

引用格式: 谌顺心, 徐任信. 铝合金表面活化及其与 CF/PEEK 复合材料电阻焊性能[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 75-84.  
CHEN Shunxin, XU Renxin. Surface activation of aluminum alloy on its resistance welding performance with CF/PEEK composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 75-84.

## 铝合金表面活化及其与 CF/PEEK 复合材料电阻焊性能

谌顺心, 徐任信\*

(武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 通过对铝合金表面活化及与热塑层的结合, 实现 7075 铝合金(7075AA)与碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)电阻焊接工艺的优化。利用激光处理在铝合金表面构建起微沟槽网络, 显著增强与聚醚酰亚胺(PEI)热塑层的机械耦合作用; 相比之下, 喷砂处理和未处理样品的结合效果则较弱。通过傅里叶变换红外光谱(FT-IR)与 X 射线光电子能谱(XPS)表面分析, 结果表明 Al—O—Si 键和硅烷偶联膜过渡层的形成可强化界面。电阻焊接头中, 喷砂/激光刻蚀铝与 PEI 层间结合的不完全, 导致热塑层脱粘成为主要失效模式。喷砂接头的单搭接剪切强度 LSS 为 10.47 MPa, 激光刻蚀接头的 LSS 达到 15.35 MPa。经过硅烷处理后, PEI 热塑层结合显著增强, 激光刻蚀和硅烷处理接头的 LSS 提高至 19.03 MPa, 相较于单纯激光刻蚀提高了 23.97%, 此时接头断面呈加热元件断裂特征, 失效模式转变为层间断裂。

**关键词:** 7075AA; CF/PEEK 复合材料; 表面增塑改性; 强化热塑层; 电阻焊接

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000062

**中图分类号:** V261.3<sup>+</sup>4; TG44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2025)03-0075-10

## Surface activation of aluminum alloy on its resistance welding performance with CF/PEEK composites

CHEN Shunxin, XU Renxin\*

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The resistance welding process of 7075 aluminum alloy(7075AA) and carbon fiber reinforced polyether ether ketone(CF/PEEK) is optimized through the activation of the aluminum alloy surface and its subsequent integration with a thermoplastic layer. A microgroove network is fabricated on the aluminum alloy surface using laser treatment, which notably augmented the mechanical coupling with the polyetherimide(PEI) thermoplastic layer. In contrast, the bonding effectiveness of sandblasted and untreated samples are inferior. Surface analysis conducted *via* Fourier transform infrared spectroscopy(FT-IR) and X-ray photoelectron spectroscopy(XPS) reveal the formation of Al—O—Si bonds and a silane coupling film transition layer, both of which fortified the interface. In the resistance welded joints, incomplete bonding between the sandblasted/laser-etched aluminum alloy and the PEI layer lead to debonding of the thermoplastic layer, which emerge as the predominant failure mode. The single lap shear strength(LSS) of the sandblasted joint is 10.47 MPa, whereas the LSS of the laser-etched joint attains 15.35 MPa. Following silane treatment, the bonding of the PEI thermoplastic layer is markedly enhanced, resulting in an LSS of 19.03 MPa for the laser-etched and silane-treated joint—a 23.97% increase compared to simple laser etching. At this juncture, the cross-section of the joint exhibits characteristics indicative of heating element fracture, with the failure mode transitioning to interlayer fracture.

**Key words:** 7075AA; CF/PEEK composites; surface plasticization modification; reinforced thermoplastic layer; resistance welding

航空航天、汽车和电子等先进行业对轻质材料的需求日益增长,这些材料应具有高刚性、优异的强度和卓越的抗冲击性<sup>[1-3]</sup>。7075 铝合金(7075AA)和碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)等材料因出色的机械特性和易加工特性,成为高端应用场景下的理想选材<sup>[4]</sup>,两者结合在实现轻量化的同时,能够有效保持结构强度。然而,不同性质材料之间实现可靠的连接却面临着诸多挑战。尽管传统连接技术如机械铆接和胶接已被应用,但前者存在应力集中和增重问题,后者则因操作周期长和强度低而受限,很难成为今后铝合金和热塑性复合材料的主要连接方式。因此,电阻焊技术以其高效、可靠、经济、设备要求简单以及对各种材料的适应性强等优势<sup>[5-6]</sup>,在解决异质材料连接难题方面展现出巨大潜力。但是,通过电阻焊将热塑性复合材料直接黏合到金属上通常是不可行的,因为该工艺不利于热塑性复合材料和轻质金属之间的分子键合<sup>[7]</sup>。为了解决这一问题,可以对铝合金表面进行特殊的热塑化处理,赋予铝合金表面类似于热塑性材料的高温熔融和自黏性特性,从而实现非热塑性铝合金与热塑性复合材料的连接。

铝合金和热塑性复合材料表现出不同的化学和物理特性,导致它们之间的黏合性不足<sup>[8-10]</sup>。为了提高黏合性,通常采用表面处理技术。研究者目前主要通过物理刻蚀和化学处理的方法对铝合金表面进行处理<sup>[11-13]</sup>。Park 等<sup>[14]</sup>采用砂纸、尼龙垫磨蚀等不同的机械磨蚀方法探究表面粗糙度对玻璃纤维/铝(GLARE)层压板的影响,发现适当的粗糙度可以提高层压板的连接强度。然而,为了满足现代装备对界面结合的严苛要求,单一的物理蚀刻或化学蚀刻已难以达到理想效果,而偶联剂凭借其独特的双官能团特性,恰好能够进一步增强金属与热塑性复合材料之间的界面结合强度<sup>[15]</sup>。Wu 等<sup>[16]</sup>开展了在铝合金表面进行硅烷化处理对 CFRP/铝合金接头粘接性能影响的研究。研究发现硅烷偶联剂处理铝合金表面可以有效促进铝合金与环氧基团的接枝反应,形成稳定的硅烷过渡层。这一处理不仅增强了铝合金与胶黏剂之间的化学键合,还改善了界面及胶黏剂的物理形貌,进一步提高 CFRP/铝合金接头的剪切强度。

本研究通过对铝合金表面热塑化处理,并结合物理蚀刻方法(喷砂和激光蚀刻)和化学偶联剂(硅烷偶联剂),增强其与热塑层的结合力。随后,将改性铝合金通过电阻焊连接到 CF/PEEK 复合材料,深入研究不同表面处理方法对热塑层的结合力、电

阻焊接接头结构和强度的影响。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

利用电阻焊技术连接 7075AA 与 CF/PEEK 复合材料异质结构。7075AA 来自中国铝业公司(化学成分组成见表 1),CF/PEEK 复合材料来自中国航空工业复合材料公司。东丽生产的 T300 碳纤维布用作加热元件(HEs)的电阻体,连接树脂膜由 PEI 和 PEEK 树脂粉末溶解制备而成。热塑层由 PEI 颗粒溶液制成。实验中所用材料还包括 SABIC 公司的 ULTEM™PEI 粉末和颗粒、Solvay 公司的 KT-880UFP PEEK 粉末,以及阿拉丁公司的  $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)、甲基吡咯烷酮(NMP)和无水乙醇。

表 1 7075AA 的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 7075AA (mass fraction/%)

| Si  | Fe  | Cu  | Mn  | Mg  | Cr   | Zn  | Ti  | Al   |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|
| 0.4 | 0.5 | 2.0 | 0.3 | 2.9 | 0.28 | 6.1 | 0.2 | Bal. |

### 1.2 铝合金表面活化

首先,使用乙醇和丙酮溶液对铝合金进行超声波清洗以彻底去除表面油污;接着,使用平均粒径为 70 目的金刚石砂对铝合金表面进行喷砂处理,喷砂通过直径为 4 mm 的喷嘴以 1.72 MPa 的气压进行,喷嘴与铝合金表面保持垂直,距离约为 250 mm,时间 30 s。随后,采用 SP-070P-A-EP-Z-F-Y 脉冲光纤纳秒激光系统进行蚀刻,激光蚀刻的扫描参数:扫描速度 2500 mm/s,功率 60 W,脉冲宽度 500 ns,频率 40 kHz。按照微织构间距 0.85 mm、宽度 0.3 mm 和深度 0.3 mm 的设计参数进行表面处理<sup>[17]</sup>(图 1)。将处理的铝合金置于丙酮酒精混合溶液中进行超声清洗 15 min,再放入去离子水中超声清

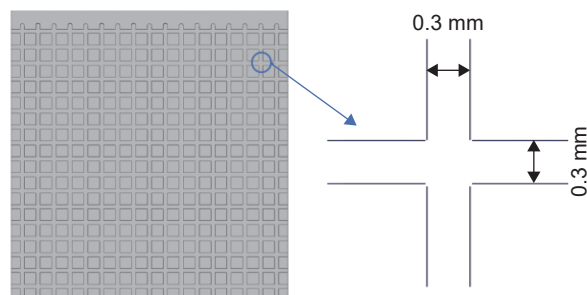


图 1 铝合金表面激光蚀刻的微织构设计图

Fig. 1 Microtexture design of laser etching on aluminum alloy surface

洗 5 min; 接着, 将未处理的、喷砂和激光蚀刻处理的铝合金样品浸入 1%(体积分数)的 KH550 硅烷偶联剂溶液(KH550:乙醇:去离子水=1:5:94)中, 使其充分反应。反应结束后, 将处理后的铝合金样品放入 80 ℃ 的烘箱中干燥 1 h, 促进偶联剂在铝合金表面固化和黏附。最后, 按照 10 g PEI:40 mL

NMP 配比的 PEI 溶液, 对未处理、喷砂处理和激光刻蚀处理的铝合金表面以及经过 KH550 硅烷偶联剂处理的铝合金表面进行均匀涂覆。涂覆后, 将样品置于 150 ℃ 的烘箱中干燥 6 h, 在铝合金表面形成 PEI 热塑层(具体过程见图 2)。表 2 列出不同铝合金表面处理后的试样编号。

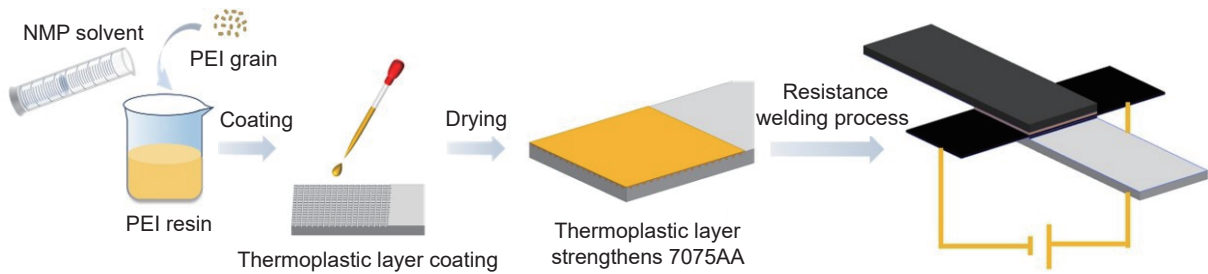


图 2 铝合金表面 PEI 热塑化处理和电阻焊接过程

Fig. 2 PEI thermoplastic treatment on aluminum alloy surface and resistance welding process

表 2 不同铝合金表面处理试样编号  
Table 2 Different aluminum alloy surface treatment specimen number

| Methods of treatment | Pure              | Sandblast         | Laser erosion     |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Blank                | Al <sub>p</sub>   | Al <sub>s</sub>   | Al <sub>L</sub>   |
| PEI                  | Al <sub>pp</sub>  | Al <sub>sp</sub>  | Al <sub>LP</sub>  |
| KH550+PEI            | Al <sub>PKP</sub> | Al <sub>SKP</sub> | Al <sub>LKP</sub> |

1.3 7075AA 与 CF/PEEK 复合材料电阻焊接

电阻焊接工艺: 首先, 运用模具技术在碳纤维 T300 布(线径 0.14 mm)的两面涂覆 PEI 和 PEEK 粉末; 然后, 将涂覆后的碳布放入夹层模具中, 在 380 ℃、10 MPa 的条件下进行热压, 形成加热元件 HEs(PEEK-CF-PEI); 随后, 将 HEs 放置在 7075AA 和 CF/PEEK 复合材料接头之间 20 mm×20 mm 重叠区域内(如图 2 所示), 施加 1 MPa 的恒定压力以确保良好接触; 接着, 将接头放入电阻焊接设备中, 在输入电压 25 V、电流 15 A 的情况下焊接 120 s; 焊接结束后, 在恒定压力下自然冷却至室温, 焊接过程完成。

1.4 表征方法

使用超深度显微镜(DSX510)检测 3 种不同表面处理(未处理、喷砂和激光蚀刻)的 7075AA 板材的表面形貌, 并测量其粗糙度。使用 NMP 溶剂制备的 PEI 溶液对不同表面处理的 7075AA 的接触角检测, 并使用 Data Physics OCA20 系统进行测量。使用 X 射线光电子能谱(XPS)识别偶联剂在铝合金表面形成的化学键类型。为了评估铝合金和 PEI 热塑层之间的结合, 使用扫描电子显微镜

(SEM)分析横截面界面。此外, 通过使用 SEM 观察接头断面的失效模式, 进一步验证表面处理对铝合金与热塑层之间的结合强度的影响。使用万能试验机测试焊接试样的单搭接剪切强度 LSS, 拉伸速率设定为 1 mm/min, 并记录最大强度值。表 2 中每种处理均制备 3 件平行试样, 每组试样进行相同的拉伸测试, 并根据结果计算平均值和标准差。

2 结果与分析

2.1 不同物理处理铝合金表面的附着力

2.1.1 物理刻蚀后铝合金表面形貌及接触角

图 3 为不同物理蚀刻处理后的铝合金样品的二维和三维表面形貌。可以看到, 仅经过丙酮和去离子水超声清洗的铝合金表面相对光滑, 表面存在滚动条纹。喷砂处理的样品表面变得粗糙, 布满砂粒侵蚀形成的微坑。激光蚀刻处理的样品呈现出均匀的微沟槽, 这些微沟槽相互交织, 在铝合金表面构建起三维相互交织的网络结构。喷砂形成的微坑比较分散, 而激光微槽的定向排列更利于树脂渗透。图 4 为铝合金经过不同处理后的表面粗糙度测量结果。未经处理的铝合金的  $R_a$  和  $R_z$  值分别为 0.2  $\mu\text{m}$  和 0.4  $\mu\text{m}$ , 表面纹理较为光滑。喷砂处理后, 由于高速砂粒的冲击, 粗糙度显著增加,  $R_a$  和  $R_z$  值分别达到 0.7  $\mu\text{m}$  和 0.9  $\mu\text{m}$ 。激光蚀刻后表面粗糙度进一步增加, 微槽网格使  $R_a$  和  $R_z$  值分别达到 1.2  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$ , 大约是未经处理铝合金的 6 倍。



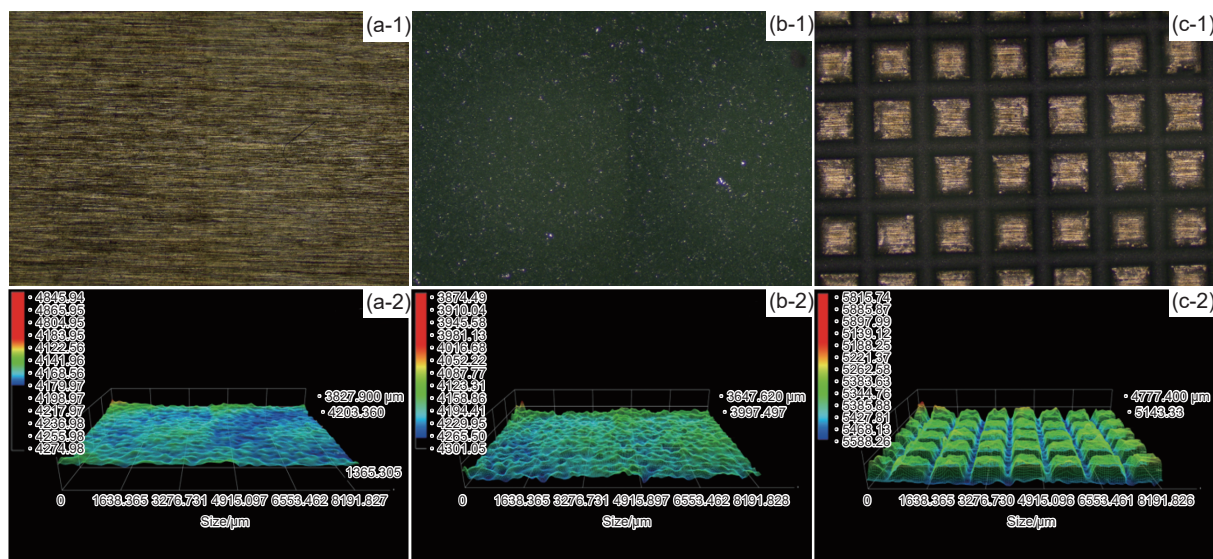


图 3 不同物理蚀刻工艺处理的铝合金表面的二维(1)和三维(2)形貌 (a)未处理的铝合金表面;(b)喷砂;(c)激光蚀刻

Fig. 3 Two-dimensional (1) and three-dimensional(2) morphologies of aluminum alloy surfaces treated with different physical etching processes (a)untreated aluminum alloy surface; (b)sandblast; (c)laser erosion

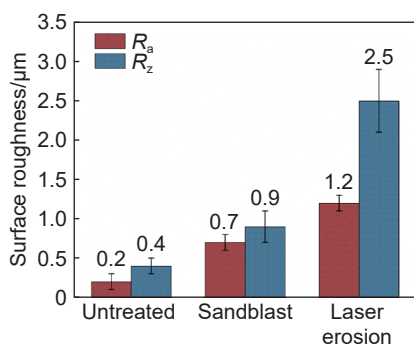


图 4 不同物理蚀刻处理后铝合金表面粗糙度

Fig. 4 Roughness of aluminum alloy surface after different physical etching treatments

图 5 给出 PEI 溶液经过不同物理蚀刻方法处理的铝合金接触角测量结果,可以清晰地观察到溶液在表面的润湿行为。未处理的铝合金与 PEI 溶液的接触角为  $56.05^\circ$ 。喷砂后,接触角几乎保持不变,表明润湿性能没有显著变化。这种观察结果可能归因于 PEI 溶液的内聚力较强,喷砂产生的微坑结构微小,缺乏明显的毛细管效应。相反,激光蚀刻铝合金的接触角显著减小。激光蚀刻产生的微槽改变了铝合金的表面特性,增强了毛细管效应,这使得 PEI 溶液在表面的扩散更好,从而增加了接触面积,提高了 PEI 溶液在铝合金上的润湿性和吸附性。

综上所述,在热塑层强化工艺中,激光处理后的铝合金表面形成的微槽网络促进与 PEI 树脂的机械互锁效应,可有效增强 PEI 热塑层与铝合金表面的结合力。相比之下,喷砂处理的铝合金附着力

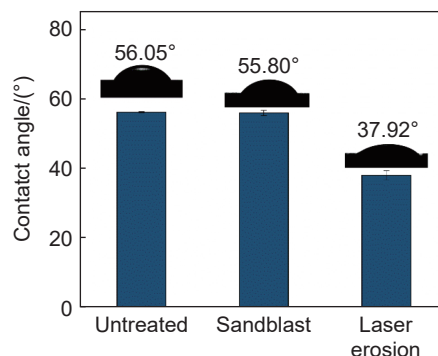


图 5 PEI 溶液在不同物理蚀刻工艺处理的铝合金表面的接触角

Fig. 5 Contact angle of PEI solution on aluminum alloy surfaces treated with different physical etching processes

相对较弱,未处理的铝合金附着力则最小。

## 2.1.2 铝合金与 PEI 热塑层的啮合效应

借助 SEM 对铝合金-PEI 热塑层横截面进行观察(见图 6),进一步分析铝合金与 PEI 热塑层之间的啮合作用。未经表面处理的铝合金表面保持光滑(图 6(a)),难以黏附 PEI 树脂。喷砂的铝合金(图 6(b))形成不规则结构,只有少量 PEI 树脂渗透。但两个表面并不能有效啮合,导致结合力有限。相比之下,激光蚀刻后铝合金表面的微槽形成较强的啮合效应(图 6(c)),使 PEI 树脂完全嵌入槽中。由此可见,增强铝合金与 PEI 热塑层之间的啮合效应,有助于提高焊接接头的强度。

## 2.2 偶联剂处理进一步增强作用

图 7(a)为经 KH550 偶联剂处理前后铝合金表面的红外光谱图,检测到典型的功能基团氨基



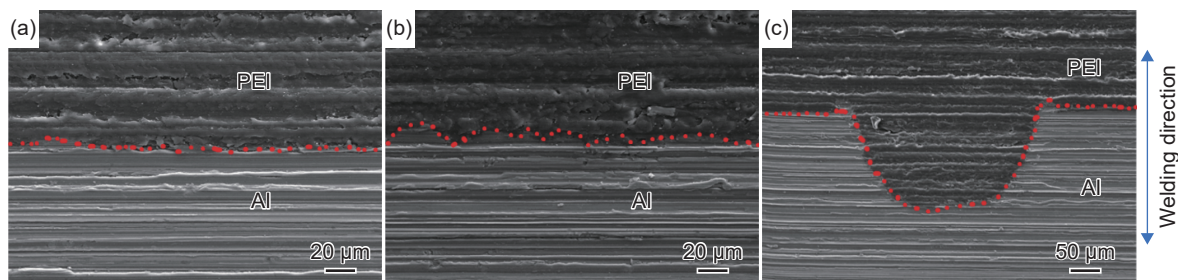


图6 不同物理蚀刻处理后的铝合金-PEI 热塑层横截面的 SEM 图像 (a)未处理的铝合金表面;(b)喷砂;(c)激光刻蚀

Fig. 6 SEM images of the hot plasticized cross-section of aluminum alloy-PEI after different physical etching treatments (a)untreated aluminum alloy surface; (b)sandblast; (c)laser erosion

( $\text{—NH}_2$ ,  $1554\text{ cm}^{-1}$ )和硅氧键( $\text{—Si—O}$ ,  $1033\text{ cm}^{-1}$ ),说明在水解硅烷偶联剂与吸附羟基( $\text{—OH}$ )的偶联反应过程中,成功在铝合金表面引入硅烷偶联膜过渡层,增强了连接效果,有助于提高铝合金与热塑层的强度和稳定性。在此基础上对铝合金表面进行 EDS 能谱测试,结果表明,经过硅烷偶联剂处理后 Si 含量增加(图 7(b)、(c)),侧面证实硅烷偶联剂成功接枝到铝合金表面<sup>[16, 18]</sup>。本研究借助 XPS 分析,深入探究铝合金及 KH550 改性铝合金表面化学键组成。在未改性铝合金全谱、O1s 和 Al2p 图中(8(a)~(c)),其全谱存在 O、Al 元素,未观测到 Si 元素。在 O1s 谱图中(8(c)),其峰位于  $531.77\text{ eV}$ ,对应  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。Al2p 谱中(8(b)),其峰位于  $74.75\text{ eV}$ ,归属为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,说明铝合金表面主要被氧化铝层覆盖。在经 KH550 改性后,在全谱图中出现 Si2p 和 Si2s 峰(8(d)),说明成功改性引入 Si 元素,在 Si2p 谱图中(图 8(e)), $101.96$ 、 $102.86\text{ eV}$  处分别对应  $\text{Al—O—Si}$ 、 $\text{Si—O—Si}$  键,证实硅烷偶联剂 KH550 成功引入。相比未改性的, O1s 谱图中(图 8(g))  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的氧峰( $530.82\text{ eV}$ )原子百分比降低,同时在  $531.93$ 、 $532.66\text{ eV}$  处分别出现  $\text{Al—O—Si}$  和  $\text{Si—O—Si}$  对应的氧峰,表明硅氧键合结构成为表面主要组成;在 Al2p 谱图中(图 8(f)), $74.01$ 、 $74.8\text{ eV}$  分别对应  $\text{Al—O—Si}$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,进一步说明铝合金表面形成了  $\text{Al—O—Si}$  键连接的界面层。综上所述, KH550 改性后,铝合金表面从以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主的氧化层转变为含有  $\text{Al—O—Si}$  和  $\text{Si—O—Si}$  键的硅烷偶联剂过渡层,成功改性表面化学组成和键合结构。在此过渡层中,改性铝合金与 PEI 热塑层之间形成的  $\text{Si—O—Al}$  化学键和酰胺键紧密相连(图 8(h))<sup>[19]</sup>。由此可知,硅烷偶联剂改性显著增强铝合金与热塑层的结合强度。

### 2.3 力学性能

图 9 给出经过各种表面改性处理后 7075AA

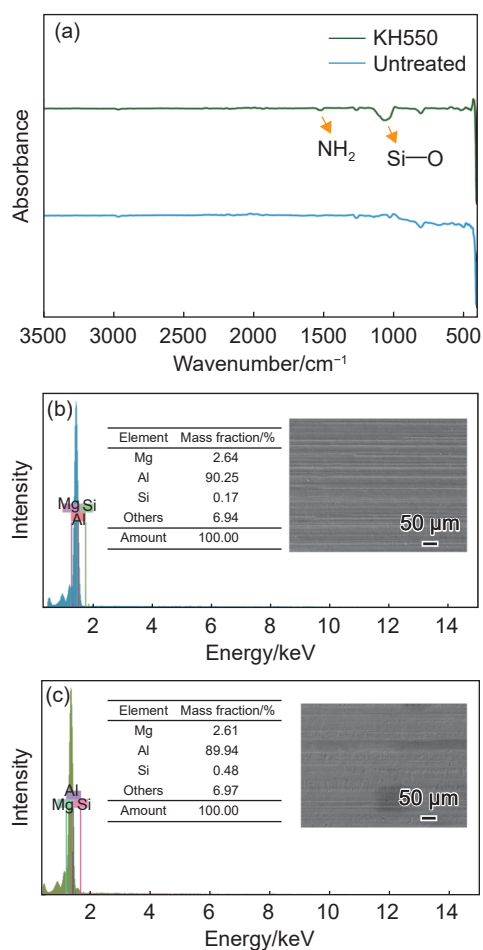


图7 铝合金表面经 KH550 偶联剂处理前后的红外光谱 (a),未处理的 SEM 和 EDS(b)及处理后的 SEM 和 EDS(c)

Fig. 7 Spectra of aluminum alloy surface before and after treatment with KH550 coupling agent(a), untreated SEM and EDS(b), treated SEM and EDS(c)

CF/PEEK 复合材料焊接接头的单搭接剪切强度 (LSS)。与未经处理的接头(无强度)相比,喷砂接头的 LSS 为  $10.47\text{ MPa}$ ,而激光蚀刻接头的 LSS 更高,为  $15.35\text{ MPa}$ 。喷砂处理的剪切强度增加归因于它粗糙、不规则的表面,能促进黏合强度的提高。在激光蚀刻的情况下,更大的黏合强度可能是由于表面粗糙度增加,从而形成更深的凹槽和空腔

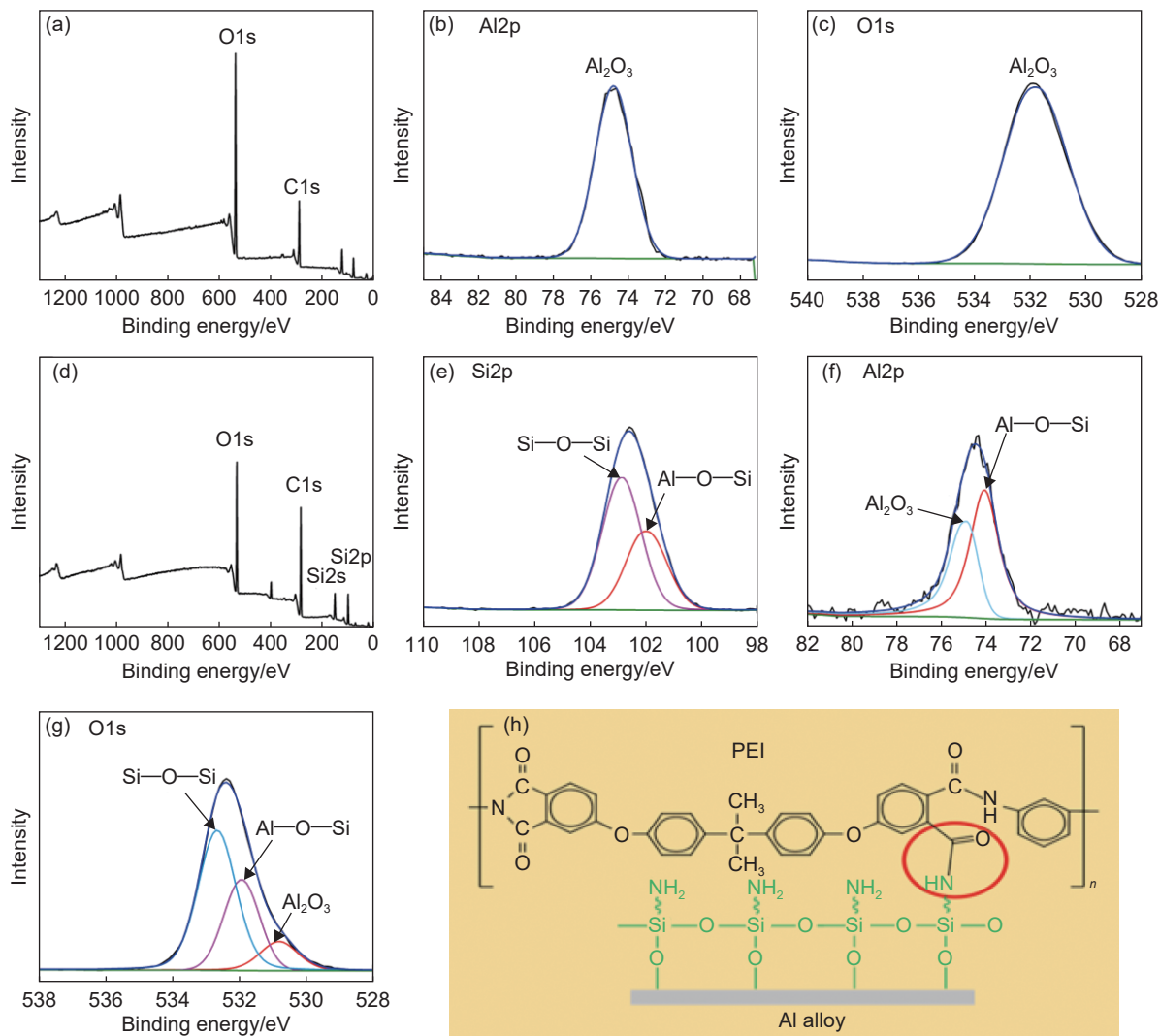


图8 铝合金表面未经硅烷偶联剂改性的XPS全谱(a), Al<sub>2</sub>p谱(b), O1s谱(c)和硅烷偶联剂改性后的XPS全谱(d), Si<sub>2</sub>p谱(e), Al<sub>2</sub>p谱(f), O1s谱(g)以及硅烷偶联剂媒介作用机理图(h)<sup>[19]</sup>

Fig. 8 XPS full spectrum(a), Al<sub>2</sub>p spectrum(b), O1s spectrum(c) images of aluminum alloy surface treatment unmodified by silane coupling agent, XPS full spectrum(d), Si<sub>2</sub>p spectrum(e), Al<sub>2</sub>p spectrum(f), O1s spectrum(g) and media effect mechanism diagram of silane coupling agent(h)<sup>[19]</sup>

而改善润湿性。这些特性共同增强了热塑层和铝合金表面之间的机械互锁,从而实现良好的界面黏合。这些发现与图3~图6中所示的表面形貌和润湿性观察结果非常吻合。此外,使用硅烷偶联剂可进一步提高黏合强度,使未处理样品的LSS提高至5.74 MPa。激光蚀刻后,与未经硅烷处理的样品相比,硅烷偶联剂形成的Si—O—Al键(图8)和硅烷偶联膜过渡层,使界面LSS提升23.97%(15.35 MPa→19.03 MPa)。这种增强可能归因于偶联剂可促进铝合金和PEI热塑层之间的化学结合作用,从而提高了整体接头强度。

表3列出铝合金和CF/PEEK复合材料包括电阻焊接技术在内的最新数据<sup>[20-22]</sup>和本工作的性能数据。值得注意的是,本工作获得的7075AA和CF/

PEEK复合材料的电阻焊强度达到19.03 MPa,而文献中的6082AA和CF/PEEK复合材料的摩擦焊接强度则很低,仅为6.7 MPa<sup>[20]</sup>。本研究的强度明显优于现有的轻合金和复合材料电阻焊的强度。这表明本研究在提高焊接效率和强度方面具有潜力。

## 2.4 断面形貌

7075AA与CF/PEEK复合材料电阻焊接头断面失效模式随铝合金表面处理的不同而有所差异,这主要是由于铝合金与PEI热塑层之间的结合能力不同所致。图10(a)~(c)显示未经PEI热塑层处理的Al<sub>p</sub>、Al<sub>s</sub>和Al<sub>L</sub>表面与加热元件上的PEI树脂的结合力较差。这表明,如果没有PEI热塑层,加热元件中的树脂无法充分润湿铝合金表面。Al<sub>pp</sub>焊接接头的断面完全脱粘(图10(d)),而

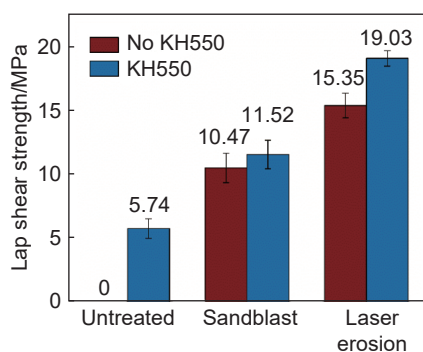


图9 铝合金与不同处理后的 CF/PEEK 复合材料电阻焊的剪切强度

Fig. 9 LSS of resistance welding of aluminum alloy and CF/PEEK composites with different treatments

$Al_{SP}$  和  $Al_{LP}$  焊接接头的主要失效模式是 PEI 热塑层脱落(图 10(e)和(f))。这意味着在失效过程中, PEI 热塑层承受了大部分的外部载荷。然而, 仅通过物理蚀刻实现的铝合金和 PEI 热塑层之间的结合仍然不够理想, 需要进一步增强。为了改善这一情况, 采用偶联剂对铝合金表面的 PEI 热塑层进行加固(图 10(g)~(i))。这种处理增加了树脂

对铝表面的附着力, 表明加热元件和 7075AA 表面之间的界面结合更强。偶联剂可增强铝合金对 PEI 热塑层的附着力, 显著提高 7075AA 和 CF/PEEK 复合材料的电阻焊接强度。经过激光蚀刻和偶联剂处理的铝合金连接失效模式为加热元件中的碳纤维断裂, 这表明连接更为牢固。这是因为激光蚀刻处理会产生更粗糙的铝表面, 当与偶联剂结合时, 有利于  $Al-O-Si$  和酰胺键的形成, 显著增强铝合金和 PEI 热塑层之间的附着力。这使得 7075AA 和 CF/PEEK 复合材料之间的电阻焊接接头更加坚固耐用。

## 2.5 失效机理

在电阻焊过程中, HEs 两侧的树脂与焊接板表面的树脂表现出很强的界面相容性。但是因铝合金和 PEI 热塑层是异质材料, PEI 热塑层与铝合金因表面能差异会导致相容性差、浸润性差、化学键合不足及应力集中, 从而引发界面失效。为了提高铝合金与热塑层之间的附着力, 采用多种表面处理。这些处理导致焊接接头出现不同类型的界面失效, 如图 10(j)所示。失效模式主要分为界面失

表3 Al/Ti 合金与 CF/PEEK 复合材料摩擦及电阻焊的研究数据与本工作的对比

Table 3 Comparison of research data on friction and resistance welding of Al/Ti alloys and CF/PEEK composites with the present work

| Welding material    | Welding method     | LSS <sub>max</sub> /MPa | Reference |
|---------------------|--------------------|-------------------------|-----------|
| 6082AA and CF/PEEK  | Friction welding   | 6.7                     | [20]      |
| 6063AA and CF/Epoxy | Resistance welding | 10.5                    | [21]      |
| Ti and GF/PEI       | Resistance welding | 17.28                   | [22]      |
| 7075AA and CF/PEEK  | Resistance welding | 19.03                   | This work |

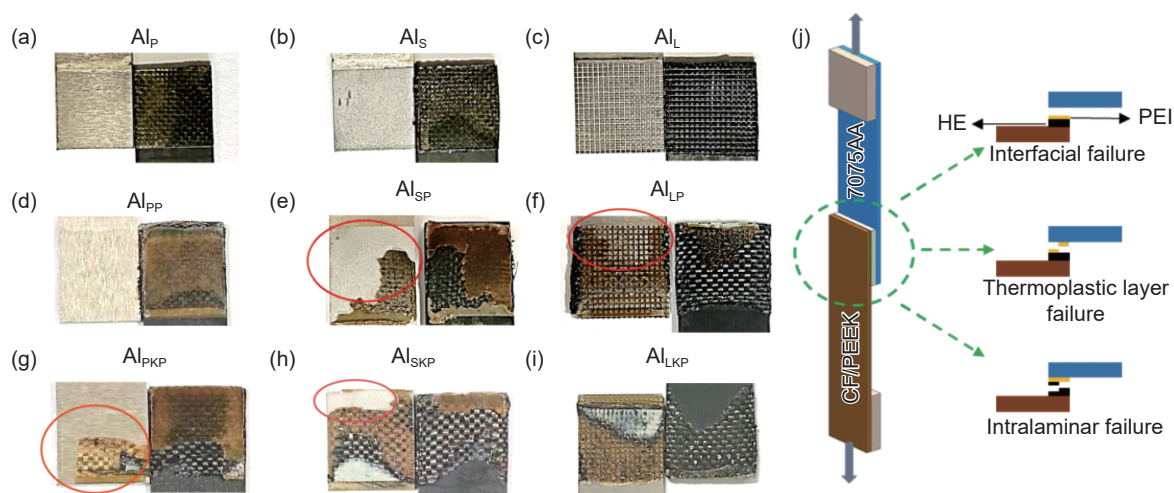


图10 7075AA 与 CF/PEEK 复合材料电阻焊接头经不同处理后的断面失效图片 (a) $Al_P$ ; (b) $Al_S$ ; (c) $Al_L$ ; (d) $Al_{PP}$ ; (e) $Al_{SP}$ ; (f) $Al_{LP}$ ; (g) $Al_{PKP}$ ; (h) $Al_{SKP}$ ; (i) $Al_{LKP}$ ; (j)断面失效模式

Fig. 10 Failure pictures of the cross-section of 7075AA and CF/PEEK composites resistance welded joints after different treatments (a) $Al_P$ ; (b) $Al_S$ ; (c) $Al_L$ ; (d) $Al_{PP}$ ; (e) $Al_{SP}$ ; (f) $Al_{LP}$ ; (g) $Al_{PKP}$ ; (h) $Al_{SKP}$ ; (i) $Al_{LKP}$ ; (j)section failure mode



效、热塑层脱粘失效和层间失效。

图 11 给出 7075AA 和 CF/PEEK 复合材料电阻焊接低剪切强度焊接接头的 SEM 图像。在低 LSS 接头中,主要失效模式是 PEI 热塑层的脱粘。铝合金表面和 PEI 热塑层之间的黏合性不足导致热塑层在失效时断裂和脱落,仅有一小部分撕裂的 HEs 仍然黏附在铝合金的 PEI 热塑层上(图 11(a))。

同样,在 CF/PEEK 复合材料的加热元件表面上,可以观察到 PEI 热塑层已从铝合金表面脱落,热塑层的边缘显示出不规则的断裂形状,PEI 树脂仍然牢固地黏附在 HEs 上(图 11(b))。这表明,虽然 CF/PEEK 层压板和 HEs,以及 PEI 热塑层和 HEs 可以有效地进行熔融缠结,但铝合金和 PEI 热塑层之间的黏附性较弱。

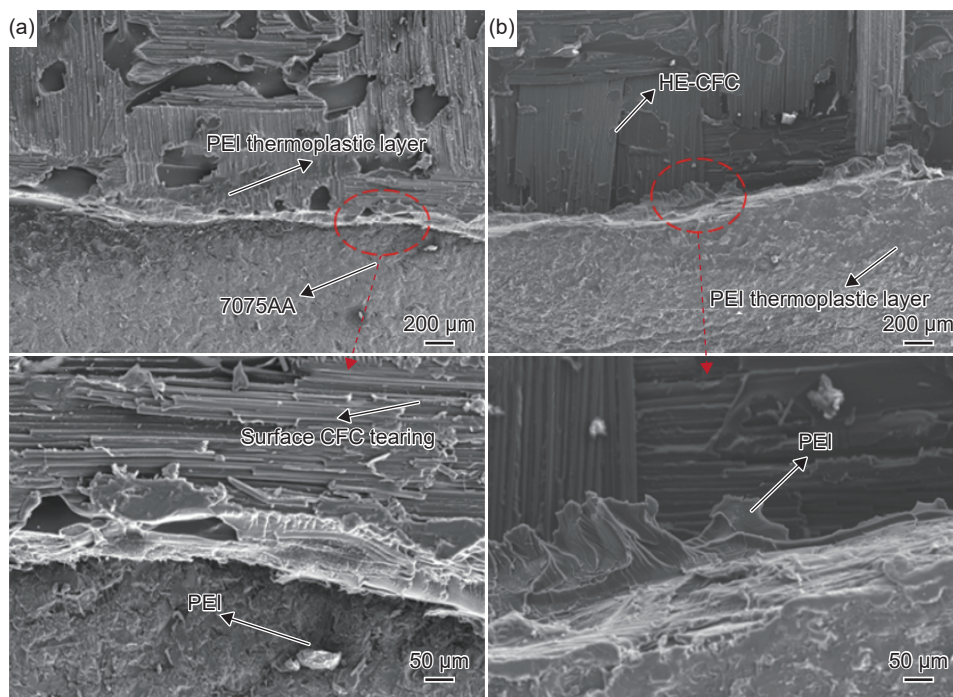


图 11 7075AA 与 CF/PEEK 复合材料电阻焊接接头断面为热塑层脱粘的失效模式 (a)7075AA 侧;(b)CF/PEEK 侧  
Fig.11 Failure mode of 7075AA and CF/PEEK composite resistance-welded joints with thermoplastic layer debonding in the section (a)7075AA side; (b)CF/PEEK side

图 12 给出高 LSS 焊接接头的 SEM 图像。在此强度级别下,失效模式为层间失效,特征为 HEs 断裂。与低强度部分不同,铝合金表面的 PEI 热塑层保持完整,撕裂的 HEs 牢固地黏附在 PEI 热塑层上(图 12(a))。在失效过程中,加热元件的碳纤维和树脂承受载荷,导致不规则的断裂形态(图 12(a))。与铝合金表面相比,由于两种材料之间增强的树脂熔化效应,CF/PEEK 复合材料在加热元件表面显示出更明显的断裂痕迹(图 12(b))。这些发现表明,当连接效果最佳时,提高铝合金和 PEI 热塑层之间的黏合性可以将失效模式从热塑层脱粘转变为层间失效。相反,当黏合性不足时,失效则表现为热塑层的脱粘。

### 3 结论

(1)激光处理在铝合金表面形成微槽网络结

构,显著增强与 PEI 树脂的机械互锁效应,而喷砂和未处理的铝合金表现出较弱的黏结效果。FT-IR 和 XPS 分析表明,硅烷偶联剂在铝合金表面形成 Al—O—Si 键,成功在铝合金表面引入硅烷偶联膜过渡层,增强连接效果,进一步提升铝合金与 PEI 热塑层之间的连接效果。

(2)在铝合金与 CF/PEEK 复合材料电阻焊接接头断面显示,喷砂和激光微槽铝合金与 PEI 热塑层之间连结不完全,主要失效模式是热塑层的脱粘。喷砂处理接头的剪切强度为 10.47 MPa,激光刻蚀处理接头的剪切强度为 15.35 MPa。经硅烷偶联剂处理后,PEI 热塑层的结合力明显增强,优化了焊接接头性能。特别是经过激光刻蚀和硅烷偶联剂处理的铝合金,断裂方式转变为层间断裂(加热元件断裂),剪切强度提高到 19.03 MPa,比单纯激光刻蚀提高了 23.97%。结果表明,优化表面处理工艺可以显著提高铝合金与热塑性复合材料的

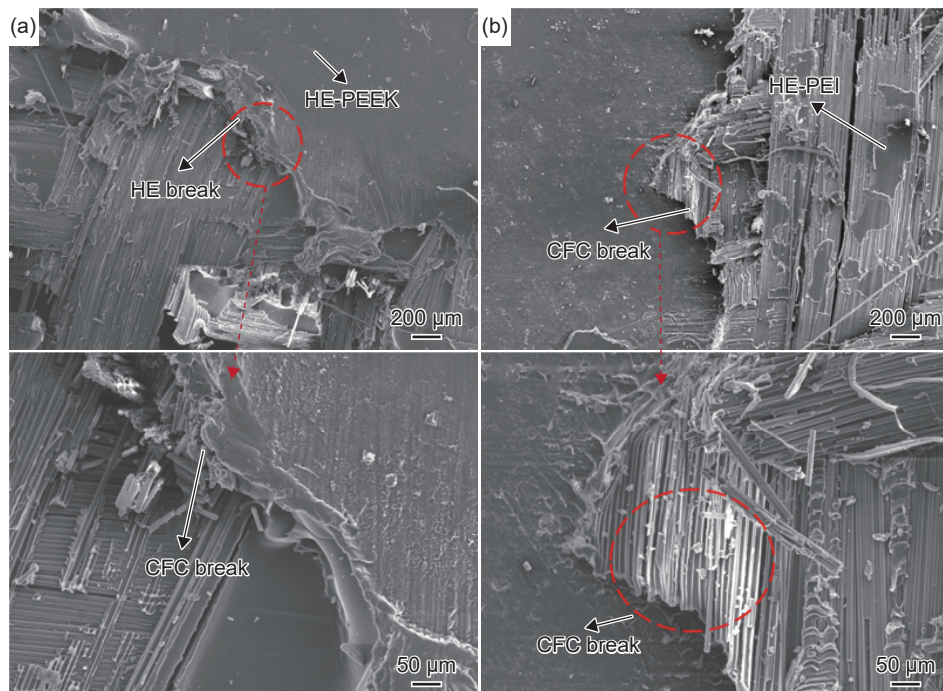


图 12 7075AA 与 CF/PEEK 复合材料电阻焊接头断面为加热元件撕裂的失效模式 (a)7075AA 侧; (b)CF/PEEK 侧

Fig. 12 Failure mode of 7075AA and CF/PEEK composite resistance weld head section with torn heating element

(a)7075AA side; (b)CF/PEEK side

结合性能和焊接接头强度。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG X, CHEN Y, HU J. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [2] 张婷婷, 朱凯航, 许振波, 等. 金属/CFRP 异种材料连接技术的研究进展及界面结合机理分析[J]. 焊接学报, 2023, 44(5): 44-54.  
ZHANG T T, ZHU K H, XU Z B, et al. Research progress of metal/CFRP dissimilar material joining technology and analysis of interface bonding mechanism[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(5): 44-54.
- [3] FENG Z, ZHANG X, QIN C, et al. Elucidation of role of carbon fibers on joining of metal to composite[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 119: 332-336.
- [4] YUAN G, ZHOU Z, LI X, et al. Blue laser welding of 7075-T6 aluminum alloy and carbon fiber reinforced polyetheretherketone[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 155: 108440.
- [5] 路鹏程, 李志敏, 王志平, 等. CF/PPS 复合材料层板电阻焊接研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(1): 60-64.  
LU P C, LI Z X, WANG Z P, et al. Study on resistance welding of CF/PPS composite laminates[J]. Plastics Industry, 2021, 49(1): 60-64.
- [6] XIONG X, WANG D, WEI J, et al. Resistance welding technology of fiber reinforced polymer composites: a review[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2021, 35(15): 1593-1619.
- [7] LI H C, LIU D L, LUO X, et al. Enhanced adhesion properties of polymer-metal interfaces via nano-injection molding: a study on molecular kinematic mechanisms[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2023, 41(6): 981-993.
- [8] JIANG B, CHEN Q, YANG J. Advances in joining technology of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite materials and aluminum alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(9): 2631-2649.
- [9] PRAMANIK A, BASAK A, DONG Y, et al. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys: a review[J]. Composites Part A, 2017, 101: 1-29.
- [10] LAMBIASE F, PAOLETTI A, GROSSI V, et al. Improving energy efficiency in friction assisted joining of metals and polymers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 379-389.
- [11] TAN B, HU Y, YUAN B, et al. Optimizing adhesive bonding between CFRP and Al alloy substrate through resin pre-coating by filling micro-cavities from sandblasting[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 110: 102952.
- [12] OTA H, JESPERSEN K M, SAITO K, et al. Effect of the interfacial nanostructure on the interlaminar fracture toughness and damage mechanisms of directly bonded

- carbon fiber reinforced thermoplastics and aluminum[J]. Composites Part A, 2020, 139: 106101.
- [13] 宋燕, 史广芹, 董作典, 等. 宇航应用中常见的表面处理方法综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019(3): 78-81.
- SONG Y, SHI G Q, DONG Z D, et al. Overview of common surface treatment methods in aerospace applications[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019(3): 78-81.
- [14] PARK S Y, CHOI W J, CHOI H S, et al. Effects of surface pre-treatment and void content on GLARE laminate process characteristics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(8): 1008-1016.
- [15] BU H, LI X, LI B, et al. Enhanced interfacial joining strength of laser wobble joined 6061-T6 Al alloy/CFRTP joint *via* interfacial bionic textures pre-construction[J]. Composites Part B, 2023, 261: 110787.
- [16] WU M, TONG X, WANG H, et al. Effect of ultrasonic vibration on adhesive bonding of CFRP/Al alloy joints grafted with silane coupling agent[J]. Polymers, 2020, 12(4): 947.
- [17] LIU Y, SU J, TAN C, 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.
- [18] PAN L, ZHANG A, ZHENG Z, et al. Enhancing interfacial strength between AA5083 and cryogenic adhesive *via* anodic oxidation and silanization[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 317-24.
- [19] HASHIZUME M, FUKAGAWA S, MISHIMA S, et al. Hot-press-assisted adhesions between polyimide films and titanium plates utilizing coating layers of silane coupling agents[J]. Langmuir, 2016, 32(47): 12344-12351.
- [20] SHEIKH-AHMAD J, ZITOUNE R, MOREL C, et al. Joining of AA5052 to CF/PEEK by friction lap welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(3): 1137-1150.
- [21] CUI X, TIAN L, ZHANG Z, et al. An additional hole to compensate for mechanical property of thermoset composite and aluminum alloy joint during resistance welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(7): 1150-1162.
- [22] XIONG X, ZHAO P, REN R, et al. Enhanced resistance-welding hybrid joints of titanium alloy/thermoplastic composites using a carbon-nanotube lamina[J]. Diamond and Related Materials, 2020, 101: 107611.

收稿日期: 2025-04-14; 录用日期: 2025-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(62171331)

通讯作者: 徐任信(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为先进复合材料制备技术, 联系地址: 湖北省武汉市武汉理工大学马房山校区(430070), E-mail: xurenxin@whutedu.cn

(本文责编: 王俊丽)