] Lambiase F, Genna S. Laser-assisted direct joining of AISI304 stainless steel with polycarbonate sheets: thermal analysis, mechanical characterization, and bonds morphology [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 205-214.
- [14] Lambiase F, Genna S. Laser assisted joining of AA5053 aluminum alloy with polyvinyl chloride (PVC) [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 107: 80-88.
- [15] 韩晓辉, 张志毅, 马国龙, 等. 热源角度对 6A01 铝合金激光-MIG 复合焊成形及气孔的影响 [J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202105.  
Han X H, Zhang Z Y, Ma G L, et al. Effects of heat source angle on weld formation and porosity defects of laser-MIG hybrid welding of 6A01 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202105.
- [16] Katayama S, Kawahito Y. Laser direct joining of metal and plastic [J]. Scripta Materialia, 2008, 59(12): 1247-1250.
- [17] Wahba M, Kawahito Y, Katayama S. Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1166-1174.
- [18] Tao W, Su X, Chen Y B, et al. Joint formation and fracture characteristics of laser welded CFRP/TC4 joints [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 1-8.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Kwon D J, Kim J H, Kim Y J, et al. Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 170: 11-18.
- [23] Heckert A, Zaeh M F. Laser surface pre-treatment of aluminium for hybrid joints with glass fibre reinforced thermoplastics [J]. Physics Procedia, 2014, 56: 1171-1181.
- [24] Rodriguez-Vidal E, Sanz C, Lambarri J, et al. Experimental investigation into metal micro-patterning by laser on polymer-metal hybrid joining [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 73-82.
- [25] 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.
- [26] Zhang Z, Shan J G, Tan X H, et al. Improvement of the laser joining of CFRP and aluminum via laser pre-treatment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9/10/11/12): 3465-3472.
- [27] Lambiase F, Paoletti A. Friction assisted joining of titanium and polyetheretherketone (PEEK) sheets [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 254-261.
- [28] Feng Z W, Zhao H Y, Tan C W, et al. Influence of laser process parameters on the characteristic of 30CrMnSiA steel substrate and adhesively bonded joints [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105920.
- [29] Su X, Tao W, Chen Y B, et al. Microstructural characteristics and formation mechanism of laser cladding of titanium alloys on carbon fiber reinforced thermoplastics [J]. *Materials Letters*, 2017, 195: 228-231.

## Laser Joining of Carbon Fiber Reinforced Plastics to Titanium Alloy via Laser Texturing

Liu Yifan<sup>1,2</sup>, Zhou Baosheng<sup>3</sup>, Zhang Tao<sup>3</sup>, Niu Detian<sup>3</sup>, Wang Shijia<sup>2</sup>,  
Su Jianhui<sup>1,2</sup>, Song Xiaoguo<sup>1,2</sup>, Tan Caiwang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;*

<sup>2</sup> *Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China;*

<sup>3</sup> *National Invitation Center of High-Speed Train at Qingdao, Qingdao 266108, Shandong, China*

### Abstract

**Objective** Lightweight structure has become a focus in industrial fields. One of the research hotspots is the effective joining of dissimilar materials. Because of their high specific strength, titanium alloys have been widely used in aerospace and automotive engineering applications. Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) have many advantages over traditional metals, such as higher specific strength, fatigue resistance, and corrosion resistance, and have a broad application prospect to further realize lightweight. The laser joining of titanium alloy and CFRP can combine the advantages of the two materials and broaden their application. However, because of the large differences in microstructure and physical properties between the two base materials, the joining strength is relatively low. The properties enhancement of metal/CFRP joint can be achieved by improving mechanical interlocking and chemical bonding. The laser texturing process can fabricate a microstructure to improve the surface roughness of metal, as well as change the chemical state of the metal surface. Thus, the laser joining process of TC4 to CFRP via laser texturing TC4 surface and the strengthening mechanism of the interface were studied by us.

**Methods** Ti-6Al-4V alloy (TC4) and polyether ether ketone reinforced by 30% carbon fibers (CFRP) were selected as base materials. The resin matrix of the composite material was polyether ether ketone (PEEK). The TC4 sheets were treated by laser texturing before laser joining. To obtain ideal micron-scale grooves, the spacing between each grid was 1 mm, and each grid line was filled with multiple equidistant scan lines. The number of scan lines was adjusted to control different micro-texture widths, and the micro-texture width in this study were set to 0.1–0.5 mm, as shown in Fig. 1. To evaluate the mechanical properties, tensile shear tests with a stretch speed of 0.5 mm/s were used. A high-temperature wetting angle measurement system was used to characterize the wettability of melted PEEK under different TC4 surface states. The optical digital microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) were used to examine the three-dimensional morphology of the laser textured surface, interface, and fracture surface of TC4/CFRP joints. The chemical bonding at the TC4/CFRP joint was examined using an X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis system.

**Results and Discussions** The introduction of micro-texture significantly increased the surface roughness of TC4, which first increased and then decreased with the increase of micro-texture width, when compared to the untreated TC4 surface. The canalization effect improved wettability significantly, as shown in Figs. 5 and 6. CFRP melted and completely filled the textured grid after laser joining with widths of 0.1 mm and 0.2 mm. When the width of the texturing grid was too wide, the molten CFRP could not be completely filled in the grid, as shown in Fig. 8. As shown in Fig. 10, new chemical bonding, such as Ti–C, was discovered at the treated interface, indicating that chemical bonding occurred. The shear force increased significantly after texturing compared with the untreated joint. The maximum tensile-shear force in the case of 0.2 mm micro-texture width was 2596 N, which was 154% higher than that of the untreated joint. The tensile-shear force of the TC4/CFRP laser joints increased first as the laser textured micro-texture width increased. The tendency was similar to that of TC4's surface roughness. A large amount of resin-carbon fiber mixture adhered to the

fracture surface of the textured TC4 side, as shown in Figs. 12 and 13. The failure mode included interface failure, cohesive failure, and TC4 matrixes stripping from the substrate due to relatively high interfacial joining strength after laser texturing, indicating mechanical property enhancement.

**Conclusions** Laser texturing was used in the laser joining TC4 and CFRP. The grid pattern was used as the texturing pattern, and the effect of micro-texture width on joint strength was investigated. After laser texturing, the surface roughness of the TC4 surface and the wettability of molten CFRP to TC4 were significantly improved. With a micro-texture width of 0.2 mm, the surface roughness of TC4 could be increased approximately 15 times compared with untreated TC4 and the contact angle reduced from nonwetting to  $49.9^\circ$ , demonstrating that laser texturing could improve the affinity of molten CFRP on TC4 substrate. The maximum tensile-shear force in the case of 0.2 mm micro-texture width was 2596 N, which was 154% higher than the untreated joint. The surface failure mode was a hybrid failure mode including interface failure and cohesive failure. After laser texturing, TC4 matrixes are stripped from the substrate, indicating that the texturing grid may promote mechanical interlocking and increase the tensile-shear force of joints. New chemical bonding was confirmed at the joining interface, implying that chemical bonding occurred at the interface due to the high interfacial temperature. The laser texturing process increased the contact area of the joining interface, improving mechanical interlocking. Surface modification of the TC4 substrate can be achieved using laser texturing, promoting the formation of chemical bonding between CFRP and TC4 to further strengthen joints.

**Key words** laser technique; laser joining; micro-texture; wettability; mechanical interlocking; chemical bonding