引用格式：蔡宇凡，周海鹏，杨苑铎，等．碳纤维增强热塑性复合材料与钛合金焊接技术研究进展[J]．材料工程，2026，54(5)：84-103.
CAI Yufan，ZHOU Haipeng，YANG Yuanduo，et al.Research progress in welding technologies of carbon fiber reinforced thermoplastic composites and titanium alloys[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(5)：84-103.

碳纤维增强热塑性复合材料与钛合金焊接技术研究进展

蔡宇凡，周海鹏，杨苑铎，敖三三，李　洋*
（天津大学 材料科学与工程学院，天津 300354）

摘要：碳纤维增强热塑性复合材料（CFRTP）以质轻、比强度高、快速成型、可焊接等优势，在航空航天等领域应用具有广泛的应用前景。钛合金作为航空航天常用轻量化金属，是可直接附着CFRTP而无腐蚀缺陷的材料，实现两者高性能连接对降低结构质量、减少碳排放及保障装备运行安全至关重要。但因两者物理与化学性能的差异，连接面临诸多挑战。本文梳理了CFRTP与钛合金焊接技术的国内外研究进展，对各类焊接技术的工艺特点、钛合金表面处理方法和界面连接机理进行了总结和分析，展望了CFRTP与钛合金焊接中有待解决的共性问题，以期为CFRTP与钛合金复合结构的大规模装配应用提供参考。

关键词：碳纤维增强热塑性复合材料（CFRTP）；钛合金；焊接技术；表面处理；连接机理
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000392　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000392
中图分类号：TG44　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)05-0084-20

Research progress in welding technologies of carbon fiber reinforced thermoplastic composites and titanium alloys

CAI Yufan，ZHOU Haipeng，YANG Yuanduo，AO Sansan，LI Yang*
（School of Materials Science and Engineering，Tianjin University，Tianjin 300354，China）

Abstract：Carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP) show great application potential in aerospace and other fields owing to their advantages of light weight, high specific strength, rapid prototyping, and weldability. As a commonly used lightweight metal in the aerospace industry, titanium alloy is a material that can be directly bonded to CFRTP without corrosion defects. Achieving high-performance joining between the two is of great significance for reducing structural weight, cutting carbon emissions, and ensuring the operational safety of equipment. However, due to the differences in their physical and chemical properties, joining the two materials poses numerous challenges. This paper reviews the research progress on the welding of CFRTP and titanium alloy. It summarizes and analyses the process characteristics of various welding technologies, surface treatment methods of titanium alloys, and interface joining mechanisms. Furthermore, it looks forward to the common issues that need to be addressed in the welding of CFRTP and titanium alloys, aiming to provide a reference for the large-scale assembly application of CFRTP/titanium alloy hybrid structure.

Key words: carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP); titanium alloy; welding technology; surface treatment; joining mechanism

碳纤维增强复合材料（carbon fiber reinforced polymer，CFRP）具有诸多优异性能，如高比强度、比刚度，优异的耐蚀性和可设计性，已经成为铝合金、钢、钛合金之后的四大结构材料之一，其用量成为航空航天结构的先进性标志之一[1]。在民用航空领域[2]，空客A350的复合材料用量接近机体总质量的53%，波音

787的复合材料占比超过50%；空客A380作为世界最大民用客机，仅机身壁板就采用了30多吨碳纤维复合材料。在卫星及宇航器领域，材料轻量化优势更为突出。我国“风云二号气象卫星”和“神舟”系列飞船，均以先进CFRP作为主承力构件，大幅减轻结构质量，降低发射成本；美国“通信卫星”(GSAT-702)的天线罩采用CFRP制成，厚度约4 mm、质量仅5 kg，远轻于传统铝合金材料[3]。

CFRP按树脂基体的种类可分为碳纤维增强热固性复合材料(carbon fiber reinforced thermosetting composites，CFRTS)和碳纤维增强热塑性复合材料(carbon fiber reinforced thermoplastic composites，CFRTP)。相较而言，CFRTP具备更优异的抗冲击性和疲劳性能，同时还具有成型周期短、可二次加工、可焊接及可回收等优势。利用其可焊性，可减少数千个紧固件，实现减重、简化装配并降低成本，CFRTP已成为航空结构领域极具潜力的下一代轻量化材料[4]。

钛合金作为航空航天常用轻量化金属，以高比强度、低热导率、强耐蚀性及抗疲劳等优势[5]，在航空制造与宇航轻量化工程中应用潜力巨大。尤为重要的是，钛是唯一可直接附着于碳纤维复合材料结构且不产生腐蚀缺陷的轻质金属[6]。因此，实现钛合金与CFRTP的高性能、长寿命连接，对减重、减排及保障装备运行安全意义重大。

然而，钛合金与CFRTP的物理化学性能差异显著[7]，其连接面临诸多挑战。与铝合金、传统钢等金属和CFRTP的连接相比，钛合金化学活性更高，高温下易生成脆性相，铝合金虽易生成氧化物，但可通过超声清洗去除；钢碳含量较高，与聚合物的碳反应平缓，生成碳化物对性能的影响远小于钛合金的脆性相[8-9]。表面处理方面，初始状态的钛合金表面呈惰性，导致其与CFRTP的润湿性差、界面反应弱，需通过物理或化学手段破坏氧化膜，再引入活性基团或过渡层以实现有效连接。

在连接工艺上，传统机械连接(如铆接)会破坏纤维增强体、引发局部应力集中，且铆钉增加质量并可能导致电化学腐蚀[10]；胶接虽可避免上述问题，但接头不可拆卸，固化时间长且性能易受环境影响。不过，随着激光焊接、超声波焊接、搅拌摩擦焊等先进工艺及表面纳米活化处理等技术的涌现，为解决Ti/CFRTP连接难题提供了新思路。本文系统梳理国内外研究进展，重点剖析关键焊接技术、界面结合机理及表面处理工艺，旨在为高性能复合材料连接技术发展提供理论支撑与工程参考。

1　工艺方法

1.1　激光焊接技术

对于金属/塑料激光焊，根据激光辐照方式的不同，可分为激光透射焊和激光传导焊两类。激光透射焊主要适用于透光性良好的塑料与金属之间的焊接，而CFRTP因碳纤维的强吸光特性导致透光性较差，无法采用透射焊的方式，因此普遍采用激光传导焊方式完成连接[11-13]。激光传导焊基本原理如图1所示。在该方法中，金属置于CFRTP上方，激光扫描金属表面，热量传导至金属/CFRTP界面，当树脂熔化后对金属表面进行浸润，冷却后形成连接。

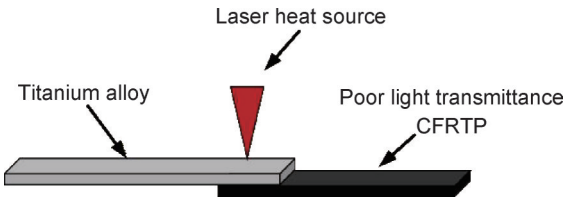


图1　钛合金/CFRTP激光传导焊示意图

Fig.1　Schematic diagram of laser conduction welding for titanium alloy/CFRTP

激光焊接工艺参数(扫描速度、离焦量、激光功率等)显著影响钛合金与CFRTP的焊接接头性能。Tan等[11]研究了扫描速度对CFRTP与钛合金激光焊的影响，发现高热量输入会导致由波纹引起的缺陷和飞溅。随着扫描速度的增加，接头最大拉剪力先增大后减小，这与树脂粘接宽度及碳纤维与树脂混合物在粘接区域的粘接比密切相关；当激光扫描速度为0.8 m/min时，接头获得最大拉剪力，为1024 N。Su等[12]通过激光传导焊实现了钛合金与碳纤维增强聚醚醚酮(carbon fiber reinforced polyetheretherketone，CF/PEEK)的连接，该研究通过调整离焦量调控工件表面激光束直径，进而优化热输入来平衡树脂熔融程度，并且在界面处形成了新的相$CTi_{0.42}V_{1.58}$实现了接头结合性能的强化。图2为离焦量对钛合金-CF/PEEK接头横截面形貌的影响。在负离焦和零离焦时，工件表面激光束直径较小，热输入集中且能量密度稳定，TC4与CF/PEEK界面的熔化区连续且宽度均匀(图2(a)，(b))。高倍下(图2(d)，(e))碳纤维形态完整，且与熔化区基体(树脂/金属相)结合紧密，即热输入适中时，树脂充分熔化并渗透到纤维表面，形成“纤维-树脂-金属”的连续结合界面，利于载荷传递，接头拉剪力为874 N。随着离焦量的增大(正离焦)，照射到工件表面的激光束直径显著扩大，激光平均能量密度下降，但光斑覆盖范围拓宽，使得TC4局部过热形成烧蚀缺

陷如图 2(h)；CFRTP 侧树脂分解、纤维暴露，最终熔化区形态杂乱，如图 2(c)，(f)，(g)所示。接头的拉剪力主要由树脂黏附宽度和碳纤维黏附率决定，如图 2(i)，(j)所示。即使+8 mm 离焦时，虽能量波动导致局部缺陷，但树脂黏附面积达到最大，使得接头拉剪力达到 1457 N。

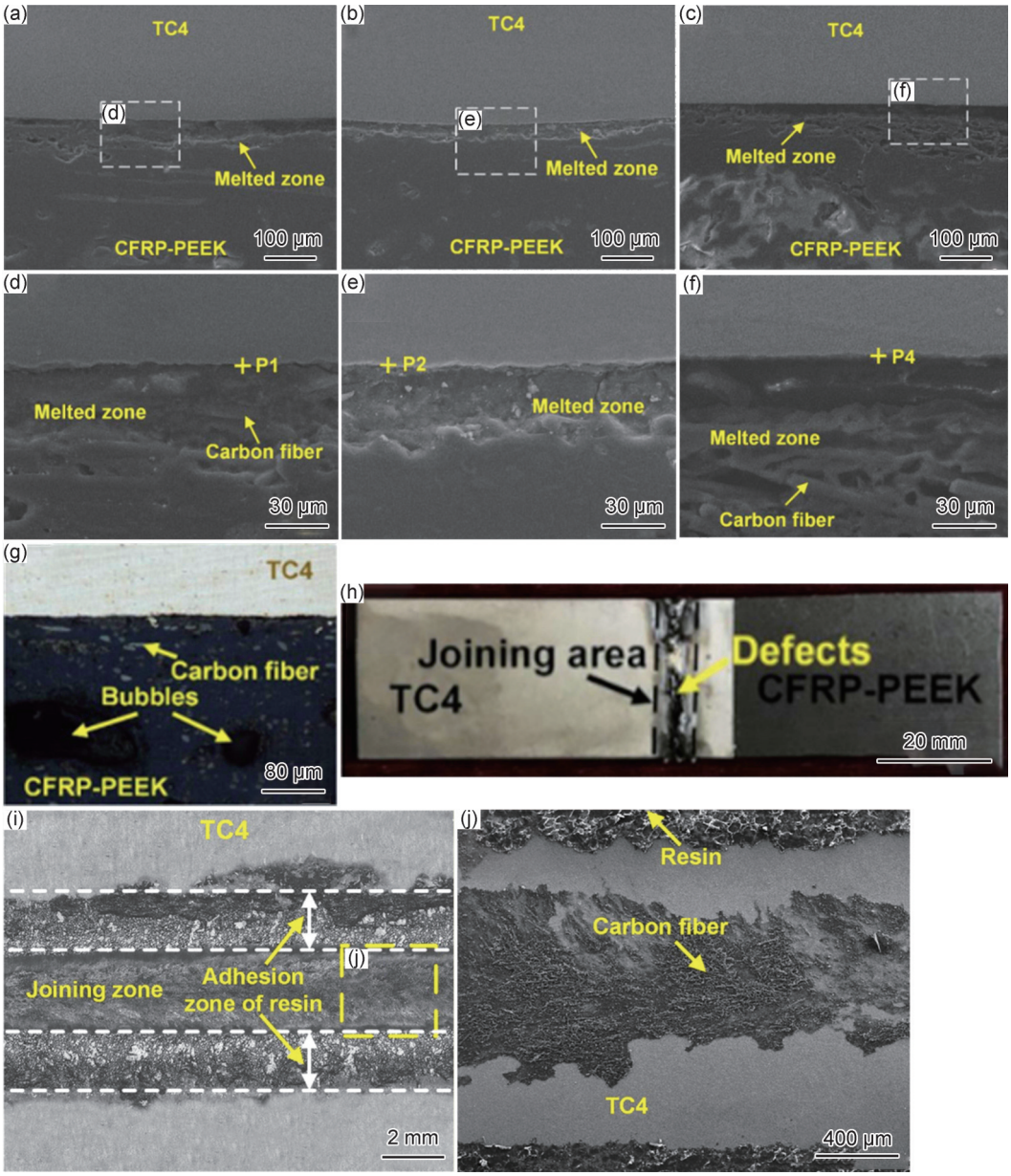


图 2　钛合金-CF/PEEK 激光传导焊接头界面的典型微观形貌及宏观形貌[12]

(a)～(c)离焦量为－4、0、+8 mm 的 SEM 微观形貌图；(d)～(f) 对应区域的高倍放大形貌；(g)+8 mm 下界面连接区域的光学形貌；(h)+8 mm 下焊接接头宏观形貌；(i)离焦距离 8 mm 处 TC4 侧典型接头的断裂面；(j)焊缝中心区局部 SEM 形貌

Fig.2　Typical microscopic and macrographic morphologies of the titanium alloy-CF/PEEK laser conduction welded joint interface[12]

(a)-(c) SEM micrographs at defocus distances of －4 mm, 0 mm, and +8 mm, respectively; (d)-(f)high-magnification morphologies of the corresponding regions in (a)-(c); (g)optical morphology of the interfacial joining region at a defocus distance of +8 mm; (h)macrographic morphology of the welded joint at a defocus distance of +8 mm; (i)fracture surface of typical TC4-side joint at a defocus distance of 8 mm; (j)local SEM morphology of the weld center zone

Tao 等[13]探讨了激光功率对短碳纤维增强聚苯硫醚(short carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide, SCF/PPS)和 TC4 焊接接头的影响，发现随激光功率增加，树脂快速熔化使接头强度提升，但过高的功率会导致 PPS 分解，降低接头拉剪性能。同时，钛合金中的活性元素在高温下包裹在碳纤维周围生成 TiC、TiS_2 等化合物，表明连接机理包含机械嵌合与化学连接双重作用。当激光功率为 700 W 时，接头拉剪力最

大，为 2052 N。Zhang 等[14]首先在金属表面制备热塑性中间层，随后研究了界面温度峰值、分布及聚合物熔化时间对接头性能的影响，发现激光功率通过影响界面温度与熔化时间，进而影响接头形成及接头断裂形式。在最优的激光功率下（380 W），TC4-CFRTP 激光焊接接头最大拉剪力达到 6278.7 N。

在激光连接过程中，界面处因热传导不均及局部过热现象产生的气孔，是制约连接强度提升的关键瓶颈。依据气孔的形貌与分布特征，可将其划分为两类，即Ⅰ型气孔和Ⅱ型气孔，典型气孔缺陷微观形貌类型如图 3[15]。其中，Ⅰ型气孔的形成主要与碳纤维热解产生的气体产物相关，这些气体包括二氧化碳、氨气、水以及碳氢化合物等；而Ⅱ型气孔则具有普遍性，在各种条件下均会产生，其内部形态较为粗糙，且多分布于材料最终的凝固区域，这是由于 CFRP 在凝固阶段发生收缩而形成的。Zhang 等[16]发现，采用摆动激光束的方式能够有效减少孔隙的形成。摆动的激光束可以让热量在界面处分布更均匀，避免局部过热导致的气体来不及逸出而形成气孔。Zhou 等[17]聚焦于环形旋转激光焊接技术，他们指出该技术通过减小焊缝的深宽比，能够显著抑制气孔的产生。Fetzer 等[18]通过调节合适的激光旋转频率和摆幅能产生特定的流体动力学效应，推动气泡内的气体向外扩散，进而实现气孔的收缩。Jiao 等[19]建立了热接触数学模型，分析了工艺参数对 TC4/T700 碳纤维增强聚酰胺（CF/PA）非均质接头性能的影响，表明高速旋转激光焊接可以显著减少气孔缺陷，提高接头的力学性能，高速旋转激光连接装置如图 4（a）所示。Guan 等[20]通过在焊接区域施加持续夹紧压力（图 4（b）），改善界面孔隙率并构建强机械嵌合。

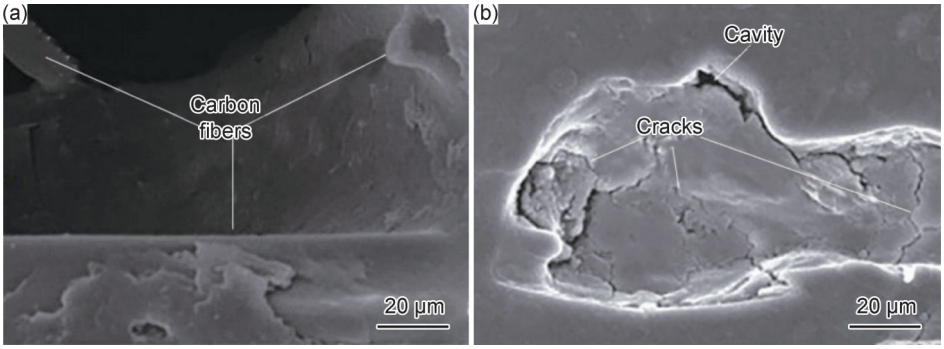


图 3　激光连接典型气孔缺陷微观形貌[15]

（a）Ⅰ型气孔；（b）Ⅱ型气孔

Fig.3　Microscopic morphologies of typical porosity defects in laser joining[15]

(a)type Ⅰ porosity; (b)type Ⅱ porosity

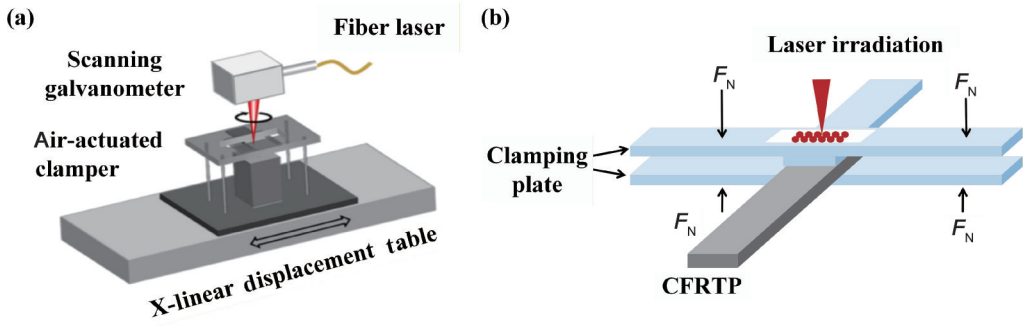


图 4　减少钛合金/CFRTP 激光焊接接头气孔方法

（a）高速旋转激光焊接 TC4/CFRTP 实验方法示意图[19]；（b）激光焊接中的夹紧装置[20]

Fig.4　Methods for decreasing porosity in laser welding of titanium alloy/CFRTP

(a)schematic diagram of high-speed rotating laser welding of TC4/CFRTP[19]; (b)clamping device for laser welding process[20]

表 1[12-13,19-21]总结了国内外 CFRTP 与钛合金激光焊接采用的激光器设备及最佳工艺参数。CFRTP 与钛合金激光焊接虽在孔隙类型及形成机理方面取得进展，但孔隙形态与分布控制仍是提升连接强度的关键挑战。未来需深入研究接头缺陷形成机理，特别是孔隙控制方法，通过工艺改进、光束整形技术优化及新型材料开发减少孔隙，提高接头致密性与力学性能。此外，针对高功率连续激光器成本高、效率低的

表 1 当前 CFRTP 与钛合金激光焊接采用的激光器设备及工艺参数

Table 1 Equipment and process parameters adopted in laser welding of CFRTP and titanium alloy

Material	Laser equipment	Rated power/W	Wavelength/nm	Power/W	Scanning speed/(m·min^{-1})	Defocus amount/mm	Others	Ref.
CF/PEEK-TC4	IPG YLS-6000 fiber laser	6000	1070	750	0.8	+6	Ar 15 L/min	[12]
CF/PEEK-TC4	CO_2 laser	3000	1060	700	0.8	+5	Ar 15 L/min	[13]
CF/PEEK-TC4	100 W infrared pulsed fiber laser	100	1064	95	3		Spot diameter 0.2 mm	[19]
CF/PEEK-TC4	Continuous laser scanning system	200	1030	200	120		Spot diameter 30 μm	[20]
CF/PA6-TC4	IPG YLS-10000 laser	10000	1070	2000	0.9		Ar 30 L/min	[21]

问题，优化工艺参数、研发高性价比激光器及多功能高效焊接装备将成为激光焊接技术的重要发展方向。

1.2 超声波焊接技术

超声波焊接是将高频（20～70 kHz）机械振动作用于工件表面的焊接技术，通过界面摩擦产热和树脂黏弹产热使焊接界面熔化，经冷却凝固后形成焊接接头。该技术具有焊接速度快、操作简便、热输入低等优势，且无需填充材料或添加剂（如胶黏剂、铆钉、螺栓），可避免对金属和CFRTP造成损伤。

图 5 展示了目前 CFRTP/金属超声波焊接技术的方法。根据焊头振动方向可分为超声波金属焊接（ultrasonic metal welding，UMW）和超声波塑料焊接（ultrasonic plastic welding，UPW），其中超声波金属焊接又包括点焊、扭转焊接和连续焊接三种形式[22]。UMW 中超声波振动方向平行于被焊工件表面，超声波在金属侧施加，产热机制主要为 CFRTP/金属接触面的摩擦产热。UPW 中超声波振动方向垂直于被焊工件表面，超声波在塑料侧施加，产热机制为树脂的黏弹产热以及 CFRTP/金属接触面的摩擦产热。

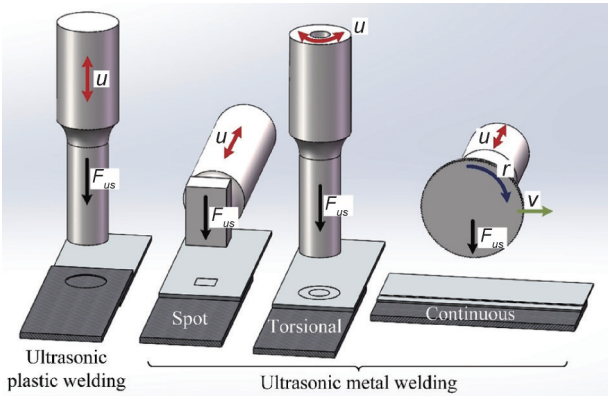


图 5 CFRTP/金属的超声波焊接方法示意图[22]

Fig.5 Schematic diagram of ultrasonic welding of CFRTP/metal[22]

Liesegang 等[23]针对 TC4 钛合金与 CF/PEEK 的高比强度复合结构在液压管件中的应用需求，开发了扭转 UMW。该设备以 20 kHz 的 Branson Ultraseam 20 滚缝焊机为基础，配备可旋转振荡单元，实现管状接头的环形焊缝。研究表明，在 20 kHz 频率下，振幅是影响焊接接头质量的关键因素，过高振幅极易导致树脂过热分解产生气孔使焊接质量大幅下降。图 6 为不同位移振幅下超声焊接的 TC4-CF/PEEK 管接头的微观组织形貌。最终通过实验设计（DoE）与有限元模拟（FEM）优化，确定最佳工艺参数为：位移幅度 48 μm、焊接力 150 N、焊头角速度 28 (°)/s，此时接头的最大拉剪力达 30 kN。该扭转式焊接接头在 96 MPa 内压下仍保持结构完整性，且 20 mm 间距配置在接头强度与焊接效率间实现最佳平衡。

在超声波金属焊接中，钛合金的高强度、高硬度会加剧焊头损耗，对匹配的声极材料提出了严苛要求。声极性能直接决定钛合金与 CFRTP 的超声波焊接质量，因此开发兼具耐用性与高效能的声极材料是 CFRTP/钛合金超声波焊的关键之一。Liesegang 等[24]针对钛合金与 CF/PEEK 的超声波金属焊接，筛选了 CPM RexM4、Ferrotitanit WFN 和 MC90 Intermet 三种粉末冶金钢作为声极材料，并通过 FEM 优化几何形状以其在 20 kHz 频率的纵向振动模式下，声极中的最大 von Mises 应力小于 350 MPa，旨在解决声极疲劳失效问题（图 7）。模态分析与实验表明，MC90 Intermet 因高疲劳强度、低磨损和均匀微观结构成为最优选择，其金字塔形尖端可降低应力集中、提升质量；商业化 WFN 焊头虽存在疲劳问题，但通过设计改进

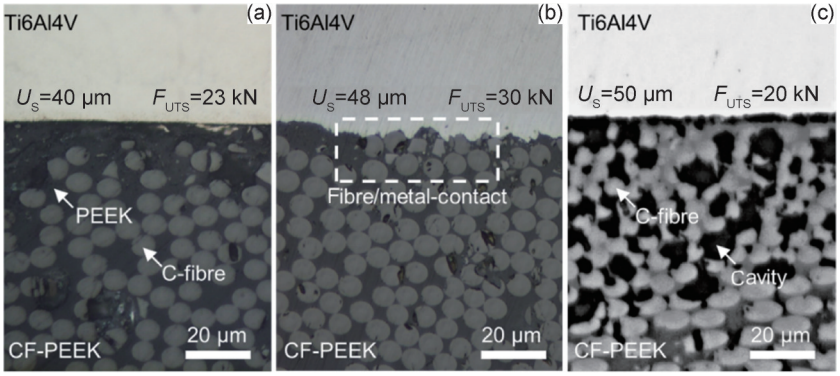


图 6　不同位移振幅下 TC4-CF/PEEK 管超声波焊接接头的微观组织[23]

(a)40 μm;(b)48 μm;(c)50 μm(焊接压力 F_{USW}:150 N,焊接速度 V_s:28 (°)/s(4.5 mm/s),附对应的极限拉伸剪切力 F_{UTS})

Fig.6　Microstructure of ultrasonically welded TC4-CF/PEEK-tube joints depending on the displacement amplitude[23]

(a)40 μm;(b)48 μm;(c)50 μm (F_{USW}:150 N and V_s:28 (°)/s (4.5 mm/s) with the resulting ultimate tensile shear force F_{UTS})

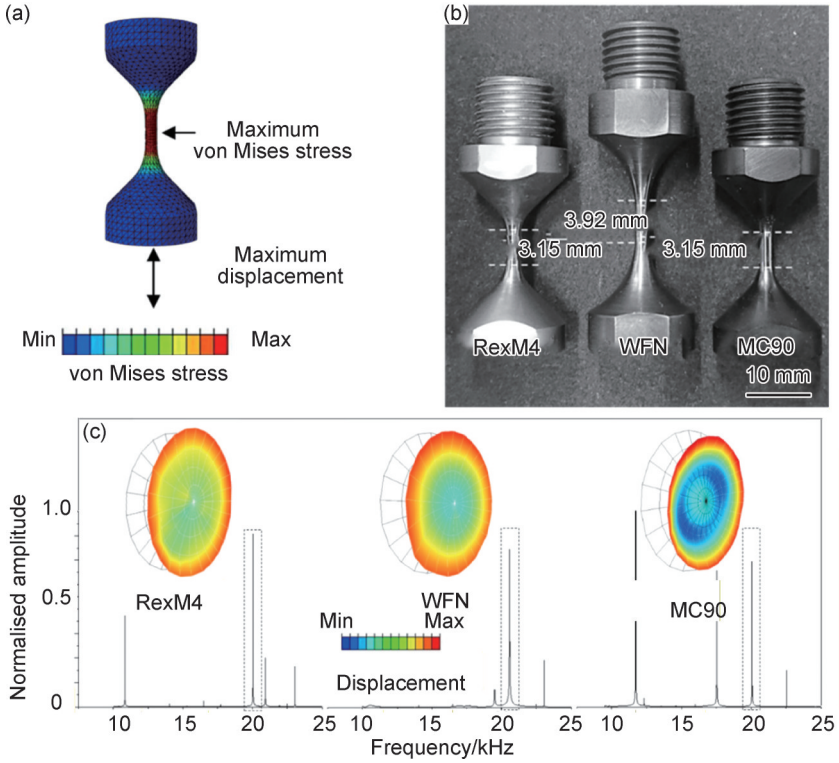


图 7　超声波声极材料选择与设计[24]

(a)用于确定固有频率和机械应力的纵向振动有限元模型;(b)制备的样品:包括虚线之间经过抛光处理的标距段;(c)三维激光多普勒测振仪对 RexM4、WFN 和 MC90 超声焊接声极进行模态分析,包括在 20 kHz 工作模式下测得的振型

Fig.7　Selection and design of ultrasonic horn materials[24]

(a)longitudinal vibration finite element model for determining natural frequency and mechanical stress;(b)prepared samples:including the gauge section polished between the dashed lines;(c)modal analysis of RexM4, WFN and MC90 ultrasonic welding horns by 3D laser Doppler vibrometer,including the vibration modes measured under 20 kHz working mode

仍具应用潜力。该研究首次将 MC90 Intermet 和 CPM RexM4 用于超声焊接工具,并提出钛合金作为上层焊接材料的可行性,为 Ti/CFRTP 超声连接的声极材料选型提供了新思路。

Tamura 等[25]通过超声波塑料焊接技术,实现了纯钛(CP-Ti)、β 钛合金与碳纤维增强尼龙 6(carbon fiber reinforced polyamide 6,CF/PA6)的连接。研究表明超声波塑料焊接可以使焊接时间短、效率高的同时能选择性加热,只熔化 PA6 基体,不损伤碳纤维和钛合金。最后通过在钛合金表面做阳极氧化处理调控其表面形貌,借助机械自锁效应使接头强度达到 5.99 MPa,较表面未处理的接头强度提升约 3 倍。

目前国内CFRTP/钛合金超声波焊接的研究文献很少，这意味着该领域尚未形成系统的理论与技术体系，存在大量有待探索的科学和技术问题。具体来看，现有研究存在多方面空白：其一，CFRTP/钛合金超声波焊接的关键参数（如振幅、频率、焊接压力、焊接时间、保压时间等）尚无系统性探讨，现有研究既缺单一参数的精细调控，也未明确多参数耦合机制，更未建立参数组合与焊接质量关联，导致参数优化缺乏有效指导；其二，超声波塑料焊接CFRTP/钛合金高强度接头尚处于空白；其三，尚未见到CFRTP/钛合金超声波焊接数值模拟、力学性能的系统性研究，研究潜力巨大。

1.3 搅拌摩擦焊接

搅拌摩擦焊（friction stir welding，FSW）作为一种低热输入的焊接技术，能够实现CFRTP与钛合金的高质量连接，其原理如图8所示[26]。FSW通过高速旋转搅拌针插入钛合金表面，使热量在钛合金表面产生，然后通过热传导方式传递至CFRTP/钛合金界面，使CFRTP发生熔化，冷却后形成CFRTP/钛合金焊接接头。然而，在CFRTP/钛合金搅拌摩擦焊接过程中，由于主要在钛合金侧实施搅拌，而钛合金本身熔点高、变形抗力大，这直接造成搅拌头磨损剧烈，显著缩短了其使用寿命[27]。此外，钛合金的塑性流动对温度变化极为敏感，加之其热导率较低，使得热量易在焊接区域积聚，进而导致工艺参数窗口狭窄。这不仅对焊接过程的控制精度提出了极高要求，还造成参数调试周期长、整体效率低下等问题[28]。

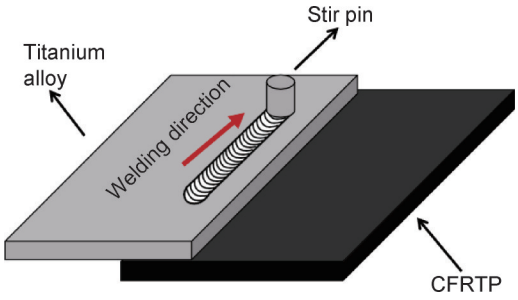


图8 CFRTP/钛合金搅拌摩擦焊示意图[26]

Fig.8 Schematic diagram of friction stir welding of CFRTP to titanium alloy[26]

Choi等[26]通过搅拌摩擦焊制备了纯钛与CF/PA6焊接接头，研究了搅拌头转速对接头拉伸剪切强度的影响。研究表明，界面温度随搅拌头转速的增加而升高。若转速低于100 r/min，界面温度将低于PA6树脂基体的熔点，导致PA6树脂基体处于固态，无法与金属表面实现连接（如图9(a)所示）。当转速在100至200 r/min之间时，焊接接头展现出较高的剪切强度（如图9(b)所示）。而当转速超过200 r/min时，界面温度高于350 ℃，虽然足够的摩擦热能使Ti与CF/PA6复合材料连接，但PA6树脂会发生热降解，产生CO_2、NH_3、H_2O和碳氢化合物等气体，导致焊缝界面附近部分结晶，形成缺陷，从而影响接头的力学性能

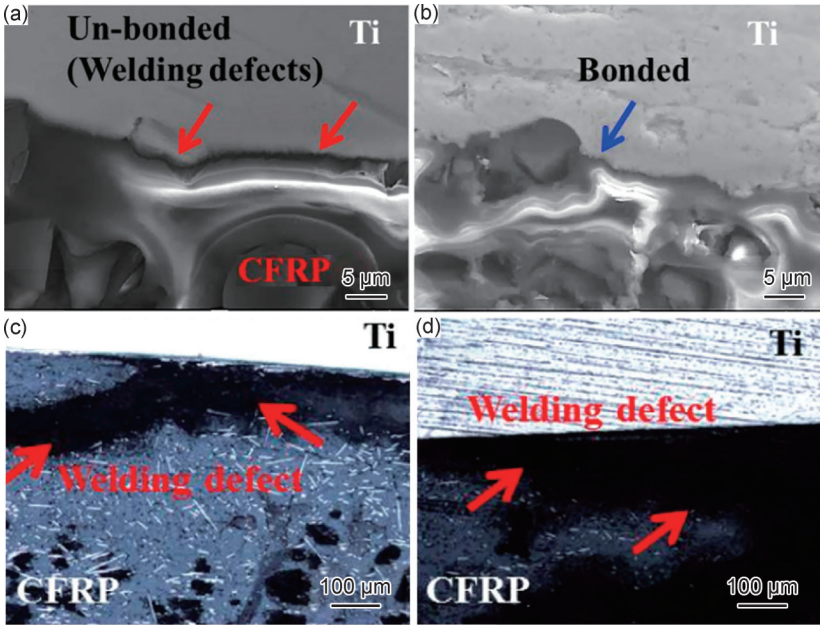


图9 不同转速下制备的CF/PA6与纯钛搅拌摩擦焊接头横截面形貌[26]

(a)100 r/min；(b)150 r/min；(c)200 r/min；(d)250 r/min

Fig.9 Cross-sectional morphologies of friction stir welded CF/PA6-Ti joints under different rotation speeds[26]

(a)100 r/min；(b)150 r/min；(c)200 r/min；(d)250 r/min

(如图9(c),(d)所示)。

Choi等[26]的研究证明了搅拌摩擦焊接可以应用于CFRTP与钛合金的焊接,与超声波焊类似,其还存在大量有待探索的科学和技术问题。例如,焊接速度、焊接压力、搅拌头形状、搅拌针插入深度等工艺参数对接头性能的影响尚不明确;搅拌摩擦焊对工件加持刚性要求极高,这种高刚度是否会影响CFRTP与钛合金的焊接性能尚不知晓。此外,由于CFRTP/钛合金的搅拌摩擦焊是在钛合金侧进行搅拌,因此CFRTP/钛合金搅拌摩擦焊也会面临钛合金搅拌摩擦中的问题,如焊头磨损、钛合金表面氧化等,需开展更广泛和深入的研究。

1.4　热压焊接

图10为典型的CFRTP/钛合金热压焊装置[29]。通过加热平台从钛合金侧进行加热,热量经钛合金传导至焊接界面使温度升至CFRTP熔点以上,使树脂熔化;在界面压力作用下,熔融树脂对钛合金表面进行浸润,随后在压力作用下冷却,实现两种材料的结合。

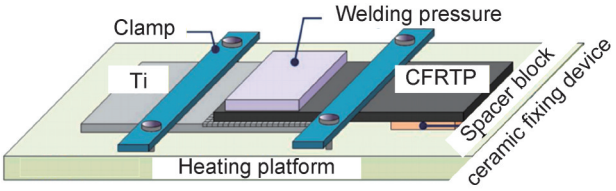


图10　CFRTP/钛热压焊接示意图[29]

Fig.10　Schematic diagram of hot-pressure welding of CFRTP to Ti[29]

Liu等[29]采用纳秒激光织构系统在TC4表面制备网格图案,采用热压焊实现织构化TC4与CF/PEEK连接,研究了网格织构宽度对接头拉剪力的影响并对比激光织构前后界面黏结状态。研究发现随网格宽度增大,钛合金表面粗糙度与润湿性下降,导致熔融CF/PEEK在织构网格中填充不充分,进而降低接头拉剪力。网格宽度为0.2 mm时,形成了最显著的机械互锁。线扫描结果显示,界面处存在C、Ti、O元素的扩散,形成约25 μm厚的化合物层,表明元素间发生了扩散或化学反应;此时最大拉剪力为5286 N。图11为网格宽度为0.2 mm热压焊接接头的宏微观形貌。

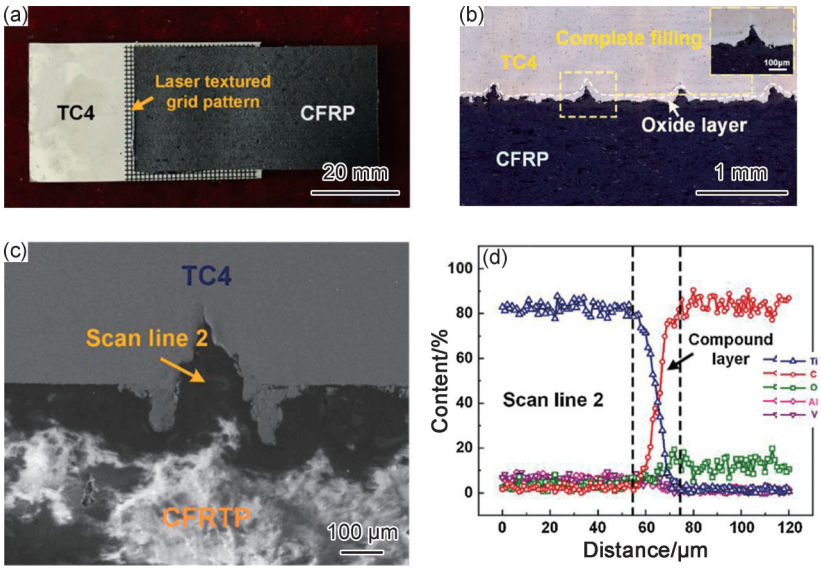


图11　CF/PEEK-钛合金热压焊接头宏微观形貌(网格织构宽度0.2 mm)[29]

(a)焊接接头宏观形貌;(b)接头横截面光学形态;(c)SEM接头形貌;(d)EDS线扫描结果

Fig.11　Macro- and micro-morphologies of hot-pressing welded CF/PEEK-titanium alloy joint (laser textured grid width of 0.2 mm)[29]

(a)macroscopic morphology of welded joint;(b)optical morphology of joint cross-section;(c)SEM morphology of joint;(d)EDS line scanning results

袁丁等[30]以TA2箔、碳纤维和PEEK树脂材料体系为基础,探索钛箔-碳纤维布-PEEK薄片直接复合的热压法制备工艺。通过三点弯曲实验测试热压工艺参数对层板弯曲性能的影响,确定的最佳工艺参数为成形温度390 ℃、热压压力1.6 MPa、保压时间40 min。结果表明,热压压力与温度是影响层合板弯曲性能的最重要因素,而保压时间对层板性能影响相对较小。本研究在最优参数下层合板弯曲强度达到681.68 MPa。热压连接技术具备操作简便、可控性强及适合大面积连接的优势,但对复杂曲面、凹陷及斜面结构的连接适应性较差。因此,开发自动化、智能化的热压一体化成型装备以提升连接效率与质量,是该技术未来的重要发展方向。

2 界面连接机理

钛合金与CFRTP的连接机理主要包括机械互锁、物理吸附及化学键合。其中，机械互锁源于熔融树脂嵌入粗糙金属表面形成的机械嵌合结构；物理吸附由范德华力和氢键主导，当聚合物分子与金属原子间距小于分子间引力作用距离阈值时，界面形成物理吸附；化学键合则通过活性钛元素与熔融树脂发生化学反应，在界面生成纳米级至微米级过渡层，形成新化学键，但该连接的结合强度相对较低。由于单一连接工艺的优化难以进一步提升接头强度，因此需通过调控界面处物理吸附、机械互锁及化学键合的复合作用，实现连接性能的突破。

2.1 机械互锁

2.1.1 减材式表面处理

减材式机械处理主要包括喷砂、喷丸、机械打磨和表面微织构等方式。喷砂、喷丸等主要通过高速喷射的磨料（石英砂、钢丸/陶瓷丸）冲击工件表面，去除污垢、锈蚀、氧化皮等多余附着层，进而实现工件表面的清理、粗化或光饰效果，其中喷砂目前运用广泛。徐飞[31]通过正交法探索出喷砂的最优工艺：60目刚玉砂、距离TA2板100～150 mm，压强0.2 MPa，喷砂处理形貌如图12所示。该处理使钛合金表面能提升至34.74 mJ/m，并与PEEK的单搭拉伸剪切强度达到了18 MPa；层间断裂韧性值比处理前提高了150.9%。他们发现砂粒尺寸对表面能的影响最大，其次是喷砂距离、喷砂压强。研究表明，随着砂粒尺寸增大、喷砂距离减小，钛表面自由能逐步增加，利于树脂对金属表面的浸润。喷砂处理的优势在于无需硝酸、氢氟酸等强腐蚀性试剂，且不受工件尺寸限制，其形成的沟壑状表面可增大接触面积，促进胶接时机械互锁结构的形成。

机械打磨利用砂纸、砂轮等工具与材料表面进行物理摩擦，随机去除表层材料，从而形成粗糙面表面。

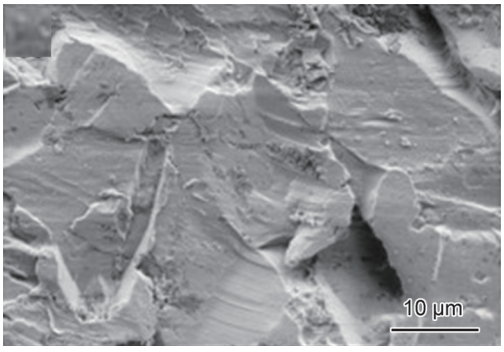


图12 钛合金表面喷砂处理形貌[31]

Fig.12 Abrasive blasting morphology on titanium alloy surface[31]

这种处理方式主要体现的是宏观粗糙度，但其效果存在一定的局限性。表面微织构法主要是应用脉冲激光对材料表面进行加工，从而在金属表面刻蚀特定形貌，实现表面改性。其优势在于解决了机械打磨的局限性，并可以通过特定的结构化设计实现了机械啮合及树脂浸润作用。Heckert等[32]总结了大量复合材料/金属激光连接实验结果，指出金属表面预处理对复合材料/金属激光连接强度至关重要。通过纳秒脉冲激光器在钛合金表面加工宏观、微观及纳米级织构，熔化的树脂在夹具压力下流入微织构并凝固，形成微型机械嵌合结构，从而实现高强度连接。微织构尺寸可通过调节激光功率、扫描速度、扫描间距等参数精确控制。激光微织构加工可控精度高，容易实现自动化，而且适用于传统方法难以加工的材料。

Jiao等[33]通过高速旋转激光束实现了CF/PA6与TC4的连接，同时采用激光微纹理技术在TC4表面制备网格织构，借助机械嵌合作用显著提升了接头性能，使接头剪切强度达到16.5 MPa。此外，他们还建立了包含微纹理的CF/PA6-TC4激光连接有限元模型，不仅揭示了微纹理导致温度场分布不均的影响机制，还优化得到了合适的工艺参数窗口。Guan等[34]预制微锥结构（如图13(a)所示），通过激光连接夹紧装置实现CCF/PEEK与TC4的连接，发现微锥密度是影响强度的关键因素。当微锥密度为8.2 锥/mm^2时，微锥深度约100 μm时，接头的最大断裂强度超过52 MPa，断裂发生在界面或者CCF/PEEK内部。当微锥密度过大时会由于单锥压力不足导致插入不充分，强度下降。Wang等[35]设计了三种角度的栅格织构（如图13(b)所示），结果发现0°/90°栅格实现了较强的附着力，但较大尺寸的织构会在界面附近引入裂纹、孔洞等微缺陷，显著降低TC4-CCF/PEEK接头的断裂强度。Tan等[36]在TC4表面制备深度90～120 μm的网格微织构（如图13(c)所示），发现网格微织构显著降低润湿角，深度100 μm时最佳，且钛基体颗粒剥离并黏附于CFRTP断裂面，表明强机械互锁效应。深度超过100 μm后接触角回升，导致填充不完全。井成虎等[37]研究了不同线间距网格微织构界面状态对CFRTP/钛合金接头强度的影响规律（如图13(d)所示），发现线间距越小，接头强度越高，扫描间距0.1 mm时强度达到峰值。Liu等[38]发现随着微织构宽度增大（如图13(e)所示），CFRTP在TC4表面的接触情况由不润湿变成润湿，当微织构宽度为0.2 mm时，润湿角最小，为49.91°，此时的润湿性最好；断裂模式从单一界面断裂转变为界面断裂、内聚断裂及TC4氧化物剥离的复合模式。

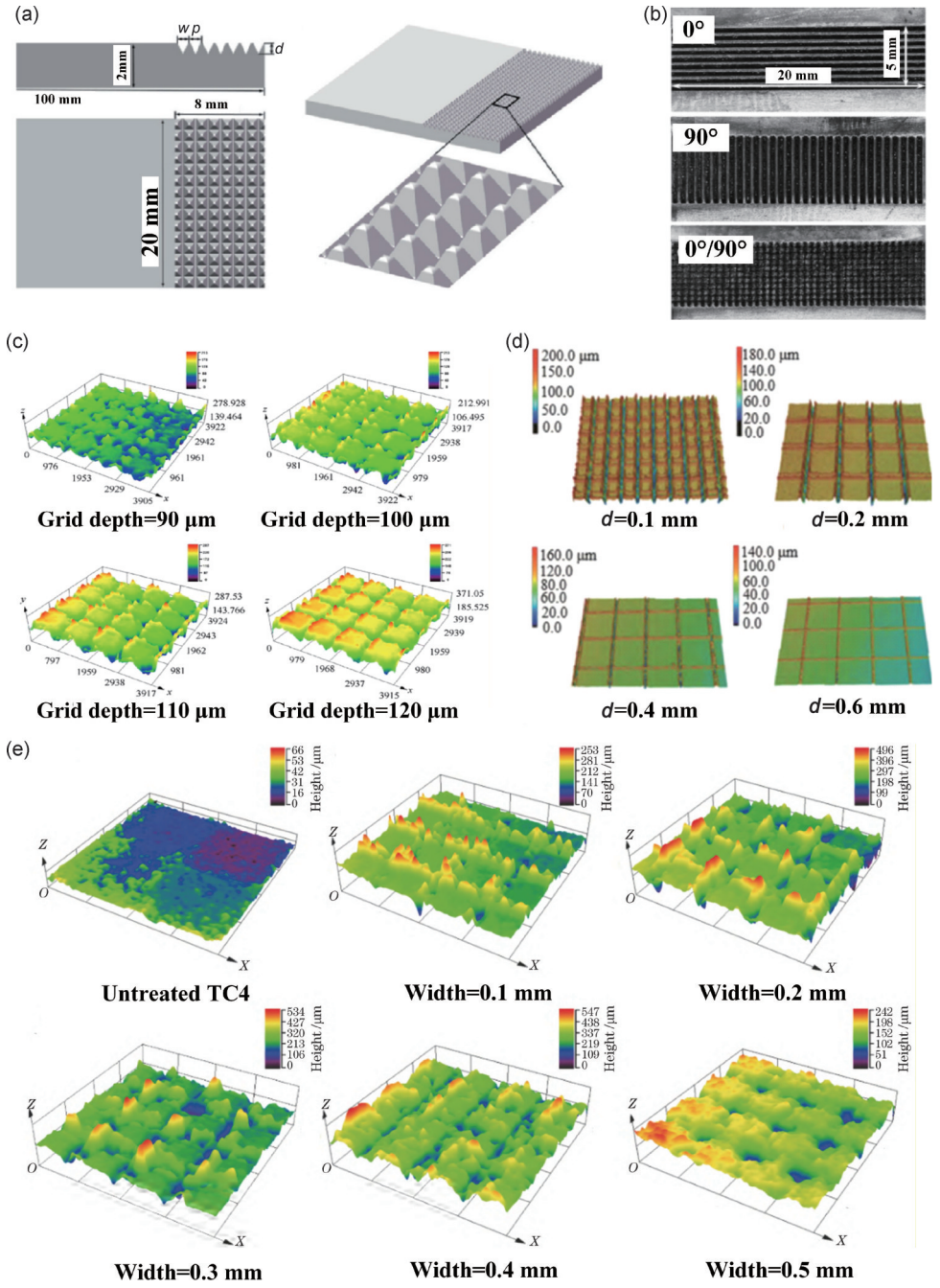


图 13　钛合金表面微织构形貌

(a)激光织构示意图[34]；(b)不同角度的宏观光栅织构[35]；(c)不同网格深度的三维微织构形貌[36]；(d)不同线间距的三维微织构形貌[37]；(e)不同宽度微织构的三维形貌[38]

Fig.13　Morphologies of microtexture on the surface of titanium alloy

(a)schematic diagram of laser texturing[34]; (b)macroscopic grating textures at different angles[35]; (c)3D microtexture morphologies with different grid depths[36]; (d)3D microtexture morphologies with different line spacings[37]; (e)3D morphologies of microtexture with different widths[38]

激光微织构作为金属表面处理的主流技术，在不同金属材料中的应用呈现显著差异，其典型参数如表 2[33-34,36,39-45]所示。然而，在钛合金材料的激光微织构研究中，仍存在两方面关键问题：一是专用加工设备的选型标准与最优工艺参数体系尚未明确；二是与其他金属（如铝、钢、镁等）在相同CFRTP连接场景下的激光刻蚀效果缺乏系统对比，使得钛合金因自身物理特性（如高熔点、高化学稳定性）带来的刻蚀难点未能得到充分凸显。基于此，未来研究可从两方面推进：一方面需开展同类设备、同种织构形态下的多金属对比研究，通过量化刻蚀效率、表面形貌及连接强度等指标，明确钛合金与其他金属的本质差异；另一方面应开展系统性工艺优化研究，结合钛合金的材料特性开发专属刻蚀方案，同时探索设备成本控制路

表 2 激光微织构处理设备、参数及织构尺寸

Table 2 Laser micro-texturing equipment, processing parameters and micro-texturing dimensions

Material	Equipment	Processing parameters				Optimal texture parameters				Ref.
		Laser power/W	Pulse frequency/kHz	Pulse width	Moving speed/mm/s^{-1}	Texture type	Width/μm	Depth/μm	Spacing/μm	
CF/PA6-TC4	100 W infrared picosecond laser	35	20	120 ns	1000	Grid array	150	75	100	[33]
CF/PEEK-TC4	Ultrafast femtosecond laser system (time bandwidth duetto)	15	100	209 fs	500	Microcone array	265	180	350	[34]
CF/PEEK-TC4	70 W pulsed fiber laser system (SP-070P-A-EP-Z-B-Y)	50	200	2 ns	300	Grid array	300	100	700	[36]
CF/PEEK-AA6061-T6	RFL-P50QB infrared picosecond laser	50	50	120 ns	500	Grid array	500	200	500	[39]
CF/PA66-AA6061	Nanosecond laser system (SP-050P-A-EP-Z-F-Y)	20	70	100 ns	25	Microcone array	100	150	100	[40]
CF/PEEK-AZ31B	Femtosecond laser system (FemtoYL-50)	50	25	500 fs	1000	Dot matrix array	ϕ1200		200	[41]
CF/PEEK-AZ31B	Nanosecond laser system (SP070P-A-EP-Z-F-Y)	56	200	240 ns	700	Grid array	300	300	1000	[42]
CF/PA66-304 stainless steel	70 W Pulsed fiber laser system (SP-070P-A-EP-Z-B-Y)	70	70	50 ns	800	Grid array	40	140	1200	[43]
CFRP-304 stainless steel	ROM-500 nanosecond laser	23	20	15 ns	1000	Rectangular strip texture	Length: 25 mm Width: 500 μm			[44]
CFRTP-Q980 stainless steel	Picosecond laser (Bellin laser, amber NX IR)	16	250	15 ps	120	Groove array	30	60	150	[45]

径，为CFRTP与钛合金的低成本高效率连接提供技术支撑。

2.1.2 反应式表面处理

反应式表面处理是指通过化学反应在钛合金表面形成具有多孔结构的氧化膜，树脂浸入这些多孔结构，形成机械互锁。反应式表面处理可分为化学溶液表面处理和电化学处理，其中化学溶液表面处理是通过酸、碱或盐溶液的腐蚀、氧化与刻蚀作用，实现表面活化与形貌重构。处理前，钛合金表面天然覆盖由空气氧化形成的TiO_2致密膜，虽具备一定防护性，但限制了其表面功能化修饰。化学溶液处理可通过溶解氧化膜、去除杂质，暴露出高活性钛基体，诱导并重新形成具有特定微观结构的TiO_2氧化层。与初始致密膜不同，新形成的氧化层因溶液中离子的选择性刻蚀、动态溶解-沉积平衡及晶体生长动力学差异[46]，呈现出多孔、纳米级须状或微凹坑等复杂形貌，显著增加表面粗糙度与比表面积，从而增强与树脂等材料的界面结合能力。陈德生等[47]对比了多种化学溶液对TC4表面处理产生的影响。研究指出，单独使用酸洗溶液（HNO_3+HF）虽然能够有效去除钛合金表面的氧化膜，但无法形成有利于胶接的活性表面，因此胶接强度较低。而磷酸盐-氟化物溶液（如含NaF、HF）虽然能够活化表面，但由于缺乏强氧化剂和碱性环境，无法生成致密的氧化膜，且处理后的膜层均匀性较差，容易出现银灰色或花斑现象。最后得出含H_2O_2和NaOH的碱性溶液是TC4钛合金胶接前化学表面处理的最优选择。碱性环境（NaOH）可以腐蚀钛合金表面，降低电极电位，使其活化，同时促进H_2O_2分解，生成强氧化性自由基，加速氧化反应。H_2O_2强氧化作用使钛合金膜层致密且具有须状或凹坑结构，同时增大与胶黏剂的机械嵌合。

电化学表面处理是通过电场作用使金属与电解液发生离子交换及氧化还原反应，在表面形成特定形貌结构，其中阳极氧化与微弧氧化法（micro-arc oxida-

tion，MAO）在钛合金表面处理中应用最广。阳极氧化通过电化学方法在阳极金属表面生成具有特殊形貌的氧化膜，广泛用于胶接连接。Li 等[48]针对钛合金表面进行喷砂-阳极氧化处理，与单一喷砂工艺对比，发现钛合金表面尖锐边缘因电解液溶解变得平滑，同时生成多孔氧化膜使钛合金与环氧树脂的粘接强度最高达 22.6 MPa。徐飞等[49]通过优化 NaTESi 电解液阳极氧化工艺参数，确定 10 V 电压下氧化 10 min 时，Ti/PEEK 界面结合强度最高（表面能 30 mJ/m），且当电压、温度一定时，纳米颗粒尺寸随氧化时间延长呈先增大后减小的趋势。段理想[50]采用阳极氧化联合重氮盐电接枝法处理 TA2 板，纳米级多孔结构显著提升 TA2/PEEK 界面的粘接强度；同时超声波辅助阳极氧化技术通过空化与机械效应加速反应，使表面能达 70.25 mN/m，进一步增强界面湿热耐久性能。Tamura 等[25]采用阳极氧化处理结合超声波塑料焊接技术，实现了纯钛与 CFRTP 的连接，重点研究了不同处理电压下阳极氧化工艺纯钛的表面形貌（如图 14（a）所示）演变规律。随处理电压升高，钛板表面孔洞聚集，孔径尺寸与孔面积比增大；相较于密集分布的纳米级孔洞，具有较低孔面积比的微米级不规则孔径结构更能显著提高结合强度，表明微米级尺寸孔槽结构对连接强度的提升起关键作用。

张宇[51]通过探究钛和铝多孔阳极氧化膜的共同形成机理，发现钛合金阳极氧化通常以恒压模式为主，若采用恒流，需精准控制电流密度以避免膜层过度溶解或生长不均。同时，钛合金对电解液成分依赖性更强，需在含氟电解液（如 NH_4F）中才能形成多孔；氟离子（F^-）是多孔结构形成的关键驱动因素，若氟离子浓度过高，会过度腐蚀氧化膜，导致结构坍塌；浓度过低则无法形成规则多孔结构。铝合金形成多孔膜可在多种酸性电解液（如 H_3PO_4、草酸）中进行，对电解液成分的依赖性低，即使参数小幅波动，仍能形成较稳定的多孔结构。此外，钛合金的多孔结构对添加剂（如磷酸、硼酸类）极其敏感。例如，在含 NH_4F 的电解液中加入 H_3PO_4 或 H_3BO_3，会显著抑制电子电流和氧气气泡产生，导致纳米管长度从 2.85 μm 降至 795 nm，甚至转变为致密膜。最后钛合金的阳极氧化对温度敏感，高温会加速氟离子的腐蚀作用，导致纳米管壁厚变薄、结构松散；低温则会降低离子迁移速率，抑制多孔结构生长，需精确控制温度。

MAO 是在普通阳极氧化基础上，利用弧光放电强化反应，在钛合金表面形成陶瓷膜。尽管该膜层通常较疏松，不利于胶接，但对焊接而言，其生成的微弧孔可显著提升钛合金与 CFRP 的机械互锁能力。Xia 等[52]结合纳秒激光加工与多孔 MAO 涂层技术，在钛合金表面预制直径 0.5～2 mm 的微孔，经微弧氧化后在孔壁生成 1～5 μm 的次级微孔，形成“大孔套小孔”的多级互锁结构（如图 14（b）所示）。随着孔结构直径的增大，界面机械互锁能力增强。当直径为 2.3 μm MAO 涂层时，拉伸剪切力最高，为 1587 N。研究通过支持向量回归（SVR）模型，明确了不同 MAO 涂层厚度与激光织构模式对拉伸剪切力的影响规律。

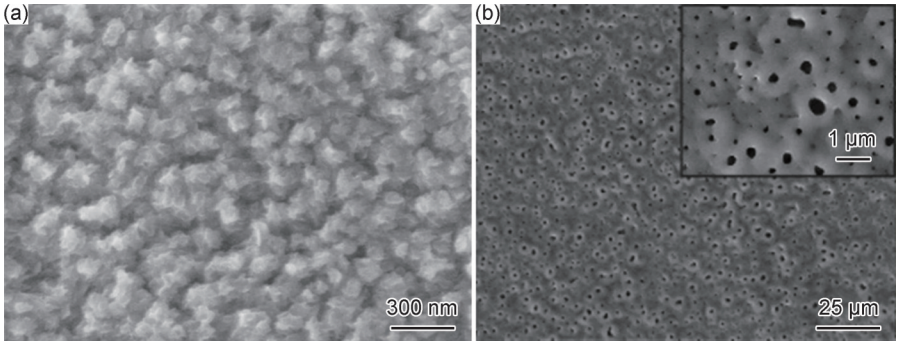


图 14　钛合金表面微孔形貌　（a）阳极氧化[25]；（b）微弧氧化[52]

Fig.14　Microporous morphologies on titanium alloy surface　(a)anodizing[25]; (b)MAO[52]

2.1.3　钛合金表面微结构分析

表 3[25,31,33-46,53-54]总结了钛合金/CFRTP 连接中利于机械互锁的表面处理方法。喷砂处理通过高速砂粒冲击形成微米级不规则微孔，其优势在于操作简便、适合大面积快速加工[31]，为粗加工表面构建基础机械咬合结构。但该工艺需配套复杂清洗工序，主要适用于精度要求不高的场景。化学溶液工艺是利用酸性溶液蚀刻或在碱性环境下强氧化剂在钛合金表面生成微米级孔群，可作为标准化预处理手段适用批量生产[46,53]。然而，强酸强碱的使用会增加环境治理与中和清洗成本，且微孔形态受化学腐蚀随机性限制，导致互锁效果提升存在上限。微弧氧化技术，在

磷酸盐/硅酸盐电解液中通过弧光放电形成微米级至亚毫米级多孔陶瓷层[54]，可以显著增加界面接触面积与互锁深度。阳极氧化工艺采用磷酸/硫酸混合液，通过电压精确控制孔隙从纳米到微米级演化。激光微织构技术，可通过精准调控孔径、孔深及排列密度，能够满足不同的界面结合力需求[33-45]。当前激光微织构技术凭借高精度、高效批量加工及无缺陷表面质量，成为航空航天等领域构建高性能界面机械互锁的理想选择，代表未来金属与复合材料连接表面处理的发展趋势。

表 3 提高 CFRTP/钛合金界面机械互锁能力的钛合金表面处理方法

Table 3 Ti alloy surface treatment methods for improving mechanical interlocking of CFRTP/Ti alloy interface

Surface treatment method	Process	Micropore scale	Ref.
Sandblasting	60-mesh corundum sand, sandblasting distance 100-150 mm, sandblasting pressure 0.2 MPa	Micron-scale	[31]
Pickling alkaline environment + strong oxidant	5%HF+15%HNO_3, NaOH+H_2O_2	Micron-scale	[46,53]
Laser microtexturing	High power, low scanning speed, high scanning times	Millimeter-scale	[42-43]
Laser microtexturing	Low power, high scanning speed, low scanning times	Micron-scale	[33-45]
Anodization	Acidic system (e.g. H_2SO_4, H_3PO_4), alkaline system (e.g. NaOH)	Nano-submicron scale	[25]
Micro-arc oxidation (MAO)	Phosphate system, silicate system	Micron-to-submillimeter scale	[54]

2.2 化学键合

CFRTP与钛合金的化学键合机制通过表面化学处理及界面反应实现，以增强界面结合强度与稳定性。钛合金表面惰性较高，难以直接与CFRTP树脂基体结合，可通过表面氧化层、硅烷偶联剂、席夫碱钛络合物等化学处理手段，引入活性基团或制造氧空位缺陷，为界面结合提供活性位点。CFRTP树脂基体在固化过程中释放的活性基团，可与钛合金表面氧化物或金属原子发生化学反应，形成共价键或配位键。在此之前，树脂基体通过氢键、范德华力等物理吸附作用与钛合金表面初步接触，为后续化学反应提供接触基础。

2.2.1 表面氧化层

电化学表面处理不仅能通过调控电解参数在金属表面构建特定形貌结构，还能借助电化学反应中的高能粒子轰击与元素迁移，在界面生成氧化层并引发跨界面元素扩散，进而实现金属与高分子基体的化学嵌合。Li等[48]研究表明，钛合金阳极氧化后生成的TiO_2氧化膜富含羟基(—OH)官能团，可与环氧树脂中的环氧基团发生化学键合，形成化学锚定效应；而单一喷砂仅通过物理粗糙化实现机械互锁，缺乏此类化学作用。此外，阳极氧化后的退火处理可促进TiO_2氧化膜结晶化，增强氧化膜与钛基底的结合力，有效避免界面分层[55]。Xia等[52]通过MAO处理在钛合金表面形成多孔TiO_2氧化层，其表面富集的大量羟基(—OH)、氧离子(O^{2-})等极性基团可与CF/PEEK基体中的羰基、醚键等极性官能团形成氢键或范德华力，显著增强界面化学结合力。MAO处理后钛合金表面自由能最高达141 mJ/m^2，其极性分量(γ^p)的显著提升直接反映了界面化学亲和力的增强，为化学嵌合提供了热力学基础。

2.2.2 硅烷偶联剂

硅烷偶联剂(silane coupling agent，SCA)是一种含有可与无机物反应的官能团和能与有机物结合基团的有机硅化合物。Arkles[56]提出了SCA成膜的四步反应模型(单分子层键合机理)，如图15所示。其反应过程大致分为四个阶段：首先，Si—X基团发生水解转化为Si—OH基团；接着，Si—OH基团之间通过脱水缩合反应形成具有Si—O—Si结构的低聚硅氧烷；随后，低聚物中的Si—OH与基材表面的羟基相互作用形成氢键；最终，在加热固化时，伴随脱水反应的发生，涂层与基材之间形成共价键连接。一般来说，SCA中仅有一个硅羟基会与基材表面的羟基通过键合形成氢键，而剩余的两个Si—OH要么处于游离状态，要么与其他SCA分子中的Si—OH发生缩合反应。选择含氨基、环氧基等官能团的硅烷偶联剂(SCA)，有利于与钛合金表面形成强化学键。配制SCA溶液时，常用乙醇或异丙醇等醇类溶剂，既能有效溶解SCA，又能促进其在金属表面均匀分布[57]。溶液浓度需控制在0.5%～2.0%，过高会导致黏稠，

难以均匀涂覆。多数SCA需将溶液pH值调至3.5～5.5，以促进水解和缩合反应。例如，用醋酸作水解催化剂，有助于SCA在钛合金表面形成稳定化学键[58]。

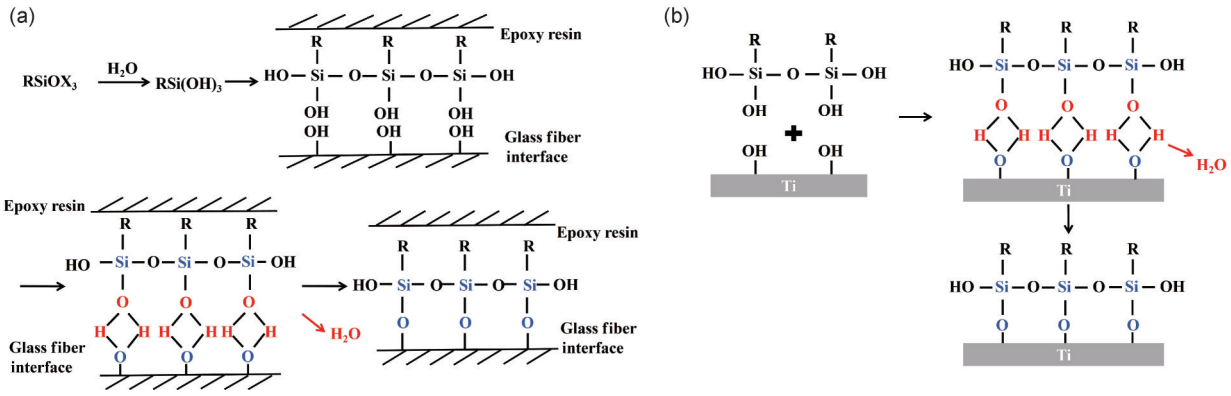


图15　硅烷偶联剂作用机理示意图

(a)偶联剂与环氧树脂反应；(b)偶联剂与Ti反应

Fig.5　Schematic diagram of the action mechanism of silane coupling agent

(a)reaction between coupling agent and epoxy resin；(b)reaction between coupling agent and Ti

Su等[59]采用激光织构、微弧氧化和SCA协同处理的改性方法提高CF/PEEK-TC4焊接接头强度。激光织构通过增加接触面积促进机械互锁，微弧氧化在激光织构内形成多孔结构，实现双尺度机械互锁。同时改善了CFRTP在TC4表面的润湿性。此外，氧化结构的存在促进了Ti—C和Ti—O等新化学键的生成，进一步提高了焊接强度，界面连接机理如图16所示。SCA处理通过引入氨基官能团，与CFRTP基体中的羰基(C═O)、醚键(R—O—R)形成氢键相互作用。激光织构与微弧氧化产生的多孔结构吸附更多—OH键，为SCA提供化学活性位点，定向诱导氨基与极性基团的氢键形成。这种多重改性方法实现了机械互锁、化学键合和官能团相互作用的全面增强。随着改性步骤的逐步引入，CFRTP/TC4焊接接头拉剪强度和弯曲强度显著增加。经过多重改性后的接头强度达到27.22 MPa，比仅酸洗情况下的10.23 MPa提高了166%，失效模式也从界面失效逐渐转变为内聚失效。

2.2.3　席夫碱钛配合物

席夫碱是一类是由伯胺与醛/酮类化合物通过亲核加成-消除反应生成的具有亚氨基(HC═N)或烷亚氨(RC═N)基团等特征官能团化合物，制备条件和方法相对简单，且合成物具有结构多样性。

席夫碱钛配合物在钛合金与CFRTP界面结合中发挥双重作用：一方面，其分子结构中的活性基团可与钛合金表面的钛原子发生定向高密度络合反应；另一方面，高温条件下可与熔融态树脂分子链扩散缠绕并产生分子间相互作用，从而在异质材料间形成桥接。该配合物能够在钛合金表面构建均匀的纳米级涂层，通过改善表面粗糙度与润湿性，促进与CFRTP的界面接触；同时，借助化学键合与物理改性协同作用，提升界面相容性，降低应力集中，增强接头力学性能，且其形成的稳定界面层可有效阻隔水分、氧气侵蚀，提高接头耐久性与抗老化能力。

Pan等[60]由以3,5-二叔丁基水杨醛与乙二胺反应生成水杨醛二亚胺席夫碱配体，再与钛酸四乙酯通过酯交换反应生成席夫碱钛配合物，最后接枝于经过预处理的TC4板表面，如图17所示。该配合物通过在界面诱发化学键合，显著提升了TC4表面润湿性与基团活性，使单搭接接头抗剪强度达到47.49 MPa，较未处理试样大幅提高。

Tan团队[61]也通过合成含席夫碱的功能化聚合物以改性TC4表面，提升其与CF/PEEK的界面结合强度。该聚合物先由香草醛与甲基丙烯酰氯反应，再与乙基4-氨基苯甲酸制得。实验对比未处理、微分子席夫碱(MS)处理及含席夫碱聚合物(PS)处理三种情况，结果显示，PS凭借化学功能团定向诱导，能与钛合金中钛原子形成配位键，其羰基(C═O)和醚键(C—O—C)还与CFRTP中极性功能团产生范德华力，显著增强界面结合强度。焊接界面FT-IR分析如图18所示，表明经席夫碱聚合物处理后，界面处席夫碱(—C═N)、羰基(C═O)和醚键(C—O—C)特征吸收峰发生显著蓝移或红移，反映次级相互作用发生。相比传统微分子席夫碱，聚合物结构使功能团密度大幅提高，进而增强次级相互作用强度。含席夫碱聚合物与TC4表面钛原子高密度络合，同时与CF/PEEK基体次级相

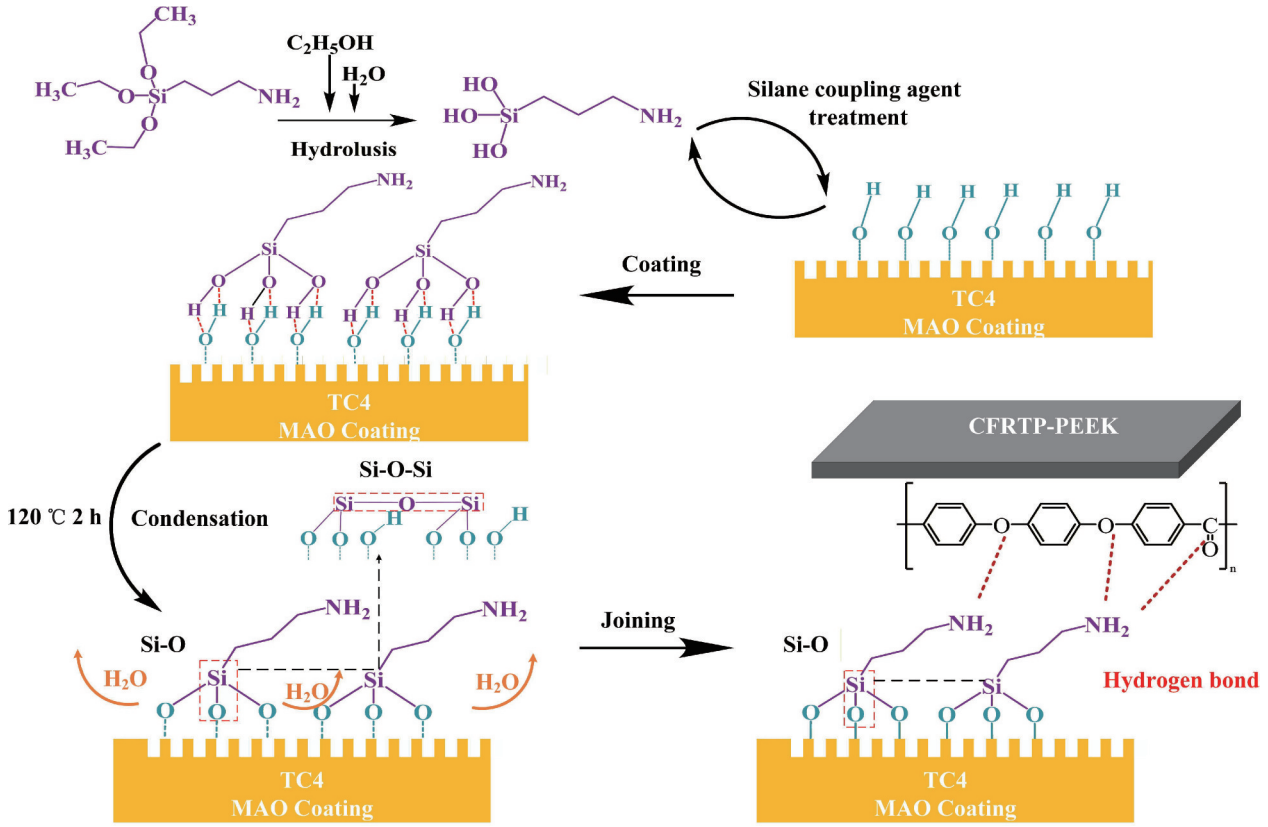


图 16 TC4 表面多重表面改性及官能团之间作用示意图[59]

Fig.16 Schematic diagram of multiple surface modifications on TC4 and interactions between functional groups[59]

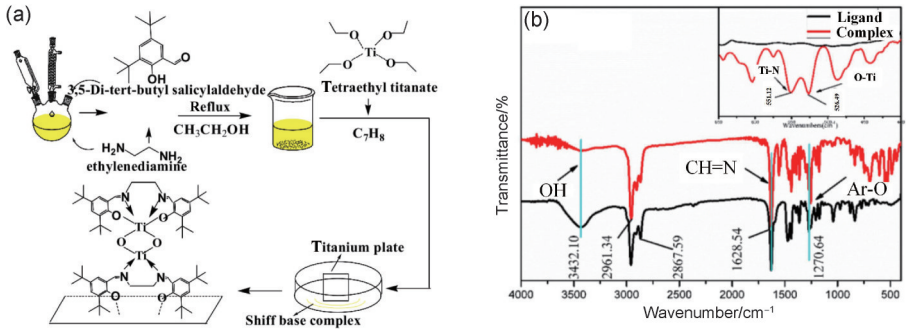


图 17 席夫碱钛配合物合成及界面化学键增强[60]

(a)席夫碱钛配合物合成工艺;(b)席夫碱钛配合物键合增强原理

Fig.17 Synthesis of Schiff base titanium complexes and interfacial chemical bond enhancement[59]

(a)synthesis process of Schiff base titanium complex;(b)principle of bonding enhancement for Schiff base titanium complex

互作用,使 CF/PEEK-TC4 接头拉剪强度达 38.73 MPa,与仅对 TC4 表面酸洗得到的接头相比(10 MPa),拉剪强度提升了 287%。

2.3 CFRTP/钛合金焊接接头强度分析

表 4[19,25,28-29,33-38,52,59,61]总结了经不同表面处理后 CFRTP/钛合金焊接接头强度。由表中数据可看到不同表面处理得到的接头强度存在显著差异,且由于各项研究采用的材料种类、材料尺寸、表面处理方法、焊接工装等各不相同,难以开展横向对比,从而形成有效的工程指导。例如文献[34-35]仅采用激光微织构方法接头强度便达到 50 MPa 以上。根据图 13,文献[34-35]采用的激光微织构并不相同,共同点是焊接中均使用了夹紧装置,这似乎表明焊接过程中加压有助于提高焊接接头强度。然而文献[29]采用热压焊,其焊接过程中一直有压力存在,但其接头强度仅 8.5 MPa(原文献给出最大拉剪力为 5286 N,本文按照搭接面积 25 mm×25 mm 计算得到拉剪强度)。文献[25]采用超声波焊,焊接过程中同样一直存在压力作用,但接头强度仅 5.99 MPa。文献[34]和[35]中试样搭接长度分别为 8 mm 和 5 mm,远小于其他文献中的长

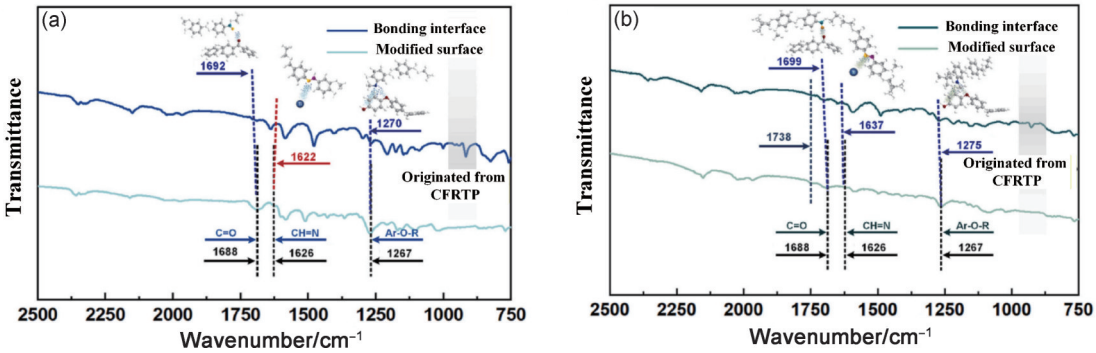


图 18　微分子席夫碱(a)处理、含席夫碱聚合物(b)作用下焊接界面 FT-IR 对比分析[61]

Fig.18　FT-IR comparative analysis of welding interface under the treatment of micromolecular Schiff base (a) and the action of Schiff base-containing polymer (b)[61]

表 4　经不同表面处理后的 CFRTP/钛合金焊接接头强度

Table 4　Joint strength of CFRTP/Ti alloy after different surface treatments

Surface treatment method	Materials and dimensions	Welding process	Joint configuration	Maximum lap shear strength/ tensile shear force of joint	Ref.
Laser microtexturing	TC4: 100 mm×20 mm×2 mm CF/PEEK: 100 mm×20 mm×2 mm	Laser welding (clamping device)	Single lap joint, lap length: 8 mm	52 MPa	[34]
Laser microtexturing	TC4: 100 mm×20 mm×2 mm CF/PEEK: 100 mm×20 mm×2 mm	Laser welding (clamping device)	Single lap joint, lap length: 5 mm	58 MPa	[35]
Laser microtexturing	TC4: 50 mm×30 mm×1.5mm CF/PEEK: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 20 mm	2621 N	[36]
Laser microtexturing	TC4: 50 mm×30 mm×1.5mm CF/PEEK: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 25 mm	2596 N	[38]
Laser microtexturing+MAO	TC4: 75 mm×25 mm×1.5 mm CF/PEEK: 75 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 20 mm	1587 N	[52]
Laser microtexturing+MAO+SCA	TC4: 50 mm×30 mm×1.5 mm CF/PEEK: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 25 mm	27.22 MPa	[59]
Schiff Base modifier	TC4: 50 mm×30 mm×1.5 mm CF/PEEK: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 20 mm	38.73 MPa	[61]
Laser microtexturing	TC4: 50 mm×30 mm×1.5 mm CF/PEEK: 50 mm×25 mm×2 mm	Hot press welding	Single lap joint, lap length: 25 mm	5286 N	[29]
Laser microtexturing	Ti: 50 mm×25 mm×2 mm CF/PA66: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 20 mm	16.5 MPa	[33]
Laser microtexturing	Ti: 50 mm×25 mm×3 mm CF/PA66: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 25 mm	18 MPa	[37]
Laser microtexturing	Ti: 50 mm×25 mm×3 mm CF/PA66: 50 mm×25 mm×2 mm	Laser welding	Single lap joint, lap length: 20 mm	30.4 MPa	[19]
Anodization	Ti: 150 mm×50 mm×2 mm CF/PA6: 50 mm×25 mm×1 mm	Ultrasonic Plastic welding	Single lap joint, lap length: 25 mm	5.99 MPa	[25]
Silane coupling agent (SCA)	Ti: 150 mm×50 mm×2 mm CF/PA6: 150 mm×50 mm×3 mm	Friction Stir welding	Single lap joint, lap length: 25 mm	10.15 MPa	[28]

度。崔学团[62]发现搭接接头尺寸(搭接宽度、搭接长度)会影响电阻点焊接头的拉剪力,因此可推测搭接接头尺寸对于金属/塑料焊接接头的强度可能也会有一定影响。此外,文献[52,59]采用激光微织构、微弧氧化和SCA多种表面处理方法,理论上通过机械互锁和化学键合的协同作用,应该得到更高的接头强度。然而,从文献数据看,其接头强度反而低于仅使用激光微织构,或仅使用希夫碱改性剂的情况。上述

这些现象说明在CFRTP/钛合金焊接领域依然缺乏系统性研究，存在大量的科学和技术问题有待进一步澄清。

3 结论与展望

本文对CFRTP和钛合金的异种材料焊接工艺现状进行了综述，主要结论和展望如下：

(1)目前CFRTP与钛合金的连接技术以激光焊为主，虽因热源可控适用于精密结构连接，但钛合金高熔点、低热导率的特性会增加焊接热输入控制难度，易因界面温度不均产生气孔、裂纹，且扫描速度、离焦量等参数对缺陷与接头强度影响显著，参数优化耗时耗力，未来需通过光束整形、研发高性价比激光器，突破成本与效率瓶颈；超声波焊接、搅拌摩擦焊、热压焊接等技术研究相对匮乏，其中超声波焊接依托高频振动可实现快速无填充连接，搅拌摩擦焊作为低热输入固相技术能避免材料热损伤，却均因钛合金高硬度、高强度特性面临焊头材料匹配难、磨损快的问题，需强化工具材料与工艺稳定性研究以推进工业化，热压焊接虽操作简便且适配大面积连接，却难以适应复杂曲面，亟待开发自动化加热与加压系统。未来需通过工艺复合与装备升级，实现不同场景下连接质量与效率的协同提升。

(2)钛合金因表面致密惰性氧化膜与熔融树脂润湿性差，需通过复杂表面处理实现与CFRTP的有效结合，因此界面作用机制与表面处理技术是决定连接性能的核心，需强化多机理协同调控；机械互锁、物理吸附与化学键合共同影响界面结合强度，其中机械互锁主要依赖树脂熔融嵌入实现，喷砂、激光微织构、阳极氧化等表面处理可改善钛合金表面润湿性与粗糙度，为树脂浸润和机械嵌合创造条件，尤其激光微织构凭借高精度与批量加工能力，在工程应用中存在巨大潜力。但钛合金化学活性高，高温下易与CFRTP中的碳、氧反应生成TiC等脆性相，这些脆性相对焊接接头质量的影响尚不明确。此外，当前机械互锁强化的表面处理手段虽多，但依然缺乏在同种焊接条件下(同种材料、同样尺寸、同样焊接工艺及参数)对各种表面结构的对比性研究。

(3)CFRTP与钛合金的界面连接机制不仅体现为机械互锁的宏观表现，还存在化学键合作用，通过表面氧化层、硅烷偶联剂、席夫碱等化学表面处理可在钛合金表面引入羟基、氨基等活性官能团，为Ti—C、Ti—O等稳定化学键的形成创造条件，这类化学键能显著提升界面结合的抗剥离能力与长期可靠性。然而当前研究存在明显短板，界面分子动力学层面的探索严重匮乏，具体成键路径、键能大小等成键效应，以及官能团如何激活界面反应的活化机制尚未明确，限制了化学键合作用的精准调控。此外，对于机械自锁和化学键合的协同强化效应还需开展系统性研究，以促进CFRTP与钛合金焊接接头强度的进一步提升和工程应用。

参考文献

[1] 赵坤鹏，郑会龙，康振亚，等.金属与CFRP穿透增强连接结构低速冲击损伤特性与结构优化[J].材料工程，2024，52(12)：100-110.
ZHAO K P，ZHENG H L，KANG Z Y，et al.Low-velocity impact damage characteristics and structural optimization of metal and CFRP through-thickness reinforcement connection structures[J].Journal of Materials Engineering，2024，52(12)：100-110.

[2] 王军照.碳纤维复合材料在航空领域中的应用现状及改进[J].今日制造与升级，2020(8)：48-49.
WANG J Z.Application status and improvement of carbon fiber composites in aviation field[J].Manufacture & Upgrading Today，2020(8)：48-49.

[3] 谷雨.碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天领域的研究进展[J].冶金与材料，2023，43(7)：118-120.
GU Y.Research progress of carbon fiber reinforced polymer composites in aerospace field[J].Metallurgy and Materials，2023，43(7)：118-120.

[4] 霍红宇，姚鑫，高亮，等.高性能连续纤维增强热塑性预浸料及复合材料制备工艺研究进展[J].材料工程，2025，53(3)：44-53.
HUO H Y，YAO X，GAO L，et al.Research progress in preparation technology of high performance continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg and its composites[J].Journal of Materials Engineering，2025，53(3)：44-53.

[5] 黄张洪，曲恒磊，邓超，等.航空用钛及钛合金的发展及应用[J].材料导报，2011，25(1)：102-107.
HUANG Z H，QU H L，DENG C，et al.Development and application of aerial titanium and its alloys[J].Materials Review，2011，25(1)：102-107.

[6] MURAKAMI S G，OZAKI K，ONO K，et al. Effect of alloying elements on machinability and hot workability of α-β titanium alloy containing Fe and C[J]. Kobelco Technology Review，2011，30：13-18.

[7] LAMBIASE F. Mechanical behaviour of polymer-metal hybrid joints produced by clinching using different tools[J].Materials & Design，2015，87：606-618.

[8] 周健，刘双宇，张福隆.激光自蔓延连接CFRTP/铝接头微观形貌及形成机理[J].激光技术，2019，43(2)：147-153.
ZHOU J，LIU S Y，ZHANG F L.Microstructure and formation mechanism of CFRTP/Al joints by laser induced self-propagating bonding[J].Laser Technology，2019，43(2)：147-153.

[9] 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.

[10] 张照龙,王天政,周海鹏,等.碳纤维增强热塑性复合材料的超声波连续焊研究现状[J].材料工程,2025,53(11):1-10.
ZHANG Z L,WANG T Z,ZHOU H P,et al.Research status of ultrasonic continuous welding of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J].Journal of Materials Engineering,2025,53(11):1-10.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] ZHANG Y,WANG F J,WANG Q.Effect of interfacial temperature on the bonding morphology and fracture mechanism of TC4-CFRTP laser bonding joints with polymer interlayer[J].Optics & Laser Technology,2025,184:112463.

[15] 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.

[16] ZHANG X D,CHEN W Z,BAO G,et al.Improvement of weld quality using a weaving beam in laser welding[J].Journal of Materials Science & Technology,2004,78(5):633-636.

[17] 周立涛,王旭友,王威,等.激光扫描焊接工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J].焊接学报,2014,35(10):65-68.
ZHOU L T,WANG X Y,WANG W,et al.Effects of laser scanning welding process on porosity rate of aluminum alloy[J].Transactions of the China Welding Institution,2014,35(10):65-68.

[18] FETZER F,SOMMER M,WEBER R,et al.Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi[J].Optics and Lasers in Engineering,2018,108:68-77.

[19] JIAO J K,ZOU Q,YE Y Y,et al.Carbon fiber reinforced thermoplastic composites and TC4 alloy laser assisted joining with the metal surface laser plastic-covered method[J].Composites Part B:Engineering,2021,213:108738.

[20] WANG H P,YAN P,GUAN Y C.Robust heterojunctions of metallic alloy and carbon fiber-reinforced composite induced by laser processing[J].Materials,2021,14(23):7469.

[21] BU H C,ZHAN X H,YANG H Y,et al.Numerical simulation of thermal distribution and residual stress characteristic for laser wobble joining of CFRTP and Ti-6Al-4V alloy[J].Journal of Manufacturing Processes,2022,79:562-575.

[22] LIU Z G,LI Y,LIU Z W,et al.Ultrasonic welding of metal to fiber-reinforced thermoplastic composites:a review[J].Journal of Manufacturing Processes,2023,85:702-712.

[23] LIESEGANG M,ARWEILER S,BECK T,et al.Orbital ultrasonic welding of Ti-fittings to CFRP-tubes[J].Journal of Manufacturing and Materials Processing,2021,5(2):30.

[24] LIESEGANG M,YU Y,BECK T,et al.Sonotrodes for ultrasonic welding of titanium/CFRP-joints:materials selection and design[J].Journal of Manufacturing and Materials Processing,2021,5(2):61.

[25] TAMURA R,YASUDA K.Ultrasonic joining of carbon fiber reinforced thermoplastic and Ti alloy[C]//2018 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ).Kyoto.IEEE,2019:135-138.

[26] CHOI J W,MORISADA Y,LIU H H,et al.Dissimilar friction stir welding of pure Ti and carbon fibre reinforced plastic[J].Science and Technology of Welding and Joining,2020,25(7):600-608.

[27] 赵衍华,张粟泓,王非凡,等.搅拌摩擦焊接与加工技术进展[J].航天制造技术,2025(1):1-25.
ZHAO Y H,ZHANG S H,WANG F F,et al.The development of friction stir welding and processing technologies[J].Aerospace Manufacturing Technology,2025(1):1-25.

[28] 张智峰,刘正涛,谢细明,等.钛合金搅拌摩擦焊研究现状[J].精密成形工程,2021,13(3):179-187.
ZHANG Z F,LIU Z T,XIE X M,et al.Research status of friction stir welding of titanium alloy[J].Journal of Netshape Forming Engineering,2021,13(3):179-187.

[29] 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.

[30] 袁丁,矫志辉,李勇.热压工艺参数对TA2/CF/PEEK层板弯曲性能的影响[J].塑性工程学报,2024,31(7):63-70.
YUAN D,JIAO Z H,LI Y.Influence of hot pressing process parameters on bending properties of TA2/CF/PEEK laminates[J].Journal of Plasticity Engineering,2024,31(7):63-70.

[31] 徐飞.优化Ti/PEEK粘结性能的钛板表面处理工艺研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
XU F.Study on surface treatment technology of titanium plate to optimize adhesion of Ti/PEEK[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2014.

[32] 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.

[33] JIAO J K,XU J H,JING C H,et al.Influence of interfacial microtextures on CFRTP-TC4 hybrid joint formation with laser assistant joining technique[J].International Journal of Adhesion and Adhesives,2024,132:103719.

[34] WANG H P,YAN P,DING X L,et al.Enhanced laser direct joining of continuous carbon fiber reinforced polyetheretherketone and titanium alloy with controllable mechanical interlocks[J].Journal of Manufacturing Processes,2023,86:56-65.

[35] WANG H P,REN Z J,GUAN Y C.Laser joining of continuous carbon fiber-reinforced PEEK and titanium alloy with high

strength[J].Polymers,2022,14(21):4676.

[36] 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.

[37] 井成虎,徐纪豪,孙圣元,等.碳纤维复合材料/钛合金激光连接界面微织构调控工艺研究[J].电焊机,2023,53(5):38-42.
JING C H,XU J H,SUN S Y,et al.Study on interface control technology of carbon fiber composite titanium alloy laser welding[J].Electric Welding Machine,2023,53(5):38-42.

[38] 刘一凡,周宝升,张涛,等.基于表面微织构的钛合金与CFRP激光连接研究[J].中国激光,2022,49(18):1803001.
LIU Y F,ZHOU B S,ZHANG T,et al.Laser joining of carbon fiber reinforced plastics to titanium alloy *via* laser texturing[J].Chinese Journal of Lasers,2022,49(18):1803001.

[39] BI X Y,LIU H,LI Y,et al.Biomimetic papilla texture by femtosecond laser for high-strength CFRTP/A6061-T6 FSSW hybrid structures[J].Composites Part B:Engineering,2024,281:111500.

[40] WANG S Y,XU Y X,WANG W Q,et al.Evolution of macro/mesoscopic thermal-mechanical fields in friction lap joining of surface-textured Al alloy to CFRTP[J].Journal of Manufacturing Processes,2025,136:356-369.

[41] 龙祥.CF/PEEK与微织构化镁合金激光焊接[D].贵阳:贵州大学,2023.
LONG X.Laser welding of CF/PEEK and micro-textured magnesium alloy[D].Guiyang:Guizhou University,2023.

[42] LIU Y F,SU J H,MA G L,et al.Effect of the laser texturing width on hot-pressing joining of AZ31B and CFRTP[J].Optics & Laser Technology,2021,143:107350.

[43] ZHANG Z Q,ZHAO H Y,ZHAO Y X,et al.Effect of surface texture spacing on interface heat transfer and tensile property of laser-welded steel/CFRTP joint[J].Polymer Composites,2024,45(2):1551-1567.

[44] 朱嘉鑫.激光焊接碳纤维复合材料与不锈钢的工艺和理论研究[D].镇江:江苏大学,2023.
ZHU J X.Process and theoretical study of laser welding carbon fiber composite and stainless steel[D].Zhenjiang:Jiangsu University,2023.

[45] CHEN J Y,BAI J Y,YIN Q A,et al.Achieving excellent interfacial bonding of QP980 steel to CFRTP by laser joining *via* carbon fiber reinforced mechanical anchorage[J].Optics & Laser Technology,2023,161:109149.

[46] 崔振铎,朱家民,姜辉,等.Ti及钛合金表面改性在生物医用领域的研究进展[J].金属学报,2022,58(7):837-856.
CUI Z D,ZHU J M,JIANG H,et al.Research progress of the surface modification of titanium and titanium alloys for biomedical application[J].Acta Metallurgica Sinica,2022,58(7):837-856.

[47] 陈德生.TC4钛合金胶接前表面制备工艺研究[J].航空工艺技术,1991(4):27-29.
CHEN D S.Study on surface preparation process of TC4 titanium alloy before bonding[J].Aeronautical Manufacturing Technology,1991(4):27-29.

[48] LI X,ZHANG X,ZHANG H,et al.Mechanical behaviors of Ti/CFRP/Ti laminates with different surface treatments of titanium sheets[J].Composite Structures,2017,163:21-31.

[49] 徐飞,潘蕾,白云瑞,等.钛表面阳极氧化处理对TA2/聚醚醚酮(PEEK)粘结性能的影响[J].航空学报,2014,35(6):1724-1732.
XU F,PAN L,BAI Y R,et al.Effects of titanium surface anodization on adhesive bonding properties of TA2/polyetheretherketone (PEEK)[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2014,35(6):1724-1732.

[50] 段理想.钛板表面处理工艺对Ti/PEEK界面湿热耐久性能的研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
DUAN L X.Study on the hydrothermal durability of Ti/PEEK interface by surface treatment process of titanium plate[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2016.

[51] 张宇.钛和铝阳极氧化过程及阳极氧化膜的介电性能研究[D].南京:南京理工大学,2024.
ZHANG Y.Study on anodic oxidation process of titanium and aluminum and dielectric properties of anodic oxide film[D].Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2024.

[52] XIA H B,YANG B Y,SU J H,et al.Improvement of laser welded TC4/CFRTP joint strength by combination of surface modification of MAO and laser texturing[J].Thin-Walled Structures,2024,196:111409.

[53] 吴春杨.钛合金表面微纳结构构建及润湿性研究[D].西安:西安理工大学,2023.
WU C Y.Research on the construction of surface micro-nanostructures and wettability properties of titanium alloy[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2023.

[54] 葛振东.钛及镍钛合金表面微弧氧化生物涂层的研究[D].大连:大连理工大学,2009.
GE Z D.Study of bioactive coatings on the surface of titanium and nitinol by micro-arc oxidation[D].Dalian:Dalian University of Technology,2009.

[55] XIONG J Y,WANG X J,LI Y C,et al.Interfacial chemistry and adhesion between titanium dioxide nanotube layers and titanium substrates[J].The Journal of Physical Chemistry C,2011,115(11):4768-4772.

[56] ARKLES B.Tailoring surfaces with silanes[J].Chemtech,1977,7:766-778.

[57] 周书威,吴琼,傅红,等.硅烷偶联剂对磁性纳米材料的表面改性:作用机制、影响因素及吸附应用[J].复合材料学报,2026,43(2):655-667.
ZHOU S W,WU Q,FU H,et al.Surface modification of magnetic nanomaterials via silane coupling agents:mechanisms,key factors,and adsorption applications[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2026,43(2):655-667.

[58] 古丽巴努·依马木,徐国强,迪丽努尔·阿吉,等.硅烷偶联剂对纯钛表面改性及细胞相容性的影响[J].中国组织工程研究,2014,18(12):1864-1869.
GULIBANU Y,XU G Q,DILINUER A,et al.Silane coupler effects on titanium surface modification and biocompatibility[J].

Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2014, 18(12): 1864-1869.

[59] SU J H, TAN C W, WANG X B, et al. Enhanced the bonding reliability of titanium alloy and CFRTP *via* interfacial multiple modification: synergy of physical interlocking and chemical interaction [J]. Composite Structures, 2023, 310: 116778.

[60] PAN L, HU J L, LV Y F, et al. Modification of Ti-6Al-4V plates with Schiff base complex and adhesive performance of Ti-6Al-4V/PEEK[J]. Materials & Design, 2018, 144: 271-280.

[61] SU J H, WANG X B, TAN C W, et al. Directionally induced high-density secondary interaction for enhancing the bonding reliability of titanium alloy and CFRTP *via* functional Schiff base-contained polymer [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275: 111316.

[62] 崔学团. 电阻点焊接头力学的尺寸效应研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
CUI X T. Size effect on mechanical properties of resistance spot welded joints[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

基金项目: 国家自然科学基金(52075375)

收稿日期: 2025-07-09; **录用日期**: 2025-10-23

通讯作者: 李洋(1986—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为热塑性复合材料焊接, 联系地址: 天津市津南区雅观路 135 号天津大学北洋园校区 31-291(300354), E-mail: liyang86@tju.edu.cn

(本文责编: 解　宏)