引用格式：曲芳葶，季春明，王兵．金属-纤维增强树脂基复合材料的界面改性技术与增强机制研究进展[J]．材料工程，2026，54(8)：234-250.
QU Fangting，JI Chunming，WANG Bing.Research progress on interface modification techniques and reinforcement mechanisms for metal-fiber reinforced resin matrix composites[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：234-250.

金属-纤维增强树脂基复合材料的界面改性技术与增强机制研究进展

曲芳葶[1]，季春明[1,2*]，王　兵[1]
（1 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所，哈尔滨 150001；
2 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘要：由金属与纤维增强聚合物（fiber reinforced polymer，FRP）复合形成的金属-纤维增强树脂基复合材料，作为新一代轻量化多功能材料，在航空航天、新能源汽车及高端装备制造等领域展现出重大应用潜力。该复合材料的界面结合状态是决定其优异力学性能的核心要素，然而金属与树脂基体间存在的润湿性不足、化学键合作用弱、热膨胀系数差异导致的热残余应力高以及热-力耦合载荷下的界面脱粘失效等问题，严重制约了跨尺度异质材料间的应力传递效率与结构长期服役的可靠性。通过金属表面处理和功能层引入等界面改性技术，可显著提高金属与FRP复合材料的界面结合强度、应力传递效率和耐久性，进而优化复合结构的整体性能。本文系统综述了金属-FRP界面改性的关键技术与研究进展，并展望了未来发展趋势。

关键词：金属-FRP结构；异种材料连接；粘接强度；界面改性；表面粗糙度
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000562　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000562
中图分类号：TB333　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0234-17

Research progress on interface modification techniques and reinforcement mechanisms for metal-fiber reinforced resin matrix composites

QU Fangting[1]，JI Chunming[1,2*]，WANG Bing[1]
（1 Center for Composite Materials and Structure，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China；
2 School of Materials Science and Engineering，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China）

Abstract：Metal-fiber reinforced resin matrix composites formed by combining metals with fiber reinforced polymers (FRP) represent a new generation of lightweight, multifunctional materials demonstrating significant application potential in aerospace, new energy vehicles, and high-end equipment manufacturing. The interfacial bonding state of this composite is the core factor determining its superior mechanical properties. However, issues such as insufficient wettability between metal and resin matrix, weak chemical bonding interactions, high thermal residual stresses due to differing thermal expansion coefficients, and interfacial debonding failure under thermo-mechanical coupled loads severely limit stress transfer efficiency between cross-scale heterogeneous materials and compromise long-term structural reliability. Interface modification techniques, such as metal surface treatment and functional layer introduction, can significantly enhance the interface bonding strength, stress transfer efficiency, and durability between metals and FRP composites, thereby optimizing the overall performance of composite structures. This paper systematically reviews key technologies and research progress in metal-FRP interface modification and outlines future development trends.

Key words：metal-FRP structure；dissimilar material bonding；bond strength；interface modification；surface roughness

近年来，航空航天、新能源汽车及高端装备制造等领域飞速发展，推动着复合材料向着轻质化、高比强度、高比刚度、出色的抗冲击和疲劳方向迈进[1]。以金属和FRP材料协同构成的多相复合结构应运而生，其形式既包括典型的金属-纤维增强层状叠层结构，也涵盖蜂窝夹层、复合立管[2-3]等多种设计方案，被用作飞机蒙皮、机翼和机尾等关键部位，为航空航天技术的突破提供了关键材料支撑[4]。该结构结合了金属和FRP的优点，具有高比强度和比刚度，优异的疲劳性能以及较高的损伤容限[5-7]。较金属材料可实现显著的减重效果，弥补传统金属材料疲劳性能差的同时，改善了FRP断裂韧性低、抗冲击性能差和剩余强度低等缺点。在实际工程中，这类异质材料的高效、可靠连接是确保整体结构性能的关键环节。然而，由于金属与FRP在力学性能、热膨胀系数、化学性质等方面存在显著差异，如何实现高强度、耐久、可控的界面连接，成为制约其进一步应用的技术瓶颈。

为满足不同应用场景和性能需求，金属-FRP结构衍生出多种连接技术，主要可分为传统分步式连接和一体化成型连接。分步式连接包括机械连接、胶接、机械-胶接混合连接和热熔连接等。其中，机械连接是将金属和FRP通过物理紧固件实现固定的传统连接方式。常见的机械连接手段包括螺栓连接[8]、铆接[9]等，其主要优势在于连接结构的可拆卸性、便于检测和维修，在厚度较大和高载荷条件下仍能保持良好的连接强度，且工艺成熟、适用性强。然而，机械连接通常引入几何破坏和应力集中问题，导致复合材料出现损伤，使连接强度降低。胶接是利用胶黏剂在界面上形成物理吸附或化学键合作用，从而将金属与FRP结合的方法[10]。胶接可以实现较均匀的载荷传递，避免了机械紧固件引入的应力集中和材料破坏，同时具有良好的密封性和减振能力[11-12]，尤其适用于大面积、复杂曲面的连接，但胶接的性能高度依赖于胶黏剂本身性能和界面结合状态。热熔连接仅适用于热塑性树脂材料，通过外部热源（激光、摩擦热、传导热）使得树脂熔融流动，在压力作用下与金属表面紧密接触，冷却后形成机械锚固的混合连接[13]。总体而言，分步式连接工艺成熟、可拆卸性好，被广泛应用于大尺寸构件的后期装配或需要维修、更换的结构部位，如航空机身拼接、维修节点及汽车车身框架连接等。

相较于分步式连接，一体化成型连接技术将部件制造过程与界面结合过程同步化，即在复合材料成型或固化的同时实现与金属基材的结合，该方法能够减少工序、提高生产效率，提升界面连续性与可靠性，并避免因二次加工引入的缺陷或损伤。常见的工艺包括注塑包裹成型、纳米成型技术、金属-预浸料一体化成型等。其中，注塑包裹成型是将熔融热塑性树脂注入模腔直接包覆金属嵌件，界面结合依赖于熔体对金属表面的润湿与冷却收缩产生的机械啮合[14]。纳米成型技术是基于注塑包裹成型衍生的新型技术，先对金属进行酸洗、阳极氧化等预处理形成纳米多孔阵列，注塑时树脂渗入孔隙并冷却固化，产生机械互锁效应[15]。金属-预浸料一体化成型技术是将金属片与纤维增强预浸料叠层并施加温度和压强，使部件成型与界面结合同步进行[16]。一体化成型连接不仅有助于提高界面结合强度和耐久性，还能实现更优的力学性能和结构完整性。因此，一体化成型技术更适合应用于结构复杂、轻量化要求高且需保证界面完整性的部件，如复合材料蒙皮-加强筋整体结构、承载舱段及电子封装件。尽管各类连接技术各有优势，但也存在不可忽视的局限性。例如，机械连接容易引入应力集中和损伤；胶接和热熔连接对界面状态敏感，受界面润湿性、化学反应性和表面洁净度等因素影响显著；而一体化成型虽可提升整体性能，但界面结合依然受到金属与树脂之间本征不相容性的制约。这些问题本质上源于金属与聚合物在物理化学特性上的差异，如润湿性不足、界面化学键合弱、热膨胀不匹配引发的残余应力高等，导致界面区域成为结构的薄弱环节[17]。因此，仅依靠连接形式本身难以从根本上解决界面失效的问题。为了充分发挥金属-FRP复合结构的潜力，提升界面结合强度、应力传递效率及耐久性，迫切需要通过界面改性技术，从表面处理和功能层引入等层面对界面进行优化。

本文重点总结了通过金属表面处理技术、功能层引入等方式增强界面性能的研究进展，并基于界面结合的机理，深入阐述了不同界面改性技术的作用原理，揭示了物理、化学和机械作用等在界面强度提升中的协同机制以及影响金属与FRP界面连接强度的因素。最后，对当前研究中存在的挑战和未来发展方向进行了展望。

1　金属-FRP结构的界面失效机制

在外载荷与服役环境的共同作用下，金属-FRP结构易出现多种失效模式，如图1所示，主要包括界面分层破坏、金属或基体断裂、纤维脱粘及断裂等[18-19]。然而，纤维作为增强相其本身具有较高的强度和模量，且通常以特定方向铺设以承受主载荷方向的应力，避免了直接承受复杂载荷作用，通常不会发生断裂或脱粘；同时，材料本体通常具有较高的强度和韧

性，实际服役过程中很少发生基体或金属本体的断裂。因此，最关键、最常见的失效模式表现为金属与树脂基体之间的界面脱粘[20]，这主要源于金属与FRP在热膨胀系数、表面能、化学活性等方面存在显著差异，引发界面不相容、应力集中、化学键合不足等问题。因此，界面区域是金属与复合材料层应力传递的薄弱环节，对结构整体性能起决定性作用[21]。金属-FRP界面失效受多种因素协同作用影响，首先，金属与FRP之间存在热膨胀系数不匹配，在热循环过程中易引发界面残余应力积聚，进而诱导界面开裂；其次，熔融态树脂对金属表面的润湿性较差，在金属表面难以铺展并形成结构完整、连续均匀的界面层；此外，金属表面的天然氧化膜通常呈惰性，难以与聚合物分子发生有效化学键合，导致界面结合力薄弱；最后，当金属表面粗糙度不足或结构设计不合理时，界面缺乏足够的机械嵌合与锁固效应。这些因素共同决定了界面粘接质量及其在外部载荷作用下的稳定性。

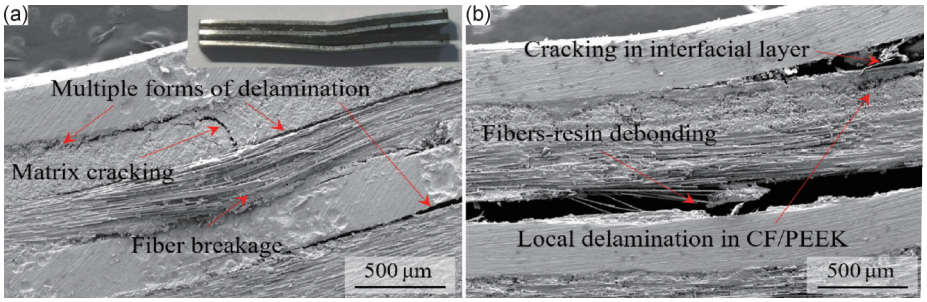


图1 金属-FRP结构的失效形貌[19]

(a)基体断裂和纤维断裂；(b)界面分层和纤维脱粘

Fig.1 Failure mechanisms of metal-FRP structures[19]

(a) matrix fracture and fiber breakage; (b) interface delamination and fiber debonding

可见，界面性能的提升不仅需要克服材料本身在物理性质和化学活性方面的差异，还需综合考虑多种界面作用机制之间的协同关系。界面结合力是机械、物理、化学等共同作用的结果。因此，深入剖析不同作用机制及其在界面结合中的耦合效应，对于科学指导界面改性策略、提升界面结合强度具有重要意义。

2 界面结合机理

金属-FRP结构的界面结合机理复杂且多元化，主要可归结为物理作用、化学作用、机械作用及多种机制协同作用。不同的结合机制在实际界面中往往不是孤立存在的，而是相互叠加、共同作用，决定了界面的强度、耐久性及服役稳定性，如图2所示。理解这些作用机制对于合理选择和设计界面改性工艺至关重要。

2.1 机械互锁理论

机械互锁理论是粘接机理中最早提出的一种观点，起源于20世纪20年代。McBain和Hopkins[22]认为界面结合强度主要源于胶黏剂填充被粘物表面的孔隙、凹槽等不规则结构后，在固化过程中所形成的啮合与栓锁作用，即机械互锁。被粘物表面的高低起伏、裂纹、孔隙、凹穴、槽沟、倒锥形孔等微观结构，有助于液态胶黏剂在润湿、渗透、挤压和固化过程中深入其中，形成类似“锁扣”或“倒钩”的嵌合结构，表现出较高的机械结合强度。该理论简单直观地揭示了粗糙度、孔隙率、润湿性等因素对界面粘接性能的影响，尤其适用于多孔性或表面粗糙材料的粘接场景，如木材、纸张、泡沫等。机械互锁理论很好地解释了经过表面粗化或多孔化处理的界面通常能获得优于光滑表面的粘接性能。但由于无法解释光滑或致密表面上的高粘接强度现象，该理论通常被视为界面结合机理的一部分，而非完整机制。

2.2 润湿-吸附理论

表面润湿与吸附理论是目前粘接研究中应用最广泛的热力学理论之一，由Sharpe和Schonhorn[23]提出。该理论强调，胶黏剂在基体表面的润湿效果是界面结合的前提，也是决定界面作用力大小的重要因素。润湿效果由接触角、表面张力和表面能等热力学参数决定，润湿充分时，胶黏剂能够与基体表面充分接触并填充微观不平整，提高界面接触面积和结合力。在润湿的基础上，胶黏剂分子通过布朗运动扩散至基体表面，并进一步靠近基体分子，在分子间作用力的作用下发生吸附，形成稳定的界面结合。分子间的范德华力、氢键等弱相互作用力是吸附的主要来源，其强度同样与界面自由能密切相关。因此，该理

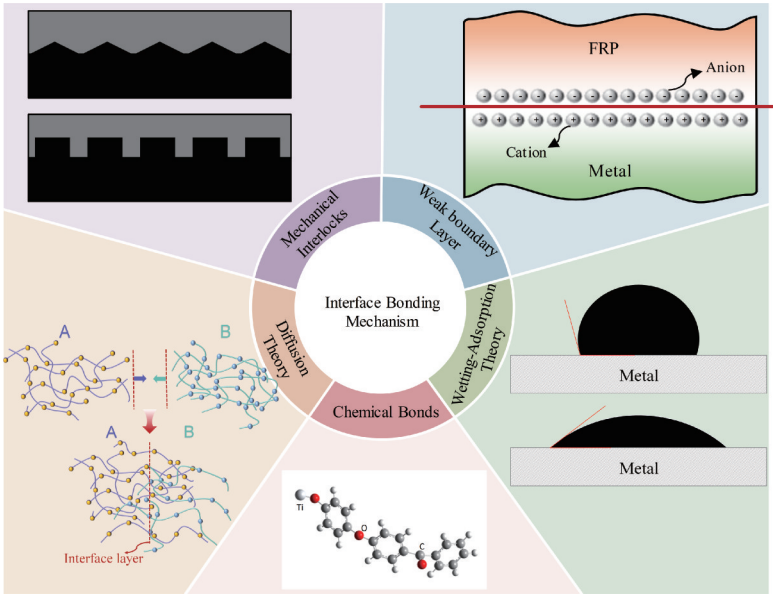


图 2　界面结合机制

Fig.2　Interface bonding mechanism

论指出，良好的润湿性和强烈的分子间相互作用共同决定了界面的结合强度[24]。然而，润湿-吸附理论仍存在一定局限性，其将粘接作用全部归因于界面分子间的相互作用力，无法解释在某些情况下粘接强度超过胶黏剂本身强度的现象。此外，该理论认为克服分子作用力所需的功应与分离速度无关，但实验结果显示粘接强度明显受剥离速度影响，这也超出了该理论的解释范围。

2.3　化学键合理论

化学键合理论认为胶黏剂与基体表面通过化学作用，形成共价键、离子键等高强度化学键[25]，从而提高两种材料之间的粘接力。化学键的形成与胶黏剂和基体的化学反应活性密切相关。反应活性越高，界面上生成的活性官能团越多，化学键形成的数目就越多，从而显著提升粘接性能和耐介质性能。化学键合作用力比范德华力高出 1～2 个数量级，但化学键合需要界面有紧密接触，而界面上可能存在的缺陷、裂纹和气泡等问题均会严重降低界面结合强度。

2.4　其他理论

静电吸附理论由 Derjaguin 等[26]提出，该理论将粘接界面视为双电层电容结构，两种材料因对电子的亲和力存在差异，会引起电荷发生转移，使得界面的两侧分别带有正、负电荷，进而产生静电吸引力。这种静电引力有助于增强胶黏剂与被粘物之间的界面结合强度，且界面强度取决于界面上形成的电荷密度。然而在实际应用中，基材表面的电荷密度通常较低，因此静电作用对整体粘接强度的影响较小，通常与其他粘接理论所描述的机制共同发挥作用。

扩散理论由 Voyutskiĭ[27]提出，用以解释两种高分子材料之间的粘接机理。其核心观点是：在界面处，高分子链发生分子运动并相互扩散，形成互相穿插的过渡层，从而增强结合强度。该机制的实现依赖于胶黏剂和被粘物具有一定的相容性和流动性，因此主要适用于解释高分子链聚合物之间的粘接现象，同时，调整胶黏剂的浓度可以增强分子运动和界面扩散速率，从而提高粘接接头的力学性能。但该理论无法完全解释胶黏剂与金属或陶瓷等无机材料的粘接。但研究表明特殊情况下金属可以扩散至聚合物内部[28]。

Bikerman 等[29]于 1961 年完善了弱界面层理论，该理论与其他粘接机理紧密相关，它从失效的角度指出了实现强力粘接的先决条件。该理论认为，粘接失效往往不发生在理想的胶黏剂-基材界面，而是由被粘物表面存在的弱边界层引发。在被粘物污染和环境吸湿氧化等因素共同作用下，被粘物表面由于低分子物质析出、吸附并聚集形成了低分子富集区，削弱了界面应力传递能力，导致胶黏剂在界面处的粘接效果较差。针对这一问题，各类表面预处理技术通过去除或破坏弱边界层，暴露出新鲜、洁净的基材表面。而处理后的表面物理结构与化学活性，是机械互锁、润湿-吸附与化学键合等机制得以有效发挥的重要前提。因此，弱边界层理论不仅揭示了界面失效的根源，也为其他粘接理论提供了必要支撑。

可见，现有的界面理论从机械、物理、化学等不同层面对界面粘接机制进行了阐释，各有侧重且互为补充，如表 1[22-23,25-27,29]所示。但由于材料多样、界面复杂且研究尺度不同，这些理论难以单独完整地解释复杂

的界面行为，迄今尚未形成统一的理论框架全面解释所有粘接现象[30]。在实际工程应用中，界面状态常常受多种因素耦合作用影响，导致界面结合强度和耐久性难以满足要求。因此，在深入理解界面粘接机理的基础上，采取有效的界面改性技术，主动调控并优化界面结构与性能，最终提升粘接质量和服役可靠性。

表 1 常见的界面结合理论

Table 1 Common interface bonding theories

Interface bonding theory	Proposer/Year	Applicable scope	Limitations
Mechanical interlocking theory	McBain & Hopkins/20th century[22]	Interfaces with significant surface roughness, grooves, or porous structures.	Difficult to account for strong adhesion on smooth interfaces; chemical and physical interactions are neglected
Wetting-adsorption theory	Sharpe & Schonhorn/1965[23]	Heterogeneous interfaces such as polymer-metal and polymer-ceramic interfaces	Unable to explain cases where the interfacial strength exceeds that of the adhesive bulk; rate-dependent effects are not considered
Chemical bonding theory	Lewis/1916[25]	Interfaces containing functional groups capable of chemical reactions with active groups on the substrate surface, such as hydroxyl, carboxyl, and amino groups	Chemical bonding requires intimate interfacial contact, which is not always achievable
Electrostatic adsorption theory	Derjaguin/1967[26]	Metal/non-metal interfaces with significant differences in electron affinity	Actual surface charge densities are generally low; electrostatic interactions contribute only marginally to the overall adhesion strength
Diffusion theory	Voyutskii/1963[27]	Polymer/polymer interfaces require a certain degree of molecular compatibility and chain mobility	Not applicable to metal or ceramic interfaces; diffusion rates are strongly limited by temperature and viscosity
Weak boundary layer theory	Bikerman/1961[29]	Interfaces affected by contamination, oxide layers, or moisture-induced degradation	Emphasizes interfacial failure mechanisms rather than adhesion formation; cannot independently explain the development of strong interfacial bonding

3 界面改性技术

基于对界面粘接机理的认识，针对金属与 FRP 之间界面结合强度不足、易发生剥离脱粘、耐久性差等问题，研究者们发展了多种界面改性技术以优化界面性能，提升服役可靠性[31]，如图 3 所示。主要可分为两类：一是通过对金属进行表面处理（如机械、物理、化学、电化学方法等）改善界面形貌、化学活性和润湿性[32]；二是通过界面功能层引入（如涂覆偶联剂、纳米结构层、配位键桥接等），提升界面化学键合力、机械互锁作用和分子链缠结效应。

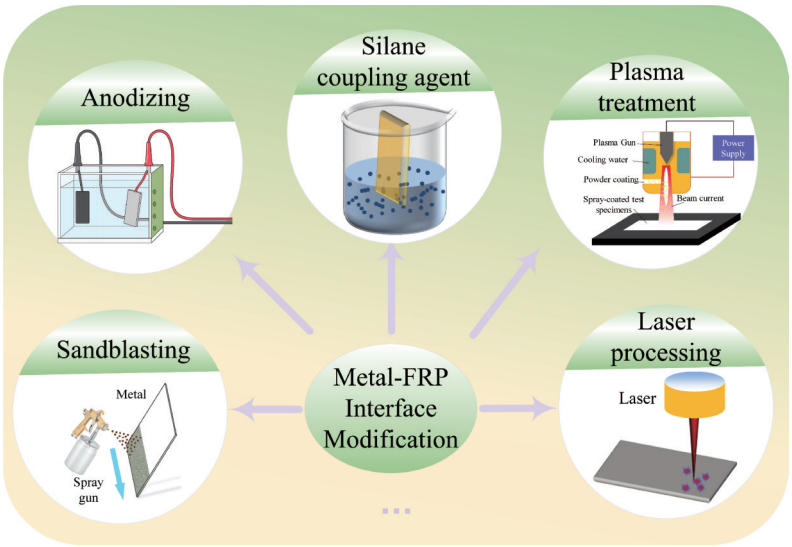


图 3 金属-FRP 界面改性技术

Fig.3 Metal-FRP interface modification technology

3.1　金属表面处理

金属表面处理作为界面改性技术中的基础手段，主要通过改变金属表面的物理形貌和化学性质来改善其与FRP之间的润湿性和粘接性能。金属表面的粗糙度、活性官能团等对界面结合强度有显著影响。常见的金属表面处理方法包括机械处理、物理处理、化学处理及电化学处理等，这些方法通过增大有效接触面积、去除表面氧化层、引入活性官能团等途径，提高界面粘接性能。

3.1.1　机械处理

机械处理是一种简便高效的金属表面改性方法，通过改变金属的表面粗糙度与纹理、去除松散氧化层，改善金属与FRP之间的润湿性和机械互锁效果，从而增强界面结合强度。常用方法包括砂纸打磨、喷砂等。在对金属进行表面处理之前，常需要对金属表面脱脂清洁，以去除油污和污染物[33-34]。

金属及其合金表面在空气中迅速形成了致密的氧化膜，该膜作为弱边界层会降低界面的结合能力。机械处理不仅能够去除松散的表面氧化物，还可以在表面形成具有“峰谷”结构的粗糙形貌，增加两种材料的实际接触面积和表面自由能，从而提高树脂对金属的润湿和吸附能力[35-36]。砂纸打磨是最基础的一种机械处理方法，可通过不同目数的砂纸调控表面粗糙度和表面能。Zhang等[37]分别采用120目和3000目的碳化硅砂纸打磨镁合金板，形成了明显的粗糙表面，显著增加了实际接触面积和对液体的吸附能力，并提高了表面能。随着砂纸目数的增大，表面粗糙度和表面能进一步提升。为了提高表面处理效率，并适应复杂几何形状或大面积工件，喷砂处理成为更优选择[38]，其原理是通过高速气流中携带的细磨料颗粒冲击金属表面去除污染物、形成不规则的微米级凹坑和各向异性的表面纹理，从而显著提高界面结合强度[36]。通常需要考虑多个加工参数，包括喷砂处理的覆盖率、喷砂强度和喷砂介质类型等[39-41]。Harris等[42]探究了不同类型和粒度的氧化铝磨料喷砂处理对低碳钢和铝合金基材表面特性及粘接性能的影响，并深入讨论了喷砂过程中表面纹理、表面能、化学性质等变化与粘接性能的关联。Ho等[43]采用相同直径的硅涂层氧化铝喷料，研究了不同喷砂距离和角度对钛表面粗糙度的影响，确定了实现钛与树脂最佳界面结合效果的喷砂参数。其中，喷砂角度是影响界面结合强度的关键因素，而喷砂距离对强度无显著影响。除传统工艺外，通过机械加工构造规则表面结构也是提升界面性能的重要途径，Guo等[44]采用线切割对钢板切出深度0.4 mm，斜角45°的凹槽结构，用于增强金属与CFRP之间的机械互锁。类似地，吕莹莹等[45]采用铣床在钢板表面铣出平行槽痕，得到平行等深度的均匀粗糙表面，并与砂纸打磨的钢板进行比较，结果表明过深的沟槽不易被胶黏剂填满，反而降低界面结合强度。

从失效模式转变可以看出，机械处理对金属-FRP界面的失效路径具有显著影响。未经处理时，金属表面光滑且存在氧化膜，界面结合力主要依赖于微弱的分子间作用力，失效模式多表现为界面脱粘或剥离。经机械处理后，界面强度显著提升，失效模式由界面脱粘转变为树脂基体内聚失效甚至纤维断裂，这表明界面结合强度已超过树脂本体强度，是机械改性有效性的直接体现。

总体来看，机械处理通过粗糙化显著改善润湿性和机械互锁效应，可有效抑制因润湿不足或应力集中引起的剥离与层间开裂失效。但处理的效果受工艺参数影响较大，喷砂不足会导致表面粗糙度不够、活性表面形成不充分，无法显著提高界面结合性能，进而引起界面失效；而过度喷砂可能引起金属表面损伤或形成无法填充的孔洞，导致界面产生气泡和缺陷，影响界面耐久性[46]。为了克服机械处理后表面形貌不可预测、处理不均匀、难以精确控制等不足，研究者们提出了物理处理方法，如激光烧蚀、等离子体喷涂等，更加精准地调控金属表面形貌和化学状态来改善界面性能。

3.1.2　物理处理

物理处理方法因其过程清洁、操作简便和对基体无明显损伤等优点，已成为一种常用且高效的表面改性手段。其中，激光烧蚀和等离子体处理被广泛应用于金属-FRP界面增强领域。

激光烧蚀是一种利用激光能量调控材料表面性能的物理表面处理方法，因其高效性和可控性，近年来被广泛应用于金属-FRP界面改性中。激光改性通过金属表面对激光能量的吸收、快速加热、短时间熔化，随后快速冷却凝固等过程，在表面形成特定的粗糙结构、重组的微观组织和化学活性层[47-49]，从而提高机械互锁和界面润湿性，改善界面结合性能。大量研究表明，激光烧蚀的工艺参数、形成的表面图案以及几何特征对界面性能均有重要影响。激光改善界面的机制主要体现在两个方面：一方面，激光作为热源使金属表面迅速升温并传递热量至界面处，使得树脂熔融后充分润湿金属并填充表面微孔，冷却后形成平整牢固的结合界面，这种机制类似于热焊接。激光的工艺参数如激光功率[50]、扫描速度[51-52]、离焦量[53-54]和能量密度[55]等对界面的热输入有较大影响，进而影响

金属与FRP的界面黏结性能[56]。因此合理选择和优化激光工艺参数，在保证金属表面充分润湿和机械互锁的同时，避免树脂的过度热损伤，是提升金属-FRP界面性能的关键[57-59]。另一方面，激光烧蚀在金属表面形成凹坑、沟槽或网格状等微结构（如图4[60-63]所示），显著提高比表面积和粗糙度，增强界面机械互锁作用和树脂渗透能力，从而进一步改善界面结合强度和耐久性[60,64-65]。

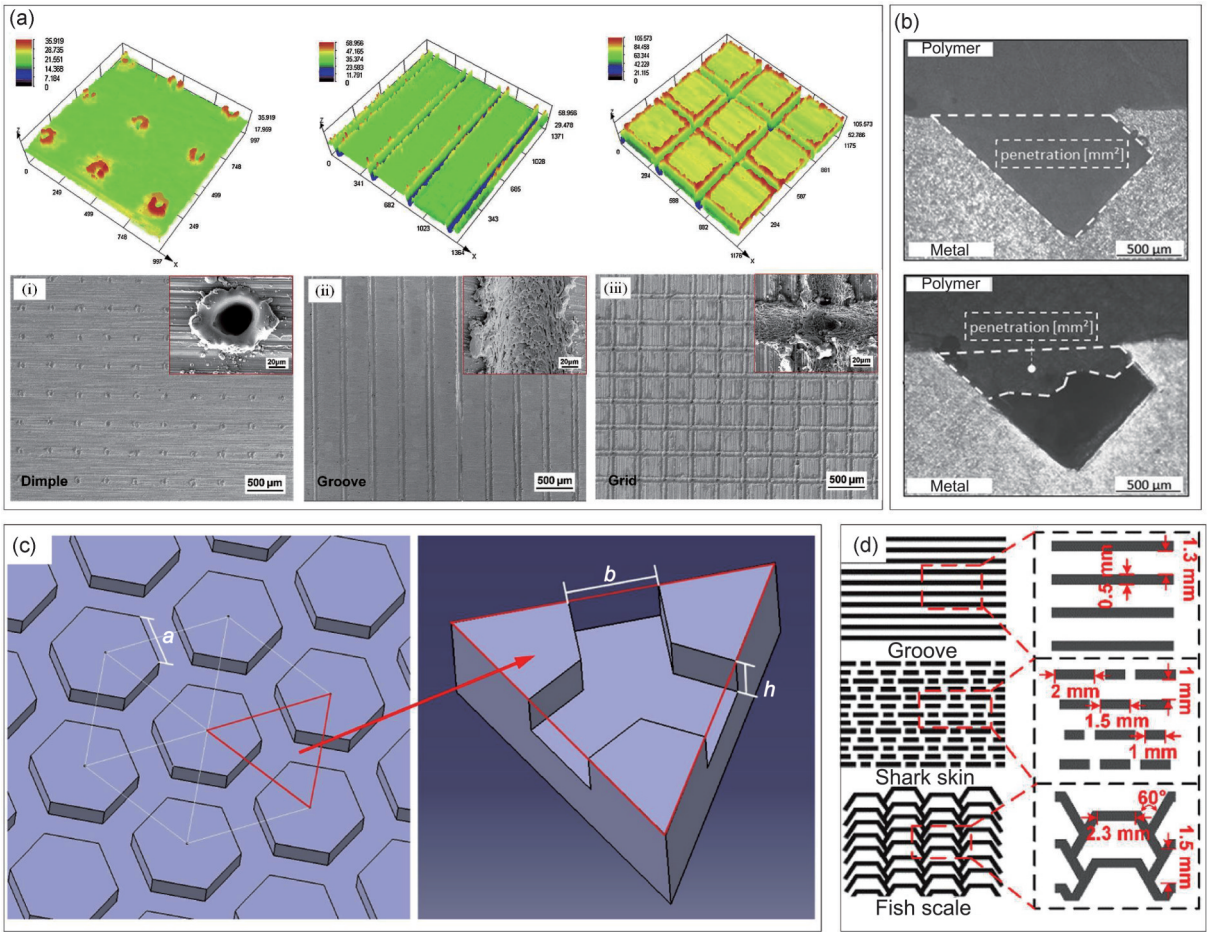


图4 激光烧蚀的表面微结构形貌

（a）点状、槽状和网格[60]；（b）−45°倾斜排列凹槽[61]；（c）六边形沟槽[62]；（d）鲨鱼皮和鱼鳞纹理[63]

Fig.4 Surface microstructure morphology of laser ablation

(a)dimple, groove, and grid patterns[60]; (b)−45° inclined groove arrangement[61]; (c)hexagonal grooves[62]; (d)shark skin and fish scale textures[63]

大量研究围绕表面微结构的形貌设计展开，结果表明表面微结构的形貌特征和排列方式对界面失效模式具有重要影响。Maressa等[64]采用激光在钛合金表面制备了凹陷、网格和无序的三种纹理，结果表明网格纹理的机械互锁效果最佳，界面破坏以胶黏剂内聚失效为主，凹陷纹理因孔洞填充不足存在部分界面失效，而无序纹理因界面生成脆性氧化物而导致基材表层撕裂，界面性能较差。类似地，Feng等[60]采用激光处理方法在30CrMnSiA高强钢表面上制备出不同微结构图案（点状、槽状、网格），研究发现网格图案显著提升了表面粗糙度与润湿性，增强了界面的机械互锁，使断裂模式由界面破坏转变为内聚破坏。并在高温高湿条件下，依然保持着较高的强度和韧性。此外，除了纹理的形貌特征外，激光烧蚀凹槽的几何尺寸（如深度、宽度、间距）也显著影响界面性能[65-66]。Schricker等[61]更进一步研究了凹槽的排列角度对界面性能的影响，结果表明，将凹槽以−45°角度倾斜排列能够显著提升界面的承载能力，相较于传统的平行或垂直排列方式，该结构在剪切载荷下形成更有利的应力分布与树脂渗透路径，有效增强了界面的机械互锁和整体稳定性。除简单的表面纹理，还有学者从生物仿生角度出发，设计了更复杂的微观结构，Wang等[62]受树蛙趾端形态启发，构建了六边形沟槽形态的表面纹理，增强了树脂在金属表面的润湿性和机械嵌合作用，使界面性能显著提升。Li等[63]构建鲨鱼皮和鱼鳞两种仿生纹理，增加表面粗糙度并改善了界面处

的机械互锁作用，同时仿生纹理阻碍裂纹萌生和扩展，从而提高了接头的粘接强度。然而，也有研究认为，激光蚀刻改善界面性能的机制中，化学性质的改变起到了更关键的作用，而不仅仅是机械互锁。Alfano 等[67]采用低功率光纤激光对铝合金和不锈钢进行表面烧蚀处理，结果显示当烧蚀功率高于阈值时，表面粗糙度显著增加并形成微图案，铝合金表面原始 Al_2O_3 层被 AlO 层替代，不锈钢表面生成 C—O 极性键，二者的化学特性均得到改善。经处理后，铝合金与不锈钢的剪切强度分别提高 100% 和 25%。其中，铝合金界面强度的提升主要归因于表面化学改性，而不锈钢的增强效果则主要源于机械互锁作用。

此外，等离子体喷涂也是一种有效的物理表面改性技术，具有环保无污染、成本低、高效、适应性强等优点，广泛应用于金属-树脂界面结合性能提升[68]。该方法通过电场激发气体分子产生富含离子、电子和自由基的等离子体，在压力作用下对材料表面进行轰击或引入官能团[69-70]，提高表面能和润湿性，从而使界面性能增强[71-72]。其显著优势在于操作温度低、过程可控且不会造成宏观热损伤，尤其适用于对温度敏感的树脂基复合材料。Pike 等[73]通过在铝合金表面喷涂氧化铝陶瓷层，形成具有 8%～10% 孔隙率的微观结构，从而增强胶黏剂的渗透性与机械互锁能力。增强了金属与环氧树脂之间的润湿性和机械互锁效果，剪切强度增强。等离子喷涂过程中的工艺参数[74]（如喷涂距离、喷涂时间等），也对涂层的致密度、粗糙度、孔隙率和残余应力分布有显著影响，进而决定等离子处理效果与界面结合性能。

物理处理通过协同调控金属表面的微观结构、化学状态和热应力分布，缓解了因热膨胀不匹配、润湿性不足导致的界面脱粘失效问题。其中，表面微结构与仿生纹理不仅可以增加机械互锁，还可以诱导裂纹偏转、促进能量耗散，防止裂纹沿界面扩展。另一方面，激光的快速加热和瞬间冷却过程可在金属层内产生应力场，有助于抵消热压成型过程中产生的热残余应力，从而降低界面开裂风险。此外，激光蚀刻和等离子喷涂可重构金属表面的化学状态与键合结构，使界面结合强度显著提升，失效模式由界面脱粘逐渐转变为树脂层断裂或纤维拔出。

3.1.3　化学处理

化学蚀刻是利用酸性或碱性化学试剂对金属表面进行处理，以去除污染物和氧化层，提升表面粗糙度和活化程度[75]，并在表面形成有利于粘接的结构[76]，从而增强界面结合强度。该方法适用于各种金属材料，尤其在处理大面积或几何复杂表面时，能够实现均匀的改性效果。常用化学蚀刻包括酸蚀刻、碱性过氧化物蚀刻和磷酸氟化物蚀刻等。其中，酸蚀刻方法通常使用铬-硫酸蚀刻[77-78]、硝酸-氢氟酸[79]、铬酸-重铬酸钠溶液等[80]对金属表面进行处理，能有效提高粗糙度和初始粘接强度。然而，含铬蚀刻液存在较大环境污染与健康风险，更符合环保要求的非铬酸性蚀刻剂被证明也可以提供良好的附着力[30,81]。尽管酸蚀刻能够提高剪切强度，但其耐久性表现较差，且存在氢脆问题[82]。该问题可以通过碱性处理进行改善[80,83]。He 等[3]将钛板置于 60 ℃的碱性过氧化物 NaOH-H_2O_2 溶液 24 h，形成了厚度约 2 μm 的稳定氧化层，并在高温高湿环境下仍保持良好胶接性能，但该方法反应速率慢、处理周期较长，限制了其在工程实践中的广泛应用。

磷酸氟化物蚀刻不仅能够改变金属表面形貌，还可以在界面上引入极性基团。许立宁等[84]采用含氟磷酸盐磷化处理金属表面，结果表明，经磷化处理的界面形成了粗糙结构与极性基团，显著提升了润湿性与界面化学键合能力，从而显著增强了界面的粘接强度与耐疲劳性能。Droździel 等[85]进一步比较了针对铝合金和钛合金的两种不同蚀刻工艺对界面性能的影响。结果表明，P2 蚀刻（浓硫酸-硫酸铁溶液）在 63～65 ℃下处理铝合金 11 min，可在其表面形成低粗糙度、均匀多孔的结构，有利于胶黏剂的渗透与机械互锁，提升界面结合强度。而对于钛合金，采用含磷酸钠和氟化钾的磷酸氟化物溶液在 24 ℃下处理 1.5～2.5 min，则得到了晶粒边界清晰、存在凹陷的表面，但仍需结合其他表面改性手段以进一步增强界面性能。

从界面失效机制来看，化学蚀刻通过去除惰性氧化层、引入极性官能团并重构表面粗糙度，可显著改善金属与树脂之间的润湿性与化学反应活性，抑制界面剥离和脱粘失效。经蚀刻处理后的金属表面更易与树脂形成稳定的化学键合与机械嵌合结构，使界面失效模式由脱粘转变为树脂内聚破坏，显著提高结构的载荷传递能力与耐久性。然而，在选择化学蚀刻方法时，需要综合考虑其环境影响、操作周期以及对金属材料性能的潜在影响等因素，以实现最佳的改性效果。

3.1.4　电化学处理

电化学处理是一种通过外加电场在金属表面生成功能性氧化膜的界面改性手段，主要包括阳极氧化和微弧氧化（micro-arc oxidation，MAO）两种方式，其表面形貌如图 5 所示。通过调控膜层结构和化学组成，可有效提高金属与树脂基体间的润湿性、机械互锁能力与化学反应活性，从而增强界面结合强度与耐

久性。

(1)阳极氧化处理

阳极氧化被广泛用于对金属的表面处理,其原理是在外加电场作用下通过电解反应在金属表面生成致密、多孔的氧化膜以增强界面结合力[86]。阳极氧化产生的氧化物表面主要取决于电解质、阳极氧化电压[87]、时间[88]和温度[89-91]。根据电解质的不同,常见体系包括酸性(如磷酸、硫酸)[92]、碱性(如NaOH)体系[3]以及氟化物体系[93]。其中,碱性体系电解质因其良好的环保性和较低的腐蚀性而广泛应用[84]。

对于铝合金而言,常见的阳极氧化方式包括铬酸阳极氧化(CAA)[94]、磷酸阳极氧化(PAA)和硫酸阳极氧化(SAA)[95],但由于含铬酸的电解液对环境有害,近年来逐渐被取代[76,96]。Critchlow 等[76]对标准硼硫酸阳极氧化(BSAA)工艺开展了系统优化研究,通过调整脱氧剂、阳极氧化参数及后处理工艺等,开发出高温硼硫酸阳极氧化(HTBSAA)的最佳处理方案,该方法处理后的铝合金表面形成了类似于CAA所产生的开放孔隙结构,初始剪切强度、湿热老化条件下的疲劳寿命以及耐腐蚀性能均与CAA的处理效果接近。成为CAA的理想环保替代方案。Zhang 等[97]探究一种新型的磷酸-硼酸-硫酸阳极氧化(P-B-SAA)工艺,该方法在铝合金表面形成厚度约为5 μm的氧化膜,孔隙率较高且分布均匀(图5(a))。表面结构有利于胶接界面的树脂渗透与机械互锁。剪切强度测试结果显示,经P-B-SAA处理的剪切强度达20 MPa,与传统CAA工艺(23 MPa)接近,显示出优异的界面结合性能。为实现更优异的界面结合性能,研究者开始探索其他电解液体系。Chen 等[98]对比了草酸体系与磷酸体系阳极化处理对铝合金与玻璃纤维增强聚丙烯复合材料搭接连接性能的影响。结果表明,磷酸阳极氧化可在铝合金表面生成更大的孔洞和更高的粗糙度,从而增强界面机械互锁作用,使得单搭接剪切强度提高约65.8%。此外,Fiore 等[99]采用酒石酸-硫酸复合体系对铝合金进行阳极氧化处理,研究发现铝合金与玄武岩FRP的接头剪切强度相比传统砂纸打磨处理提升50%~60%。再通过NaOH溶液对阳极氧化膜进行蚀刻处理,可显著放大表面孔隙结构与粗糙度,进一步提升界面结合能力,使剪切强度较原始状态提高约83%。与铝合金不同,钛及钛合金在不同类型的电解液中阳极氧化时可形成不同的表面结构。在酸性(铬酸、硫酸等)或碱性(NaOH等)的电解液体系中,其表面可形成氧化钛膜,而在特定含氟离子的电解液体系中,则会生成有序的TiO_2纳米管阵列结构。这些氧化结构不仅提高了钛表面的粗糙度和比表面积,还显著增强了润湿性和化学反应活性,从而有效提升界面结合强度。

为评估不同电解液对界面性能的影响,Schulze[100]等对比了在激光处理钛合金板的基础上分别在5 mol/L的NaOH溶液(15 V,10 min)、1 mol/L的H_2SO_4溶液(40 V,3 min)和1 mol/L的H_3PO_4(60 V,3 min)溶液进行阳极氧化后的表面形貌及其与聚醚醚酮(PEEK)树脂的粘接性能。结果显示,NaOH处理可形成高度结构化的氧化层,H_2SO_4处理次之,而H_3PO_4处理仅生成边缘轻微结构化氧化膜,表现出较差的界面增强效果。因此,碱性阳极氧化体系在钛与树脂基界面增强方面具有更大的潜力。Mertens 等[101]拓展了碱性阳极氧化体系,采用NaTESi电解质对金属钛进行阳极氧化处理,使钛与聚合物之间表现出良好的结合强度和长期耐久性。为进一步优化NaTESi体系的处理效果,徐飞等[102]采用正交实验法优化了阳极氧化的电压、时间和温度等参数。并对处理后钛表面进行粗糙度测试、扫描电子显微镜观察及XRD晶型分析,结果表明,优化工艺下阳极氧化后的钛表面形成了均匀分布的纳米颗粒结构,粗糙度约为1.34 μm,有助于增强界面的机械嵌合与树脂润湿性,使剪切强度显著提升,达到26 MPa。此外,He 等[89]制备了由氢氧化钠(7.5 mol/L)、乙二胺四乙酸(0.1 mol/L)、酒石酸钠(0.2 mol/L)组成的复合碱性电解液,通过调控阳极氧化温度,在钛合金表面获得了蜂窝状的多孔结构,该结构增强了表面的粗糙度和润湿性,使其与树脂的界面结合能力大幅提升,剪切强度最高提升达317.2%。研究者进一步探索在特定电解质体系中制备具有高比表面积和高界面活性的TiO_2纳米管阵列结构,其在金属/树脂界面增强方面已成为研究热点。与传统酸、碱性体系不同,TiO_2纳米管的制备主要通过在含氟电解液阳极氧化实现,其尺寸与形貌可通过电解液组分、电压、pH值、氧化时间和温度等参数进行精准控制[103-104]。

(2)MAO处理

MAO在常规阳极氧化工艺的基础上进一步发展,通过高压火花引发金属表面放电,产生局部高温高压,并与电解质溶液相互作用,促使金属基体表面原位生成更厚、更硬、更均匀的陶瓷型多孔氧化膜[86,105-106]。该工艺适用于钛、铝、镁等金属及其合金,在提升界面结合强度的同时更耐腐蚀、耐磨损。而MAO过程中电解液的组成、电源类型、电压、电流密度、加工时间等工艺参数对氧化膜结构有显著影响[107-111],进而决定了与树脂基体之间的界面机械互锁和化学键合的程度[112-113]。MAO处理后,金属表面通

常会形成外层多孔、内层致密的双层陶瓷膜结构。其中，外层多孔区提供了更大的比表面积，有利于树脂的渗透和机械嵌合；而内层致密区则提供了良好的屏障性能和附着基础，有助于增强界面粘接稳定性和耐久性。Tang 等[112]研究发现，MAO 过程中，占空比的升高会显著增加外层多孔区的孔隙率。这些多孔结构为环氧树脂的渗透提供了更多空间，从而增强了界面之间的机械嵌合作用，提高了界面结合强度。同时，氧化膜中 MgO 的存在还能诱导表面形成羟基基团，进一步促进氢键的形成，加强界面的化学结合。此外，适当的孔隙结构还优化应力分布与能量耗散路径，增强界面的整体韧性。研究表明，在占空比为 40% 时，氧化膜孔隙率和 MgO 含量达到较优水平，实现了最高搭接剪切强度 24.5 MPa。除了占空比等电参数外，电解液组分的调控同样影响着膜层结构。Gao 等[113]研究了 MAO 过程中电解液 Na_2SiO_3 的浓度变化对镁合金与环氧树脂界面结合性能的影响。结果表明，Na_2SiO_3 浓度较低时，氧化膜中 MgO 的存在有助于表面生成羟基基团，增强界面的润湿性和氢键作用，从而提升了镁合金与环氧树脂的剪切强度。而随着 Na_2SiO_3 浓度的升高，Mg_2SiO_4 含量增加，氧化膜中的 MgO 含量逐渐降低，剪切强度出现下降。除了镁合金外，MAO 在钛合金界面改性中的应用也取得了显著成效。Logesh 等[114]等对比了单步 MAO 处理与传统多步阳极氧化工艺（包括喷砂、阳极氧化、蚀刻与退火）在提升钛合金与热塑性树脂界面结合性能方面的差异（图 5(b)）。结果表明，单步 MAO 处理效果更优，主要归因于其表面形成了更高孔隙率、更大孔隙尺寸和更厚的氧化层，有利于树脂的充分渗透与界面机械互锁，从而增强了界面结合强度。

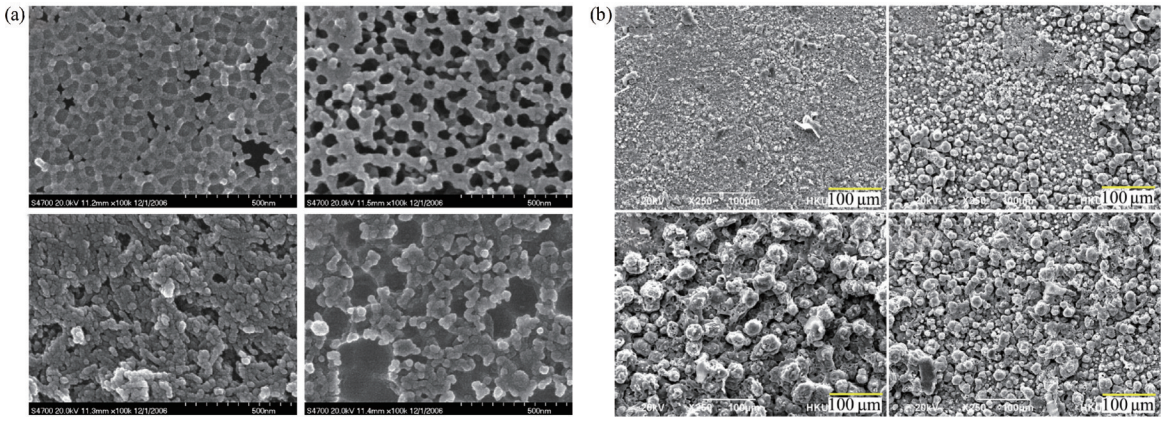


图 5　电化学处理的表面形貌　(a)阳极氧化[97]；(b)MAO[114]

Fig.5　Surface morphology of electrochemistry treated surfaces　(a)anodic oxidation[97]; (b)MAO[114]

电化学处理通过在金属表面构建多孔氧化膜与功能性结构，在不引入机械损伤的条件下，实现对金属表面微观形貌与化学组成的精准调控，从而有效提升其与树脂基体之间的界面结合强度与服役耐久性。其中，阳极氧化所形成的多孔膜结构有助于树脂渗透并实现机械互锁，同时氧化膜中的极性官能团增强了化学键合能力，使失效模式由界面脱粘转变为树脂内聚破坏或纤维拔出。MAO 则通过调控氧化膜的孔隙率、厚度及组成，改善界面的应力传递，并抑制裂纹沿界面的扩展，从而提升界面韧性与疲劳寿命。因此，电化学处理不仅提升了界面的初始粘接强度，更在复杂服役环境下展现出优异的失效抑制效果。作为一种绿色、可控且适应性强的表面改性手段，电化学处理已成为当前金属-树脂复合材料界面增强研究的重要方向之一。

3.2　界面功能层引入

与直接处理金属基体不同，界面功能层的构建是通过在金属表面引入一层或多层具有特定结构与化学活性的中间层，为金属与 FRP 之间提供更优的界面过渡区。不仅能够提升界面的机械嵌合与化学键合，还能实现阻隔、缓冲、耐蚀等多重功能。其中，常见的界面功能层引入法的典型机理如图 6 所示。在界面功能层的构建中，硅烷偶联剂（silane coupling agent，SCA）处理是一种常见而有效的策略。其作用机制在于通过偶联剂分子中的双功能基团（X 基团与 Y 基团），分别与金属基体表面和树脂基体发生化学反应，从而在两者之间形成一层稳固的功能化中间层（即致密的硅烷膜），从而增强两种材料的界面连接[115-117]。SCA 的界面增强效果与聚合物的化学结构及表面活性基团密切相关。当树脂基体中含有羟基、氨基、羧基等活性官能团时，可与偶联剂中的 Y 基团发生化学键合或氢键作用，显著提升界面结合强度。Ji 等[116]采用 SCA 对钛表面进行改性，探究了偶联剂浓度、固化

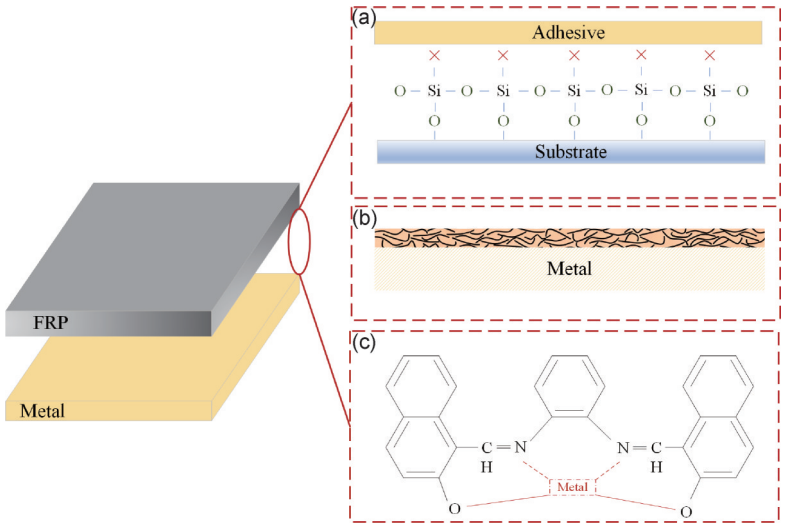


图 6 界面功能层引入的典型机理示意图

(a)SCA 桥接;(b)纳米功能层网络增强;(c)希夫碱金属配合物配位桥接

Fig.6 Schematic of typical mechanisms introduced by the functional interface layer

(a)SCA bridging;(b)network enhancement by nano-functional layers;(c)Schiff base metal complex coordination bridging

温度和时间等参数对钛与 FRP 界面结合性能的影响。结果表明,钛表面形成了均匀完整的硅烷薄膜,且存在 Si—O—Ti 共价键,验证了 SCA 的界面增强效果。相比于喷砂处理,处理后试样的层间剪切强度提升了 132.6%。类似地,郭一民[118]采用 KH560 处理 AA6061-T4 铝合金和 C_f/PA6 复合材料,分别形成了 Al—O—Si、Si—O—Si 共价键和 Si—N、Si—O—Si 共价键,从而有效提升了界面粘接性能。尽管 SCA 在提升异质界面结合性能方面取得显著成效,但由于某些树脂缺乏活性基团,与 SCA 发生化学反应的概率较低,界面增强效果受到限制。为进一步提升界面强度,研究者们开始探索构建纳米结构功能层,以实现更优异的界面性能。

Pan 等[119]采用电泳沉积(electrophoretic deposition, EPD)技术将氧化石墨烯(graphene oxide, GO)沉积至钛合金表面,构建纳米功能界面层,以提升其与 PEEK 之间的粘接性能。EPD 过程中,带负电的 GO 片层在电场驱动下沉积于钛合金阳极表面,形成均匀致密的涂层。GO 富含羧基、羟基、环氧等极性官能团,可与 PEEK 分子产生氢键和范德华力等分子间作用力,从而实现分子级的界面桥接。该中间层不仅改善了金属表面的润湿性,还增强了界面的机械互锁,显著提升了界面结合强度。同样,Ji 等[19]采用 EPD 工艺在钛层和 CF/PEEK 复合材料之间构建了碳纳米管(carbon nanotube, CNT)网络结构层,研究表明,沉积层的密度和厚度主要受 CNT 浓度和沉积时间调控,该网络结构能够显著改善界面粘接性能较弱的异质材料结合强度。配位键桥接作为构建界面功能层的重要机制,同样能够有效提升金属与聚合物之间的结合强度。Pan 等[120]采用希夫碱配体(Schiff)与钛离子(Ti^{4+})形成稳定配合物,该配合物通过配位键桥接钛合金表面,Ti^{4+}作为中心离子与希夫碱中的氮、氧供电子原子形成配位键,配合物通过自组装吸附在金属表面,构建了有序的界面层。尽管该功能层降低了材料的润湿性和表观表面能,但其通过配位键、氢键、机械互锁以及分子链缠结等多重作用机制,有效增强了界面结合能力,TC4 板与 PEEK 的单搭接剪切强度较仅阳极氧化处理提高 53.89%。综上所述,界面功能层的引入不仅可以实现金属与树脂基体间的化学耦合,还可在纳米尺度上调控界面能量状态与微观形貌,为金属与 FRP 之间界面性能的提升提供了多维度的增强机制。

3.3 不同金属基体的界面改性适配性

不同金属材料在物理化学性质、表面能及氧化层特性等方面存在显著差异,其表面改性策略须具备针对性。钛合金表面氧化膜致密、化学惰性强,难以与树脂形成强化学键合。因此适宜采用激光烧蚀、阳极氧化或 SCA 等改性方法,在表面形成高比表面积的多孔层或纳米管阵列、引入 Ti—O—C 化学键或极性官能团,从而实现机械互锁与化学键合。铝合金易氧化,但表面能较低,其表面的天然氧化膜(Al_2O_3)结构疏松,且在湿热环境下易水解,形成弱边界层,这是界面失效的主要原因。因此,常采用激光烧蚀或阳极氧化去除天然的氧化膜,并构建致密、多孔、耐水解的新氧化层,以提升界面润湿性与表面活性,从而改善界面结合强度与耐久性。镁合金化

学性质活泼但耐腐蚀性较差，常采用MAO在镁表面原位生成多孔、致密的陶瓷层结构，即可以提供优异的耐腐蚀性能，又可以实现与FRP的牢固机械互锁。不锈钢及其他高密度金属表面能较低且易锈蚀，可通过喷砂或激光烧蚀等方法提升表面粗糙度，增强界面润湿性与机械互锁，从而获得较高的界面粘接强度。如图7所示，针对不同的金属材料，各类改性方法展现出了差异化的性能优化效果，为金属-FRP结构在不同工程场景的应用提供了多样化的界面改性技术选择。

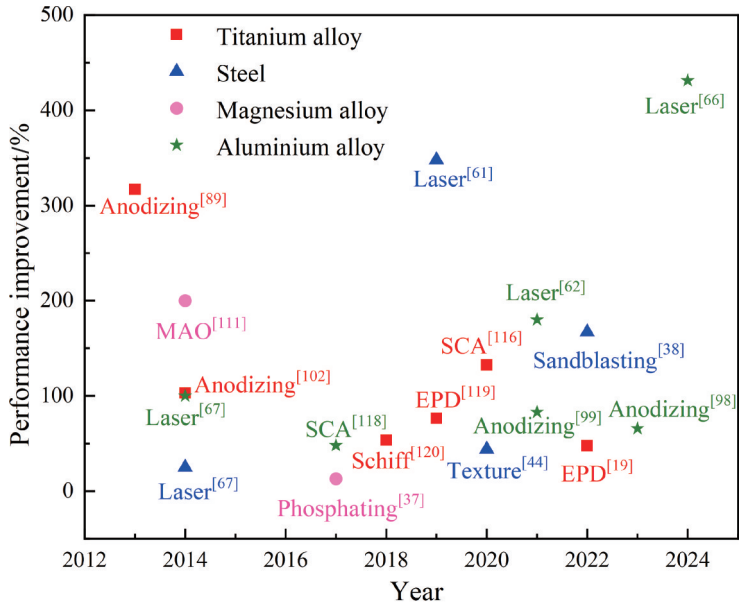


图7　不同金属材料界面改性方法的性能提升效果

Fig.7　Performance improvement effect of interface modification methods for different metal materials

虽然不同金属在改性策略上存在显著差异，但单一机制往往难以全面兼顾界面强度、韧性与耐久性。因此，多机制协同作用，已成为提升金属-FRP界面性能的关键方向。

3.4　多机制协同作用

金属-FRP界面的粘接强度并非由单一的界面结合机制决定，而是多种机制在不同尺度上协同作用的结果。机械互锁、润湿-吸附、化学键合等理论虽各自成立，但在工程应用中往往相互耦合，共同影响界面性能。近年来，研究们者逐渐认识到多机制协同设计的重要性，并通过复合改性工艺显著提升界面结合强度和服役稳定性。Jiang等[121]提出了一种结合机械处理与配位功能界面层引入的复合增强策略，首先通过喷砂工艺在钛合金表面构建微观粗糙形貌，提升界面的机械互锁作用和润湿性；随后引入具有配位能力的稀土Ce^{3+}与PEEK和TiO_2表面氧原子形成稳定的配位键，在金属表面构建了一个具有化学活性的界面层，该配位结构在增强化学键合的同时，促进了应力传递和能量耗散，使界面剪切强度较仅喷砂处理提升约178%。体现了机械处理与功能层引入的协同增强作用。Hao等[122]针对Cu/PEEK界面提出了一种基于紫外/臭氧氧化与SCA双重改性的界面增强策略。研究表明，紫外/臭氧处理可在铜箔表面诱导形成Cu_2O氧化层，进一步通过SCA处理在铜箔或氧化铜箔表面得到硅烷偶联薄膜，最后通过纳秒激光连接铜箔与PEEK薄膜。该复合改性策略有效提升了界面应力传递效率，使Cu/PEEK接头的剥离强度较未处理样品提升约95%。Tan等[123]在研究TC4钛合金与CFRTP连接性能时，采用了MAO-SCA的联合改性工艺实现界面性能的协同增强。MAO处理在TC4表面构建多孔结构，不仅提高了表面粗糙度和润湿性，增强了熔融树脂的渗透与机械互锁，还有效吸附了—OH官能团，为后续化学键合提供了反应位点。随后引入的KH550偶联剂在保留多孔结构的基础上，引入了—NH_2极性基团，进而形成氢键作用，显著增强了界面的结合强度，结合力提高了约29.96%。此外，Liao等[124]针对AA6060铝合金与PEEK层压板界面结合力不足的问题，提出了CNT涂层与激光仿生纹理复合改性的多机制表面改性策略。研究表明，CNT涂层在提升界面应力传递能力的同时，与铝氧化层形成了Al—O—C化学键，从而增强了界面的化学键合；而激光诱导的波浪形横向仿生纹理有效提高了表面粗糙度与实际接触面积，降低了应力集中并改变了裂纹扩展路径，实现了更好的机械互锁效果。两者协同作

用下，界面剪切强度提高至18.8 MPa，且失效模式由界面脱粘转变为铝基体断裂，充分体现了机械互锁、化学键合与纳米桥接在界面增强中的跨尺度协同作用。

综上所述，金属-FRP界面改性正在由单一机理调控向多机制协同优化转变。通过合理组合机械、物理、化学、电化学及引入功能层等多种改性手段，可在宏-微-纳观多尺度层面上实现粗糙度、表面能与化学活性的同步提升，从而实现高强度、高韧性和高稳定性的界面结合。这种多机制协同设计理念为高性能金属-FRP复合结构的界面改性提供了新的理论依据与技术路径。

4 结语与展望

金属-FRP的界面性能直接决定了结构的可靠性和服役寿命。本文综述了此类结构中的界面失效模式、界面结合机理及典型的改性策略。研究表明，界面结合依赖于机械互锁、润湿吸附、化学键合等多种机制，且在实际界面中呈现出复杂的协同耦合关系。针对界面粘接强度不足的问题，金属表面的机械、物理、化学、电化学处理以及功能层的构建，均在一定程度上实现了界面强度和稳定性的提升。然而，目前界面改性技术仍面临诸多挑战，如对界面多机制协同作用的理解不充分、改性工艺适用性有限、界面性能调控精度不足等。未来研究可关注以下方向：

(1)多功能化纳米增强界面

在界面区域引入纳米颗粒(如纳米SiO_2、碳纳米管、石墨烯等)，基于纳米颗粒的高比表面积、高表面能的特性，增强与金属基体、FRP树脂的界面相互作用，促进机械嵌合与化学键合的协同；同时，纳米颗粒还可以填充界面微空隙、抑制微裂纹萌生与扩展，从而提升界面的抗剪切能力与耐久性。在此基础上，界面改性正逐步向多功能化方向迈进。例如，在界面处引入具有导电性(如石墨烯)、形状记忆功能的纳米粒子等，实现金属-FRP结构高性能承载和多功能服役的双重目标。

(2)多种改性方法的跨尺度协同作用

单一改性方法往往存在局限性，可以结合不同的界面作用机制，探索多种改性方法的协同作用。例如，可将电化学沉积(构建微米级金属涂层)、纳米颗粒引入(填充涂层空隙)、硅烷偶联剂处理等改性方法与宏观界面形貌调控(如喷砂、激光雕刻)相结合，实现微-纳米多级多尺度协同增强和力学、物理与化学作用的互补与耦合，同时也要规避不同方法之间相互干扰导致的界面性能劣化，最终实现界面结合强度与耐久性的提升。

(3)界面的多尺度建模

采用多尺度建模方法，在微观尺度分析化学键合与分子间作用，在细观尺度研究微结构形貌与应力分布，在宏观尺度评估整体的力学性能与失效行为。通过跨尺度关联，实现对不同改性方案下界面结合强度、应力分布及失效模式的精准预测。

(4)机器学习优化界面改性参数

基于界面改性的实验数据与多尺度模拟数据(如分子动力学、有限元模拟等)，结合机器学习等数据驱动方法，构建工艺参数(如纳米粒子掺杂比例、喷砂粗糙度、电化学沉积时间等)-微观结构(如纳米颗粒分散度、微结构尺寸等)-界面性能(如界面剪切强度、湿热老化寿命等)的智能预测模型。通过模型对改性参数进行反向优化，在满足工程服役需求的前提下，实现对关键参数的精准调控以及界面服役性能的预测。

参考文献

[1] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报，2007，24(1)：1-12.
Du S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[2] Li X D, Xiong J, Ma L, et al. Effect of vacuum thermal cycling on the compression and shear performance of composite sandwich structures containing pyramidal truss cores[J]. Composites Science and Technology, 2018, 158: 67-78.

[3] He P G, Chen K, Yang J L. Surface modifications of Ti alloy with tunable hierarchical structures and chemistry for improved metal - polymer interface used in deepwater composite riser[J]. Applied Surface Science, 2015, 328: 614-622.

[4] 吴志恩.纤维金属层板在飞机制造中的应用及工艺性分析[J].航空制造技术，2013，56(增刊1)：137-139.
Wu Z E. Application and property analysis of fiber-metal laminate for aircraft manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(S1): 137-139.

[5] Deniz M E, Aydin F. Determination of fatigue life of the unidirectional GFRP/Al hybrid composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 580-587.

[6] 陶杰，李华冠，潘蕾，等.纤维金属层板的研究与发展趋势[J].南京航空航天大学学报，2015，47(5)：626-636.
Tao J, Li H G, Pan L, et al. Review on research and development of fiber metal laminates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(5): 626-636.

[7] Li H G, Xu Y W, Hua X G, et al. Bending failure mechanism and flexural properties of GLARE laminates with different stacking sequences[J]. Composite Structures, 2018, 187: 354-363.

[8] Fink A, Camanho P P, Andrés J M, et al. Hybrid CFRP/titanium bolted joints: performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor[J]. Composites Science and Technology,

2010,70(2):305-317.

[9] Kashaev N, Ventzke V, Riekehr S, et al. Assessment of alternative joining techniques for Ti - 6Al - 4V/CFRP hybrid joints regarding tensile and fatigue strength [J]. Materials & Design, 2015, 81: 73-81.

[10] 栾建泽,那景新,谭伟,等.铝合金-BFRP粘接接头的服役高温老化力学性能及失效预测[J].材料工程,2020,48(9):166-172.
Luan J Z, Na J X, Tan W, et al. Mechanical properties and failure prediction of aluminum alloy-BFRP bonded joints under service high temperature aging [J]. Journal of Materials Engineering, 2020,48(9):166-172.

[11] 张龙,马冀君,李锋伟,等.碳纤维增强树脂基复合材料与金属材料的胶接及混合连接技术研究进展[J].西安航空学院学报,2022,40(5):44-57.
Zhang L, Ma J J, Li F W, et al. Research progress of bonding and hybrid connection technology between carbon fiber reinforced polymer and metal materials[J]. Journal of Xi'an Aeronautical Institute, 2022,40(5):44-57.

[12] Baldan A. Adhesion phenomena in bonded joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012,38:95-116.

[13] 刘孟珂,颜春,祝颖丹,等.纤维增强热塑性树脂基复合材料与金属热熔连接技术的研究进展[J].高分子通报,2024,37(11):1535-1549.
Liu M K, Yan C, Zhu Y D, et al. Research progress on hot-melt joining of fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites and metal [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2024, 37(11): 1535-1549.

[14] Wang S H, Kimura F, Zhao S J, et al. Influence of fluidity improver on metal-polymer direct joining via injection molding[J]. Precision Engineering, 2021,72:620-626.

[15] 刘斌,陈昌乾,张步进.金属与塑料一体化的纳米成型技术及应用[J].模具工业,2015,41(7):1-4.
Liu B, Chen C Q, Zhang B J. The application of nano-moulding technology for metal and plastic's integration[J]. Die & Mould Industry, 2015,41(7):1-4.

[16] Su Y B, de Rooij M, Grouve W, et al. Characterisation of metal - thermoplastic composite hybrid joints by means of a mandrel peel test[J]. Composites Part B: Engineering, 2016,95:293-300.

[17] Baldan A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(1):5257414.

[18] Sinke J. Development of Fibre Metal Laminates: concurrent multi-scale modeling and testing[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(20):6777-6788.

[19] Ji C M, Guo J B, Hu J Q, et al. Enhanced interfacial adhesion of CF/PEEK-titanium hybrid laminates via introducing micro-nano layers with multi-walled carbon nanotube networks[J]. Composites Science and Technology, 2022,223:109418.

[20] Chen Y Z, Wang Y C, Wang H. Research progress on interlaminar failure behavior of fiber metal laminates[J]. Advances in Polymer Technology, 2020,2020:3097839.

[21] 季春明,王兵,郭家宝,等.Ti/CFRP超混杂层板的研究与应用展望[J].宇航总体技术,2021,5(6):62-72.
Ji C M, Wang B, Guo J B, et al. Review on research and application prospects of Ti/CFRP hybrid laminates [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021,5(6):62-72.

[22] McBain J W, Hopkins D G. On adhesives and adhesive action[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1925,29(2):188-204.

[23] Sharpe L H, Schonhorn H. Surface energetics, adhesion, and adhesive joints[M]//Contact Angle, Wettability, and Adhesion. Washington D C: American Chemical Society, 1964:189-201.

[24] Schonhorn H, Ryan F W. Surface crosslinking of polyethylene and adhesive joint strength[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1974,18(1):235-243.

[25] Lewis G N. The atom and the molecule[J]. Journal of the American Chemical Society, 1916,38(4):762-785.

[26] Derjaguin B V, Smilga V P. Electronic theory of adhesion[J]. Journal of Applied Physics, 1967,38(12):4609-4616.

[27] Voyutskiĭ S S. The diffusion theory of adhesion[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1960,33(3):748-756.

[28] Faupel F, Willecke R, Thran A. Diffusion of metals in polymers [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 1998,22(1): 1-55.

[29] Bikerman J J. Adhesion in friction[J]. Wear, 1976,39(1):1-13.

[30] Bharti S. Adhesives and adhesion technologies: a critical review [J]. American Journal of Polymer Science and Technology, 2018, 4(1):36.

[31] Critchlow G W, Brewis D M. Review of surface pretreatments for aluminium alloys[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1996,16(4):255-275.

[32] 张晓鹏,陈学文,汪建强,等.表面处理对2024铝合金热变形连接界面微观组织的影响[J].材料工程,2026,54(3):161-169.
Zhang X P, Chen X W, Wang J Q, et al. Influence of surface treatment on microstructure of 2024 aluminum alloy hot compression bonding interface [J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(3):161-169.

[33] Davis M, Bond D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999,19(2/3):91-105.

[34] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora M Ö, et al. A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods [J]. Materials & Design, 2011,32(7):3671-3685.

[35] Wu X T, Zhan L H, Zhao X, et al. Effects of surface pre-treatment and adhesive quantity on interface characteristics of fiber metal laminates[J]. Composite Interfaces, 2020,27(9):829-843.

[36] Critchlow G W, Brewis D M. Influence of surface macroroughness on the durability of epoxide-aluminium joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1995,15(3):173-176.

[37] Zhang X, Zhang Y, Ma Q Y, et al. Effect of surface treatment on the corrosion properties of magnesium-based fibre metal laminate [J]. Applied Surface Science, 2017,396:1264-1272.

[38] Yao Y Q, Shi P C, Chen M D, et al. Experimental and numerical study on Mode Ⅰ and Mode Ⅱ interfacial fracture toughness of co-cured steel-CFRP hybrid composites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022,112:103030.

[39] KIRK D, ABYANEH M Y. Theoretical basis of shot peening coverage control[J]. Shot Peener, 1995, 9(2): 28-30.
[40] Guagliano M. Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(3): 277-286.
[41] John W, Locke L N, Bagley G E. Relative toxicity of lead and five proposed substitute shot types to pen-reared mallards[J]. The Journal of Wildlife Management, 1968, 32(3): 483.
[42] Harris A F, Beevers A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999, 19(6): 445-452.
[43] Ho B J, Tsoi J K, Liu D, et al. Effects of sandblasting distance and angles on resin cement bonding to zirconia and titanium[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015, 62: 25-31.
[44] Guo C, He J, Su Y H, et al. Thermo-stamping co-curing process for CFRP/steel hybrid sheets and its interface strength improvement[J]. Composite Structures, 2020, 241: 112108.
[45] 吕莹莹,纪箴,杜建华,等.表面处理对钢板与环氧树脂粘结性能的影响[J].粉末冶金技术,2016,34(3):213-217.
Lv Y Y, Ji Z, Du J H, et al. Effect of surface treatment on the shearing strength of the epoxy resin adhesion coating[J]. Powder Metallurgy Technology, 2016, 34(3): 213-217.
[46] Wu J Z, Liu H J, Wei P T, et al. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 183: 105785.
[47] Yue T M, Yan L J, Chan C P. Stress corrosion cracking behavior of Nd: YAG laser-treated aluminum alloy 7075[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(14): 5026-5034.
[48] Stammen E, Dilger K, Böhm S, et al. Surface modification with laser: pretreatment of aluminium alloys for adhesive bonding[J]. Plasma Processes and Polymers, 2007, 4(S1): S39-S43.
[49] Rechner R, Jansen I, Beyer E. Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30(7): 595-601.
[50] Jiao J K, Xu Z F, Wang Q, et al. CFRTP and stainless steel laser joining: thermal defects analysis and joining parameters optimization[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 170-176.
[51] 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.
[52] 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.
[53] Xue Z L, Shen J Q, Hu S S. Influence of scanning speed and defocus distance on laser welded PA6GF30/SUS444 dissimilar lap joints[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108223.
[54] 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.
[55] Wu Y R, Lin J P, Carlson B E, et al. Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 340-347.
[56] Lambiase F, Genna S, Kant R. A procedure for calibration and validation of FE modelling of laser-assisted metal to polymer direct joining[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 363-372.
[57] Critchlow G W, Brewis D M, Emmony D C, et al. Initial investigation into the effectiveness of CO_2-laser treatment of aluminium for adhesive bonding[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1995, 15(4): 233-236.
[58] 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.
[59] Hussein F I, Akman E, Oztoprak B G, et al. Evaluation of PMMA joining to stainless steel 304 using pulsed Nd: YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 143-152.
[60] Feng Z W, Zhao H Y, Tan C W, et al. Effect of laser texturing on the surface characteristics and bonding property of 30CrMnSiA steel adhesive joints [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 219-228.
[61] Schricker K, Stambke M, Bergmann J P, et al. Macroscopic surface structures for polymer-metal hybrid joints manufactured by laser based thermal joining[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 782-790.
[62] Wang Y, Cheng D, Ye X K, et al. Interfacial construction and interlayer properties of fiber metal laminates-based bionic micro-nano composite structure inspired by the toe-end morphology of tree frogs[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112515.
[63] Li J C, Zhao Y X, Zhang X Y, et al. Influence of bionic texture on the mechanical properties of 6061Al/CFRTP laser joints [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112393.
[64] Maressa P, Anodio L, Bernasconi A, et al. Effect of surface texture on the adhesion performance of laser treated Ti6Al4V alloy [J]. The Journal of Adhesion, 2015, 91(7): 518-537.
[65] Akman E, Bora M Ö, Çoban O, et al. Laser-induced groove optimization for Al/CFRP adhesive joint strength [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 107: 102830.
[66] Rodríguez-Vidal E, Lambarri J, Soriano C, et al. A combined experimental and numerical approach to the laser joining of hybrid polymer - metal parts[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 835-844.
[67] Alfano M, Pini S, Chiodo G, et al. Surface patterning of metal substrates through low power laser ablation for enhanced adhesive bonding[J]. The Journal of Adhesion, 2014, 90(5/6): 384-400.
[68] Davis G D, Groff G B, Zatorski R A. Plasma spray coatings as treatments for aluminum, titanium and steel adherends[J]. Surface and Interface Analysis, 1997, 25(5): 366-373.
[69] Carradó A. Structural, microstructural, and residual stress investigations of plasma-sprayed hydroxyapatite on Ti-6Al-4V[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(2): 561-565.
[70] Fombuena V, Balart J, Boronat T, et al. Improving mechanical performance of thermoplastic adhesion joints by atmospheric plasma [J]. Materials & Design, 2013, 47: 49-56.
[71] Tanarro I, Herrero V J, Carrasco E, et al. Cold plasma chemistry and diagnostics[J]. Vacuum, 2011, 85(12): 1120-1124.
[72] Mühlhan C, Weidner S, Friedrich J, et al. Improvement of bonding

properties of polypropylene by low-pressure plasma treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 116/117/118/119: 783-787.

[73] Pike R A, Patarini V M, Zatorski R, et al. Plasma-sprayed coatings as adherend surface pretreatments[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1992, 12(4): 227-231.

[74] Mandolfino C, Lertora E, Gambaro C, et al. Improving adhesion performance of polyethylene surfaces by cold plasma treatment [J]. Meccanica, 2014, 49(10): 2299-2306.

[75] Lawcock G, Ye L, Mai Y W, et al. The effect of adhesive bonding between aluminum and composite prepreg on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced metal laminates [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(1): 35-45.

[76] Critchlow G W, Yendall K A, Bahrani D, et al. Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26(6): 419-453.

[77] Kinloch A J, Little M S G, Watts J F. The role of the interphase in the environmental failure of adhesive joints [J]. Acta Materialia, 2000, 48(18/19): 4543-4553.

[78] Bishopp J. Chapter 4 surface pretreatment for structural bonding [M] // Adhesives and Sealants-Basic Concepts and High Tech Bonding. Amsterdam: Elsevier, 2005: 163-214.

[79] Hughes A E, Theodossiou G, Elliott S, et al. Study of deoxidation of 2024-T3 with various acids[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(12): 1642-1652.

[80] Molitor P, Barron V, Young T. Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001, 21(2): 129-136.

[81] Digby R P, Packham D E. Pretreatment of aluminium: topography, surface chemistry and adhesive bond durability [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1995, 15(2): 61-71.

[82] 李涛. 一种 TC18 钛合金酸洗工艺的应用研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(8): 65-69.
Li T. Application study of a pickling process for TC18 titanium alloy[J]. Plating and Finishing, 2024, 46(8): 65-69.

[83] Critchlow G W, Brewis D M. Review of surface pretreatments for titanium alloys [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1995, 15(3): 161-172.

[84] 许立宁, 张颖怀, 路民旭. 磷化处理对胶黏剂/金属界面力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(增刊2): 103-107.
Xu L N, Zhang Y H, Lu M X. Influence of phosphating treatment on the mechanics performance of adhesive/metal interface[J]. Chinese Journal of Engineering, 2007, 29(S2): 103-107.

[85] Droździel-Jurkiewicz M, Bieniaś J. Evaluation of surface treatment for enhancing adhesion at the metal-composite interface in fibre metal-laminates[J]. Materials, 2022, 15(17): 6118.

[86] Wang Y M, Jia D C, Guo L X, et al. Effect of discharge pulsating on microarc oxidation coatings formed on Ti_6Al_4V alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 90(1): 128-133.

[87] He L P, Mai Y W, Chen Z Z. Effects of anodization voltage on CaP/Al_2O_3-Ti nanometre biocomposites [J]. Nanotechnology, 2004, 15(11): 1465-1471.

[88] Rahimi M H, Saramad S, Tabaian S H, et al. Study the effect of striping in two-step anodizing process on pore arrangement of nano-porous alumina[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(1): 12-16.

[89] He P G, Chen K, Yu B, et al. Surface microstructures and epoxy bonded shear strength of Ti_6Al_4V alloy anodized at various temperatures [J]. Composites Science and Technology, 2013, 82: 15-22.

[90] Stępniowski W J, Bojar Z. Synthesis of anodic aluminum oxide (AAO) at relatively high temperatures. Study of the influence of anodization conditions on the alumina structural features[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(2/3): 265-272.

[91] Brockmann W, Hennemann O D, Kollek H, et al. Adhesion in bonded aluminium joints for aircraft construction[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1986, 6(3): 115-IN1.

[92] Gemelli E, Almeida Camargo N H. Low voltage anodization of titanium in nitric acid solution: a new method to bioactivate titanium [J]. Materials Characterization, 2011, 62(10): 938-942.

[93] 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.

[94] Elabar D, La Monica G R, Santamaria M, et al. Anodizing of aluminium and AA 2024-T3 alloy in chromic acid: effects of sulphate on film growth[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309: 480-489.

[95] Aghamohammadi H, Hosseini Abbandanak S N, Eslami-Farsani R, et al. Effects of various aluminum surface treatments on the basalt fiber metal laminates interlaminar adhesion [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 184-193.

[96] Domingues L, Fernandes J C S, Da Cunha Belo M, et al. Anodising of Al2024-T3 in a modified sulphuric acid/boric acid bath for aeronautical applications [J]. Corrosion Science, 2003, 45 (1): 149-160.

[97] Zhang J S, Zhao X H, Zuo Y, et al. The bonding strength and corrosion resistance of aluminum alloy by anodizing treatment in a phosphoric acid modified boric acid/sulfuric acid bath[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(14): 3149-3156.

[98] Chen J, Huang J, Wu Y T, et al. Effect of surface anodizing on the bonding properties of aluminum alloy/glass-fiber reinforced polypropylene random copolymer hybrid joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023, 123: 103361.

[99] Fiore V, Di Franco F, Miranda R, et al. Effects of anodizing surface treatment on the mechanical strength of aluminum alloy 5083 to fibre reinforced composites adhesive joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 108: 102868.

[100] Schulze K, Hausmann J, Wielage B. The stability of different titanium-PEEK interfaces against water [J]. Procedia Materials Science, 2013, 2: 92-102.

[101] Mertens T, Gammel F J, Kolb M, et al. Investigation of surface pre-treatments for the structural bonding of titanium[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 34: 46-54.

[102] 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.

[103] Ossowska A,Sobieszczyk S,Supernak M,et al.Morphology and properties of nanotubular oxide layer on the "Ti-13Zr-13Nb" alloy[J].Surface and Coatings Technology,2014,258:1239-1248.

[104] Wang J,Lin Z Q.Anodic formation of ordered TiO_2 nanotube arrays:effects of electrolyte temperature and anodization potential [J].The Journal of Physical Chemistry C,2009,113(10):4026-4030.

[105] Li G Q,Ma F C,Liu P,et al.Review of micro-arc oxidation of titanium alloys:mechanism,properties and applications[J].Journal of Alloys and Compounds,2023,948:169773.

[106] 吴瑜,李月樵,洪伟,等.镁合金微弧氧化膜致密化技术研究进展[J].电镀与精饰,2024,46(11):76-85.
Wu Y,Li Y Q,Hong W,et al.Research advance in densification for micro-arc oxidation film on magnesium alloy[J].Plating and Finishing,2024,46(11):76-85.

[107] Liu S,Xia C Q,Liu Z Y,et al.Micro-arc oxidation preparation of a ZnO-Se composite coating on titanium with anti-oxidation and anti-bacterial potentials for osteomyelitis control [J]. Materials Letters,2022,327:132978.

[108] Chen X W,Li M L,Zhang D F,et al.Corrosion resistance of MoS_2-modified titanium alloy micro-arc oxidation coating [J]. Surface and Coatings Technology,2022,433:128127.

[109] Zhang Z Y,Huang T Y,Zhai D J,et al.Study on strontium doped bioactive coatings on titanium alloys surfaces by micro-arc oxidation [J]. Surface and Coatings Technology,2022,451:129045.

[110] 陈宇科,原梅妮,周鹏飞,等.脉冲频率及占空比对Ti_6Al_4V合金微弧氧化膜层微观结构及性能的影响[J].金属热处理,2023,48(6):9-15.
Chen Y K,Yuan M N,Zhou P F,et al.Effect of pulse frequency and duty ratio on microstructure and properties of microarc oxidation coating on Ti_6Al_4V alloy [J]. Heat Treatment of Metals,2023,48(6):9-15.

[111] Pan Y C,Wu X,Huang Z,et al.A new approach to enhancing interlaminar strength and galvanic corrosion resistance of CFRP/Mg laminates [J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2018,105:78-86.

[112] Tang Y M,Zhao X H,Jiang K S,et al.The influences of duty cycle on the bonding strength of AZ31B magnesium alloy by microarc oxidation treatment[J].Surface and Coatings Technology,2010,205(6):1789-1792.

[113] Gao H T,Zhang M,Yang X,et al.Effect of Na_2SiO_3 solution concentration of micro-arc oxidation process on lap-shear strength of adhesive-bonded magnesium alloys[J].Applied Surface Science,2014,314:447-452.

[114] Shanmugam L,Kazemi M E,Yang J L.Improved bonding strength between thermoplastic resin and Ti alloy with surface treatments by multi-step anodization and single-step micro-arc oxidation method:a comparative study [J]. ES Materials & Manufacturing,2019,3:57-65.

[115] Honkanen M,Hoikkanen M,Vippola M,et al.Characterization of silane layers on modified stainless steel surfaces and related stainless steel-plastic hybrids[J].Applied Surface Science,2011,257(22):9335-9346.

[116] Ji C M,Wang B,Hu J Q,et al.Effect of different preparation methods on mechanical behaviors of carbon fiber-reinforced PEEK-titanium hybrid laminates[J].Polymer Testing,2020,85:106462.

[117] Van Schaftinghen T,Le Pen C,Terryn H,et al.Investigation of the barrier properties of silanes on cold rolled steel[J].Electrochimica Acta,2004,49(17/18):2997-3004.

[118] 郭一民.C_f/PA6复合材料与AA6061-T4铝合金的硅烷处理及粘接技术研究[D].郑州:郑州大学,2017.
Guo Y M.A study on silane treatment and adhesive technology of C_f/PA6 composites and AA6061-T4 aluminum alloys [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2017.

[119] Pan L,Lv Y F,Nipon R,et al.Enhancement in interfacial adhesion of Ti/polyetheretherketone by electrophoretic deposition of graphene oxide[J].Polymer Composites,2019,40(S2):E1243-E1251.

[120] 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.

[121] Ye J,Wang H,Dong J L,et al.Metal surface nanopatterning for enhanced interfacial adhesion in fiber metal laminates[J].Composites Science and Technology,2021,205:108651.

[122] Hao R J,Zhao Y X,Su J H,et al.Enhancing interfacial bonding between the copper foil and poly-ether-ether-ketone film via dual modification using UV/ozone and silane coupling[J].Applied Surface Science,2024,646:158977.

[123] Tan C W,Su J H,Liu Y F,et al.Enhanced interfacial bonding strength of laser bonded titanium alloy/CFRTP joint via hydrogen bonds interaction[J].Composites Part B:Engineering,2022,239:109966.

[124] Liao J,Huang Y C,Xue X,et al.CNT coating combined with laser bionic fractal texturing for enhancing interfacial adhesion in AA6060/PEEK laminates[J].Composite Structures,2025,372:119566.

基金项目:国家自然科学基金(12402159);黑龙江省重点研发计划(2024ZX06A08);国家资助博士后研究人员计划B档(GZB20240961)
收稿日期:2025-09-30;**录用日期**:2025-11-19
通讯作者:季春明(1994—),男,副研究员,博士,研究方向为多功能复合材料与结构轻量化,联系地址:黑龙江省哈尔滨市香坊区哈尔滨工业大学科学园复合材料与结构研究所(150001),E-mail:jichunming@hit.edu.cn

(本文责编:解　宏)