

# 钛/钢异质金属压力焊与钎焊研究进展

夏月庆<sup>1,2</sup>, 杜强<sup>1</sup>, 郭鹏<sup>2\*</sup>, 秦建<sup>2</sup>, 路全彬<sup>2</sup>, 丁宗业<sup>2</sup>,  
李鹏<sup>3</sup>, 董红刚<sup>3</sup>, 纠永涛<sup>2</sup>, 周培林<sup>1</sup>, 张秀丽<sup>1</sup>

(1.河南农业大学 机电工程学院, 郑州 450002; 2.中国机械研究总院集团郑州机械研究所  
有限公司 高性能新型焊接材料全国重点实验室, 郑州 450001; 3.大连理工大学  
材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 钛/钢异质金属复合结构可同时发挥钛的优异耐腐蚀性与钢的良好综合力学性能, 并实现结构轻量化, 达到“取长补短, 物尽其用”的效果, 应用领域广泛。焊接是制造钛/钢异质结构的重要手段之一, 然而钛、钢之间的物理及冶金性能差异悬殊, 其高质量焊接面临巨大挑战。压力焊(扩散焊、摩擦焊、爆炸焊)与钎焊因其特有的焊接优势, 被视为连接钛/钢的优选方法, 并已成为研究热点, 对钛/钢复合结构的高可靠应用意义重大。本文从直接扩散焊、单一中间层、复合中间层及特殊工艺辅助四方面阐述了钛/钢扩散焊的研究现状; 针对旋转摩擦焊和搅拌摩擦焊2种具体方法, 归纳了钛/钢摩擦焊接头的界面组织结构、强度等问题; 从工艺、接头强度、界面结构等方面总结了钛/钢爆炸焊的进展; 围绕钛/钢钎焊常用的Ag基与Ti基钎料对钎焊钛/钢钎焊进行了分类总结。最后指出了钛/钢异质焊接接头塑韧性差的瓶颈难题, 并从通过中间层/钎料调控、外场辅助、母材表面构型等手段提升接头强韧性的角度展望了钛/钢异质连接的未来研究方向。

**关键词:** 钛/钢异质金属; 扩散焊; 摩擦焊; 爆炸焊; 钎焊

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2025.03.008

**中图分类号:** TG454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2025)03-0067-14

## Research Progress on Pressure Welding and Brazing of Titanium/Steel Dissimilar Metals

XIA Yueqing<sup>1,2</sup>, DU Qiang<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>2\*</sup>, QIN Jian<sup>2</sup>, LU Quanbin<sup>2</sup>, DING Zongye<sup>2</sup>, LI Peng<sup>3</sup>,  
DONG Honggang<sup>3</sup>, JIU Yongtao<sup>2</sup>, ZHOU Peilin<sup>1</sup>, ZHANG Xiuli<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;  
2. State Key Laboratory of High Performance & Advanced Welding Materials, China Academy of Machinery Zhengzhou  
Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. School of Materials  
Science and Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

**ABSTRACT:** Titanium/steel dissimilar composite structures could take advantage of the corrosion resistance of titanium and

收稿日期: 2025-01-16

Received: 2025-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(52305355); 中国博士后科学基金(2023M743244); 河南省科技研发联合基金(重点项目)(225200810013); 河南省科技攻关(232102110287)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (52305355); China Postdoctoral Science Foundation (2023M743244); Henan Province Science and Technology Research and Development Joint Fund (225200810013); Key Scientific and Technological Project of Henan Province Department of China (232102110287)

引文格式: 夏月庆, 杜强, 郭鹏, 等. 钛/钢异质金属压力焊与钎焊研究进展[J]. 精密成形工程, 2025, 17(3): 67-80.

XIA Yueqing, DU Qiang, GUO Peng, et al. Research Progress on Pressure Welding and Brazing of Titanium/Steel Dissimilar Metals[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(3): 67-80.

\*通信作者 (Corresponding author)

comprehensive mechanical properties of steel, and achieve lightweight structure to make the best use of everything. Thus the titanium/steel dissimilar composite structure is widely used in various fields. Welding is one of the important methods of manufacturing titanium/steel composite structures. However, the physical and chemical properties of titanium and steel are very different, which results in a great challenge in the high-quality welding of titanium/steel. With specific welding advantages, solid-phase welding (diffusion bonding, friction welding and explosive welding) and brazing are preferred means to weld titanium/steel dissimilar metals, and are significant to its high-reliability application with are proved to be research hotspots. In this work, the research progress of titanium/steel diffusion bonding is expounded from direct bonding, single interlayer, multiple interlayers and particular techniques. The interfacial microstructure and strength are summarized based on rotary friction welding and friction stir welding. The titanium/steel explosive welding progresses are summarized from the aspects of process, joint strength and interfacial microstructure. Focused on Ag- and Ti-based filler metals, the titanium/steel brazing is concluded. Finally, the bottleneck worse plasticity and toughness of titanium/steel joint is pointed out. This paper prospects the future of titanium/steel joining from improving strength and toughness of titanium/steel joints by the means of interlayer/filler metal regulation, out-field assistance, and configuration on base metals.

**KEY WORDS:** titanium/steel dissimilar metals; diffusion bonding; friction welding; explosive welding; brazing

异质金属复合结构可“取长补短，物尽其用”，充分发挥不同金属的性能优势与经济效益，在现代制造业中的重要性日益突显<sup>[1-3]</sup>。钛及钛合金具备诸多优良性能，如比强度高、耐腐蚀性能优异、可塑性好等<sup>[4-5]</sup>，钢具有强度高、塑韧性优良、耐热性好且价格低廉等特点<sup>[6-7]</sup>，钛/钢异质复合结构的工程应用需求十分迫切，广泛应用于化工设备、航空航天、汽车、船舶、建筑工程等领域。焊接是钛/钢异质结构制造的重要手段之一，然而由于钛、钢之间的物理及化学冶金性能差异巨大，钛/钢异质高质量连接一直是行业的难点和痛点。

钛、铁主要物理性能参数如表 1 所示。可以看出，钛、铁之间的线膨胀系数差距尤为明显，这必然会导致钛与钢在焊接时因膨胀、收缩不同步而形成较大残余应力，进而导致接头界面开裂，极大影响接头性能。热导率的差距同样会使焊接与冷却过程中材料吸放热不同步，对接头质量带来不利影响。

表 1 钛、铁主要物理性能参数

Tab.1 Main physical parameters of titanium and steel

Material	Density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	Thermal conductivity/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Linear expansion coefficient/ ( $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Ti	4.5	1677	13.8	8.2
Fe	7.87	1535	66.7	11.76

Fe-Ti 二元合金相图如图 1 所示。在化学冶金性能方面，Fe、Ti 在常温下的固溶度极小，其质量分数仅为 0.04%~1%，当 Fe 的质量分数超过 1%时，钛/钢接头中极易生成一系列 Fe-Ti 脆性金属间化合物，严重影响钛/钢接头力学性能。此外，Ti 是强碳化物形成元素，极易与碳钢中的 C 生成 TiC 脆性化合物，恶化接头性能。此外，焊接钛/钢常用的中间层为铜和镍，Ti 和 Cu、Ni 的亲合力较大，焊接冶金过程中

生成的系列 Cu-Ti、Ni-Ti 金属间化合物也会影响钛/钢接头的服役可靠性。

在众多焊接方法中，压力焊接时母材不熔化，接头中的金属间化合物量少且可控；钎焊温度低、接头应力小且装配形式灵活，因此压力焊与钎焊已成为钛/钢连接的重要焊接方法和研究热点。多年来，国内外学者对钛/钢异质焊接进行了大量研究，加速了钛/钢异质结构的工程应用进程。本文将围绕压力焊（扩散焊、摩擦焊、爆炸焊）及钎焊全面论述钛/钢连接研究进展、科学问题、未来展望等。

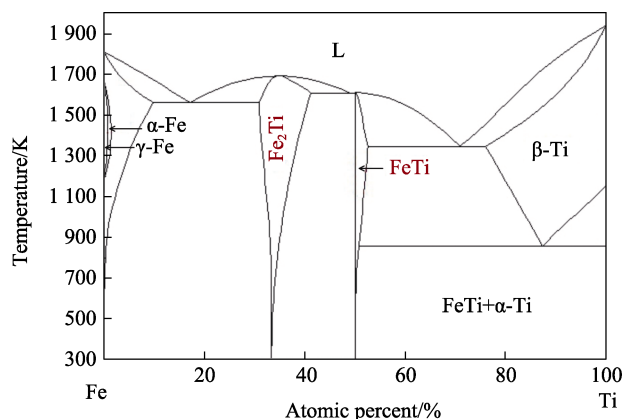


图 1 Ti-Fe 二元合金相图  
Fig.1 Ti-Fe binary diagram

## 1 压力焊

本文选取的压力焊为固相焊，焊接时，一般在母材熔点以下提供高温、高压环境，母材在焊接过程中不熔化，接头中生成的金属间化合物量少且可控，固相焊是焊接钛/钢的重要手段之一。常见的钛/钢固相焊接方法有扩散焊、摩擦焊、爆炸焊等。其中，钛/钢扩散焊的研究主要围绕直接扩散焊、添加中间层扩

散焊及特殊工艺辅助扩散焊进行; 钛/钢摩擦焊的研究主要有旋转摩擦焊和搅拌摩擦焊; 爆炸焊中以直接爆炸焊和添加中间层辅助爆炸焊较为常见。

### 1.1 扩散焊

#### 1.1.1 直接扩散焊

邵甄腴等<sup>[8]</sup>通过真空扩散焊对 TC4 钛合金/316L 不锈钢进行直接焊接, 研究表明, 焊缝中产生了大量 Ti-Fe、Ti-Cr 系金属间化合物, 接头难以形成高可靠连接, 并断裂于脆性化合物区, 最高强度仅为 43.01 MPa。Li 等<sup>[9]</sup>对商业纯钛/碳钢进行了直接扩散连接, 主要研究了接头中晶体取向对化合物界面层生长的影响, 750 °C 和 800 °C 焊接温度下的接头界面含大量 Ti 和少量 C, 随着焊接温度的升高和时间的延长, TiC 层生成量逐渐增多, 并开始出现细小晶粒, 如图 2 所示。TiC 形成的壁垒有效阻止了 Fe 向  $\alpha$ -Ti 基体中的扩散。Yang 等<sup>[10]</sup>同样发现了 TiC 作为壁垒能有效阻止 TiFe、Ti<sub>2</sub>Fe 生成的现象, 接头拉伸强度最高为 322 MPa。TiC 是一种脆性化合物, 需严格控制其含量以消除不利影响, 而其他非碳钢与钛合金的直接扩散焊接头中则无 TiC 形成, 取而代之的是其他 Ti 基金属间化合物。Kundu 等<sup>[11]</sup>利用真空扩散的方法连接 TC4/双相不锈钢, 当焊接温度低于 800 °C 时, 界面结合效率低下, 在 850 °C/60 min 时开始形成 FeTi 金属间化合物, 在 120 min 焊接时间下, 得到接头最大拉伸强度为 510 MPa, 断裂发生在脆性化合物相位置。Velmurugan 等<sup>[12]</sup>在低温条件下对 TC4/双相不锈

钢进行直接扩散连接, 在 650~800 °C 时, 界面处形成了 Fe<sub>2</sub>Ti、Cr<sub>2</sub>Ti、FeTi 等多种金属间化合物, 在 750 °C 时, 接头剪切强度最大为 194.3 MPa。

#### 1.1.2 单一中间层扩散焊

在扩散连接钛/钢中, 单一中间层以 Cu、Ni 较为常见, 随着新材料的不断涌现, 新型中间层逐渐崭露头角。Norouzi 等<sup>[13]</sup>采用 Cu 中间层扩散连接 Ti-6Al-4V/AISI304, 接头在较高焊接时间下发生了等温凝固, Ti、Fe 与 Cu 的相互扩散使界面产生了一系列 Ti-Cu、Ti-Fe 化合物。延长焊接时间可有效减少 Ti-Cu 化合物的生成量, 在 80 min 焊接时间下, 接头最高剪切强度达到 247 MPa, 接近母材 AISI304 的强度。Kundu 等<sup>[14]</sup>选取 300  $\mu$ m 厚的铜作为中间层, 研究了商业纯钛/304 不锈钢的扩散连接, 在焊接温度为 850 °C 和 900 °C 时, 接头两侧的扩散界面均出现 Fe-Cu-Ti 三元合金产物, 表明 Cu 不能有效阻止钢、纯钛中组元之间的相互扩散。在 900 °C 焊接温度时, 接头抗拉强度达到最大值 318 MPa。Kundu 等<sup>[15]</sup>又以厚度为 300  $\mu$ m 的纯 Ni 作为中间层, 研究了纯钛/304 不锈钢的扩散连接, 在 950 °C 焊接温度下, 304/Ni 界面生成了 Fe-Ti-Cr 等二元、三元系金属间化合物。在 800~900 °C 焊接温度下, 界面处有 Ti-Ni 金属间化合物反应层生成, 反应层的厚度随温度的升高而增加。当焊接温度为 900 °C 时, 接头最大拉伸强度与强剪强度分别为 311 MPa 与 236 MPa。Li 等<sup>[16]</sup>采用 AlCoCrCuNi<sub>2</sub> 高熵合金 (HEA) 中间层扩散连接

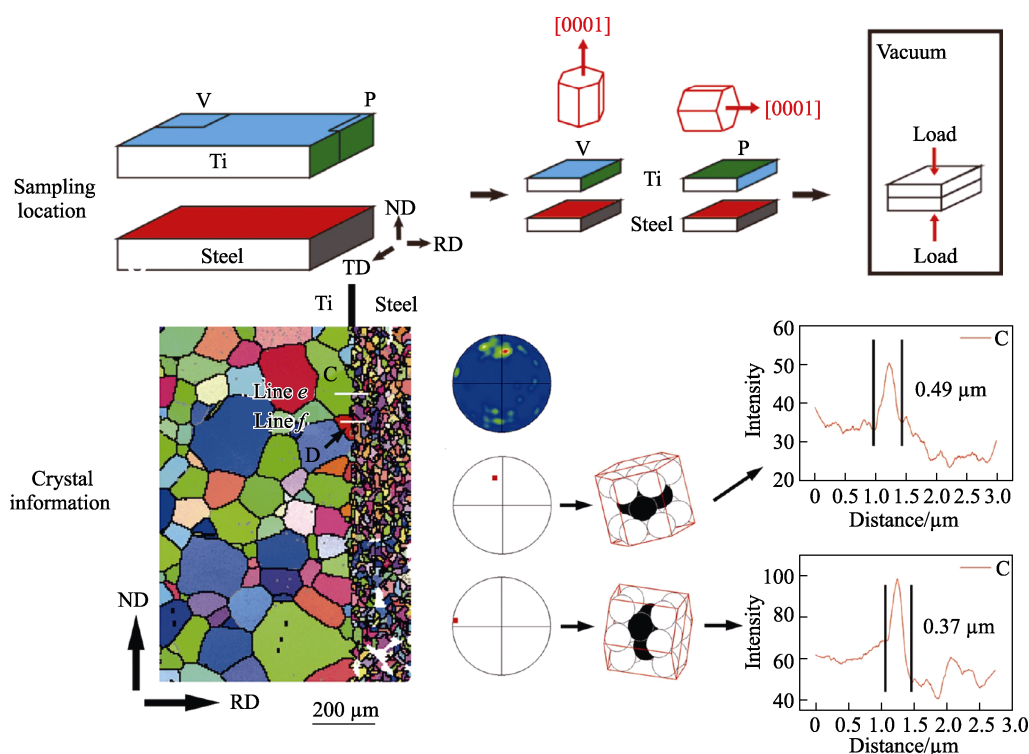


图 2 钛/钢直接扩散焊接头信息<sup>[9]</sup>

Fig.2 Information of titanium/steel direct diffusion bonded joint<sup>[9]</sup>

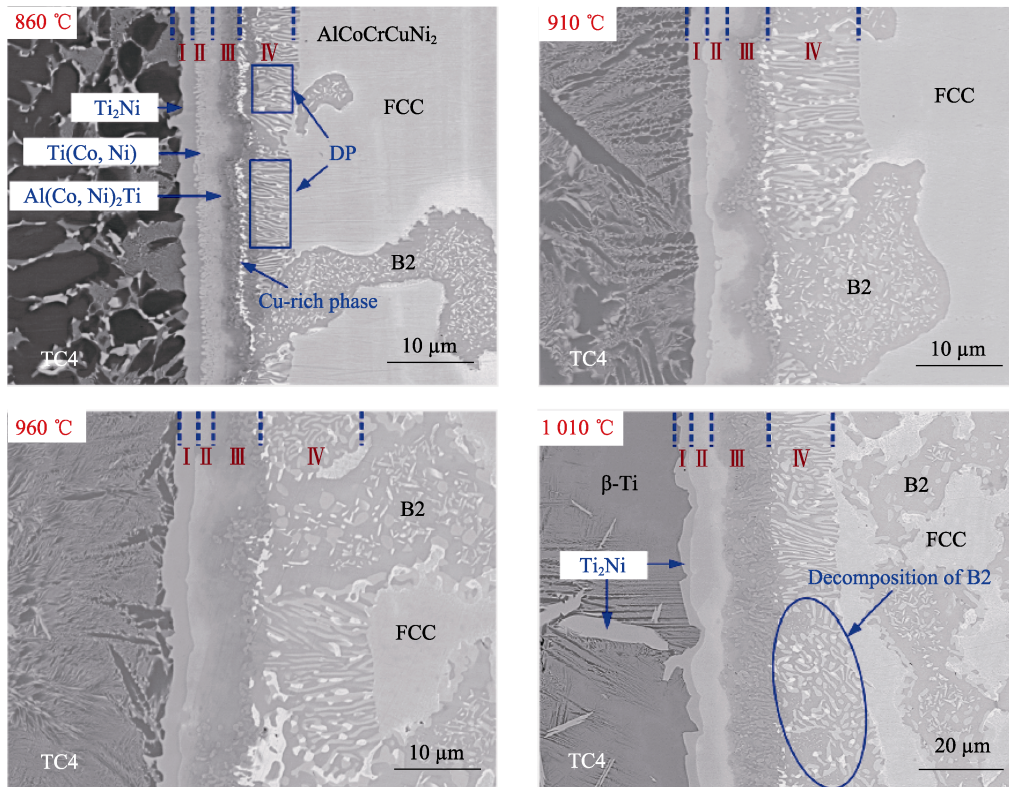


图3 不同温度下 TC4/HEA/316L 扩散接头 TC4 侧微观组织<sup>[16]</sup>

Fig.3 Interfacial microstructure at TC4 side of TC4/HEA/316L diffusion bonded joint at different diffusion temperature<sup>[16]</sup>

TC4/316L 异质金属, 结果表明, HEA/316L 界面以固溶体形式达成高可靠冶金连接, 而 TC4/HEA 界面区均生成了 Ti 基金属间化合物, 如图 3 所示, 化合物反应层的厚度随温度的升高而增加。当焊接温度由 860 °C 升高到 1 010 °C 时, TC4/HEA 界面由直线结构转变为锯齿状结构, 有效阻止了裂纹扩展, 使接头得到强化, 最大剪切强度为 214 MPa。

### 1.1.3 复合中间层扩散焊

Cu、Ni 和 Fe 具有良好的固溶性, 因此复合中间层多采用 Cu、Ni 金属结合其他单质金属的形式扩散焊接钛/钢。Kundu 等<sup>[17]</sup>采用 Cu/Ni 复合中间层扩散连接双向不锈钢 (DSS)/TC4 钛合金异质金属 (图 4a)。在 875 °C 焊接温度下, Cu/TC4 钛合金界面处生成一系列 Cu-Ti 金属间化合物, 而 DSS/Ni 和 Ni/Cu 界面处无金属间化合物生成。在 925 °C 时, Cu 中间层无法阻挡 Ni 与 TC4 之间的相互扩散而生成 Ti-Ni 化合物; 在 950 °C 时, 复合中间层失去作用, DSS 和 TC4 钛合金之间发生扩散, DSS/Ni/Cu/TC4 扩散接头在焊接温度为 875 °C 时获得最大剪切强度 377 MPa, 断裂发生于 Cu/TC4 侧的  $\text{Cu}_4\text{Ti}$  金属间化合物处。霍立鹏等<sup>[18]</sup>同样采用了 Cu/Ni 复合中间层的方法焊接 TC4/1Cr18Ni9Ti, 当焊接温度为 860 °C 时, Ni 能有效阻止 Ti 和 Cu 之间的相互扩散, 其拉伸强度为 300 MPa。Wang 等<sup>[19]</sup>设计了新型的 AlCoCrNiCuAg/Cu 高熵复合中间层, 用于 TC4/316L 之间的真空扩散连

接, 如图 4b 示, 在 1 010 °C/90 min 时, 接头组织为 TC4/ $\beta\text{-Ti}/\beta\text{-Ti}+\text{TiFe}/\text{TiFe}_2+\chi+\sigma/\alpha\text{-Fe}+\chi+\sigma/316\text{L}$ 。随着焊接温度的升高, Cu 固溶分散于 Ti-Fe 相中, 在 1 010 °C/90 min 时, 接头剪切强度达到最高 222.8 MPa, 接头脆性断裂于  $\text{TiFe}_2+\chi+\sigma/\beta\text{-Ti}+\text{TiFe}$  界面。Li 等<sup>[20]</sup>采用 Nb/Cu/Ni 复合中间层扩散连接纯钛/304SS, 如图 4c 所示。Ni 原子向 Cu-Nb 界面聚集, 提高了 Cu 在 Nb 中的溶解度, 产生了 Cu-Nb 固溶强化效应, 接头达到最高剪切强度 300 MPa。Lee 等<sup>[21]</sup>采用 3 个连续的 V/Cr/Ni 复合中间层扩散焊接 Ti Gr.2/UNSS31254, 如图 4d 所示, 在 900 °C/10 min 条件下形成有效连接, 在焊缝中没有发现 Ti 基金属间化合物, 接头强度超过了钛母材强度, 约为 480 MPa。选用合适的复合中间层组合可完全阻挡金属间化合物的形成, 在钛/钢异质连接中发挥着重要作用。

### 1.1.4 特殊工艺扩散焊

Li 等<sup>[22]</sup>采用 Ta/Ni 复合中间层对钢粉末 G33/Ti-7Al-1Mo-0.5V-0.1C 钛合金进行了扩散连接, 在接头中生成了具有高剪切强度和模量的 Ta-Ni 化合物, 实现了可靠冶金连接, 所得到的接头剪切强度为 485.5 MPa。Yu 等<sup>[23]</sup>在激光辅助下扩散焊接 Ti6Al4V/301SS, 并在接头中添加 Ni 夹层, 通过调整焊接参数, 被激光照射的 301SS 未完全穿透, SS/Ni 和 Ni/Ti 界面由于间接加热而发生冶金连接。随着激光功率的增加, 剩余 Ni 中间层的厚度逐渐减小, 反应层作为 2 种母材

混合的壁垒, 阻止了 TiC 的形成, 接头的抗剪强度先增后减, 接头的最大抗剪强度为 269.8 MPa。Bi 等<sup>[24]</sup>采用 Monel 400 (63% Ni, 30% Cu, 1%~2%Fe, 质量分数) 中间层和激光扩散焊接方法焊接 TC4/304SS,

通过对 Monel 中间层与焊接工艺参数的精准控制, 极大限制了接头中 Fe-Ti 金属间化合物的产生, 提升了接头强度, 接头在 Monel400-Ti 合金界面处断裂, 最大抗拉强度为 216 MPa。

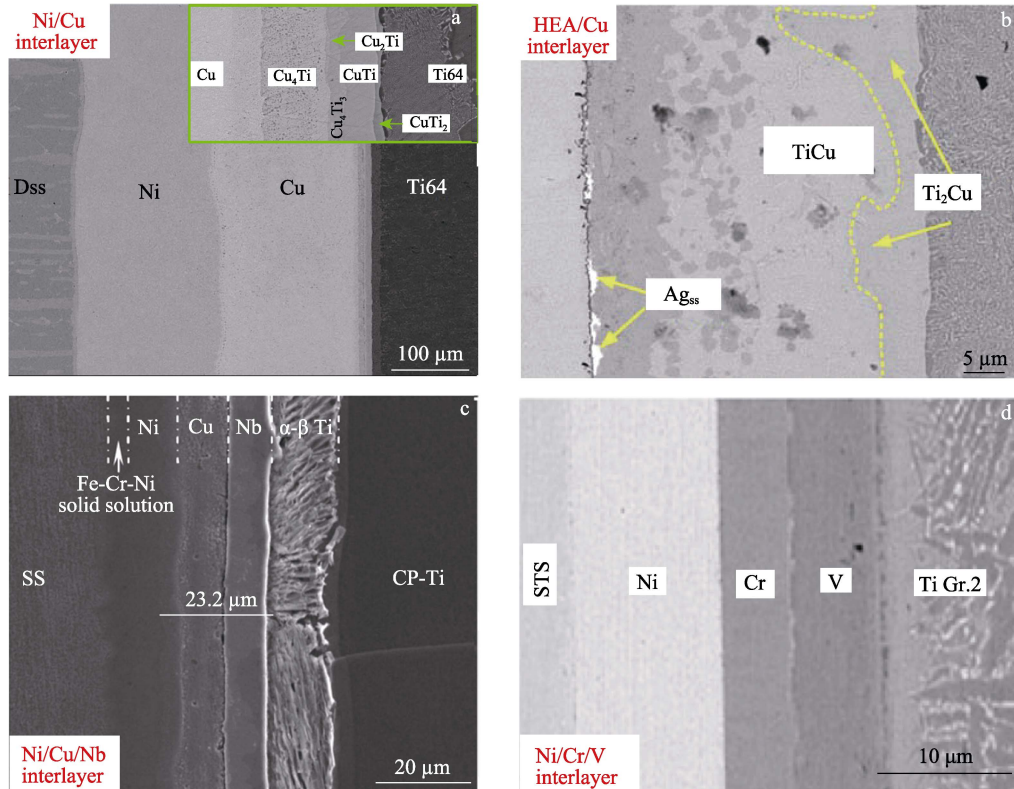


图 4 采用不同复合中间层的钛/钢扩散焊接头界面组织<sup>[17,19-21]</sup>

Fig.4 Interfacial microstructure of Ti/Fe diffusion bonded joint via various interlayers<sup>[17,19-21]</sup>

采用不同中间层的钛/钢扩散焊接头性能及断裂情况如表 2 所示。当无中间层扩散焊连接钛/钢时, 接头界面大量生成了以 Ti-Fe 为主的金属间化合物脆

性相, 因此中间层的添加是实现钛/钢高质量扩散焊的必由之路。然而, 中间层的加入引发的问题也值得关注, 例如接头的耐腐蚀性、导电性、导热性等, 其

表 2 钛/钢扩散焊接头性能总结

Tab.2 Summary of titanium/steel diffusion bonded joints

Interlayer type	Base metals	Interlayer materials	Joint strength /MPa	Fracture location
None	TC4/316L <sup>[8]</sup>	—	43.01	Mixed IMCs
	TC4/Duplex SS <sup>[12]</sup>	—	194.3	Mixed IMCs
Single interlayer	CP-Ti/304SS <sup>[14]</sup>	Pure Cu	318	—
	CP-Ti/304SS <sup>[15]</sup>	Pure Ni	311	—
	TC4/1Cr18Ni9Ti <sup>[25]</sup>	LF6	183	—
Multi interlayer	TA2/1Cr18Ni9Ti <sup>[26]</sup>	Ni/Nb	261	Ni/Nb interface
	TC4/1Cr18Ni9Ti <sup>[18]</sup>	Ni/Cu	285	Ni/Cu interface
	TC4/316L <sup>[19]</sup>	HEA/Cu	222.8	TiFe layer
	CP-Ti/UNSS31254 <sup>[21]</sup>	Ni/Cr/V	480	Ti side
	CP-Ti/304SS <sup>[20]</sup>	Nb/Cu/Ni	300	—
Other	TA2/20# <sup>[27]</sup>	V/Cr	252	V/Cr interface
	G33/Ti7Al1Mo0.5V0.1C <sup>[22]</sup>	Ta/Ni	485.5	—
	TC4/304SS <sup>[24]</sup>	Monel400	216	Monel400/Ti interface
	TC4/301SS <sup>[23]</sup>	Ni	269.8	—

实际应用价值有待检验。

## 1.2 摩擦焊

在摩擦焊时,焊接母材完全不发生熔化,当焊件加热到塑性状态后,表面原子相互扩散使母材形成冶金结合,焊接时间短,加工效率高,接头性能可靠<sup>[28]</sup>。

### 1.2.1 旋转摩擦焊

目前钛/钢旋转摩擦焊常用 TiAl 基合金/Ti 基固溶体合金和高强钢/不锈钢的连接。Dey 等<sup>[29]</sup>研究了钛/AISI304 旋转摩擦焊接,研究表明,焊态接头弯曲性能几乎为 0,在热处理条件下,由于应变强化和残余应力的存在,接头可弯曲至 5°。Dong 等<sup>[30]</sup>研究了 TiAl 合金/42CrMo 钢棒的直接摩擦焊连接,在界面上检测到 2~5 μm 厚、由 Ti<sub>2</sub>Fe、TiAl、TiC 相组成的化合物反应层,在 580 °C/2 h 热处理条件下得到接头拉伸强度为 405 MPa,化合物在界面形成精细的碎屑,有效提升了接头强度。Lee 等<sup>[31]</sup>采用摩擦焊连接 TiAl 合金/AISI4140,顶锻压力为 300~460 MPa,AISI4041 侧因热力作用形成了精细的珠光体组织,焊缝外侧区域相对于中心区域发生了严重塑性变形,接头剪切强度最高为 120 MPa。

Li 等<sup>[32]</sup>采用旋转摩擦焊接方法制备了 Ti6Al4V/SUS321 异质接头。界面微观组织形貌如图 5 所示,抗拉强度随摩擦时间的延长而增大。当摩擦时间为 4 s 时,最大平均强度为 560 MPa。化合物反应层厚度随摩擦时间的延长而增加,最大达到 3 μm,在此范围以下有利于接头形成强烈的冶金结合。然而,较长的摩擦时间会导致 Ti6Al4V 侧的金属间化合物过度生长,从而损害接头性能,应予严格控制。Sheykhi 等<sup>[33]</sup>通过改变不同的顶锻压力研究了 Cr 中间层对

CP-Ti/AISI304 异质摩擦焊接头硬度和强度的影响,研究表明,在添加 Cr 中间层和高顶锻压力时,接头强度得到提升,并减少了焊缝中脆性金属化合物的生成,钛侧发生了动态再结晶的现象。当顶锻压力为 350 MPa 时,焊缝区的脆性化合物被挤出,接头强度达到最高。Impero 等<sup>[34]</sup>研究了 TC4 与 304SS/316 的摩擦焊,研究表明,2 种接头的微观组织形态一致,在钛侧发现了马氏体区域,该区域因快速淬火而形成,且产生了明显的塑性流动。TC4/316 焊缝中存在裂纹,这是由于 Mo 元素促进了金属间化合物生成,而在 TC4/304 焊缝中则无裂纹形成。Prasanthi 等<sup>[35]</sup>采用旋转摩擦焊工艺连接低碳钢/钛,发现只有细小的 FeTi 颗粒形成于 MS/Ti 界面的扩散区。Li 等<sup>[36]</sup>研究了 TC4/316L 旋转摩擦焊接头焊态和焊后热处理条件下的不均匀界面结构和力学性能,研究表明,整个焊缝的拉伸强度为 117 MPa,在 600 °C/2 h 热处理条件下,拉伸强度提升到 419 MPa。

### 1.2.2 搅拌摩擦焊

Liao 等<sup>[37]</sup>研究了商业纯钛/钢搅拌摩擦焊接头的微观组织,如图 6a 所示。界面上形成了旋涡状的宏观混合区。在宏观混合区,α-Ti 和 Fe 以漩涡形貌混合;在微观混合区,细小的 Fe-Ti 颗粒分散在界面上。West 等<sup>[38]</sup>采用搅拌摩擦焊的方法连接 TiNi 合金/304SS 不锈钢,界面中无金属间化合物生成,母材两侧的搅拌区晶粒得到细化,接头最高拉伸强度达 705.3 MPa。Deng 等<sup>[39]</sup>同样对 NiTi/TC4 异质金属分别进行了常规搅拌摩擦焊与背加热辅助摩擦焊研究,研究表明,传统搅拌摩擦焊接时,母材流动性不足和焊接应力导致焊缝开裂缺陷,很难获得良好的接头。然而,在背热辅助搅拌摩擦焊过程中,当预热温度为 200 °C 时,获得了无缺陷的接头。

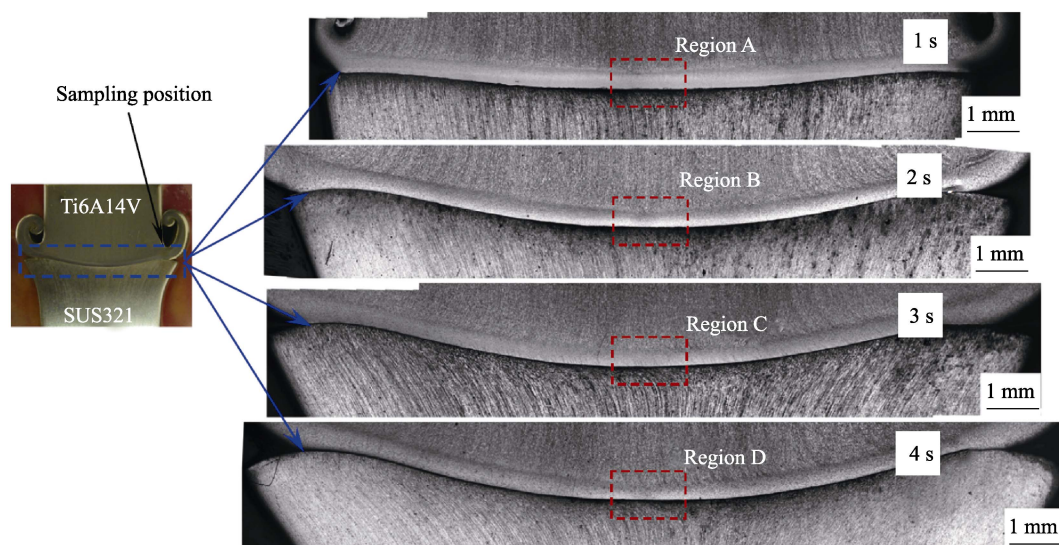


图 5 不同焊接时间下的钛/钢旋转摩擦焊接头界面特征<sup>[31]</sup>

Fig.5 Interfacial features of titanium/steel rotary friction-welded joint at various welding times<sup>[31]</sup>

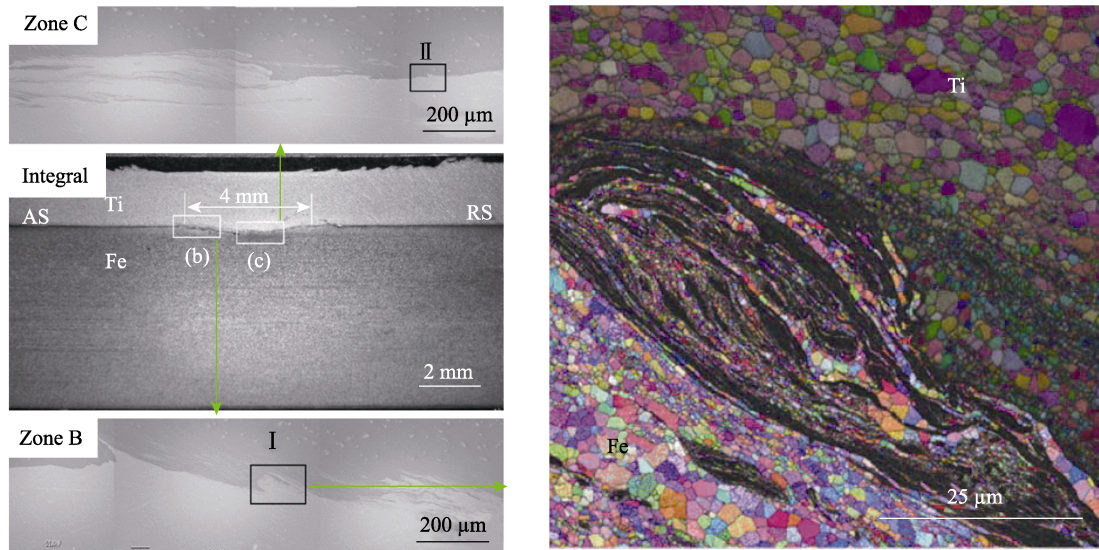


图 6 钛/钢搅拌摩擦焊接头界面组织形态<sup>[37]</sup>  
Fig.6 Interfacial morphology of titanium/steel friction stir welded joint<sup>[37]</sup>

在钛/钢接头强度方面, 摩擦焊是其他方法难以比拟的, 但是接头应力集中明显, 服役可靠性难以保证。因此, 需对钛/钢摩擦焊接头进行焊后热处理, 这无疑限制了摩擦焊的应用范围。而且, 受制于搅拌头材质, 关于钛/钢搅拌摩擦焊的研究较少, 对工艺、机理、搅拌头加工的进一步深入研究必不可少。

### 1.3 爆炸焊

爆炸焊是焊接异质复合材料的一种优良的连接技术, 是制备钛/钢复合板的重要方法<sup>[40]</sup>。Chu 等<sup>[41]</sup>研究了爆炸焊焊接 TA1/Q235 钢接头的界面结果及力

学性能, Ti/Fe 界面上的 TEM 结果如图 7 所示, 其接头界面呈波浪结构, 在其熔化区观察到  $Fe_2Ti$  金属间化合物与  $FeTi+Fe$  相的混合物, 复合材料的抗拉强度为 530 MPa。Xie 等<sup>[42]</sup>采用爆炸焊热轧法制造了 CP-Ti/X65 双金属板, 结果表明, X65 横截面界面有一定范围的 Ti 扩散层和脱碳层, 其他区域呈带状形态。在界面上存在部分空隙, 并伴有富 C 元素区域形成, CP-Ti 界面周边分为一定区域的 Fe 扩散区及残余绝热剪切带区, 其他区域则由  $\alpha$ -Ti 组成。

Song 等<sup>[43]</sup>对钛/钢板爆炸焊焊缝微观组织进行了研究, 研究表明, 界面区域由 4 个连续层次的反应层

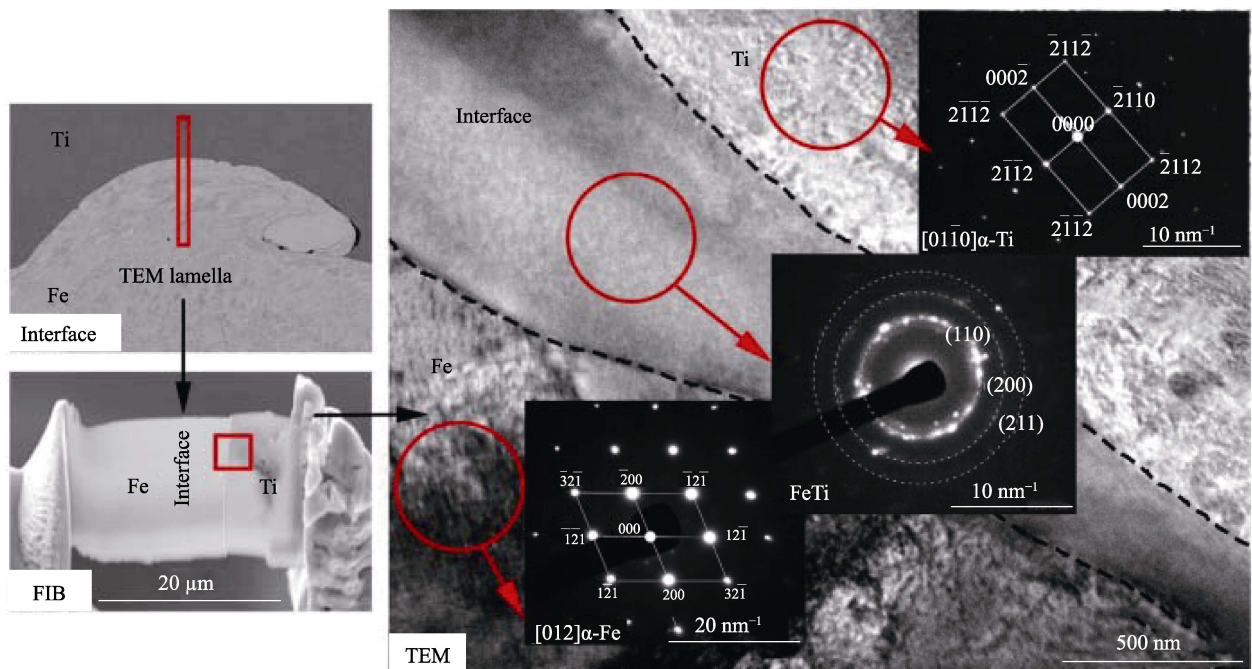


图 7 钛/钢爆炸焊界面透射 (TEM) 表征结果<sup>[41]</sup>  
Fig.7 Interfacial TEM results of titanium/steel explosive welding<sup>[41]</sup>

组成,有  $\text{FeTi}$  和  $\text{Fe}_{9.64}\text{Ti}_{0.36}$  化合物产生,这些化合物并没有扩散到母材焊缝中,并发现了由纳米晶体组成的反应层。Akbari 等<sup>[44]</sup>研究了不同爆炸载荷下 CP-Ti/AISI304 连接界面的微观特征,低载荷爆炸焊接时界面呈平面型,波状界面在高载荷爆炸焊接时出现,且波长与波幅随着载荷的增加而增加,焊缝中晶粒在爆炸冲击作用下得到细化,界面处有少量金属间化合物残留。Maliutina 等<sup>[45]</sup>选用 Cu 作中间层对钛/不锈钢进行了爆炸焊接,通过对焊接界面进行表征发现界面无裂纹,在 Ti、Cu 侧形成了  $5\ \mu\text{m}$  厚的反应层,接头强度超过无 Cu 中间层时焊接的接头强度,这是由于 Cu 中间层缓解了接头残余应力。

爆炸焊产生的高温能粗化钛/钢接头基体和焊缝中晶粒,但是爆炸时产生的冲击力使界面产生塑性变形且具有晶粒细化作用,有利于消除接头的残余应力。爆炸焊是制备钛/钢复合板的首选方法,但是难以适应其他形式的钛/钢接头,尤其是精密焊接结构。

## 2 钎焊

采用钎焊连接异质金属的优势在于:钎料成分调控范围广;试样整体加热,残余应力小;钎焊接头形式多样;可连接难熔高熔点金属。因此,钎焊是连接钛/钢等异质金属组配的优势手段之一。用于钛/钢钎焊的常见钎料有 2 种:银基钎料和钛基钎料,国内多学者对此 2 种钎料钎焊钛/钢异质金属开展了大量研究。

### 2.1 银基钎料

银基钎料一般是以 Ag-Cu 共晶合金为基体的二元

或多元合金,具有熔点低、润湿性和填缝性能优良、塑性高等优点,是钎焊异质金属的主要钎料之一<sup>[46]</sup>。Yue 等<sup>[47]</sup>选用 Ag-26.7Cu-4.6Ti 钎料钎焊 TC4/1Cr18Ni9Ti,发现在  $920\ \text{°C}/5\ \text{min}$  条件下,剪切强度为 188 MPa;当钎焊温度升高到  $980\ \text{°C}$  时,剪切强度下降到 123 MPa,且发生了脆性断裂;在  $920\ \text{°C}/10\ \text{min}$  钎焊条件下,Cu-Ti 化合物过度生长。Han 等<sup>[48]</sup>采用 72Ag-28Cu 钎料在通电条件下钎焊连接 TA15/304SS 异质金属。如图 8 所示,304SS/72Ag-28Cu/TA15 接头微观组织分为 3 个反应区。在 TA15 一侧,Cu 原子向 Ti-Cu 反应层扩散,在焊缝形成了更多的 Cu 固溶体,较高的电流促进了 TA15 合金的溶解和 Ti 的扩散,导致 Ti-Cu 化合物快速生长。在 2.0 mA 的电流下,接头最大剪切强度约 188.6 MPa,并断裂于 Ti-Cu 反应层。Shiue 等<sup>[49]</sup>分别使用 72Ag-28Cu 和 63Ag-35.25Cu-1.75Ti (质量分数) 2 种银基钎料与镀 Ni 层/镀 Cr 层对 TC4/17-4PH 异质金属进行红外真空钎焊,结果表明,无论是镀 Ni 还是镀 Cr 都能有效阻止 Ti 和 Fe 之间的界面反应,提高了接头的剪切强度。Lee 等<sup>[50]</sup>指出,Ag 能阻止 Ti 向焊缝区扩散,选用了 Ti-Ag/Ag 固溶体钎料对钛/不锈钢钎焊,获得了强度较高的焊接接头,强度达到 440 MPa,断裂位于 Ag 基固溶体反应层。张鹏贤等<sup>[51]</sup>分别采用镀 Ni 与 Cr、V 粉介入的方法对 TC4 钛合金/304 不锈钢真空钎焊,选用的钎料为 Ag45CuZn。结果表明,镀 Ni 层有效抑制了 Fe-Ti 相的生成,接头剪切强度达到 118 MPa;而加入 Cr、V 粉能完全消除 Fe-Ti 相的生成,取而代之的是 Cr-Fe 和 Ti-V 组织,接头强度提升至 187 MPa。

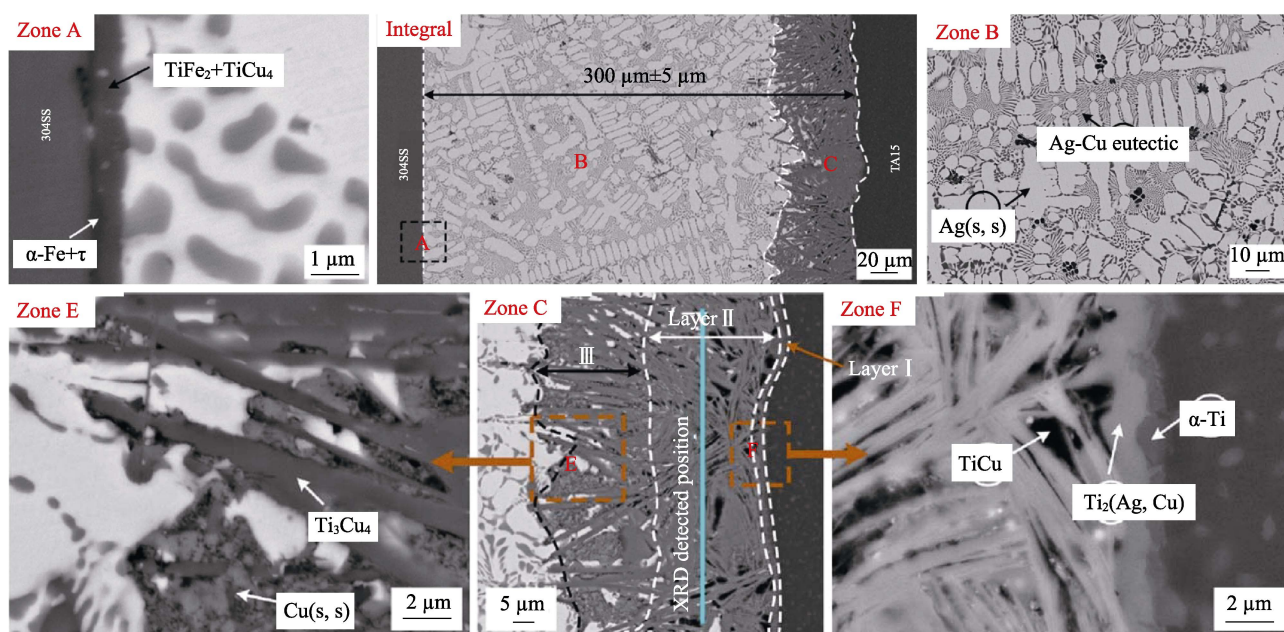


图 8 304SS/72Ag-28Cu/TA15 钎焊接头界面组织形貌<sup>[49]</sup>

Fig.8 Morphology of interfacial microstructure of 304SS/72Ag-28Cu/TA15 brazed joint<sup>[49]</sup>

## 2.2 钛基钎料

钛金属化学性质活泼, 钛基钎料可与大部分金属发生冶金反应, 且钛的比强度高、耐腐蚀, 以钛为主加入锆、铍、锰、钴、铬等元素形成的合金钎料耐腐蚀性能好、润湿性能优异、抗氧化性强, 钎焊钛/钢优势显著<sup>[52]</sup>。邓永强<sup>[53]</sup>选用 Ti-Zr-Cu-Ni 钎料对纯钛/304 不锈钢进行了钎焊, 研究表明, 钎料中 Cu 优先与钛侧发生反应, 在界面处生成 Ti-Cu 共晶组织。延长钎焊时间, 界面中的 Ti-Cu 相数量增加, 导致接头强度降低。在 900 °C 时, 钎料中 Cu、Ti 不断向两侧扩散, 接头中 Cu、Ti 浓度不断降低, 当保温时间为 60 min 时, 无脆性金属化合物, 其接头强度超过母材强度。Miyazawa 等<sup>[54]</sup>选用 Ti-15Cu-15Ni 和 Ti-20Zr-20Cu-20Ni 合金钎料箔片对工业纯钛/钛合金与不锈钢在 850~1 000 °C 下进行钎焊连接。在钎焊过程中, Ni 和 Cu 从熔融钎料扩散到母材, 在钎焊后冷却过程中 Ti-Cu-Ni 发生共晶反应。Xu 等<sup>[55]</sup>设计了  $Ti_{35}Zr_{25}Be_{40-x}Co_x$  ( $x=2, 4, 6, 8, 10$ ) 非晶钎料对 TC4/316L 进行真空钎焊, 接头在不同温度下的钎缝组织如图 9 所示, 当钎焊温度为 910 °C 时, 填料金属没有完全熔化; 当温度升高到 920 °C 时, 钎料熔化充分, 母材与钎料间的元素扩散加速, 形成少量块状相

和树枝状相, 钎焊缝中心区域因 CoNi、TiFe 的形成而增强了接头强度; 在 930 °C/15 min 时, 接头剪切强度最高 (225 MPa)。当温度较低时, 不锈钢母材侧界面发生断裂, 随着温度的升高, 裂纹向中间区域扩展。

朱瑞等<sup>[56]</sup>设计了  $Ti_{35}Zr_{25}Be_{32}Co_8$ 、 $Ti_{35}Zr_{25}Be_{28}Co_{12}$ 、 $Ti_{20}Zr_{20}Hf_{20}Cu_{20}Ni_{20}$  3 种钛基非晶钎料对 TC4/316L 异质金属进行钎焊, 其对应的钎焊接头剪切强度分别为 249、254、200 MPa。夏月庆<sup>[57]</sup>选用  $Ti_{33.3}Zr_{16.7}Cu_{39}Ni_{11}$  非晶钎料连接 TC4/316L, 深入表征了接头界面反应层产物, 如图 10 所示, 其中在钢侧界面共有 3 个较薄的反应层, 分别为  $Fe_2Ti$ 、 $FeCr$ 、 $\alpha-Fe$ 。在 990 °C 钎焊温度下, 接头强度达到最高, 为 318 MPa, 接头于  $FeTi/Fe_2Ti$  界面开裂失效。

不同钎料钎焊钛/钢的性能表现如表 3 所示。可知, 采用 Ag 基钎料和 Ti 基钎料钎焊钛/钢, 通过调控钎料成分和优化钎焊工艺, 钛/钢钎焊接头强度已接近工程服役要求。但接头中脆性化合物的生成仍难以完全避免, 导致其塑性差。同时 Ag 材质价格高, Ag 基钎料抗腐蚀性差, Ti 基钎料难加工, 成本高, 应用场景特殊, 这些因素都导致钛/钢钎焊构件难以大范围使用。降成本、提性能、扩范围是钛/钢未来钎焊的发展重点。

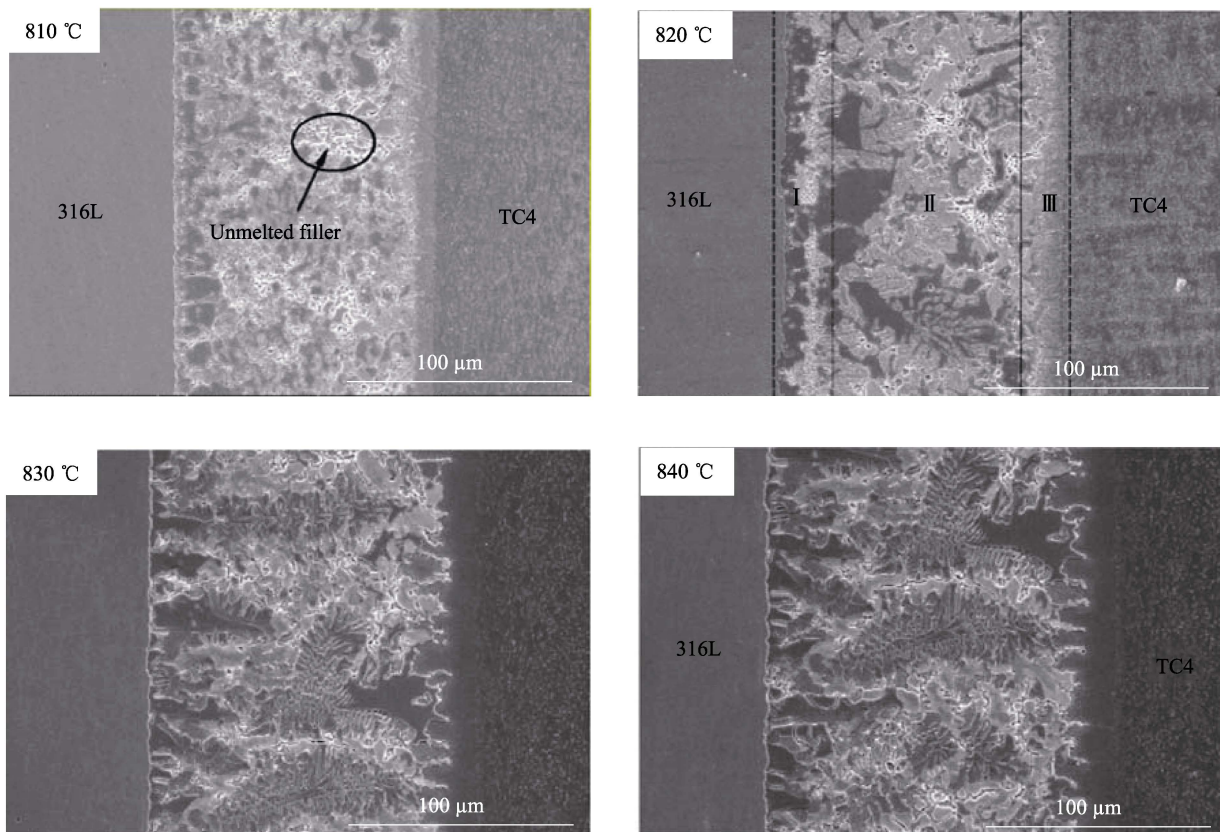


图 9 不同钎焊温度下 316L/ $Ti_{35}Zr_{25}Be_{38}Co_2$ /TC4 钎焊界面微观组织<sup>[55]</sup>

Fig.9 Interfacial microstructure of 316L/ $Ti_{35}Zr_{25}Be_{38}Co_2$ /TC4 brazed joint at various welding temperature<sup>[55]</sup>

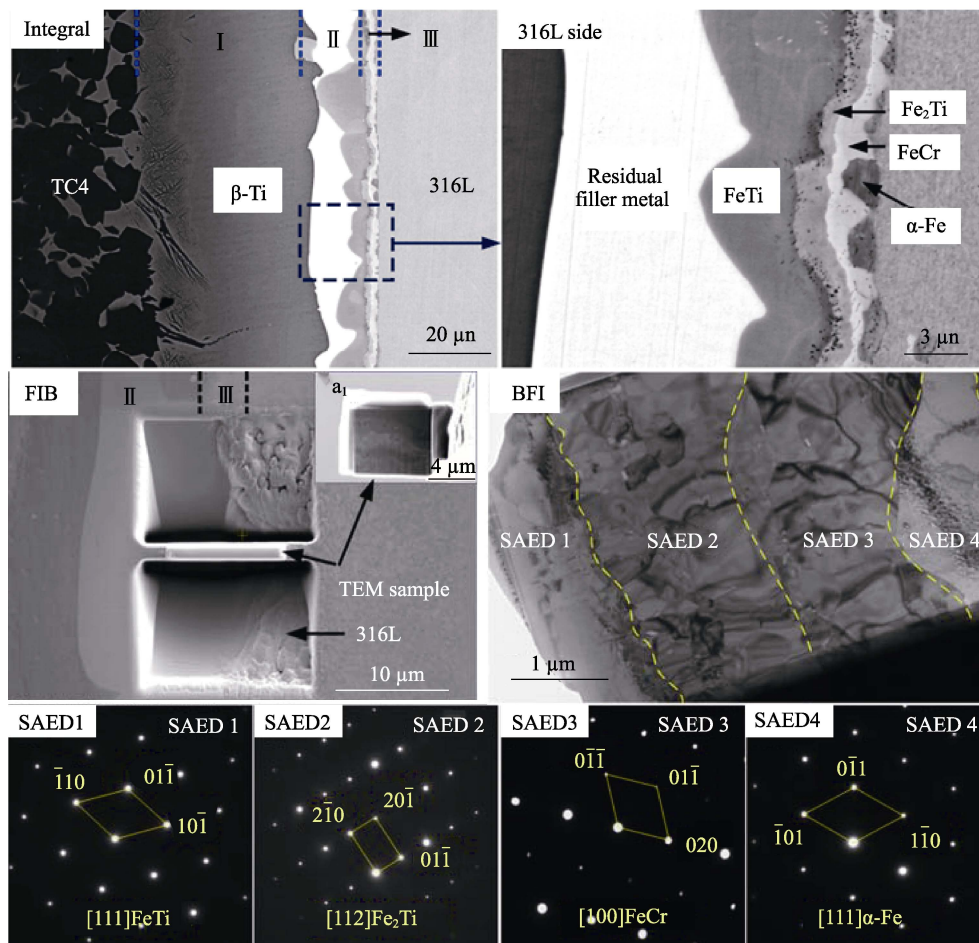


图 10 TC4/Ti<sub>33.3</sub>Zr<sub>16.7</sub>Cu<sub>39</sub>Ni<sub>11</sub>/316L 钎焊接头界面微观组织<sup>[57]</sup>  
Fig.10 Interfacial microstructure of TC4/Ti<sub>33.3</sub>Zr<sub>16.7</sub>Cu<sub>39</sub>Ni<sub>11</sub>/316L brazed joint<sup>[57]</sup>

表 3 钛/钢钎焊接头性能总结  
Tab.3 Summary of titanium/steel brazed joints

Filler metal	Base metals	Filler metals	Joint strength/MPa	Fracture location
Ag-based	TC4/304SS <sup>[51]</sup>	Ag45CuZn3.5Ni	467	Eutectic
	Gr.2Ti/UNSS31254 <sup>[58]</sup>	Ag-28Cu	<100	TiFeIMC
	CP-Ti/304L <sup>[59]</sup>	Ag-28Cu	112	Welding seam
	TC4/316L <sup>[60]</sup>	Ag-25Cu-25Z	85	—
	TC4/1Cr18Ni9Ti <sup>[47]</sup>	Ag-26.7Cu-4.6Ti	188	Ag-rich zone
	AlTi/35CrMo <sup>[61]</sup>	AgCuNiLi	158	Ti(Cu Al) <sub>2</sub>
	TC4/17-4Ph <sup>[49]</sup>	63Ag-35.25Cu-1.75Ti	233	—
	TA1/304SS <sup>[62]</sup>	Ag-Cu-Ni	148.5	Welding seam interface
Ti-based	Ti/STS <sup>[50]</sup>	Ti-Ag/Ag <sub>ss</sub>	440	Ag <sub>ss</sub>
	CP-Ti/SS <sup>[54]</sup>	Ti15Cu15Ni/Ti20Zr20Cu20Ni	222	—
	TiAl/42Cr <sup>[63]</sup>	Ti <sub>42.5</sub> Zr <sub>32.5</sub> Cu <sub>8</sub> Ni <sub>6</sub> Co <sub>6</sub>	110	—
	TiAl/42CrMo <sup>[64]</sup>	Ti-15Cu-15Ni	95.1	Welding seam
	TC4/316L <sup>[57]</sup>	Ti-Zr-Cu-Ni-V	70	TiFe/TiFe <sub>2</sub> interface
TC4/316L <sup>[65]</sup>	Ti-Cr-Cu-Ni-Co	310	Middle welding seam	

### 3 结语与展望

压力焊在调控钛/钢异质接头中脆性化合物形成

方面表现出色, 通过压力焊可获取较高强度钛/钢异质接头。但是压力焊接头形式受限严重, 采用某些复合中间层组合虽然可以阻止 Ti-Fe 脆性相的生成, 但是多种中间层的介入会导致接头电偶腐蚀的产生, 削

弱接头的耐腐蚀性, 同时也会对接头其他性能(例如导电性)带来不利影响。采用钎焊连接钛/钢, 所获得接头的力学性能优势也较为明显, 但是脆性化合物的生成仍然给钛/钢异质结构的应用带来巨大挑战。

截至目前, 钛/钢异质金属接头强度已逼近工程应用要求, 但是无论采用压力焊还是钎焊方法, 钛/钢接头塑韧性差的瓶颈一直存在, 这对承受交变载荷工况的钛/钢异质结构可靠性来说是致命的。其根本原因在于, 钛/钢接头中生成了多种连续的反应层, 连续反应层有时相互依附生成, 形成连续物相界面。界面两侧物相物性存在一定差异, 连续的反应层及其连续界面势必极易导致接头裂纹快速萌生和裂纹急速扩展, 从而极大影响接头韧性。针对钛/钢连接在技术与理论上存在的难题, 可从以下几个方面进行攻关:

1) 调控中间层/钎料成分组成, 调节反应物相。干预脆性化合物的生成类别及生长方式, 以韧性较高的冶金产物取代脆性较高的反应物相, 同时定向调整化合物由层状分布转变为非连续的弥散分布。这样既能避免大面积脆性化合物的不利影响, 同时也可利用脆性化合物的钉扎作用, 强化接头。

2) 外场辅助, 改善反应层形态。单一的焊料成分与焊接工艺调整往往难以实现反应层形态调整。利用电场、磁场、超声等外场焊接过程(元素扩散、液相反应、冷却阶段等)进行实时干预, 可以在优化反应层形态的同时, 使焊接应力得到极大改善。

3) 母材表面构型, 调控界面形态。在接头薄弱侧母材表面加工点阵、纹理等几何宏/微观结构, 而后基于焊接冶金反应, 构建非平直、非连续界面, 切断接头连续应力线, 并改变界面连接机制, 提升接头强韧性能和加工变形承受能力。

随着现代高端装备的快速迭代, 钛/钢异质复合构件的应用需求越来越大, 实现钛/钢异质金属高质量焊接和高可靠应用任重而道远, 攻克钛/钢异质金属焊接壁垒刻不容缓, 这对其他异质材料的高质高效连接与应用具有重大意义。

#### 参考文献:

- [1] 孙清洁, 陶玉洁, 刘一搏, 等. 钛/钢异种金属焊接研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(22): 40-57.  
SUN Q J, TAO Y J, LIU Y B, et al. Review on the Research Progress of Titanium/Steel Dissimilar Metal Welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(22): 40-57.
- [2] 曾欣, 廖东波, 彭必友, 等. 添加中间层的 TC2 钛合金/321 不锈钢真空扩散焊研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(8): 182-189.  
ZENG X, LIAO D B, PENG B Y, et al. Research on Vacuum Diffusion Welding of TC2 Titanium Alloy/321 Stainless Steel with Intermediate Layer Addition[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(8): 182-189.
- [3] 龙伟民, 张雷, 程亚芳. 铝与铜连接技术的研究[J]. 金属加工(热加工), 2008(12): 47-49.  
LONG W M, ZHANG L, CHENG Y F. Study on Connection Technology of Aluminum and Copper[J]. MW Metal Forming, 2008(12): 47-49.
- [4] 李伟东, 史许娜, 李晨阳, 等. 钛及钛合金铸锭制备工艺发展现状[J]. 钛工业进展, 2024, 41(5): 42-48.  
LI W D, SHI X N, LI C Y, et al. Development Status of Preparation Process of Titanium and Titanium Alloy Ingot[J]. Titanium Industry Progress, 2024, 41(5): 42-48.
- [5] NAJAFIZADEH M, YAZDI S, BOZORG M, et al. Classification and Applications of Titanium and Its Alloys: A Review[J]. Journal of Alloys and Compounds Communications, 2024, 3: 100019.
- [6] SUI P, REN B L, WANG J S, et al. Current Situation and Development Prospects of Metallurgical By-Product Gas Utilization in China's Steel Industry[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(74): 28945-28969.
- [7] 梁超. 双相不锈钢管材在海洋石油平台的应用与研究[J]. 化工管理, 2024(21): 158-160.  
LIANG C. Application and Research of Duplex Stainless Steel Pipes on Offshore Oil Platforms[J]. Chemical Enterprise Management, 2024(21): 158-160.
- [8] 邵甄胰, 陈天赐, 宋庭丰, 等. 保温时间对 316L 不锈钢与 TC4 钛合金扩散焊组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(5): 79-85.  
SHAO Z Y, CHEN T C, SONG T F, et al. Effects of Holding Time on Microstructure and Properties of Weld Joints of 316L Stainless Steel and TC4 Titanium Alloy by Diffusion Welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(5): 79-85.
- [9] LI B X, CHEN Z J, HE W J, et al. Effect of Titanium Grain Orientation on the Growth of Compounds at Diffusion Bonded Titanium/Steel Interfaces[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 243-251.
- [10] YANG X Y, GUO K, GAO Y Z, et al. Effect of Carbon Content on Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of a Vacuum Hot-Compressed Bonding Titanium-Steel Composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 824: 141802.
- [11] KUNDU S, SAM S, CHATTERJEE S. Interface Microstructure and Strength Properties of Ti-6Al-4V and Microduplex Stainless Steel Diffusion Bonded Joints[J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 2997-3003.
- [12] VELMURUGAN C, SENTHILKUMAR V, SARALA S, et al. Low Temperature Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V and Duplex Stainless Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 234: 272-279.
- [13] NOROUZI E, SHAMANIAN M, ATAPOUR M, et al. Diffusion Brazing of Ti-6Al-4V and AISI 304: An

- EBSD Study and Mechanical Properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(20): 12467-12475.
- [14] KUNDU S, GHOSH M, LAIK A, et al. Diffusion Bonding of Commercially Pure Titanium to 304 Stainless Steel Using Copper Interlayer[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 407(1/2): 154-160.
- [15] KUNDU S, CHATTERJEE S, OLSON D, et al. Effects of Intermetallic Phases on the Bond Strength of Diffusion-Bonded Joints between Titanium and 304 Stainless Steel Using Nickel Interlayer[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(9): 2053-2060.
- [16] 李超. TC4 钛合金/316L 不锈钢异质金属接头扩散连接高熵合金中间层设计及工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022: 27-32.
- LI C. Design and Process Research of High Entropy Alloy Interlayer for Diffusion Bonding of TC4 Titanium Alloy/316L Stainless Steel Dissimilar Metal Joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022: 27-32.
- [17] KUNDU S, THIRUNAVUKARASU G, CHATTERJEE S, et al. Effect of Bonding Temperature on Phase Transformation of Diffusion-Bonded Joints of Duplex Stainless Steel and Ti-6Al-4V Using Nickel and Copper as Composite Intermediate Metals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(12): 5756-5771.
- [18] 霍立鹏, 李京龙, 李文亚, 等. Ni+Cu 中间层对 TC4 与 1Cr18Ni9Ti 扩散焊接头组织与强度的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008(37): 818-821.
- HUO L P, LI J L, LI W Y, et al. Effect of Ni+Cu Interlayer on Microstructure and Strength of Diffusion Welded Joints of TC4 and 1Cr18Ni9Ti[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008(37): 818-821.
- [19] WANG Y C, LI P, ZHAO C H, et al. A Novel High Entropy Composite Interlayer for Diffusion Bonding of TC4 Titanium Alloy to 316L Stainless Steel[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110291.
- [20] LI P, LI J L, XIONG J T, et al. Diffusion Bonding Titanium to Stainless Steel Using Nb/Cu/Ni Multi-Interlayer[J]. *Materials Characterization*, 2012, 68: 82-87.
- [21] LEE M K, LEE J G, CHOI Y H, et al. Interlayer Engineering for Dissimilar Bonding of Titanium to Stainless Steel[J]. *Materials Letters*, 2010, 64(9): 1105-1108.
- [22] LI C W, FAN Q B, YANG L, et al. Hot-Pressing Sintering Diffusion Bonding of a High-Toughness Titanium Alloy and an Ultra-High-Strength Steel with Ta/Ni Dual-Interlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 3543-3553.
- [23] MENG Y, GU X Y, CUI M, et al. Laser Assisted Diffusion Bonding of TC4 Titanium Alloy to 301 Stainless Steel Using a Ni Interlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 739-748.
- [24] BI Y B, XU Y, LUO Z. Material Characterization and Mechanical Performance of Laser Diffusion Welded Joint between Titanium Alloy and Stainless Steel[J]. *Materials Letters*, 2023, 336: 133927.
- [25] HE P, YUE X, ZHANG J H. Hot Pressing Diffusion Bonding of a Titanium Alloy to a Stainless Steel with an Aluminum Alloy Interlayer[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 486: 171-176.
- [26] 李鹏, 李京龙, 熊江涛, 等. TA2/Ni+Nb 中间层/1Cr18Ni9Ti 扩散焊接头的组织与性能[J]. *航空材料学报*, 2010(30): 25-29.
- LI P, LI J L, XIONG J T, et al. Structure and Properties of Diffusion Bonded TA2 to 1Cr18Ni9Ti Joints with Ni+Nb Composite Interlayer[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010(30): 25-29.
- [27] ZENG S, YOU G Q, LING X, et al. Diffusion Bonding of TA2 Titanium and 20# Steel with Vanadium/Chromium Bimetal Interlayers: Microstructure, Unexpected Carbides, and Mechanical Properties[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 2430-2441.
- [28] ZHANG H, KHOSHNAW F. *Friction Stir Welding*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2023: 197-228.
- [29] DEY H C, ASHFAQ M, BHADURI A K, et al. Joining of Titanium to 304L Stainless Steel by Friction Welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(18/19): 5862-5870.
- [30] DONG H G, YU L Z, DENG D W, et al. Direct Friction Welding of TiAl Alloy to 42CrMo Steel Rods[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(9): 1104-1108.
- [31] LI P, LI J L, SALMAN M, et al. Effect of Friction Time on Mechanical and Metallurgical Properties of Continuous Drive Friction Welded Ti6Al4V/SUS321 Joints[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, 56: 649-656.
- [32] LEE W B, KIM M G, KOO J M, et al. Friction Welding of TiAl and AISI4140[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(3): 1125-1128.
- [33] SHEYKHI M M, MOSTAFAEI M. Optimizing Weld Strength and Microstructure in CP-Titanium and 304 Stainless Steel Friction Welds with Chromium Interlayer[J]. *Results in Materials*, 2024, 24: 100627.
- [34] IMPERO F, SCHERILLO F, ASTARITA A, et al. Study of the Metallurgy of a Dissimilar Ti-6Al-4V Stainless Steel Linear Friction Welded Joints[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 651/652/653: 1427-1432.
- [35] PRASANTHI T N, SUDHA C, RAVIKIRANA, et al. Friction Welding of Mild Steel and Titanium: Optimization of Process Parameters and Evolution of Interface Microstructure[J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 58-68.
- [36] LI P, DONG H G, XIA Y Q, et al. Inhomogeneous Interface Structure and Mechanical Properties of Rotary Friction Welded TC4 Titanium Alloy/316L Stainless Steel Joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 33: 54-63.
- [37] LIAO J S, YAMAMOTO N, LIU H, et al. Microstructure at Friction Stir Lap Joint Interface of Pure Titanium and Steel[J]. *Materials Letters*, 2010, 64(21): 2317-2320.
- [38] WEST P, SHUNMUGASAMY V C, USMAN C A, et al.

- Dissimilar Friction Stir Welding of Nickel Titanium Shape Memory Alloy to Stainless Steel-Microstructure, Mechanical and Corrosion Behavior[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2021, 4: 100072.
- [39] DENG H B, CHEN Y H, JIA Y L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar NiTi/Ti6Al4V Joints via Back-Heating Assisted Friction Stir Welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 379-391.
- [40] SHERPA B B, RANI R. Advancements in Explosive Welding Process for Bimetallic Material Joining: A Review[J]. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 2024, 6: 100078.
- [41] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, et al. Experimental and Numerical Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior of Titanium/Steel Interfaces Prepared by Explosive Welding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 689: 323-331.
- [42] XIE M X, ZHANG L J, ZHANG G F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of CP-Ti/X65 Bimetallic Sheets Fabricated by Explosive Welding and Hot Rolling[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 181-197.
- [43] SONG J, KOSTKA A, VEEHMAYER M, et al. Hierarchical Microstructure of Explosive Joints: Example of Titanium to Steel Cladding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(6): 2641-2647.
- [44] AKBARI MOUSAVI S A A, FARHADI SARTANGI P. Experimental Investigation of Explosive Welding of Cp-Titanium/AISI 304 Stainless Steel[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3): 459-468.
- [45] MALIUTINA I N, BATAEV A A, BATAEV I A, et al. Explosive Welding of Titanium with Stainless Steel Using Bronze-Tantalum as Interlayer[C]// 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Cox's Bazar, Bangladesh. IEEE, 2014: 436-439.
- [46] LONG W M, ZHANG G X, ZHANG Q K. In Situ Synthesis of High Strength Ag Brazing Filler Metals during Induction Brazing Process[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 110: 41-43.
- [47] YUE X, HE P, FENG J C, et al. Microstructure and Interfacial Reactions of Vacuum Brazing Titanium Alloy to Stainless Steel Using an AgCuTi Filler Metal[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(12): 1721-1727.
- [48] HAN K, WANG T, CHANG S J, et al. Interface Characteristics and Mechanical Property of Titanium/Steel Joint by Electron Beam Brazing with 72Ag-28Cu Filler Metal[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: 58-67.
- [49] SHIUE R K, WU S K, SHIUE J Y. Infrared Brazing of Ti-6Al-4V and 17-4 PH Stainless Steel with (Ni)/Cr Barrier Layer(s)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 488(1/2): 186-194.
- [50] LEE J G, LEE M K. Microstructure and Mechanical Behavior of a Titanium-to-Stainless Steel Dissimilar Joint Brazed with Ag-Cu Alloy Filler and an Ag Interlayer[J]. *Materials Characterization*, 2017, 129: 98-103.
- [51] 张鹏贤, 马驰原, 于海宇. 镀 Ni 层对钛/钢钎焊接头原子扩散行为的影响机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(2): 449-453.
- ZHANG P X, MA C Y, YU H Y. Influencing Mechanism of Ni Clad Layer on Atomic Diffusion Behavior of Titanium/Steel Brazing Joints[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(2): 449-453.
- [52] LU Q B, LONG W M, ZHONG S J, et al. TZM/Graphite Interface Behavior in High-Temperature Brazing by Ti-Based Brazing Filler Materials[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(11): 1877-1885.
- [53] 邓永强. 纯钛及 Ti-6Al-4V 合金及其与 304 不锈钢及 Inconel 镍基合金的连接研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 46-57.
- DENG Y Q. Study on Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy and Their Connection with 304 Stainless Steel and Inconel Nickel-based Alloy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 46-57.
- [54] MIYAZAWA Y, CHANG C S, SATO H, et al. Brazing of CP-Titanium/CP-Titanium and Titanium Alloy/Stainless Steel with Laminated Ti-Based Filler Metal[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 539/540/541/542/543: 4031-4035.
- [55] CAO X, DONG K W, ZHU R, et al. A High-Strength Vacuum Brazed TC4/316L Joint with a Ti-Zr-Based Amorphous Ribbon as the Filler Metal[J]. *Vacuum*, 2021, 187: 110070.
- [56] 朱瑞. TC4 钛合金-316L 不锈钢钎焊与热塑连接研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021: 11-12.
- ZHU R. Study on Brazing and Thermoplastic Joining of TC4 Titanium Alloy-316L Stainless Steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021: 11-12.
- [57] 夏月庆. Ti-Cu 基钎料设计及钛合金/不锈钢真空钎焊机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 44-47.
- XIA Y Q. Design of Ti-Cu Based Solder and Study on Vacuum Brazing Mechanism of Titanium Alloy/Stainless Steel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 44-47.
- [58] LEE J G, HONG S J, LEE M K, et al. High Strength Bonding of Titanium to Stainless Steel Using an Ag Interlayer[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 395(1/2/3): 145-149.
- [59] LAIK A, SHIRZADI A A, SHARMA G, et al. Microstructure and Interfacial Reactions during Vacuum Brazing of Stainless Steel to Titanium Using Ag-28pct Cu Alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(2): 771-782.
- [60] SOLTANI T R, AKBARI M S A A, MAZAR A M. Diffusion Brazing of Ti-6Al-4V and Austenitic Stainless Steel Using Silver-Based Interlayer[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, 54: 161-167.
- [61] 许威, 何景山, 冯吉才. TiAl/Ag-Cu-Ni-Li/35CrMo 感应钎焊接头的组织特征[J]. *焊接学报*, 2005, 26(3): 13-16.

- XU W, HE J S, FENG J C. Microstructure Characteristics of Induction Brazed TiAl/35CrMo Joint with Ag-Cu-Ni-Li Filler Metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(3): 13-16.
- [62] YAO Y J, HAN Y, ZHANG K Y, et al. The Dependence of Fracture Mode on Interfacial Microstructure in TA1 Pure Titanium/AgCuNi/304 Stainless Steel Vacuum Brazed Joints[J]. Vacuum, 2022, 203: 111318.
- [63] 刘景峰, 朱颖, 康慧, 等. 不同钎料对 TiAl 基合金与 40Cr 钎焊接头强度的影响[J]. 焊接, 2004(2): 34-36.
- LIU J F, ZHU Y, KANG H, et al. Effect of Filler Metals on Shear Strength of Ti-Al Based Alloy and 40Cr Steel Brazing Joint[J]. Welding & Joining, 2004(2): 34-36.
- [64] 陈波, 熊华平, 毛唯, 等. 采用 Ti-15Cu-15Ni 钎料的 TiAl/42CrMo 钢接头组织及形成机理[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 317-318.
- CHEN B, XIONG H P, MAO W, et al. Microstructure and Bonding Mechanism of TiAl/42CrMo Steel Joints Using Ti-15Cu-15Ni Filler Metal[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 317-318.
- [65] 韩文倩, 董红刚, 马月婷, 等.  $Ti_{43.76}Zr_{12.50}Cu_{(37.49-x)}Ni_{6.25}Co_x$  非晶钎料真空钎焊 TC4 钛合金/316L 不锈钢 [J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 47-57.
- HAN W Q, DONG H G, MA Y T, et al. Vacuum Brazing TC4 Titanium Alloy/316L Stainless Steel with  $Ti_{43.76}Zr_{12.50}Cu_{(37.49-x)}Ni_{6.25}Co_x$  Amorphous Filler Metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 47-57.