



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.09

钛合金/不锈钢异种金属连接中间层的研究进展

蒋文天¹, 芦丽莉^{1*}, 徐睦忠², 王璐³, 陈浩瀚¹, 刘自刚², 丁涛¹,
谭超², 刘自豪¹, 姜忠礼²

1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610023
2. 浙江巴顿焊接技术研究院, 浙江 杭州 313100
3. 四川大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610065

摘要: 钛合金/不锈钢异种金属构件综合了钛合金的高比强度、耐腐蚀性和不锈钢的力学性能及经济性, 在航空航天、核能、石油化工等领域具有重要的工程应用价值。然而, 由于Ti与Fe的物理化学性能差异显著, 直接焊接时不可避免地生成TiFe、TiFe₂等脆性金属间化合物(IMCs), 导致接头开裂、性能劣化。添加金属中间层被认为是抑制脆性IMCs、实现钛/钢高质量连接的有效途径。本文从中间层材料体系的角度, 系统综述了纯金属、合金、复合金属及高熵合金四类中间层在钛/钢异种金属连接中的研究进展, 重点梳理了各类中间层的设计原则、界面反应机制及对接头力学性能的影响规律, 并通过对比分析揭示了不同中间层体系的适用性与局限性。综述发现, 纯金属中间层成分简单、界面反应可控, 但难以同时兼顾Ti侧和Fe侧的冶金相容性; 合金中间层可通过成分设计调控界面产物, 但多元合金自身仍形成脆性相; 复合金属中间层采用“功能梯度”策略分段匹配两侧相容性, 接头性能整体最优, 但对层间界面控制精度要求较高; 高熵合金中间层利用高熵效应和迟滞扩散效应从源头抑制脆性相生成, 虽研究尚处于初期, 但发展潜力较大。在此基础上, 从新型低铜低钴中间层开发及界面IMCs生成与生长机理研究等方面展望了未来研究方向, 以期高性能钛/钢异种金属连接的结构设计与工程应用提供参考。

关键词: 钛合金/不锈钢; 异种金属连接; 中间层; 金属间化合物; 高熵合金

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0071-10

Research Progress on Interlayers for Joining Titanium Alloy/Stainless Steel Dissimilar Metals

JIANG Wentian¹, LU Lili^{1*}, XU Muzhong², WANG Lu³, CHEN Haohan¹, LIU Zigang², DING Tao¹,
TAN Chao², LIU Zihao¹, JIANG Zhongli²

1. Nuclear Powder Institute of China, Chengdu 610023, China
2. Zhejiang E.O. Paton Welding Technology Research Institute, Hangzhou 313100, China
3. School of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Titanium alloy/stainless steel dissimilar metal components combine the high specific strength and corrosion resistance of titanium alloys with the mechanical performance and economic efficiency of stainless steel, possessing significant

收稿日期: 2025-04-11 修回日期: 2025-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0201400)

作者简介: 蒋文天(1997—), 硕士, 研究实习生, 主要从事金属材料焊接及增材制造方面研究。E-mail: 3466318778@qq.com。

通讯作者: 芦丽莉(1983—), 硕士, 研究员, 主要从事金属材料焊接及可靠性方面研究。E-mail: lulu1021@163.com。

engineering application value in aerospace, nuclear energy, petrochemical and other fields. However, due to the significant differences in physical and chemical properties between Ti and Fe, direct welding inevitably produces brittle intermetallic compounds (IMCs) such as TiFe and TiFe₂, leading to joint cracking and performance degradation. The addition of metallic interlayers is considered an effective approach to suppress brittle IMCs and achieve high-quality Ti/steel joints. From the perspective of interlayer material systems, this paper systematically reviews the research progress of four types of interlayers — pure metals, alloys, composite metals, and high-entropy alloys — in the joining of Ti/steel dissimilar metals, focusing on the design principles, interfacial reaction mechanisms, and effects on joint mechanical properties of each interlayer category, and revealing the applicability and limitations of different interlayer systems through comparative analysis. The review finds that pure metal interlayers have simple compositions and controllable interfacial reactions, but are difficult to simultaneously accommodate the metallurgical compatibility on both the Ti side and the Fe side; alloy interlayers can regulate interfacial products through composition design, yet the multi-element alloys themselves still form brittle phases; composite metal interlayers adopt a "functionally graded" strategy to match the compatibility of both sides in stages, achieving the best overall joint performance, but requiring higher precision in controlling inter-layer interfaces; high-entropy alloy interlayers utilize the high-entropy effect and sluggish diffusion effect to suppress brittle phase formation from the source, and although research is still in its early stage, they hold considerable development potential. On this basis, future research directions are prospected from the aspects of developing novel low-copper low-cobalt interlayers and elucidating the generation and growth mechanisms of interfacial IMCs, aiming to provide references for the structural design and engineering application of high-performance Ti/steel dissimilar metal joints.

Keywords: titanium alloy/stainless steel; dissimilar metal joining; interlayer; intermetallic compounds; high-entropy alloys

引用格式:蒋文天,芦丽莉,徐睦忠,等. 钛合金/不锈钢异种金属连接中间层的研究进展[J]. 电焊机,2026,56(7):71-80.

Citation:JIANG Wentian, LU Lili, XU Muzhong, et al. Research Progress on Interlayers for Joining Titanium Alloy/Stainless Steel Dissimilar Metals [J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 71-80.

0 引言

随着现代工业的发展,单一材料越来越难以满足工业需求。因此,结合多种优势的异种材料连接技术受到了广泛的关注。钛合金与不锈钢异种金属构件将钛合金的高比强度、优异耐蚀性与不锈钢的力学性能和经济性有机结合,在航空航天、石油化工、船舶工程及核能等领域具有重要的工程应用价值^[1-3]。尤其在核能领域,先进换热器等设备对钛/钢异种金属接头在高温、高压及辐照环境下的服役性能提出了更为严苛的要求^[4]。因此,实现钛合金与不锈钢的高质量连接已成为制造业中亟待解决的关键技术问题^[5-6]。

钛合金与不锈钢直接熔焊时,由于Ti与Fe的物理化学性能差异显著(熔点差约400℃、热膨胀系数差异约40%、晶体结构差异等),焊缝中不可避免地生成TiFe、TiFe₂、Cr₂Ti等脆性金属间化合物(IMCs)。当IMCs层厚度超过临界值(通常为1~2 μm)时,接头力学性能急剧劣化,在较小热应力下即出现开裂,

这使得直接焊接难以获得满足工程要求的接头性能。

目前,钛/钢异种金属焊接方法主要包括钎焊、扩散焊、摩擦焊、爆炸焊、电弧焊、电子束焊及激光焊等。其中,钎焊接头脆性相对较低,适用于微电子领域;爆炸焊工艺成熟,多用于复合板材的大规模生产,但后续热处理中存在脱焊风险^[7];对于扩散焊、摩擦焊和熔化焊,脆性IMCs的抑制与调控仍然是核心难题。

针对上述问题,在连接界面引入合适的金属中间层被认为是当前最有效的解决途径之一。中间层通过以下机制改善接头性能:一是物理阻隔Ti与Fe的直接接触,抑制脆性Ti-Fe IMCs的生成;二是与Ti、Fe分别形成塑性更优的金属间化合物或固溶体,替代原有脆性界面产物;三是调节界面热膨胀系数梯度,缓解残余应力。近年来,围绕中间层材料的研究已从早期的纯金属(如V、Nb、Cu、Ni)逐步拓展到多元合金、复合梯度金属层以及高熵合金,接头性能显著提升。

本文系统总结钛/钢异种金属连接中各类中间层材料的研究进展,重点分析不同中间层体系的设

计原理、界面反应机制及对接头力学性能的影响规律,并结合核能领域的特殊需求,对钛/钢异种金属接头中间层的发展方向进行展望,以期为高性能钛/钢异种金属连接的结构设计与工程应用提供参考。

1 钛/钢异种金属连接中间层的设计原则

1.1 Ti-Fe脆性相的特征与危害

钛/钢异种金属有效连接的主要困难是Ti与Fe之间极强的化学亲和性。根据Ti-Fe二元相图,Ti与Fe在焊接过程中可形成多种金属间化合物(IMCs),主要包括TiFe和TiFe₂。此外,不锈钢中的Cr元素还会与Ti反应生成Cr₂Ti,进一步增加界面脆性。这些IMCs的硬度远高于基体金属,且室温下几乎不具备塑性变形能力。研究表明,当IMCs层厚度超过1~2 μm时,裂纹优先沿IMCs层萌生和扩展,接头力学性能急剧劣化^[8]。

从扩散动力学角度分析,Ti与Fe的互扩散速率在典型焊接温度下较高,且IMCs层的生长通常符合抛物线规律,即IMCs层厚度的平方与高温保持时间成正比。这意味着即使在高温冷却初期,IMCs仍会持续生长。因此,单纯依靠控制工艺参数(如缩短高温保持时间、降低焊接温度)难以从根本上解决脆性问题,需要从界面设计的角度寻求突破。

1.2 中间层的作用机制

在连接界面引入合适的金属中间层,是当前解决钛/钢直接连接脆性问题的有效途径。中间层可以阻断Ti与Fe元素的扩散,抑制钛合金和钢之间脆性IMCs的形成,甚至改善IMCs的结构。由于Ti、Fe元素的物理及化学性能的差异显著,中间层金属可以改变和减少因晶粒细化、成分不均、应力集中和因物化性能差异而产生的裂纹。此外,引入的中间层也具有导电效应,可以缓解残余应力并避免其他成形缺陷的产生^[9]。

1.3 中间层材料的选取准则

(1)中间层金属在液态下能与Ti、Fe无限互溶;
(2)中间层金属在固态下能与Ti或Fe有限互溶,且生成的IMCs脆性较低;(3)中间层金属的物理性能位于Ti、Fe之间,或非常相似;(4)中间层金属在室

温下具有良好的塑性及强度。目前,根据国内外相关研究的成果并结合Ti和Fe元素的二元相图分析,可以得到如图1所示的结论^[10]。

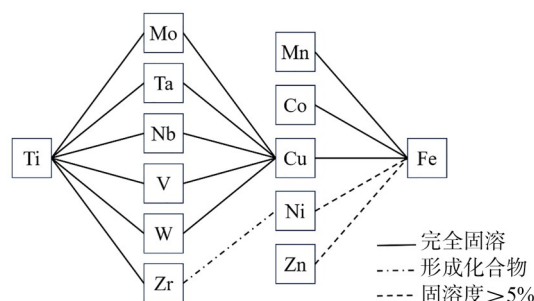


图1 中间层金属与Ti、Fe的固溶度^[10]

Fig. 1 Solid solubility of interlayer metal with Ti and Fe

2 中间层研究现状

为抑制钛/钢直接焊接时大量脆性IMCs的生成,添加合适的中间层已被证明是有效的途径之一。根据中间层材料的组织特征,现有研究主要集中在纯金属、合金、复合金属及高熵合金四大类。

2.1 纯金属中间层

纯金属中间层是最早被系统研究的一类。由图1可知,V、Nb、Ta等元素与Ti可形成连续固溶体,而Cu、Ni等则与Fe具有良好的冶金相容性。研究者正是利用这种“一侧固溶、一侧反应”的不对称冶金特性来设计中间层。

V因其与Ti完全互溶且与Fe仅生成少量脆性相而备受关注。Zhang等^[11]采用V中间层进行TC4/301L激光焊,V层完全阻隔了Ti-Fe扩散,接头由Ti-V固溶区和未熔化的V层组成,最大抗拉强度达587 MPa,但断裂发生于Ti/V界面,表明该界面为接头最薄弱环节。Tomashchuk等^[12]进一步对比了单道、双道及双光束三种激光焊工艺,如图2所示,发现双道焊可使熔化区分别形成γ-Fe固溶体(不锈钢侧)和Ti-V固溶体(钛侧),抗拉强度达到367 MPa;而单道焊因V层部分未熔、熔池成分不均,强度仅130 MPa。Nb中间层能有效阻止焊接过程中Ti-Fe IMCs的形成^[13],焊接接头存在两个基于不同结合机制的冶金结合区,如图3所示。但Nb中间层的效果略逊于V,钛/Nb/钢激光焊接头强度为370 MPa,断裂于反应层。Ta中间层虽能减少IMCs的形成,

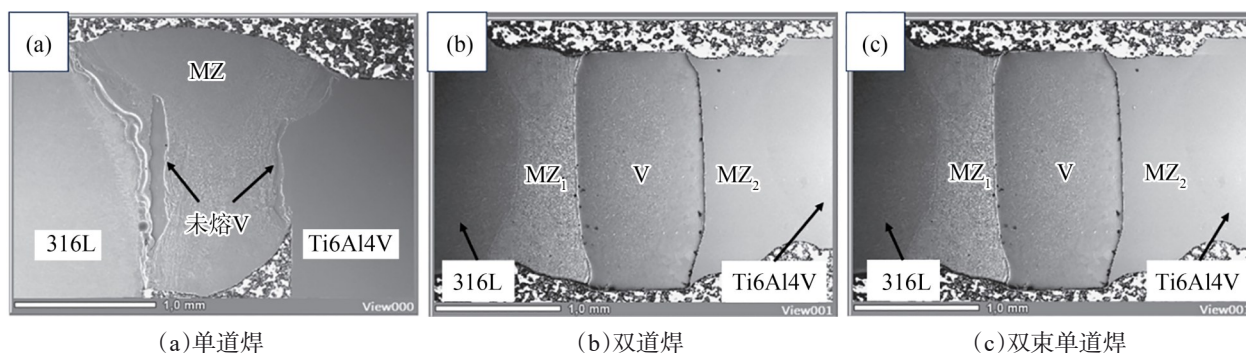


图2 不同焊接工艺接头SEM图像

Fig. 2 Macro morphology of hybrid joint

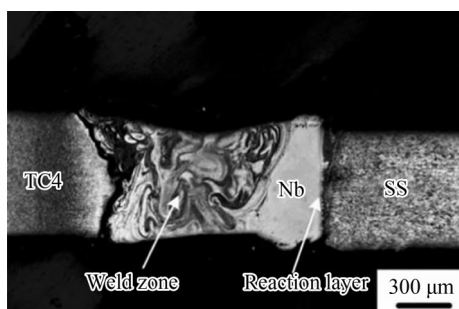


图3 混合接头宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of hybrid joint

但因Ta高温易氧化,所得接头强度仅为44 MPa,实用性较差^[14]。

Ni和Cu中间层的对比研究揭示了两者不同的

界面行为。Muralimohan^[15]和Kumar^[16]分别采用Ni、Cu中间层进行纯钛/304钢摩擦焊,发现Ni中间层生成NiTi、Ni₂Ti、Ni₃Ti及NiTi₂等多种IMCs,如图4所示,接头强度为352 MPa;而Cu层通过优先形成Cu-Ti IMCs(如CuTi₂)并抑制Ti-Fe及马氏体转变,使强度提升至523 MPa。Mishra等^[17]在Ti-6Al-4V/321钢旋转摩擦焊中的对比结果则相反——Ni中间层接头强度达400 MPa,略高于Cu的319 MPa,但断口分析表明Ni侧IMCs层更厚且脆性更高。曾欣等^[18]在真空扩散焊中的对比结果与Kumar一致,Cu中间层接头强度(496 MPa)显著优于Ni(386 MPa),归因于Cu-Ni化合物的塑性优于Ni-Ti系IMCs。

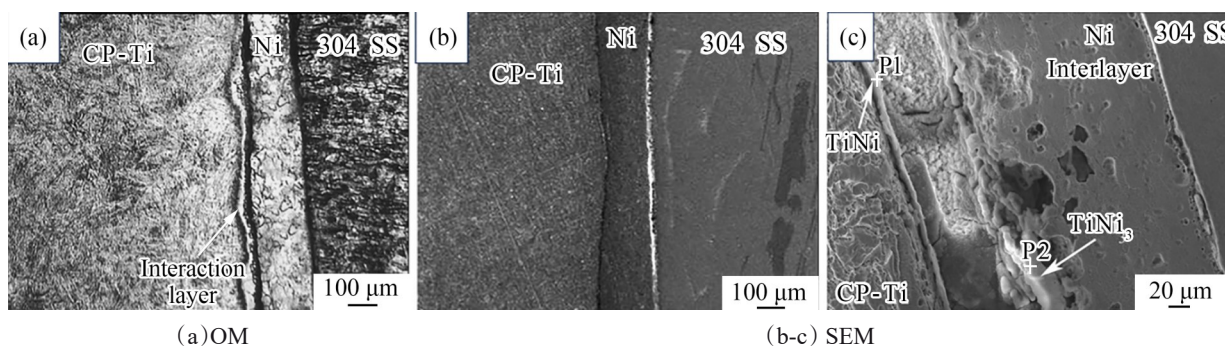


图4 焊接接头微观结构图像

Fig. 4 Microstructure images of welded joint

纯金属中间层成分单一、界面反应相对简单,其中V是最具潜力的选择。但单一金属难以同时兼顾Ti侧和Fe侧的冶金相容性,断裂往往发生在薄弱界面。因此,纯金属中间层更适合对接头强度要求不高、构件尺寸较小的场合。

2.2 合金中间层

为突破纯金属中间层“单一金属性能不匹配”的瓶颈,研究者开始采用多元合金作为中间层,通

过合金成分设计,利用不同元素之间的协同效应优化界面反应产物,改善接头组织和性能。

在钎焊领域,Tashi等^[19]采用AgCuZn对Ti6Al4V和316L进行真空钎焊,接头处生成CuTi、Fe-Cu-Ti及TiAg相,其中TiAg有助于形成无裂纹接头;但随着钎焊温度升高和钎焊时间延长,接头剪切强度降低。张鹏贤等^[20]在AgCuZn钎料里添加Ni,当Ni添加量为3.5%时,Ti-Fe IMCs被有效抑制,剪切强度提

升至 148 MPa。Dong 等^[21]采用 CuTiNiZrV 非晶合金作为中间层对 TC4 和 304 不锈钢进行真空钎焊,获得了无裂纹、无气孔的接头。其中,采用 $\text{Cu}_{37.5}\text{Ti}_{25}\text{Ni}_{12.5}\text{Zr}_{12.5}\text{V}_{12.5}$ 时接头剪切强度更高,为 116 MPa,沿着焊缝断裂,具有脆性断裂特征,如图 5 所示,表明非晶钎料虽能抑制裂纹,但其自身形成的多元素 IMCs 仍呈脆性。

在熔焊和固相焊领域,Bi 等^[22]采用 Monel 400 合金 (63 wt.% Ni, 30 wt.% Cu) 作为激光-扩散焊中间层,通过两步法(先激光焊连接不锈钢与中间层,再扩散焊连接钛合金),有效避免了 Ti-Fe 直接接触,但接头强度仅 216 MPa,断裂于 Monel 400/Ti 界面,说明 Ni-Cu 固溶体与 Ti 的反应层仍为强度短板。Sahasrabudhe 等^[23]利用激光定向能量沉积,添加 NiCr 中间层后成功实现 Ti6Al4V/SS410 连接,避免了直接焊接时的开裂。Gao 等^[24]选用 Cu_3Si 焊丝

进行激光-电弧复合焊,探究了不同热输入对钛/钢接头组织的影响,焊缝中少量颗粒状 $\text{Fe}_{67-x}\text{Si}_x\text{Ti}_{33}$ 分散在枝晶状 $\alpha\text{-Cu}$ 基体上,接头在 Ti 侧 CuTi_2 层处发生脆性断裂,最大抗拉强度为 212 MPa。Li 等^[25]使用 CuSi_3 焊丝进行 GTAW,结合热力学计算分析了 IMCs 的形成机制,获得无缺陷接头,最大抗拉强度为 266 MPa,延伸率为 1.6%。

合金中间层的优势在于可通过调整元素成分比例来“定制”界面反应产物,使脆性 IMCs 的形成被部分抑制。然而,多元合金自身也易形成多种 IMCs,这些化合物虽比 TiFe 稍具韧性,但本质上仍为脆性相;高性能合金成本较高,且合金元素较多,可能会导致焊接接头出现新的界面问题,不适合大规模工业应用。因此,合金中间层目前主要适用于小型精密部件等对强度要求不高但对抗裂性有要求的场景。

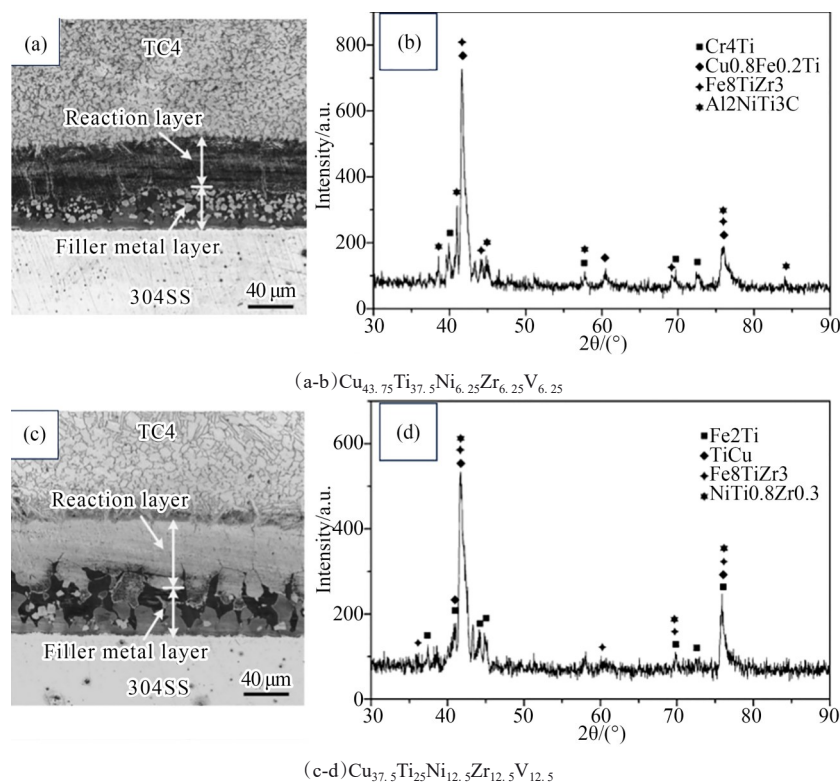


图5 钎焊接头微观组织及断口 XRD 图像

Fig. 5 Microstructure and fracture XRD images of brazed joint

2.3 复合金属中间层

复合金属中间层采用两层或多层不同金属叠合,结合不同金属的优点,旨在发挥各层的功能分工,在接头两侧分别形成相容性好的冶金结合。这

种“功能梯度”策略被认为是最有希望同时解决扩散控制和应力缓解问题的方案,是实现钛/钢高性能连接的重要策略。

V+Cu 是最经典的复合中间层体系。孙荣禄等

早期研究证实 V+Cu 复合中间层可有效阻止 Ti、Fe 元素的互扩散,阻碍脆性 IMCs 的形成^[26]。何鹏等^[27]进一步研究了 V+Cu 中间层对 TiAl/40Cr 钢扩散焊的影响,发现接头强度主要取决于 TiAl/V 界面,通过调整工艺参数控制 IMCs 的尺寸和数量,实现 TiAl 与 40Cr 钢的有效物理连接,但强度仅为 200 MPa。王廷等^[28]设计了一种梯度复合 V-Cu 中间层用于电子束焊,减少了 Ti-Cu IMCs 的生成, Ti/V/Cu-V/钢接头的抗拉强度达到 395 MPa。

近年来的研究在工艺和材料体系上均有拓展。Shi 等^[29]通过激光金属沉积工艺在 TC4 钛合金侧先沉积 V 层,随后与 CuCrZr 板结合作为中间复合层,成功实现了 TC4 与 304 不锈钢的对接,如图 6 所示。当 V 层厚度为 1.2 mm 时,接头无 Ti-Fe IMCs,接头抗拉强度达到 418 MPa,延伸率为 15%。

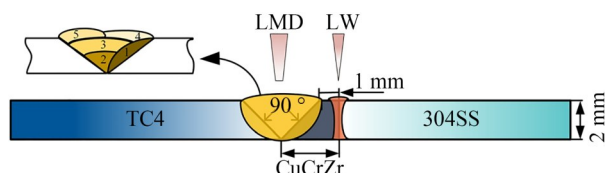
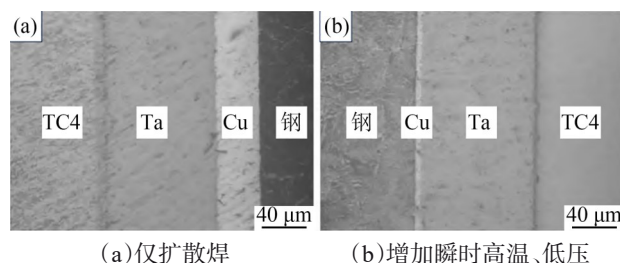


图6 304不锈钢和TC4钛合金的激光焊接(LW)和激光定向沉积(LMD)连接工艺示意

Fig. 6 Schematic diagram of laser welding and laser directed deposition connection process of 304 stainless steel and TC4 titanium alloy

陈一帆等^[30]开发了 Cu-Ta 复合中间层的 TC4/低碳钢扩散焊工艺,在 950 °C、8.5 MPa、保温时间 1 200 s 条件下,低碳钢/Cu、Cu/Ta、Ta/TC4 三个界面均结合良好,形成明显的过渡层,如图 7a 所示,抗拉强度为 257 MPa;在此工艺基础上,扩散焊前增加瞬时高温低压(1 050 °C/3 MPa/20 s)预处理后,原子扩散充分,如图 7b 所示,强度跃升至 600 MPa。宋庭丰^[31]采用 Cu/Nb 复合层进行激光焊 TC4/316L,高功率下 Nb/Ti 界面易产生热裂纹,平均强度仅 96 MPa;但同一复合层在真空扩散焊中用于 TC4/15-5PH 钢时,形成 15-5PH/Cu、Cu/Nb、Nb/TC4 三个良好结合界面,强度达 540 MPa,断裂于 Cu/Nb 界面,表明扩散焊工艺更能发挥复合层的梯度优势^[32]。

复合金属中间层的核心理念是“分段匹配”——将单一中间层难以兼顾的 Ti 侧和 Fe 侧相容性问题拆解,由不同金属层分别承担。这使得复合层在抑制 Ti-Fe IMCs 方面效果最佳,且可通过调整各



(a) 仅扩散焊 (b) 增加瞬时高温、低压

图7 扩散焊接头微观形貌

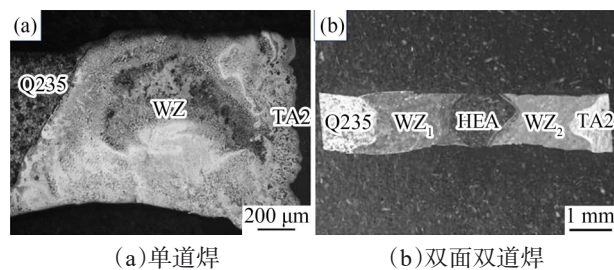
Fig. 7 Microstructure of diffusion welding joint

层厚度来优化应力分布,因此其接头强度普遍高于纯金属和合金层。然而,复合层层间界面数量增加,导致每个界面都有可能成为失效源,需要精确控制各层厚度和连接工艺。此外,由于需要考虑到钛合金与不锈钢及复合金属间的相容性、热膨胀系数、熔点等因素,复合金属中间层的材料选择有限。

2.4 高熵合金中间层

高熵合金(HEA)具有一系列“特异”效应:热力学上的“高熵效应”、动力学上的“迟滞扩散效应”、结构上的“晶格畸变效应”、性能上的“鸡尾酒效应”^[33]。因此,基于高熵效应与迟滞扩散效应的协同作用,HEA 具有作为异种金属焊接中间层材料或者钎料的巨大潜力。

裴龙基等^[34]采用 $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ HEA 中间层进行 TA2/Q235 钢 TIG 焊。单道焊时,接头形貌如图 8a 所示,由于热输入不足以完全阻隔扩散,焊缝中仍存在 Ti-Fe IMCs,强度仅为 186 MPa;改为双面双道焊后,接头形貌如图 8b 所示,焊缝无 Ti-Fe 相,但析出了 Cr_3O_8 氧化物,强度升至 236 MPa,仍为脆性解理断裂。该研究表明,HEA 可有效抑制 Ti-Fe 反应,但氧化物夹杂成为新的脆性源。



(a) 单道焊 (b) 双面双道焊

图8 TIG焊接接头形貌

Fig. 8 TIG welding head appearance

Wang 等^[35]采用一种新型的 AlCoCrNiCuAg/Cu 高熵复合中间层进行 TC4 与 316L 不锈钢的真空扩散连接。结果表明,在 1 010 °C 下扩散键合 90 min

后, 钛/钢接头的微观组织结构为: TC4/ β -Ti/ β -Ti+FeTi/Fe₂Ti+X+ σ / α -Fe+X+ σ /316L, 此时接头达到最高剪切强度 222 MPa。断裂表面显示出解理特征, 表明发生了脆性断裂, 主要裂纹位于 β -Ti+FeTi 和 Fe₂Ti+X+ σ 的交界处, 说明 HEA 层虽阻碍了 Ti-Fe 直接反应, 但 TiFe 脆性 IMCs 依然形成, 只是其分布被细化。AlCoCrCuNi₂ HEA 中间层通过迟滞扩散效应, 有效抑制了硬脆的 IMCs 的形成和生长, 钛合金侧界面形态有直线转变为锯齿状, 有助于阻止裂纹的扩展, 提高接头的力学性能; 在不锈钢侧, 316L 与 HEA 形成了良好的冶金结合, 在扩散区内形成了固溶区。当键合温度为 1 010 °C 时, 获得最大剪切

强度 214 MPa^[36]。

HEA 中间层的最大优势在于其“高熵效应”——通过提高构型熵降低体系自由能, 使固溶体成为热力学优势相, 从源头上避免脆性 IMCs 的大量生成; 同时, 迟滞扩散效应为工艺窗口的拓宽提供了可能。目前 HEA 中间层研究尚处于初期, 研究数量有限, 但发展潜力巨大, 未来需在成分设计、界面调控及工艺优化方面进一步深入。

2.5 不同中间层接头性能对比

表 1 汇总了各类中间层在典型焊接工艺下的接头强度、断裂位置及界面产物特征。从数据可以看出以下规律:

表 1 中间层类型、焊接方法及接头性能对比
Table 1 Comparison of interlayer types, welding methods, and joint properties

中间层类型	成分	焊接方法	抗拉、剪切强度/MPa	断裂位置	文献
纯金属	V	激光焊	367~587	Ti/V 界面	[11]、[12]
	Nb	激光焊	370	反应层	[13]
	Cu	摩擦焊	523	反应层	[16]
	Ni	摩擦焊	352~400	Ti/Ni 界面	[15]、[17]
合金	AgCuZnNi	真空钎焊	148(剪切)	焊缝区	[20]
	Cu-Ti-Ni-Zr-V	真空钎焊	116	焊缝区	[21]
	Monel 400	激光-扩散焊	216	Monel 400/Ti 界面	[22]
	Cu-Si	电弧焊	212~266	CuTi ₂ 层	[24]、[25]
复合金属	V+Cu	扩散焊/电子束焊	200~395	Ti/V 界面	[27]、[28]
	Cu+Ta	扩散焊	600	—	[30]
	Cu+Nb	扩散焊	540	Cu/Nb 界面	[32]
高熵合金	CoCrCuNi	TIG 双道焊	236	焊缝区	[34]
	AlCoCrNiCuAg/Cu	扩散焊	222(剪切)	β -Ti+FeTi 与 Fe ₂ Ti+X+ σ 界面	[35]
	AlCoCrCuNi ₂	扩散焊	214(剪切)	Ti/HEA 界面	[36]

(1) 中间层的作用机制决定界面产物类型。V、Nb 等金属凭借与 Ti 的完全固溶特性可实现“无 Ti-Fe IMCs”固溶结合, Cu、Ni 及合金通过优先形成 Ti-M(M=Cu/Ni) 脆性相以“消耗”Ti 元素, 而复合金属层则利用多层梯度结构完全隔离 Ti 与 Fe 直接扩散。

(2) 接头断裂位置遵循“薄弱优先”的规律。V、Nb 断裂于固溶界面, Cu、Ni 及合金断裂于反应脆性层内部, 复合金属断裂于层间固溶结合界面, 高熵合金则断裂于 Ti/HEA 界面附近, 断裂位置均对应接头中界面结合强度最低或脆性相最集中的区域。

(3) 焊接热输入存在最优化工艺窗口, 且接头强度上限取决于中间层对 Ti-Fe IMCs 生成的抑制有效程度。其中复合金属层和纯 V 层因能同时实

现扩散阻断与应力缓解而获得最高强度, 而合金层和现有高熵合金层则因脆性相固有生成或界面相容性不足而强度受限。

3 总结及展望

3.1 总结

本文系统综述了钛合金/不锈钢异种金属连接中金属中间层的研究现状, 主要结论如下: 如何抑制脆性 IMCs 的形成是实现钛合金与不锈钢异种金属有效连接的主要难点, 并且针对焊接界面 IMCs 的形成机理也有待进一步的研究。依据现有的研究进展分析, 添加中间层能有效阻碍 Ti、Fe 元素的

扩散,抑制脆性 IMCs 的生成,但 Ti、Fe 会与中间层金属生成脆性相对较低的 IMCs,使得接头处仍然存在较大的残余应力,导致接头出现开裂,降低接头性能。有研究者采用 HEA,利用高熵效应来改变接头组织构成,将凝固组织转变为无序固溶体而非 IMCs,从而改善接头性能。尽管针对 HEA 中间层的研究较少,但是根据现有研究成果,HEA 具有高熵效应及独特的物化性质,具有作为异种金属焊接中间层材料或者钎料的巨大潜力。

3.2 展望

随着中国核能的快速发展,面向先进换热器高热效率、高性能的发展需求,核工业领域对于高性能钛/钢接头的需求较为迫切。目前性能较好的钛/钢异种金属接头所使用的中间层材料均含有铜、钴等元素,然而含铜、钴构件抗辐照性能较差,在辐照环境下组织及性能会发生退化,导致安全隐患的出现,危害核电站的安全。因此,核能领域使用的钛/钢异种金属焊接构件应该严格控制铜、钴元素的含量。为了满足核工业对于高性能钛/钢接头的需求,未来应该从以下几方面进行研究:(1)探索新一代低铜低钴金属中间层,包括复合金属中间层及 HEA 中间层等,能与钛合金、不锈钢形成良好的冶金结合,抑制脆性 IMCs 的生成,阻碍裂纹的萌生与扩展;(2)深入研究钛/钢接头界面处 IMCs 的生成及生长机理,改良现有工艺或开发新型焊接方法,减少脆性 IMCs 的形成,降低焊接接头残余应力。

参考文献:

- [1] 顾俊,刘钊鹏,徐友钧,等. 钛合金及其激光加工技术在航空航天制造中的应用[J]. 应用激光, 2020, 40(3):547-555.
GU J, LIU Z P, XU Y J, et al. Titanium Alloy and its Laser Processing Technology in Aviation Manufacturing [J]. Applied Laser, 2020, 40(3):547-555.
- [2] 徐建平,苏航标,郭获子,等. 核乏燃料后处理设备用钛合金腐蚀性性能研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(3):31-41.
XU J P, SU H B, GUO D Z, et al. Research Progress on Corrosion Behavior of Titanium Alloy Used in Nuclear Spent Reprocessing Equipment [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2019, 47(3):31-41.
- [3] 孙荣禄,张久海. 钛及钛合金与钢焊接的问题及研究现状[J]. 宇航材料工艺, 1997(2):7-11.
SUN R L, ZHANG J H. Welding Problems and Present Situation of Titanium or Titanium Alloy and Steel [J]. Aerospace Materials & Technology, 1997(2):7-11.
- [4] 宋庭丰,蒋小松,莫德锋,等. 不锈钢和钛合金异种金属焊接研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(6):81-87.
SONG T F, JIANG X S, MO D F, et al. A Survey on Dissimilar Welding of Stainless Steel and Titanium Alloy [J]. Materials Reports, 2015, 29(6):81-87.
- [5] 陈成. TC4 钛合金与 316L 不锈钢异质材料选区激光熔化连接研究[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
CHEN C. Investigation on Dissimilar Materials Bonding Process of TC4 Titanium Alloy and 316L Stainless Steel with Selective Laser Melting [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [6] 吕攀,王克鸿,朱和国. 钛合金与不锈钢异种金属焊接的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(13):26-32.
LV P, WANG K H, ZHU H G. Research Status of Titanium Alloy and Stainless Steel Dissimilar Metal Welding [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(13):26-32.
- [7] 刘夫,李士凯,蒋鹏,等. 钛/钢异种金属焊接技术的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(2):67-74.
LIU F, LI S K, JIANG P, et al. Development Progress of Welding Technologies of Titanium/Steel Dissimilar Metal [J]. Development and Application of Materials, 2020, 35(2):67-74.
- [8] 赵蕾. 钛合金与不锈钢的激光焊接研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2016.
ZHAO L. Laser Welding of Titanium Alloy and Stainless Steel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016.
- [9] 张宗智. 钛/钢连接时激光同轴熔覆铜过渡层的成形与组织分析[D]. 兰州:兰州理工大学, 2023.
ZHANG Z Z. Formation and Microstructure Analysis of Copper Transition Layer by Laser Coaxial Cladding During Titanium/Steel Joint [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [10] LI J Z, LIU Y B, GAO Y F, et al. Benefits of interfacial regulation with interlayers in laser welding Ti6Al4V/316L steel [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 125: 106007-106016.
- [11] Zhang Y, Zhou J P, Sun D Q, et al. Two pass laser welding of TC4 Titanium alloy to 301L stainless steel via pure V interlayer [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2):1400-1404.
- [12] Tomashchuk I, Grevey D, Sallamand P. Dissimilar laser

- welding of AISI 316L stainless steel to Ti6-Al4-6V alloy via pure vanadium interlayer[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 622: 37-45.
- [13] Zhang Y, Sun D Q, Gu X Y, et al. A hybrid joint based on two kinds of bonding mechanisms for Titanium alloy and stainless steel by pulsed laser welding[J]. *Materials Letters*, 2016, 185: 152-155.
- [14] Shanmugarajan B, Padmanabham G. Fusion welding studies using laser on Ti-SS dissimilar combination [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(11): 1621-1627.
- [15] Muralimohan C H, Ashfaq M, Ashiri R, et al. Analysis and characterization of the role of ni interlayer in the friction welding of titanium and 304 austenitic stainless steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(1): 347-359.
- [16] Kumar R, Balasubramanian M. Experimental investigation of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer [J]. *Defense Technology*, 2015, 11(1): 65-75.
- [17] Mishra N J, Manikandan SGK, Neethu N, et al. Influence of Cu/Ni interlayer on rotary friction welded dissimilar SS321-Ti6Al4V joints[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2024, 39(5): 610-619.
- [18] 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.
- [19] Tashi R S, Mousavi S A A A, Atabaki M M. Diffusion brazing of Ti-6Al-4V and austenitic stainless steel using silverbased interlayer[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 161-167.
- [20] 张鹏贤, 李慧芳. 钛/钢异种金属感应钎焊钎料及其工艺性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(11): 212-214.
- ZHANG P X, LI H F. Brazing Filler Metal and High-Frequency Induction Brazing of Titanium Alloy and Stainless Steel [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(11): 212-214.
- [21] Dong H, Yang Z, Wang Z, et al. Vacuum brazing TC4 titanium alloy to 304 stainless steel with Cu-Ti-Ni-Zr-V amorphous alloy foil [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(10): 3770-3777.
- [22] 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.
- [23] Sahasrabudhe H. Stainless steel to titanium bimetallic structure using LENS [J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 5: 1-8.
- [24] Gao M, Chen C, Wang L, et al. Laser-arc hybrid welding of dissimilar titanium alloy and stainless steel using copper wire [J]. *Metallurgical and Materials transactions A*, 2015, 46(5): 2007-2020.
- [25] Li Z, Cao X B, Zhou X F, et al. Dissimilar gas tungsten arc welding of TC4 titanium to 304 stainless steel using CuSi₃ filler wire [J]. *Welding in the World*, 2023, 67: 593-605.
- [26] 孙荣禄, 张九海, 黄喜东. 中间过渡金属V+Cu对钛合金与不锈钢扩散焊接头性能的影响[J]. *焊接*, 1997(2): 2-6.
- SUN R L, ZHANG J H, HUANG X D. Influence of Transition Metal V+Cu on Properties of Diffusion Bonding of Ti and Stainless Steel [J]. *Welding & Joining*, 1997(2): 2-6.
- [27] 何鹏, 冯吉才, 韩杰才, 等. TiAl/V/Cu/40Cr钢扩散焊接界面组织结构对接头强度的影响[J]. *焊接*, 2002(7): 12-14.
- HE P, FENG J C, HAN J C, et al. Effect of Interfacial Microstructure of Diffusion Bonding on Strength of the TiAl/V/Cu/40Cr Steel Joint [J]. *Welding & Joining*, 2002(7): 12-17.
- [28] 王廷, 张秉刚, 张艳桥, 等. 采用不同结构Cu/V填充层的钛合金/不锈钢电子束焊接试验[J]. *焊接学报*, 2014, 35(8): 71-74.
- WANG T, ZHANG B G, ZHANG Y Q, et al. Experimental Research on Electron Beam Welding of Titanium Alloy to Stainless Steel Based on Cu/V Filler Metals with Different Shapes [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(8): 71-74.
- [29] Shi Z F, Cui L, He D Y, et al. Enhanced strength of laser welded steel/titanium butt joints with vanadium multi-layers and a copper plate as a composite intermediate layer [J]. *Optics and Laser Technology*, 2025, 180: 111478.
- [30] 陈一帆, 张占领, 邱然锋. 基于添加Cu-Ta中间层的TC4与低碳钢扩散焊工艺研究[J/OL]. *热加工工艺*, 1-4[2025-04-23]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001>

- 3814.20211616.
- CHEN Y F, ZHANG Z L, QIU R F. Study on Diffusion Welding Process Between TC4 and Low Carbon Steel Based on Cu-Ta Interlayer[J/OL]. Hot Working Technology, 1-4 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20211616>.
- [31] 宋庭丰. AISI316L 不锈钢与 TC4 钛合金异种金属焊接组织及性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- SONG T F. Research on Microstructure and Properties of Dissimilar Welded Joints between AISI316L Stainless Steel and TC4 Titanium Alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [32] 陈一帆, 张占领, 邱然锋. 以铌+铜为复合中间层扩散焊接钛合金/不锈钢接头的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(10): 77-80.
- CHEN Y F, ZHANG Z L, QIU R F. Microstructure and Property of Diffusion Welded Titanium Alloy/Stainless Steel Joint with Nb and Cu as Composite Interlayer[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(10): 77-80.
- [33] 吴刚, 李熙, 李忠涛. 高熵合金应用于异种金属焊接的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2021, 35(17): 17031-17036.
- WU G, LI X, LI Z T. Research Status on the Application of High-entropy Alloys in Dissimilar Metal Welding[J]. Materials Reports, 2021, 35(17): 17031-17036.
- [34] 裴龙基. 基于高熵合金中间层的钛/钢异种金属焊接性研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2021.
- PEI L J. Study on Weldability of Titanium/Steel Dissimilar Metals Based on High-entropy Alloy Interlayer[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [35] Wang Y, Li P, Zhao C, 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.
- [36] Li P, Li C, Dong H, et al. Vacuum diffusion bonding of TC4 titanium alloy to 316L stainless steel with Al-CoCrCuNi2 high-entropy alloy interlayer[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 909: 164698.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

👉 上接第 56 页

- electrical signals based on LabVIEW[J]. Welding & Joining, 2021(1): 13-17.
- [23] Zhao Y F, Wang Y, Meng L K, et al. Stability analysis of CO₂ gas shielded welding short-circuit transition process based on GMAW dynamic model[J]. China Welding, 2023, 32(4): 55-68.
- [24] 吉霖, 刘纪周, 郭彦兵, 等. 基于后级斩波可控短路过渡 GMAW 电源设计[J]. 热加工工艺, 2023, 52(19): 106-110.
- JI L, LIU J Z, GUO Y B, et al. Design of GMAW power source for controllable short-circuit transfer based on post-stage chopper[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(19): 106-110.
- [25] Yu R, Zhang T, Huang Y, et al. Monitoring of gas metal arc welding process using optical temperature measurement and neural network modelling[J]. Measurement, 2025, 248: 116934-116934.
- [26] 李瑞晨. 电弧焊熔池图像的特征提取及分类研究[D]. 成都:西南交通大学, 2023.
- LI R C. Research on Feature Extraction and Classification of Weld Pool Images in Arc Welding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [27] 何卫隆. 超窄间隙焊接电弧和焊缝截面形貌视觉检测研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2023.
- HE W L. Research on Visual Inspection of Welding Arc and Weld Cross-Section Morphology in Ultra-Narrow Gap Welding[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [28] Fabry C, Pittner A, Rethmeier M. Design of neural network arc sensor for gap width detection in automated narrow gap GMAW[J]. Weld World, 2018, 62: 819-830.
- [29] Zhao H, Lv T, Zhang J, et al. Research on suppression of cross coupled arc oscillation behavior[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 115: 365-374.
- [30] Zhang J, Chen S, Yu Y, et al. Large- and Small-Signal Modeling and Control Strategy for Multi-Output Welding Power Supply[J]. Electronics, 2023, 12(8): 1800.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>