

铝合金与 CF/PA66 激光直接连接工艺及化学成键研究

冯紫微^{1,2}, 周宝升³, 张涛³, 牛得田³, 张雪妍¹, 梁圣明¹, 宋晓国^{1,2}, 檀财旺^{1,2*}

¹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;

²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;

³国家高速铁路青岛技术创新中心, 山东 青岛 266108

摘要 铝合金与轻质高强的碳纤增强尼龙 66 复合材料(CF/PA66)的高质量连接是实现轨道交通等领域结构轻量化的重要手段之一。然而,由于二者物化差异大,二者难以实现激光直接连接。为探究铝合金与 CF/PA66 激光直连工艺及其连接机理,以激光功率为变量,揭示了不同热输入下接头宏观形貌、CF/PA66 熔化宽度及界面结合的变化规律,建立了激光功率与接头拉剪性能的联系。结果表明,随着激光功率的增加,CF/PA66 熔宽增加,铝合金与 CF/PA66 的实际接触面积扩大,从而接头承载力提高。然而,热输入过高将会导致树脂分解,界面产生气孔,接头性能降低。接头拉剪力在激光功率为 1100 W 时达到最大值 2571.6 N(拉剪强度为 10.2 MPa)。能与 X 射线光电子衍射仪(XPS)的分析结果表明,铝合金与 CF/PA66 激光直连过程中界面产生了新的化学键“Al—O—C”及“Al—C”,二者因此形成了紧密的界面冶金结合,进而获得了高质量接头。

关键词 材料; 激光连接; 碳纤增强尼龙 66 复合材料; 铝合金; 结合机理; 化学键

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1303002

1 引言

作为实现轻量化的重要途径,轻质高强材料已被广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车等领域^[1]。碳纤增强热塑复合材料(CFRTP)具有高比强度和比模量、耐疲劳、加工成型好等优势,在汽车、船舶等领域的应用比例逐渐增加^[2-3]。然而,由于其生产成本较高,难以实现单一 CFRTP 结构的应用。因此,进行结构设计时,需考虑轻质金属与 CFRTP 复合的连接^[4]。聚酰胺(PA,俗称尼龙)系复合材料具有优异的综合性能^[5],被广泛应用于电子电器、汽车制造等领域。目前有多种热源可以实现 PA 系复合材料与金属的连接,包括激光连接^[6-9]、搅拌摩擦焊^[10-13]、热压连接^[14-15]等。激光热影响区小,能够减少对母材的热损伤,且加工柔性好,在实现二者的连接上具有较大的优势^[16-17]。

相对于钛合金、高强钢等轻量化材料,铝合金具有比重小、导热性好、成本低等突出优势。国内外已有多位学者开展了铝合金与 PA 系复合材料的激光连接。Jung 等^[18]利用半导体激光器实现了 5052 铝合金与碳纤增强聚己内酰胺复合材料(CF/PA6)的直接连接,

发现接头强度受限于高热输入下界面产生的气孔缺陷,通过控制热输入,接头拉剪力最高达到 3000 N。为了提高界面结合强度,Heckert 等^[19]首先对 6082 铝合金表面进行激光处理,增大其表面粗糙度,提高了其与玻纤(GF)增强 PA6 复合材料(GF/PA6)的激光连接接头强度。Zhang 等^[20]采用高速激光毛化技术在 A7050 铝合金表面制备凸起结构,使其与 CF/PA6 复合材料的激光连接头的强度最高达到 39.0 MPa。Jiao 等^[21]首先采用纳秒激光器在 7075 铝合金表面制备了不同网格间距的微织构形貌,然后与 CF/PA 复合材料进行激光连接,试验发现,微织构的引入可以增大二者的接触面积以及界面机械互锁效果。此外,Zhang 等^[22]对比了有无阳极氧化处理的 6061 铝合金与 CF/PA6 的激光连接情况,试验结果表明,经过处理的铝合金表面活性官能团增加,促进了铝合金与 PA6 在界面的化学反应。根据 X 射线光电子能谱(XPS)分析,推测 PA6 中的羰基(C=O)与氧化铝成键,从而提高了接头强度。此外,研究者还发现,通过紫外接枝的方式增加 CF/PA6 表面活性官能团数量也能提高其与铝合金激光连接接头强度^[23]。

上述结果表明,激光热输入对铝合金与 PA6 系复

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-11-16; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(52074097)、国家高速铁路技术创新中心研发计划[CXKY-02-02(2020)]

通信作者: *tancaiwang@163.com

合材料的连接具有至关重要的影响,且通过增强界面机械嵌合以及化学键作用可实现二者的高质量连接。相对于其他常用 PA 系复合材料,聚几二酰几二胺(尼龙 66, PA66)树脂熔点较高,连接区间较窄,为满足其应用需求,探索其与铝合金的激光直接连接工艺及连接机理具有重要价值,然而目前鲜有学者对铝合金与 PA66 树脂基复合材料的激光连接特性进行研究。因此,本文以激光功率为变量,验证铝合金与 CF/PA66 的激光直接连接工艺的可行性,通过分析二者的界面结合情况,讨论激光功率对接头拉剪性能的影响,最后结合能谱仪(EDS)和 XPS 手段鉴定界面化学键种类,最终揭示出二者激光直连机理。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

所用母材为尺寸为 50 mm×50 mm×1.5 mm 的 6061 铝合金和尺寸为 50 mm×25 mm×3 mm 的碳纤增强热塑复合材料。其中,CFRTP 的树脂基体为聚几二酰几二胺(PA66),增强相为体积分数为 30% 的碳纤维。图 1 为 PA66 的结构式,其链上每 12 个碳中存在两个羰基(C=O),熔点为 265 °C。根据 ASTM D638 标准,测得 CFRTP 的拉伸强度为 226 MPa,其拉伸件尺寸(单位为 mm)如图 2 所示。试验前将 CFRTP 放在超声清洗机中利用乙醇清洗

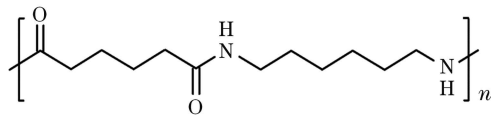


图 1 PA66 结构式

Fig. 1 Structural formula of PA66

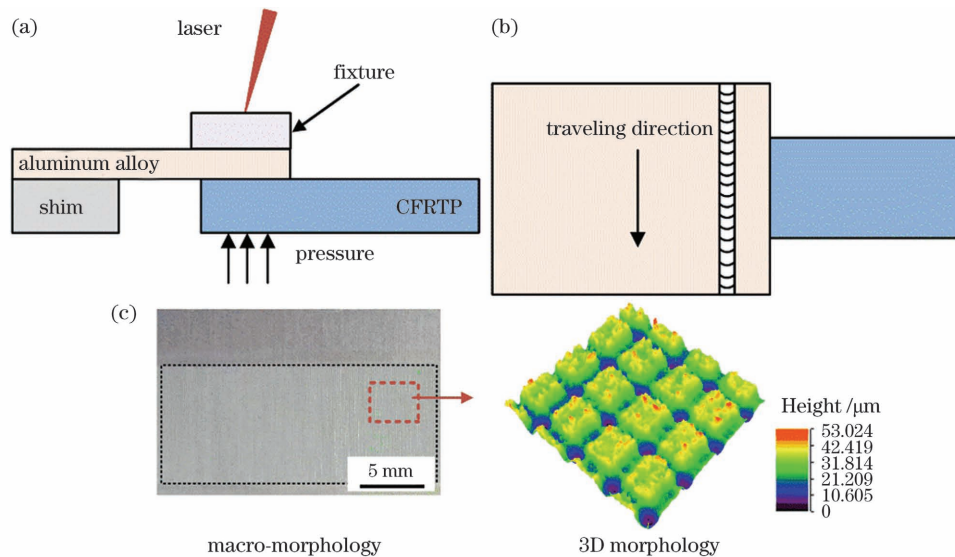


图 3 铝合金-CFRTP 的激光直接连接示意图。(a)激光直接连接过程;(b)激光直接接头;(c)铝合金微结构形貌

Fig. 3 Schematics of laser direct-joining of aluminum alloy-CFRTP. (a) Laser direct joining process; (b) joint made by laser direct joining; (c) microstructural morphology of aluminum alloy

为评估接头的力学性能,采用 30 kN 万能材料试验机进行拉剪试验,拉伸速率为 2 mm/min。此外,采

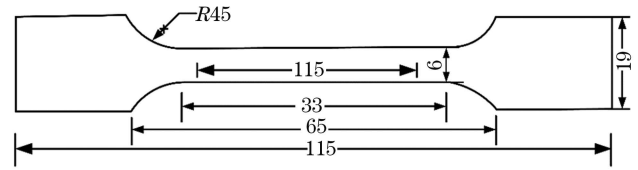


图 2 CFRTP 拉伸件尺寸

Fig. 2 Dimension of CFRTP tensile part

0.5 h 后置入 85 °C 的烘干箱中干燥 72 h 待用。铝合金的清洗首先采用质量分数为 5% 的氢氧化钠(NaOH)溶液浸泡 15 min 去除氧化膜,再利用质量分数为 10% 的盐酸(HCl)溶液去除碱性物质,最后冲洗烘干,存储于冷风干燥箱中。

2.2 试验方法

试验所用激光器为 YLS-6000 型光纤激光器,详细参数见前期研究^[24],图 3 为铝合金与 CFRTP 的激光直接连接过程示意图。为保证二者紧密接触,将夹具固定在工件上表面,并在其正下方施加 0.3 MPa 的恒定压强。该压强通过气动工装夹具输出控制。焊接时,激光与铝合金上表面发生作用,热量通过热传导传递到铝合金与 CFRTP 的界面,熔点较低的 CFRTP 发生熔化,并在压力作用下与铝合金形成接头。为提高铝合金对激光的吸收率,采用纳秒激光器在表面制备微结构,同时利用马克笔进行涂黑处理,其中纳秒激光器处理后的铝合金表面形貌如图 3(c)所示。为防止飞溅,采用 15 L/min 气流量的纯 Ar 作为保护气。经过前期试验,固定离焦量为 +10 mm,焊接速度为 5 mm/s,激光功率变化范围为 900~1300 W 时能够获得稳定的接头。进一步优化工艺区间,改变激光功率间隔为 100 W,研究铝合金与 CFRTP 在不同热输入下的激光直接头性能及界面结合情况。

用最大拉剪载荷与 CFRTP 的熔化面积计算接头拉剪强度,其中 CFRTP 的熔化宽度和实际接触面积通过

统计 CFRTP 侧断口获得, 处理软件为 ImageJ 软件。每个参数对应的拉剪力和拉剪强度至少采用三组数据的平均值作为最终结果。利用 OLYMPUS 光学数码显微镜(OM)和 Zeiss 场发射扫描电子显微镜(SEM)对铝合金与 CFRTP 的界面进行观察。拉剪试验后获得的断口也通过 SEM 进行分析。此外, 采用 EDS 及 XPS 对界面化学键种类进行确定。为制备 XPS 试验样品, 对拉伸测试后的铝合金侧断口立即进行打磨处理, 确保分析位置无 CFRTP 残留, 随后将样品置于乙醇中清洗烘干后分析表面化学成分。所采用的 XPS 试验设备型号为 ESCALAB 250Xi (美国, ThermoFischer), 并通过 Avantage 软件进行分峰拟合, 以 284.8 eV 结合能作为能量标准进行荷电校正。

3 试验结果与分析

3.1 宏观成形

图 4 分别为激光功率 900, 1100, 1300 W 下铝合

金/CFRTP 接头的宏观形貌。在所选工艺参数下, 接头宏观成形良好, 无气孔、裂纹等缺陷产生。而从图 4(b)、(d)、(f) 中可以发现, 在接头的两侧有 CFRTP 由于挤压而溢出。随着激光功率的增加, 热输入相应增加, 这导致树脂的熔化量增加, 溢出量因此随之增加。相应地, 图 5 是不同激光功率下 CFRTP 熔化宽度的变化。随着激光功率的增加, 激光加热区域的中心温度升高, CFRTP 发生熔化的区域随之增加, CFRTP 的熔化宽度从 900 W 的 9.3 mm 提高到 1300 W 的 14.8 mm。由于 PA66 的熔点较低, 其熔化区间较大, 这与熔点较高的聚醚醚酮(PEEK)树脂激光连接工艺特性有所不同。课题组前期对铝合金与 CF/PEEK 进行了激光连接, 试验发现不同热输入下 PEEK 的熔化宽度在 5 mm 左右^[24]。可以发现, CF/PA66 的熔化宽度较大, 这会影响其与铝合金实际接触的面积及相应的拉剪性能, 具体结果在下文进行比较与讨论。

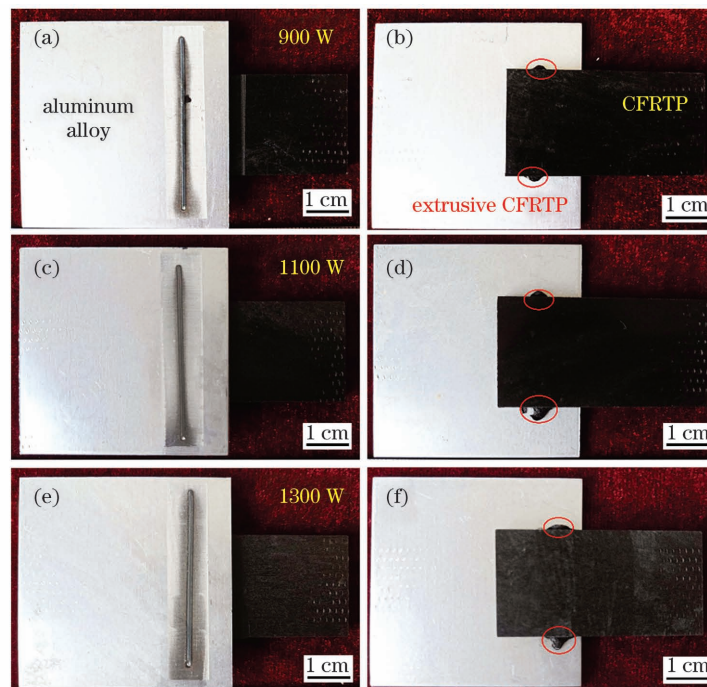


图 4 不同激光功率下铝合金-CFRTP 直连接头的宏观形貌。(a)(b)900 W;(c)(d)1100 W;(e)(f)1300 W

Fig. 4 Macroscopic morphologies of direct-bonding joints of aluminum alloy-CFRTP under different laser powers.

(a)(b) 900 W; (c)(d) 1100 W; (e)(f) 1300 W

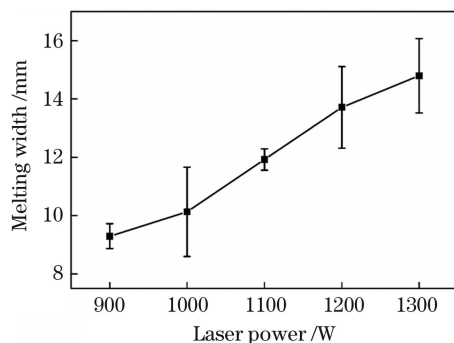


图 5 CFRTP 熔化宽度随激光功率的变化

Fig. 5 Melting width of CFRTP versus laser power

3.2 界面结合

为研究铝合金/CFRTP 在不同激光功率下的界面结合情况, 对抛光后的金相件进行观察, 其结果如图 6 所示。可以发现, 当功率从 900 W 增加到 1100 W 时, 界面结合良好, 而当激光功率继续增加时, 由于界面温度过高, CFRTP 一侧出现了明显的气孔, 这是因为当温度超过树脂分解温度时, 树脂分解产生的气体会残留在界面形成气孔。利用 SEM 对界面进行进一步观察, 其结果如图 7 所示。其中, 图 7(a)、(c)、(e) 分别对应于图 6 中的 A、B、C 三个区域, 而图 7(b)、(d)、(f) 对应于图 7(a)、(c)、(e) 的放大区域

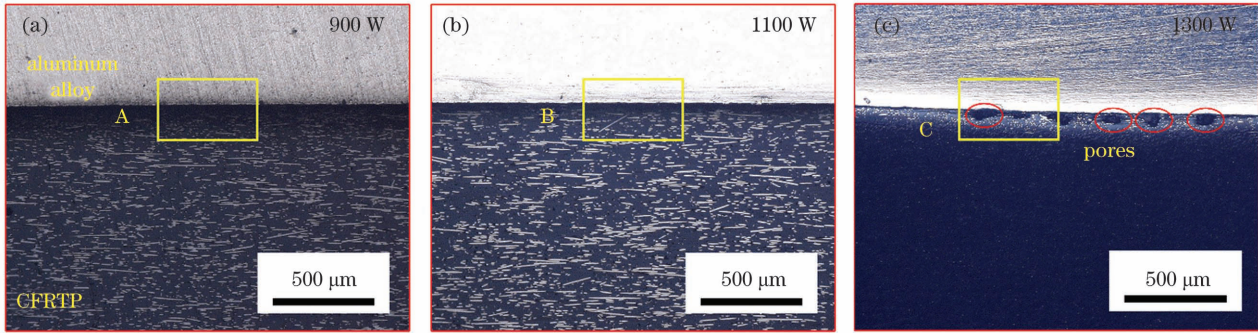


图 6 不同激光功率下铝合金-CFRTP 的界面结合。(a) 900 W; (b) 1100 W; (c) 1300 W

Fig. 6 Interface bonding of aluminum alloy-CFRTP under different laser powers. (a) 900 W; (b) 1100 W; (c) 1300 W

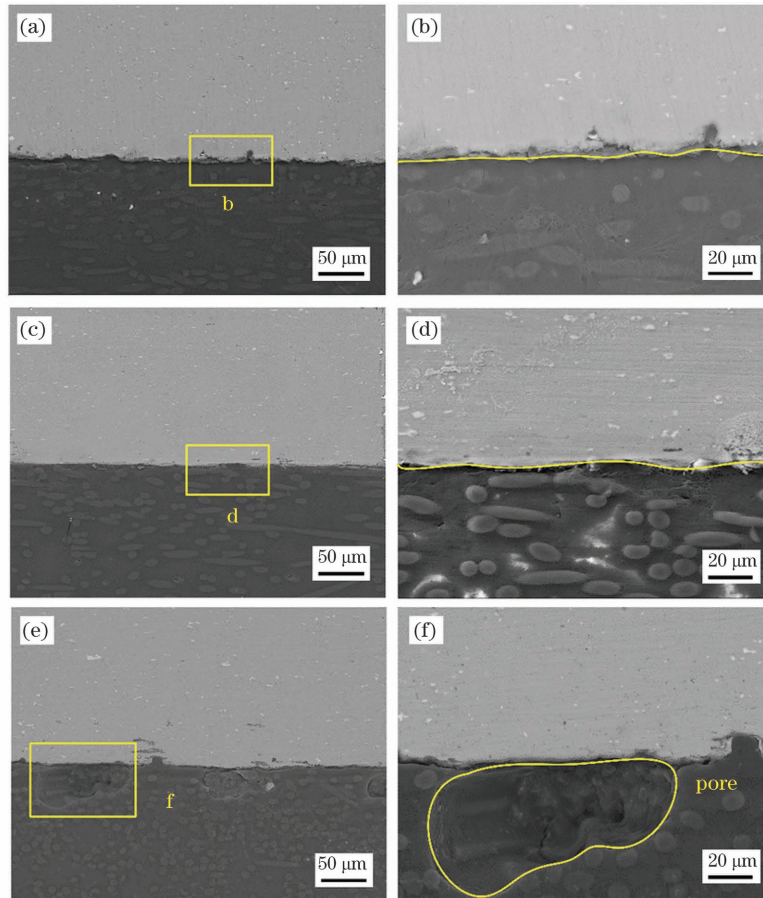


图 7 不同功率下铝合金-CFRTP 界面结合的放大形貌。(a) A 区,图 6; (b) b 区,图 7(a); (c) B 区,图 6; (d) d 区,图 7(c); (e) C 区,图 6; (f) f 区,图 7(e)

Fig. 7 Magnified morphologies of interface bonding of aluminum alloy-CFRTP under different laser powers. (a) A area in Fig. 6; (b) b area in Fig. 7(a); (c) B area in Fig. 6; (d) d area in Fig. 7(c); (e) C area in Fig. 6; (f) f area in Fig. 7(e)

b、d、f。可以发现,当激光功率为 900 W 和 1100 W 时,铝合金表面凹凸不平处与 CFRTP 紧密嵌合,形成“互锁”结构。而当激光功率为 1300 W 时,可以观察到贴近界面的微米级气孔,使铝合金与 CFRTP 的界面产生缺陷。

3.3 拉剪性能

图 8 是不同激光功率下铝合金/CFRTP 接头拉剪力的变化情况。随着激光功率的增加,接头拉剪力出现先增加后降低的趋势,并在功率为 1100 W 时获得最大值。当功率从 900 W 增加到 1100 W 时,拉剪力

从 2083.9 N(拉剪强度为 6.4 MPa)增加到 2571.6 N(拉剪强度为 10.2 MPa);当功率从 1100 W 增加到 1300 W 时,拉剪力从 2571.6 N(拉剪强度为 10.2 MPa)降低到 2114.7 N(拉剪强度为 7.8 MPa)。原因分析认为,一方面,功率的增加引起热输入增加,CFRTP 的熔化区域增加,铝合金与 CFRTP 的实际接触面积也随之增加,接头拉剪性能因此得到改善;另一方面,热输入过大引起界面温度升高,当界面温度超过 CFRTP 的分解温度时,树脂发生分解产生的气体将作为缺陷留在界面,接头的有效承载面积降低,从而

使接头拉剪性能降低。图 9 为典型的拉剪载荷-位移曲线,可以发现,随着拉剪载荷的提高,位移也相应增加,这进一步说明了接头承载力得到增强。在铝合金与 CF/PEEK 的激光连接中^[24],课题组前期通过在铝合金表面引入微织构增强机械互锁的方式,使接头拉剪力达到 2100 N 左右,而本研究中铝合金与 CF/PA66 的激光直连接头拉剪力最高达到 2571.6 N,这进一步说明了连接面积对本研究接头拉剪性能的积极影响。

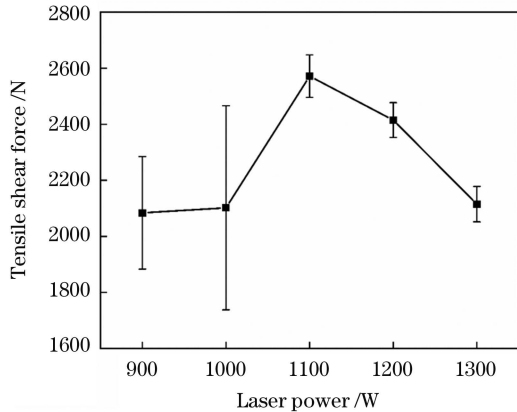


图 8 激光功率对铝合金-CFRTP 接头拉剪性能的影响
Fig. 8 Effect of laser power on tensile shear properties of joints of aluminum alloy-CFRTP

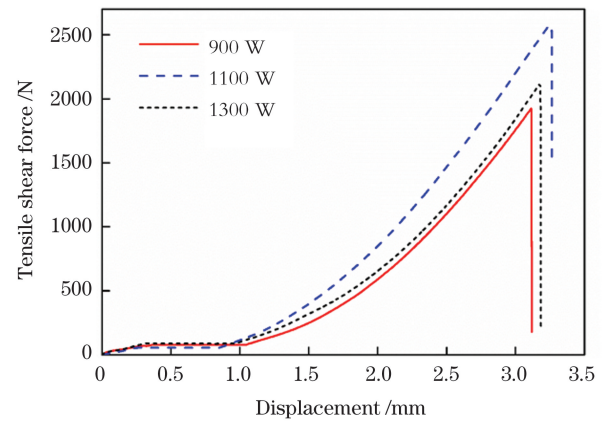


图 9 不同激光功率下铝合金-CFRTP 接头的载荷-位移曲线
Fig. 9 Load-displacement curves of joints of aluminum alloy-CFRTP under different laser powers

3.4 断口分析

为进一步研究铝合金与 CFRTP 的结合情况,对拉剪测试后的断口进行分析。图 10 为不同激光功率下获得的断口宏观形貌。可以发现,二者的断裂模式为界面破坏,且随着激光功率的增加,CFRTP 侧的连接区域增加,这与上述 CFRTP 的熔化宽度变化相一致。当激光功率为 1100 W 时利用 SEM 对 CFRTP 侧断口进行进一步的微观分析,其结果如图 11 所示。可以发现,CFRTP 表面的树脂被粘附在铝合金一侧,

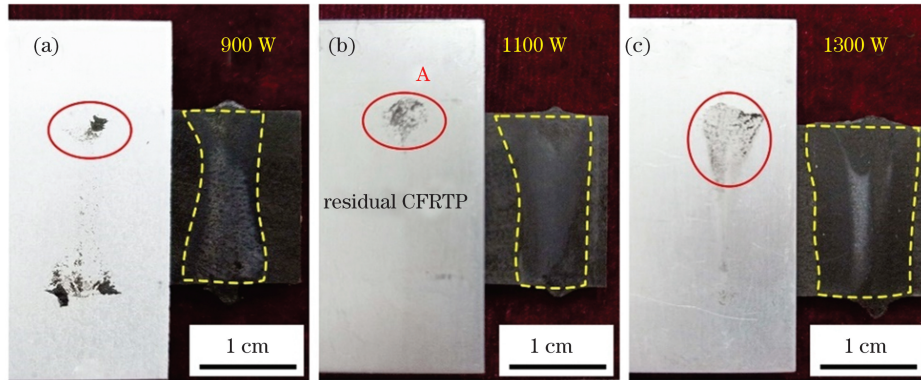


图 10 不同激光功率下铝合金-CFRTP 接头的宏观断口形貌。(a) 900 W;(b) 1100 W;(c) 1300 W
Fig. 10 Morphologies of fracture surfaces of joints of aluminum alloy-CFRTP under different laser powers. (a) 900 W; (b) 1100 W; (c) 1300 W

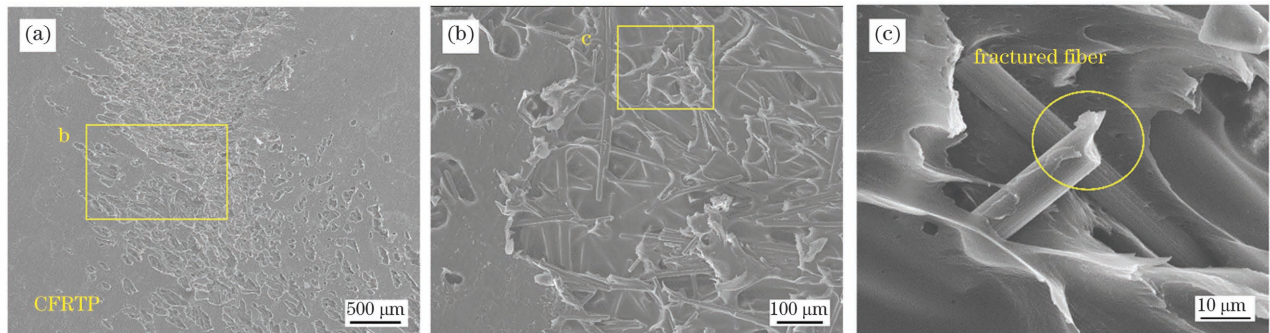


图 11 激光功率为 1100 W 时 CFRTP 侧断口的 SEM 形貌。(a)图 10(b)的 A 区域;(b)图 11(a)的 b 区域;(c)图 11(b)的 c 区域
Fig. 11 SEM morphologies of fracture surfaces of CFRTP side for laser power of 1100 W. (a) A area in Fig.10 (b); (b) b area in Fig.11(a); (c) c area in Fig.11(b)

从而裸露出碳纤维,并且从图 11(c)中可以看到有扯断的碳纤维,这说明铝合金与 CFRTP 的界面具有较高的结合强度。

3.5 连接机理

金属与树脂基复合材料的激光连接界面结合机理主要包括机械嵌合和化学键作用。去除氧化膜后铝合金表面仍存在一定的粗糙度,因此在微观上铝合金表面与 CFRTP 间能够产生机械锚固的作用,其效果如图 7 所示。为确定铝合金与 CFRTP 间是否发生了化学反应,首先采用 EDS 对不同激光功率下铝合金-CFRTP 界面进行线扫描以获得元素分布情况,所得结果如图 12 所示。其中,图 12(a)为界面线扫描的位置,图 12(b)~(d)分别为激光功率为 900,1100,1300 W 时的线扫描结果。可以发现,铝合金与

CFRTP 的界面存在一个元素的过渡层,且过渡层厚度随着激光功率的增加而增大。当激光功率为 900 W 时,元素过渡层的厚度为 $9\ \mu\text{m}$,当激光功率为 1100 W 时,元素过渡层的厚度为 $12\ \mu\text{m}$,而当激光功率增加到 1300 W 时,元素过渡层的厚度增加到 $15\ \mu\text{m}$ 。说明在铝合金与 CFRTP 的激光连接过程中,界面元素发生了扩散,且随着热输入的增加,元素扩散程度增加。推测界面的 Al、C、O 元素可能在热作用下发生了化学作用。本课题组前期对钛合金与 CFRTP 进行了激光连接,发现 Ti、C、O 三种元素在其界面发生了扩散,并证明了化学键的生成^[25-26]。因此,在铝合金与 CFRTP 的激光连接中,其连接机理除了分子间作用力和机械锚固力,还可能

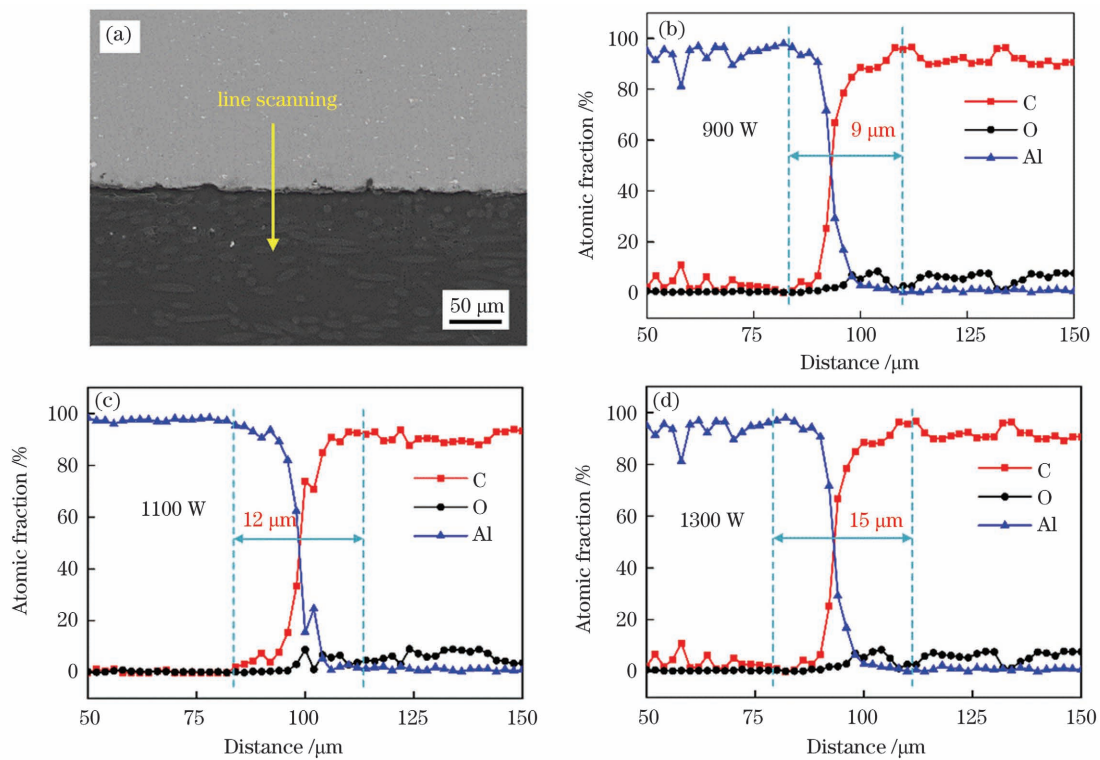


图 12 不同激光功率下铝合金-CFRTP 界面的线扫描结果。(a)激光功率为 900 W 时的线扫描位置;(b) 900 W;(c) 1100 W;(d) 1300 W

Fig. 12 Line scanning results of interface of aluminum alloy-CFRTP under different laser powers. (a) Location of line scanning for laser power of 900 W; (b) 900 W; (c)1100 W; (d) 1300 W

为进一步揭示铝合金与 CFRTP 的界面化学成键情况,选择激光功率为 1100 W 时的铝合金-CFRTP 接头进行 XPS 检测,其结果如图 13 所示。其中,图 13(a)为 XPS 全谱的元素定性分析,能够检测到 Al、C、O、N 元素。为了准确分析 C 元素在界面的结合状态,对 C1s 轨道进行精细谱扫描,分析后的结果如图 13(b)所示。在结合能为 283 eV 及 284 eV 左右,分别检测到“Al-C”键及“Al-O-C”

键,这是在铝合金与 CFRTP 激光连接过程中形成的新化学键。同样,Liu 等^[27]在进行铝合金与 PA66 树脂的搅拌摩擦焊接时,发现界面形成了“Al-C”键及“Al-O-C”键。学者认为,PA66 中的羰基(C=O)与铝合金成键,并且是接头形成的重要条件。综上所述,在合适的激光热输入下,铝合金与 CF/PA66 发生化学反应,最终形成了高质量的激光连接接头。

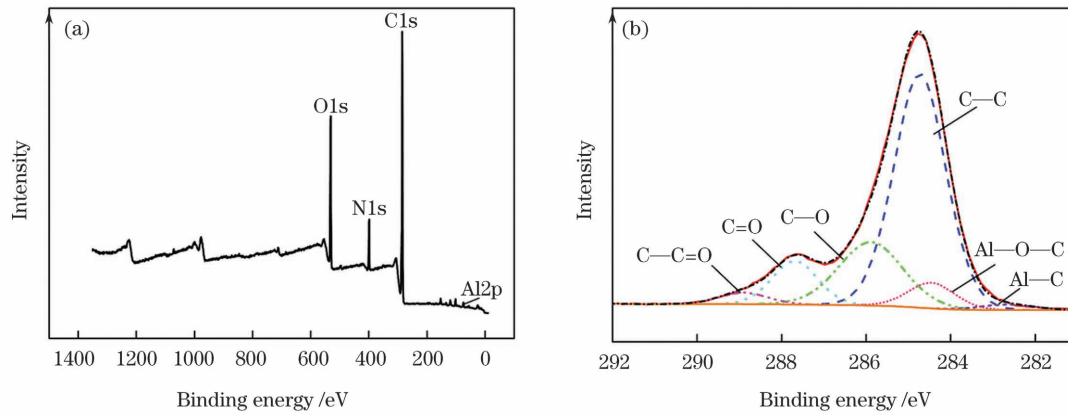


图 13 激光功率为 1100 W 时铝合金-CFRTP 界面 XPS 结果。(a)全谱;(b)精细谱

Fig. 13 XPS results of interface of aluminum alloy-CFRTP for laser power of 1100 W. (a) Survey spectrum; (b) fine spectra

4 结 论

探索了 6061 铝合金与 CF/PA66 激光直接连接的可行性,并通过改变激光功率确定了工艺区间,基于界面结合、拉剪性能及化学成键分析明确了二者的连接机理,获得的主要结论如下。

1)在所选参数下,焊缝成形良好,无缺陷产生。随着激光功率的增加,CFRTP 的熔化宽度增加,因此接头的连接面积增加。在一定的热输入下界面结合紧密;功率过高时界面出现由树脂分解产生的气体造成的气孔。

2)随着激光功率的增加,接头拉剪力出现先增大后减小的趋势。当激光功率为 1100 W 时,接头拉剪力达到最大值 2571.6 N(拉剪强度为 10.2 MPa)。这是由于增加的热输入增大了铝合金与 CFRTP 的实际接触面积,因此接头承载力提高,接头拉剪力得到改善,而当热输入过高导致界面树脂分解时,气孔缺陷会降低接头性能。

3)接头失效形式为界面破坏,在 CFRTP 侧断口上观察到裸露的碳纤维;能谱分析及 XPS 结果证明 PA66 中的 C=O 与铝合金在激光连接过程中发生了化学反应,在界面上形成了“Al—C”键和“Al—C—O”键,为铝合金与 CF/PA66 激光直接连接形成高质量接头提供可能。

参 考 文 献

- [1] 张书迈,张福全,周楷武,等. Ni 夹层对镁合金/铝合金激光熔焊接头组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0702001.
Zhang S M, Zhang F Q, Zhou D W, et al. Effects of Ni interlayer on microstructure and properties of fusion welded joints of magnesium/aluminum alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0702001.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张承启,彭小红,包海峰. 碳纤维-尼龙 6 混编织物复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(11): 2487-2494.
Zhang C Q, Peng X H, Bao H F. Preparation and properties of carbon fiber-nylon 6 mixed braid fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(11): 2487-2494.
- [6] van der Straeten K, Burkhardt I, Olowinsky A, et al. Laser-induced self-organizing microstructures on steel for joining with polymers[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 1137-1144.
- [7] 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.
- [8] van der Straeten K, Sparla J, Olowinsky A, et al. Influence of self-organizing microstructures on the wettability of molten plastic on steel for hybrid plastic-metal joints[J]. Welding in the World, 2019, 63(5): 1431-1441.
- [9] Li Y, Bu H C, Yang H Y, et al. Effect of laser heat input on the interface morphology during laser joining of CFRTP and 6061 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 366-379.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Yan Y F, Shen Y F, Lei H B, et al. Friction lap welding AA6061 alloy and GFR nylon: influence of welding parameters and groove features on joint morphology and mechanical property[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116458.
- [13] Xu M J, Liu B S, Zhao Y Q, et al. Direct joining of thermoplastic ABS to aluminium alloy 6061-T6 using friction lap welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(5): 391-397.

- [14] Arkhurst B M, Kim J H, Lee M Y. Hot metal pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to AZ31 Mg alloy and the effect of the oxide surface layer on joint strength[J]. Applied Surface Science, 2019, 477: 241-256.
- [15] Kim S G, Suzuki A, Takata N, et al. Effect of hot-press thermal history on joint strength of A5052/Polyamide-6 hybrid structure via a porous layer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 276: 116388.
- [16] 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): 0202020.
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): 0202020.
- [17] Li J H, Lei L Y, Du M K, et al. Study on the structure and properties of T2 copper/304 stainless steel laser welding joint[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1316001.
李继红, 雷龙宇, 杜明科, 等. T2 铜/304 不锈钢激光焊接接头组织及性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1316001.
- [18] Jung K W, Kawahito Y, Takahashi M, et al. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(3): 032003.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Zhang Z, Shan J G, Tan X H, et al. Effect of anodizing pretreatment on laser joining CFRP to aluminum alloy A6061[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 70: 142-151.
- [23] Zhang Z, Shan J G, Tan X H. Evaluation of the CFRP grafting and its influence on the laser joining CFRP to aluminum alloy[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(4): 390-406.
- [24] Feng Z W, Ma G L, Su J H, et al. Influence of process parameters on the joint characteristics during laser joining of aluminium alloy and CFRTP[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1493-1506.
- [25] 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.
- [26] Liu Y F, Su J H, Tan C W, et al. Effect of laser texturing on mechanical strength and microstructural properties of hot-pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to Ti6Al4V[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 30-41.
- [27] Liu F C, Dong P, Lu W, et al. On formation of Al—O—C bonds at aluminum/polyamide joint interface[J]. Applied Surface Science, 2019, 466: 202-209.

Investigation on Laser Direct Joining of Aluminum Alloy-CF/PA66 and Chemical Bonding Mechanism

Feng Ziwei^{1,2}, Zhou Baosheng³, Zhang Tao³, Niu Detian³, Zhang Xueyan¹,
Liang Shengming¹, Song Xiaoguo^{1,2}, Tan Caiwang^{1,2*}

¹Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai,
Weihai 264209, Shandong, China;

²State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

³National Invitation Center of High Speed Train at Qingdao, Qingdao 266108, Shandong, China

Abstract

Objective Joining light materials have become an important way to achieve the lightweight of automotive, rail transportation, and other fields. Carbon fiber reinforced nylon composites (CF/PA) are thought to a promising application due to high specific strength and modulus. However, a hybrid joint of lightweight metals and CF/PA is necessary when considering the cost of CF/PA. Moreover, joining aluminum alloys with high thermal conductivity and low price to CF/PA plays a significant role in saving energy and reducing emission. To overcome the shortcomings of traditional mechanical connection and adhesive bonding, various welding methods have been investigated for joining aluminum alloys to CF/PA such as laser welding, friction stir welding, and induction welding. Thereinto, the laser as a heat source possesses a flexible controllability and a less heat affected area to base materials. A high-quality joint can be obtained via optimizing the process parameters and strengthening the interface bonding though some differences in physical and chemical properties exist between two materials. The melting point of CF/PA66 is higher than those of the other PA composites, which causes a narrow process window. So far, few researches are performed to investigate the laser joining of aluminum alloys to CF/PA66. Therefore, in the current study, laser power is chosen as a variable to confirm the possibility of direct joining aluminum alloys to CF/PA66, and the bonding mechanism is finally revealed.

Methods The 1.5 mm-thick 6061 aluminum alloy and a 3 mm-thick carbon fiber reinforced composite (CFRTP) are selected to perform the laser direct joining. The resin substrate of CFRTP is polyhexamethylene adipamide (PA66). The traveling speed and defocus distance are kept constant, and the laser power is changed from 900 W to 1300 W with an

interval of 100 W to investigate the effect of heat input on the interface bonding and the corresponding joint characteristics. Tensile shear tests with a stretch speed of 2 mm/s are adopted to evaluate the mechanical properties. The melting width of CFRTP and the actual contact area between the aluminum alloy and the CFRTP are extracted by ImageJ software. Interface bonding is observed by optical digital microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). Fracture surfaces are also detected by SEM. Chemical bonding is determined by combining the analysis of energy spectrum (EDS) with X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Results and Discussions An excellent weld formation without defects is obtained under the condition of the selected parameters (Fig. 4). The melting width of CFRTP is increased from 9.3 mm to 14.8 mm when the laser power increases from 900 W to 1300 W (Fig. 5), which could expand the contact area between the aluminum alloy and the CFRTP. Interface bonding under different laser powers is comparatively observed (Fig. 6). Enlarged SEM morphologies are also presented to further observe the interface (Fig. 7). Pores occur at the interface when the temperature exceeds the decomposition point of the CFRTP, which is detrimental to improve the strength of joints. Therefore, when the tensile shear force of joints is discussed, a tendency of first increasing and then decreasing is found, and the maximum value is obtained at a laser power of 1100 W (Fig. 8). The tensile shear force is first increased from 2083.9 N (tensile shear strength of 6.4 MPa) to 2571.6 N (tensile shear strength of 10.2 MPa) when the laser power increases from 900 W to 1100 W, and subsequently is decreased to 2114.7 N (tensile shear strength of 7.8 MPa) when the laser power increases to 1300 W. Interface failure is determined by analyzing the fracture surfaces under different laser powers (Fig. 10). A diffusion of Al, C and O elements at the interface is detected (Fig. 12). Based on this result, the XPS analysis is performed to confirm the existence of new chemical bonds including Al—O—C bond and Al—C bond (Fig. 13). This provides the evidence for the direct bonding of aluminum alloys and CFRTP by a laser.

Conclusion To investigate the process and bonding mechanism of aluminum alloys and CFRTP during the laser direct joining, laser power is changed to reveal the macroscopic morphologies of the joints, the melting width of CF/PA66, and interface bonding under different heat inputs. The relationship between laser power and tensile shear properties of joints is thus established. Results indicate that the melting width of CF/PA66 increases as the laser power increases. The bearing capacity of joints is thus improved because of expanded actual contact areas. However, when the heat input is excessively high, some pores will be produced at the interface due to the decomposition of resin, which will weaken the joint properties. The maximum tensile shear force of 2571.6 N (tensile shear strength of 10.2 MPa) is obtained when laser power is 1100 W. The formation of new chemical bonds including Al—O—C bond and Al—C bond is identified during the laser direct joining. A tight metallurgical bonding at the interface between the aluminum alloy and the CF/PA66 forms, and the direct-bonding joints with high quality are thus obtained.

Key words materials; laser joining; carbon fiber reinforced nylon 66 composite; aluminum alloy; bonding mechanism; chemical bonds