

钛 / 钢多材料增材制造研究进展

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1001

范海洋 汪翀昊

哈尔滨工程大学

烟台研究院

山东 烟台 264000

摘 要: 综述钛 / 钢的多材料制造研究现状及增材制造技术在其中的应用, 总结多种不同中间层对钛 / 钢界面处易反应合金成分的隔绝作用, 并进一步分析中高熵合金作为多材料中间层的可能性。通过分析钛 / 钢多材料界面的微观组织和相应的力学性能, 系统地阐述过渡区内多种金属间化合物的生成机理, 研究工艺因素和结构设计对多材料界面缺陷形成和元素扩散行为的影响。增材制造技术在钛 / 钢多材料连接上的应用, 使创建无缺陷且牢固结合的多材料界面成为可能, 推动了包装产业向更高效、更环保、更智能的方向发展。

关键词: 钛合金; 钢; 多材料; 中间层; 激光增材制造

中图分类号: TB485

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0001-11

引文格式: 范海洋, 汪翀昊. 钛 / 钢多材料增材制造研究进展 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 1-11.

1 研究背景

随着现代工业的快速发展, 零部件所处的工作环境愈加复杂, 通常要求具备多功能耦合及广泛的环境适应能力。然而, 由传统制造方法所生产的单一材料零部件, 逐渐难以满足这些多样化的需求。通过结合不同材料的优异性能, 多材料结构能够有效满足多种工况的要求, 因此在航空航天、汽车、电子元件、核能及包装等领域的应用潜力日益受到关注。近年来, 迅猛发展的增材制造技术, 为解决传统加工方法在金属多材料制造中的性能瓶颈、低生产效率及难以加工复杂零部件形态等问题提供了新的解决方案。增材制造技术能够通过直接连接以及过渡连接 (例如中间层和成分梯度) 的方式, 实现创新性的多材料结构与制造^[1-3]。

定向能量沉积 (direct energy deposition, DED)

和粉末床熔融 (powder bed fusion, PBF) 是两种主要应用于金属多材料制造的增材制造技术^[4-7]。PBF 技术以其卓越的成形精度和对复杂几何结构的适应性而广受关注, 能够进行精密的多材料界面制造, 适用于高精度、多功能的小型部件制造。相比之下, DED 技术在大规模高效制造方面展现出明显的优势, 尤其是在制造功能梯度材料 (functionally graded materials, FGMs) 时, 通过连续调控材料成分, 可实现单一部件内性能的空间分布优化。

钛合金因其高强度、优异的抗疲劳性、良好的生物相容性以及高耐腐蚀性, 广泛应用于航空航天、医疗、汽车等领域。根据晶体微观组织的不同, 钛合金分为 α 钛合金 (TA)、 β 钛合金 (TB) 和 α - β 双相钛合金 (TC)。然而, 钛合金与异种金属的多材料结合面临两方面的限制。首先, 多材料之间的物理性质差异, 尤其是热膨胀系数、热导率、比热容等

收稿日期: 2024-10-07

基金项目: 山东省优秀青年科学基金资助项目 (海外) (2024HWYQ-087)

作者简介: 范海洋, 男, 教授, 博士, 主要从事多材料激光增材制造研究, E-mail: hyfanhy@gmail.com

热物理性质, 可能导致界面处材料凝固行为的改变, 从而诱发凝固裂纹等缺陷。在增材制造过程中, 由于冷却速率极快, 多材料界面处的高温梯度可能会引起较大的残余应力, 进而表现为不均匀的微观组织^[8-9]。其次, 钛合金与多种金属元素(如 Fe、Al、Ni 等)之间的互溶度较低, 这在熔池中可能导致反应, 形成脆硬的金属间化合物(intermetallics, IMCs)。这些脆硬的 IMCs 在凝固后显著提高了多材料界面区域的硬度, 但却降低了抗拉强度与韧性, 甚至可能导致界面的脆性断裂。

不锈钢, 以其优异的机械性能、良好的抗腐蚀性以及较为良好的成形性, 广泛应用于建筑、汽车、航空航天、能源等领域。钛合金与不锈钢的多材料结构因其优异的耐腐蚀性、较高的强度和相对较低的制造成本, 可以在化学及核工业领域获得广泛应用^[10]。然而, 采用传统焊接方法制备的钛/钢多材料结构, 在结合界面处, 由于热影响区的存在, 易形成较厚的 IMCs 层。脆性的 TiFe 和 TiFe₂ 会在界面处析出并显著降低结合强度^[11-12]。此外, 由于钛合金与不锈钢的热膨胀系数差异较大, 凝固过程中残余应力的释放可能导致多材料界面处产生裂纹, 从而限制了力学性

能^[13]。

对于钛/钢的多材料组合, 本文深入探讨了不同中间层对界面反应合金成分的隔绝效果, 并将传统的焊接工艺拓展至增材制造领域。通过分析增材制造过程中的工艺参数、金属材料固有特性以及合金元素的掺杂效应, 揭示这些因素对熔池状态和微观结构演化的影响, 旨在深入探讨影响多材料界面成型质量的关键因素, 并系统评估其对力学性能的影响。最后, 通过分析先进增材制造技术的应用实例, 展望激光增材制造在金属多材料结构加工中的关键技术问题及面向包装产业的未来研究方向。

2 钛/钢多材料连接

钛合金与不锈钢多材料界面具有急剧的元素过渡, 两种材料热物理性质(热膨胀系数、热导率、熔点等)的显著差异, 在熔池内凝固过程中导致较高的残余应力, 并可能在界面处产生裂纹等缺陷。因此, 钛合金与不锈钢的多材料界面常通过中间层连接, 以隔绝两侧的反应, 减少 IMCs 的生成。通过选择不同类型的中间层, 结合不同连接方法, 可以获得形貌和性质各异的界面, 具体分析见表 1。

表 1 用不同连接方式得到的钛/钢多材料结构与力学性能

Table 1 Multi-material structure and mechanical properties of titanium /steel obtained by different joining methods

合金成分		连接方法	连接策略	界面缺陷	力学性能	参考文献
钛合金	不锈钢					
TC4	316L	电子束焊	Cu 中间层	IMCs、缺乏熔合孔	极限抗拉强度 195 MPa	[14]
TC4	304L	激光焊	Mg 中间层	IMCs	极限抗拉强度 221 MPa	[15]
TC4	316L	L-PBF	Cu 中间层	IMCs、微裂纹	极限抗拉强度 523 MPa	[16]
TC4	316L	激光焊	V 中间层	裂纹、未熔颗粒	极限抗拉强度 367 MPa	[17]
TC4	SUS301L	激光焊	V 中间层	微裂纹、未熔颗粒	极限抗拉强度 587 MPa	[18]
TC4	17-4PH	L-PBF	V 中间层	裂纹、未熔颗粒	极限抗拉强度 400 MPa	[19]
TC4	316L	钎焊	TiZrCuNi 中间层	IMCs、裂纹	最大剪切强度 318 MPa	[20-21]
TC4	316L	L-DED	FeCrCuV 中间层	IMCs	极限抗拉强度 (253 ± 15) MPa	[22]

2.1 纯金属中间层连接

对于钛合金与不锈钢的多材料连接, 通常使用 Cu、Mg 等合金作为中间层, 不仅可有效降低制造成本, 且可有效减少两侧反应生成的 IMCs。I. Tomashchuk 等^[14]使用 Cu 作为中间层, 通过电子束焊连接了 TC4 钛合金和 316L 不锈钢, 并研究了在焊接速度为 1.8 m/min 下激光分别偏置在 TC4 侧和 316L 侧对多材料界面的影响。结果表明, 激光偏置在 TC4 侧会在界面熔合区附近产生未熔合缺陷,

而偏置在 316L 侧, 结合中间层的引入, 可有效抑制 TC4 的熔化, 减少 TC4 与 316L 反应生成的 IMCs, 从而提高界面结合强度(见图 1)。

Gao M. 等^[15]使用 Mg 合金作为中间层, 通过激光焊连接了 TC4 钛合金与 304L 不锈钢。界面元素分析说明 Mg 作为中间层有效阻止了不锈钢和钛合金之间的元素扩散与反应, 减少了 IMCs 的生成(见图 2)。在拉伸试验中, 所有样品均在界面处断裂, 说明 Mg 中间层为多材料结构中最薄弱部分。

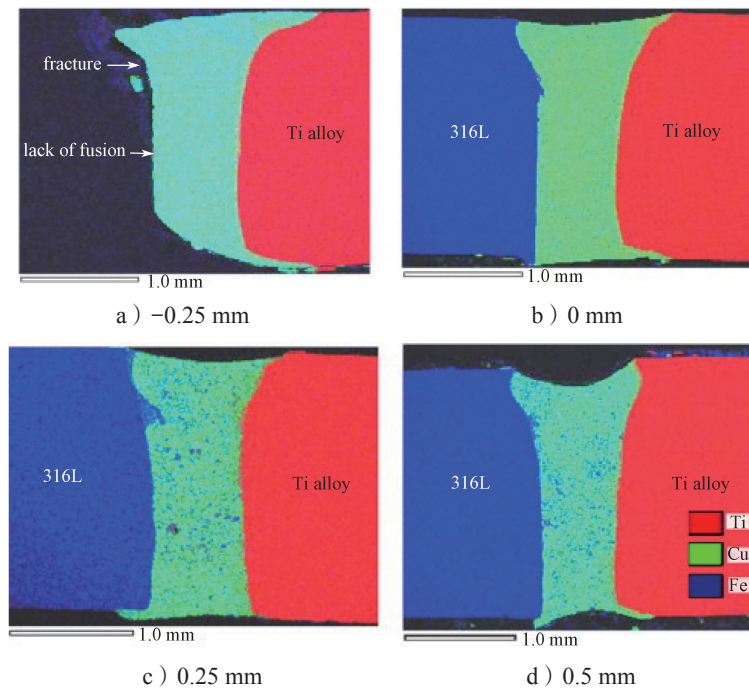


图1 不同激光偏移量下焊缝元素分布

Fig. 1 Element distribution maps in the welds performed with a different beam offsets

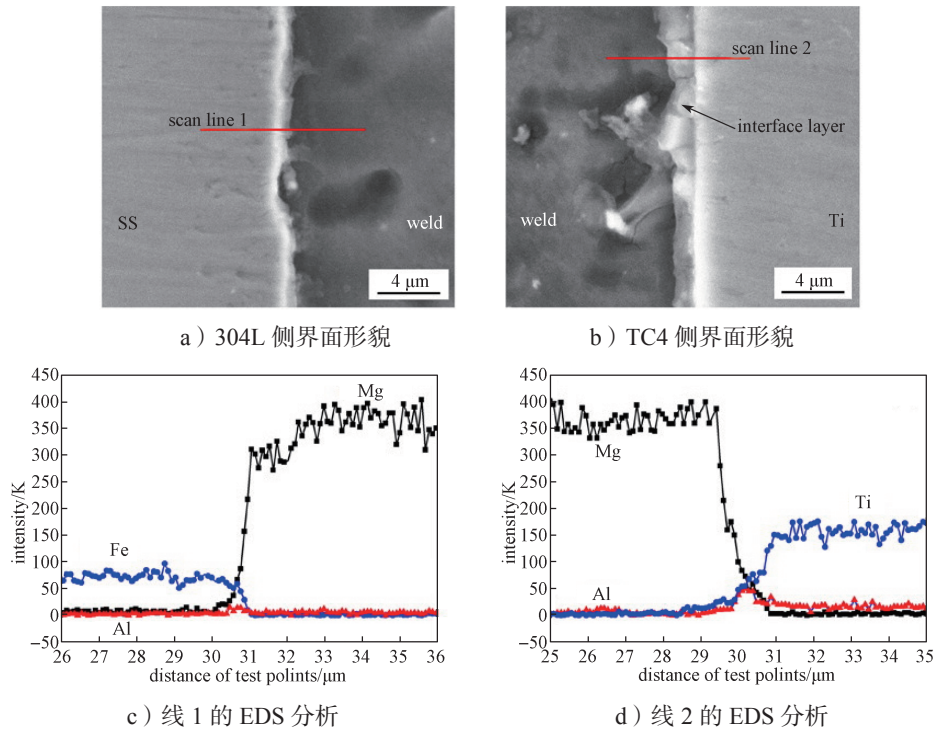


图2 界面SEM和EDS图

Fig. 2 SEM and EDS interface characterisation

在焊接过程中, 激光偏置可以优化焊接效果, 适应不同材料的物理性质。而增材制造技术的引入可根据不同材料的性质选择合适的参数, 为Cu等中间层

带来了更广泛的应用前景。Tey C. F. 等^[16]通过引入Cu中间层, 利用L-PBF技术成功连接了TC4钛合金和316L不锈钢, 并分析了不同激光参数对中间层两

侧界面的微观组织和整体结构力学性能的影响。在 316L 侧, 由于熔池内的非均匀对流混合, 界面从下至上存在 3 种形貌差异较大的区域 (见图 3), 过渡区内完全由 ε -Cu 和 γ -Fe 相组成, 无反应产物。在熔池中, 由于 Fe 的熔点 (约 1540 $^{\circ}\text{C}$) 比 Cu (约 1080 $^{\circ}\text{C}$) 高, 在熔池中 316L 首先凝固并为 Cu 提供形核点, 因此界面区内呈现尺寸较小的细晶。随着 Cu 中间层

增材制造过程的进行, 316L 的含量进一步减少, 晶体的生长逐渐由冷却方向主导, 并沿建造方向逐渐转变为柱状晶。

TC4 侧界面过渡区内同样呈现明显的分层结构, 并存在多种不同的相成分, 不同激光扫描速度得到的样品成分分布也不完全相同 (见图 4)。在过渡区内存在微裂纹, 由非晶区域萌生, 在脆性的 β -Ti+Ti₂Cu

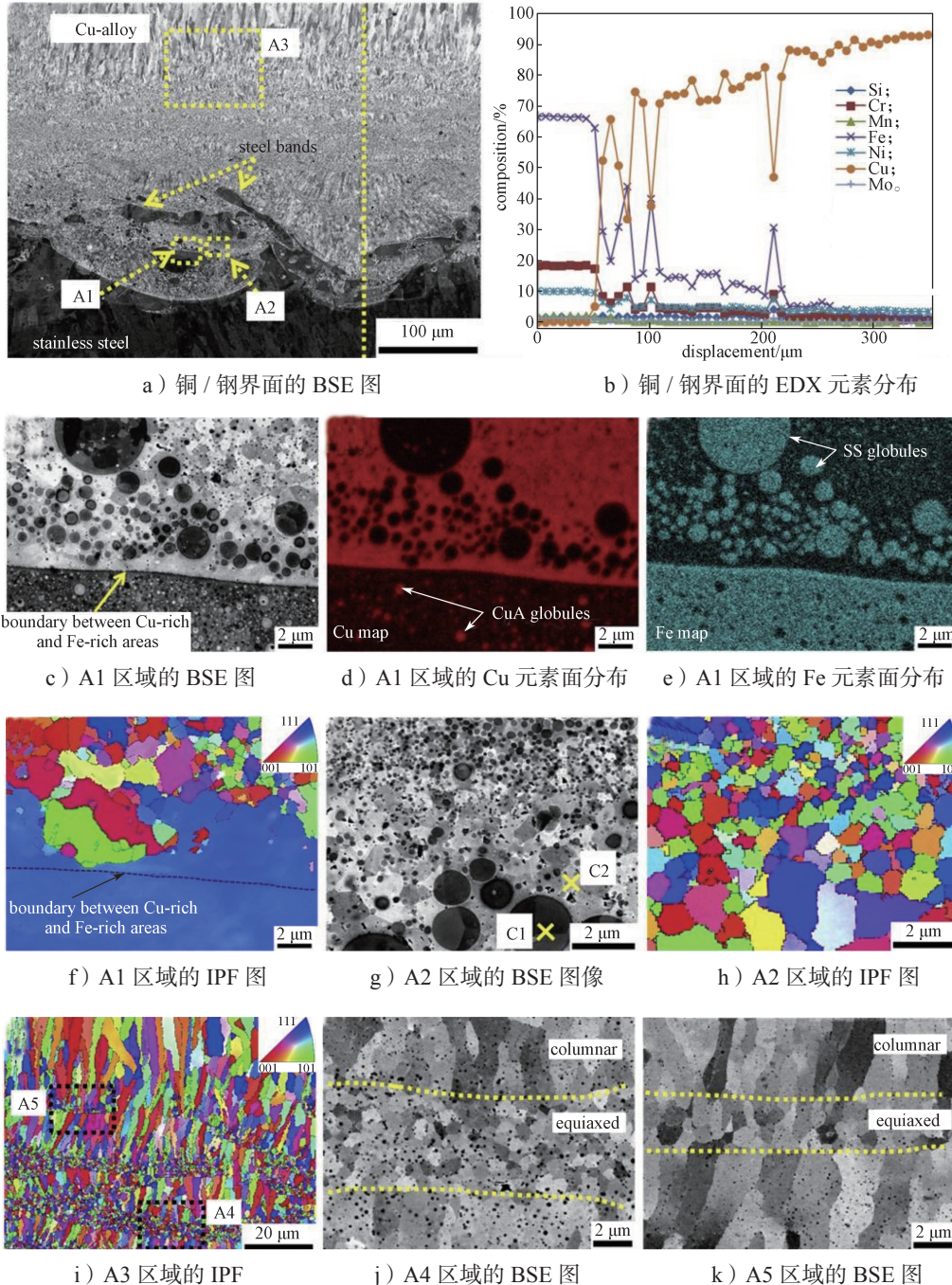


图 3 铜 / 钢界面图

Fig. 3 Images of the CuA/SS interface

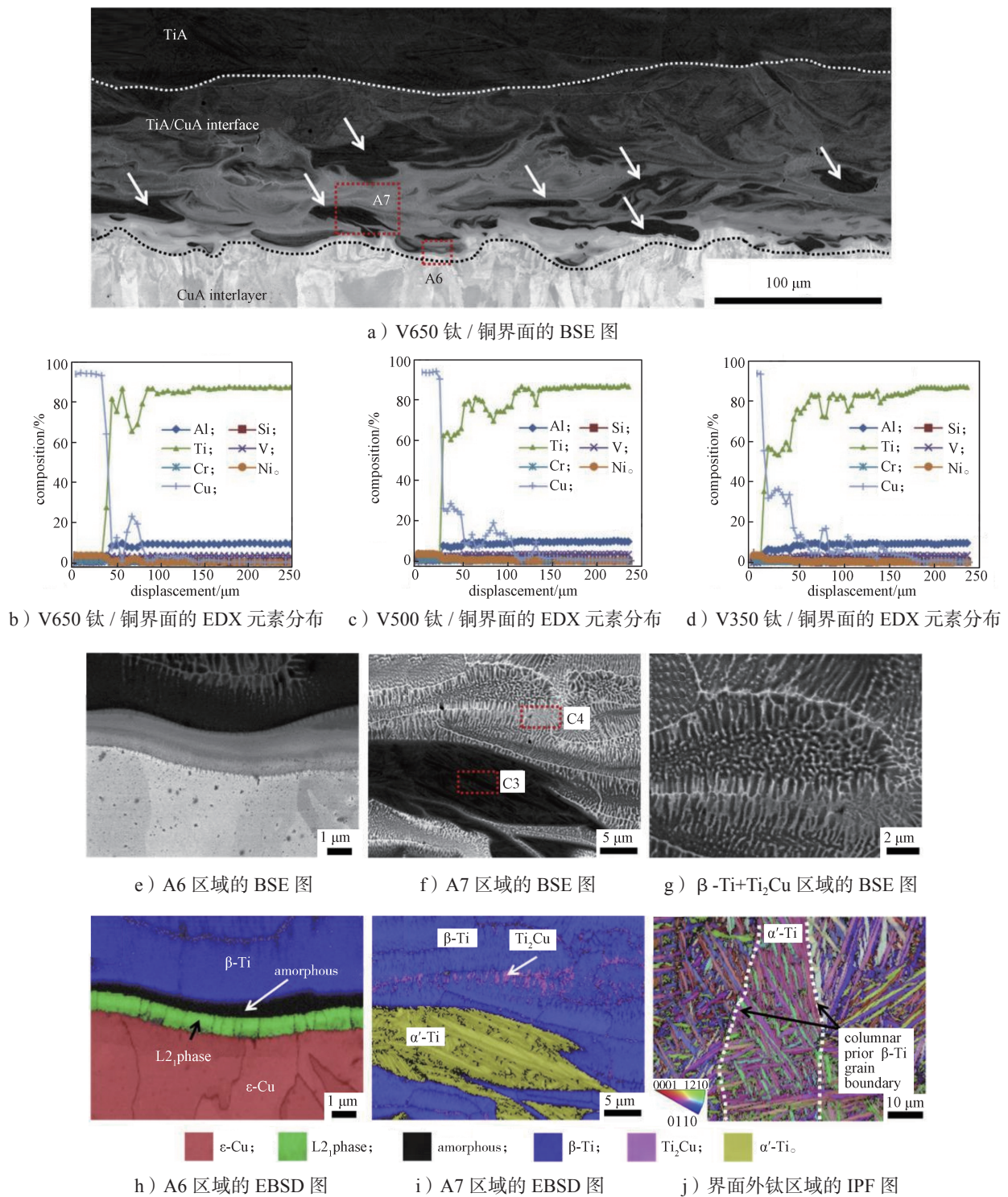


图 4 钛 / 铜界面图

Fig. 4 Images of TiA/CuA interface

基底内扩展并被其中的 α' -Ti 阻隔, 由于下方区域较高的 Cu 含量, 裂纹优先向下扩展, 穿过非晶和 L2₁ 相的薄层, 最终扩展至底部 Cu 中间层内。由于 α' -Ti 韧性较高且其在脆性 β -Ti+Ti₂Cu 中的分布能够有效

阻止裂纹的扩展, 因此在不同扫描速度的样品中, 界面含有最高体积分数 α' -Ti 相的 V650 样品在拉伸过程中韧性最高, 抗拉强度超过 500 MPa。

由于 Cu、Mg 等单质金属及其合金本身强度较低,

其作为中间层连接钛合金和不锈钢后,在拉伸过程中仍会在界面处断裂,难以满足许多使用要求。高强的金属材料通常是难熔金属(W、V、Mo等),不少研究尝试了将高强的难熔金属V作为连接钛合金与不锈钢的中间层,以有效抑制IMCs的生成,但高熔点的V中间层在激光焊的加热下难以与两侧达成良好的冶金结合^[17-18]。增材制造中的高能量密度为提高难熔金属中间层成型质量、得到结合良好的多材料界面带来了更多选择。N. K. Adomako等^[19]通过L-PBF在TC4基板上制造了V中间层,然后用L-DED制造了17-4PH不锈钢,并分析了L-PBF过程中扫描速率对中间层的影响。采用较高激光能量时,V中间层隔离了17-4PH中元素的扩散,可形成无IMCs的界面(见图5)。但大部分难熔金属作为中间层并不能完全阻止钛合金中元素扩散。当激光能量不足时,部分钛合金中的元素会扩散至中间层内,并与不锈钢反应生成IMCs^[18-19]。且难熔金属经历高能量的激光热输入成型后,其内部往往残余应力水平较高,需要通过后续的热处理调控强度与韧性以满足使用需求。

2.2 中高熵合金中间层连接

传统合金和难熔金属的各种不足促使中间层的研究向多成分、多组元合金的方向发展。近年来,中高熵合金(MEA/HEAs)打破了由一种或两种主要金属元素构成的传统合金设计理念。它们是由具有高混合熵的多种金属元素形成的一种合金,由于多种金属元素的晶格畸变和位错滑移,在熵合金中倾向于形成单相结构的固溶体而不是IMCs^[23-25]。复杂的化学成分和晶格畸变导致各种原子在高熵合金内部的扩散变得异常困难,被称为迟滞扩散效应,这一效应有利于防止在异种金属连接过程中界面处生成IMCs反应层^[26]。

中高熵合金的多种性质为隔绝钛/钢界面上元素相互反应提供了更好的条件,因此其作为中间层的应用也被逐渐开发。在HEA制造过程中,Ti和Cu被认为分别与Zr和Ni相似,因为二者的混合焓相近^[27-28],故用Zr取代Ti、Ni取代Cu来构建新的HEA中间层。Xia Y. Q.等^[20-21]用TiZrCuNi中间层钎焊连接了TC4钛合金和316L不锈钢,并研究了其

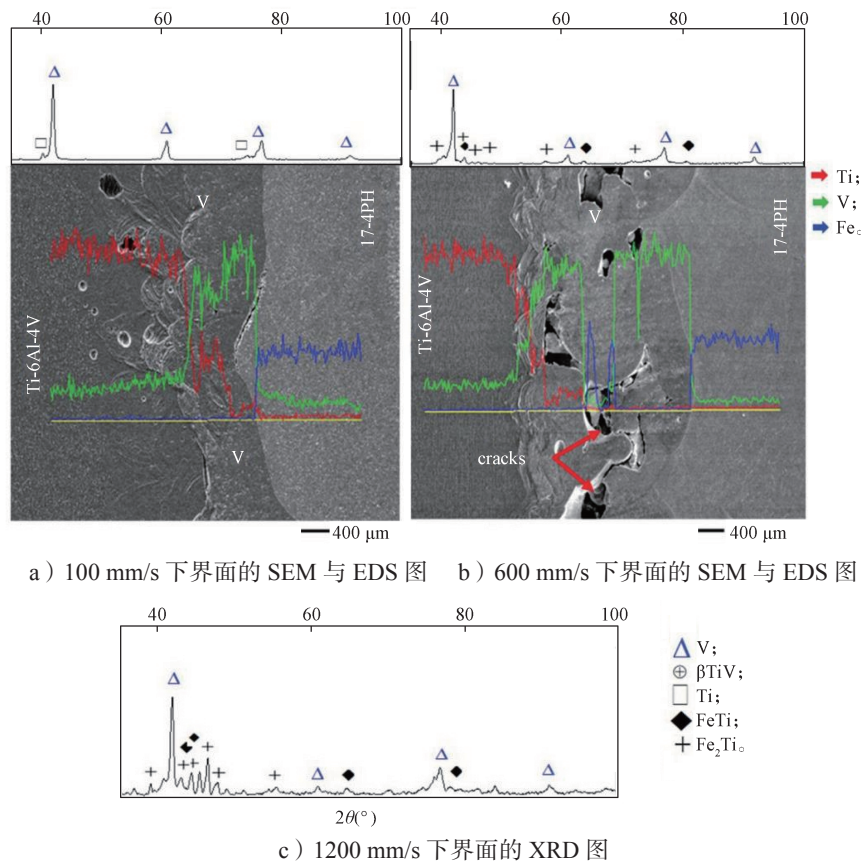


图 5 不同扫描速率下界面分析结果

Fig. 5 Interface analysis results at different scan speeds

中Ni和Zr元素含量对界面微观组织和力学性能的影响。

Ni元素削弱了HEA中间层在TC4侧的润湿性,并使钎焊接头的界面过渡区变厚。过渡区内存在3个反应层,反应层内形成了FeTi、Fe₂Ti、FeCr和 α -Fe相,大量IMCs的分布导致界面成为整体结构中最薄弱部位(见图6)。FeTi与Fe₂Ti相之间的界面存在非共格现象,晶格不匹配度达到61.4%,导致在(β -Ti + FeTi)/Fe₂Ti界面处出现裂纹。裂纹主要沿着Fe₂Ti和FeCr层传播,具有脆性特征。钎焊接头的强度随Ni含量上升呈现先增后降的趋势,Ni含量为11%时,最大剪切强度为318 MPa^[20]。

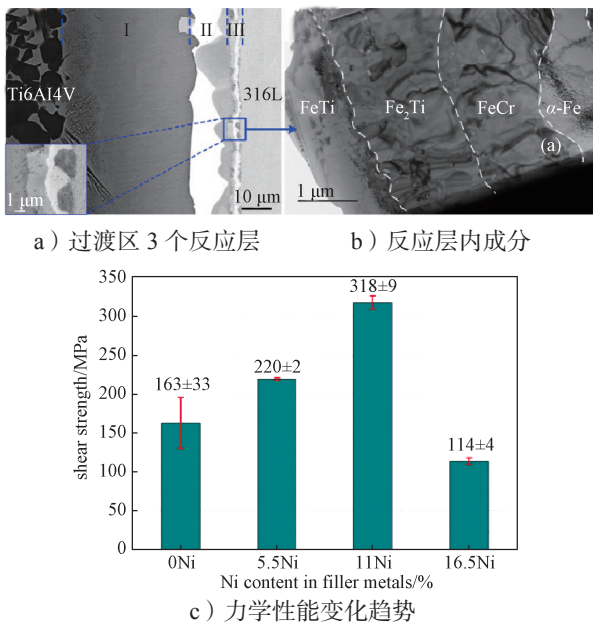


图6 不同Ni元素含量对界面微观组织和力学性能的影响

Fig. 6 Effect of different Ni element content on the microorganization and mechanical properties of the interface

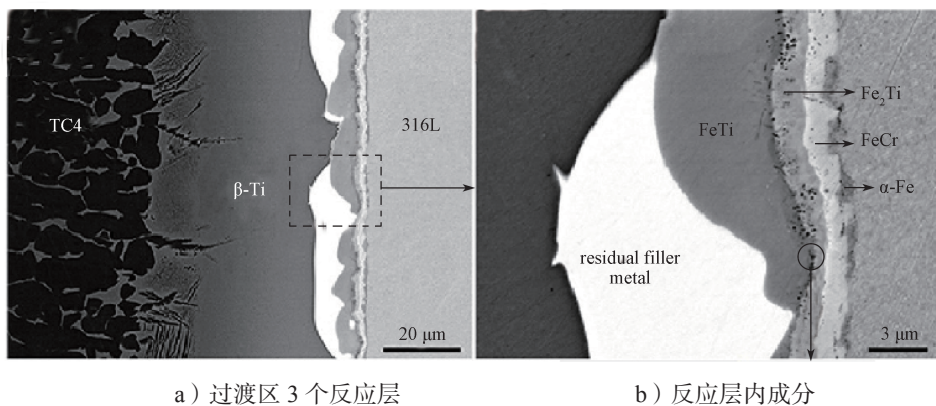
Zr元素同样削弱了中间层在TC4侧的润湿性,并使界面过渡区变厚。但由于Ti向316L侧的扩散

被阻止, α -Fe反应层的厚度变薄(见图7)。亚微米 β -Ti相在FeTi/Fe₂Ti界面附近沉淀,并且和FeTi和Fe₂Ti相之间存在复杂的取向关系。钎焊接头的剪切强度随着Zr含量的增加,先增加后减小,在Zr含量为22.2%时达到峰值238 MPa。FeTi/Fe₂Ti界面处的应力集中和取向关系导致了钎焊接头在FeTi/Fe₂Ti界面处发生了脆性断裂^[21]。

传统焊接方式加工的高熵合金难以达成各成分的完全融合,因此无法完全达成迟滞扩散效应以阻止两侧反应IMCs的生成。增材制造技术的引入拓展了更多种类的高熵合金作为中间层的应用。Jiang T.等^[22]采用L-DED的方法,通过FeCrCuV中间层成功连接了TC4钛合金和316L不锈钢,得到了结合良好的多材料界面(见图8)。316L侧界面良好,无明显裂纹,分界较为明显,EDS元素分析也表明没有明显的元素扩散现象。TC4侧界面有明显的元素扩散现象,MEA中间层中的Cu在向TC4侧扩散过程中出现明显的富集区。相反地,由于迟滞扩散效应,TC4侧中的元素向MEA中间层扩散较少。通过MEA中间层连接的多材料界面抗拉强度达到(253±15) MPa,相比其他中间层或其他制造方式有明显提升^[22]。

目前,对高熵合金成分体系的系统性研究有限,需针对不同异种金属体系筛选出最优化的高熵合金中间层材料成分。且由于高熵合金中各元素的熔化温度差异较大,在增材制造过程中可能导致非均匀的组织或不理想的界面结合,需要通过进一步的优化探索合适的加工参数、粉末选择和热处理工艺。因此,通过增材制造高熵合金作为钛合金与不锈钢连接的中间层材料仍缺乏广泛的应用^[29]。

未来,随着增材制造技术的不断进步,研究将集中在优化合金成分设计与工艺参数,改善多材料界面性能。此外,借助多尺度建模与模拟,可以预测高熵



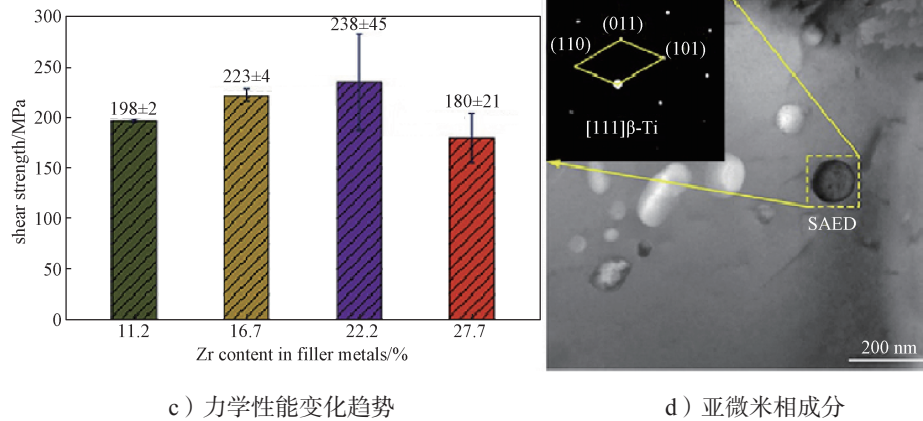


图 7 不同含量的 Zr 元素对界面微观组织和力学性能的影响

Fig. 7 Effects of different Zr element content on the microorganization and mechanical properties of the interface

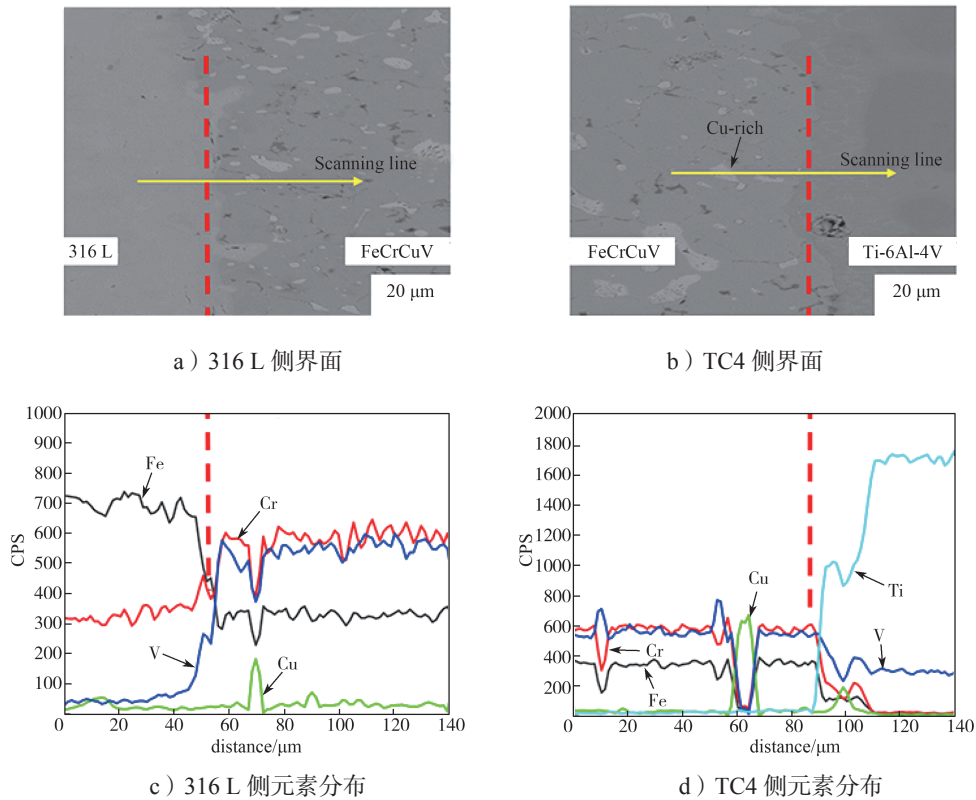


图 8 316L/FeCrCuV/Ti-6Al-4V 界面的微观结构和元素分布

Fig. 8 Microstructure and elemental distribution at the interfaces of 316L/FeCrCuV/Ti-6Al-4V

合金在增材制造过程中的行为，为工艺优化提供指导，进一步拓展增材制造高熵合金在钛合金与不锈钢中间层领域的应用。

3 结论与展望

随着现代制造技术的发展，异种金属间的多材料连接问题逐渐成为了学术界和工业界关注的焦点。

传统的熔焊、钎焊、搅拌摩擦焊、激光偏置焊等方法在一定程度上解决了金属材料间的连接问题，但由于不同金属之间的热物理性质、化学反应特性和熔化行为差异，连接过程中常常会产生不利的界面反应或冶金问题，影响连接质量与性能。特别是在钛合金与铝合金^[30-32]、不锈钢等金属材料连接时，这些差异更加显著，因此必须精确控制连接过程中的热输入、

熔池动力学以及冷却速率, 以确保焊接区域的冶金结合质量达到要求。

对于钛 / 钢多材料的结合, 界面反应与冶金结合质量是影响连接效果的核心因素。钛合金与钢不互溶的化学成分和物理性质较大的差异通常导致界面区域的多种缺陷, 不仅降低了接头的力学性能, 还可能造成连接区域的应力集中, 甚至导致界面失效。通过精确调控焊接参数、合理选择焊接材料可以缓解上述问题。

增材制造技术的引入为钛 / 钢多材料连接提供更多的创新路径。传统焊接方法通常依赖于固定的焊接材料, 而增材制造能够根据需求灵活调整材料成分和结构, 并设计应用多种中间层以减少界面处钛合金与钢中元素的互相反应, 可以平滑不同金属间的成分变化, 从而优化界面微观结构。通过增材制造技术引入的中间层能够有效减少脆性相的生成, 改善界面的抗拉强度、抗疲劳性能和断裂韧性, 显著提升连接效果, 避免了传统焊接中由于材料不兼容导致的界面失效。这不仅提高了连接部件的强度和耐腐蚀性能, 还改善了结构的整体性能, 使得这些连接部件在航空航天、汽车、海洋工程等领域中得到了广泛的应用。

随着包装领域工业应用需求的不断提高, 金属多材料连接技术亟需进一步提升其适应性和可靠性, 以满足包装机械、金属容器、包装教具等产品日益增长的技术标准和质量要求。特别是在食品包装、医药包装及高端工业包装等高要求领域, 金属多材料连接技术的应用将有助于提升包装产品的性能, 如增强抗压强度、提升密封性能以及延长使用寿命等。通过技术的不断创新与进步, 金属多材料连接将在更多包装细分领域展现出其独特的应用价值, 推动包装制造产业的发展与升级。未来, 随着材料科学、制造工艺以及智能制造技术的持续发展, 金属多材料结构将在包装装备领域的应用潜力将得到进一步释放, 带来全新的设计理念和技术方案, 进而推动包装行业向更高效、更环保、更智能的方向发展。

综上所述, 钛合金与钢的多材料连接研究已取得了显著的进展, 尤其是在增材制造技术的应用方面, 展示了广阔的前景和巨大潜力。尽管如此, 现阶段的研究仍然存在一些挑战, 特别是在界面反应控制、材料设计、工艺优化等方面仍需进一步深入探索。在未来的研究中, 需要结合先进的计算模拟技术、实验方法和多尺度表征手段, 深入研究不同金属间的连接

机理及界面反应规律。同时, 随着工业应用需求的不断提高, 金属多材料连接技术必须进一步提升其适应性和可靠性, 以满足包装机械、包装金属容器及包装教具等领域日益增长的技术标准和质量要求。通过技术的不断创新和进步, 金属多材料连接将在更多的领域展现出其独特的应用价值, 推动相关产业的发展与升级。

参考文献:

- [1] BANDYOPADHYAY A, HEER B. Additive Manufacturing of Multi-Material Structures[J]. Materials Science and Engineering: Reports, 2018, 129: 1-16.
- [2] BOSE S, ROBERTSON S F, BANDYOPADHYAY A. Surface Modification of Biomaterials and Biomedical Devices Using Additive Manufacturing[J]. Acta Biomaterialia, 2018, 66: 6-22.
- [3] DEBROY T, MUKHERJEE T, MILEWSKI J O, et al. Scientific, Technological and Economic Issues in Metal Printing and Their Solutions[J]. Nature Materials, 2019, 18(10): 1026-1032.
- [4] GU D D, SHI X Y, POPRAW R, et al. Material-Structure-Performance Integrated Laser-Metal Additive Manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [5] LOWTHER M, LOUTH S, DAVEY A, et al. Clinical, Industrial, and Research Perspectives on Powder Bed Fusion Additively Manufactured Metal Implants[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 565-584.
- [6] WILSON J M, PIYA C, SHIN Y C, et al. Remanufacturing of Turbine Blades by Laser Direct Deposition with Its Energy and Environmental Impact Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 80: 170-178.
- [7] TAN C L, ZHOU K S, MA W Y, et al. Microstructural Evolution, Nanoprecipitation Behavior and Mechanical Properties of Selective Laser Melted High-Performance Grade 300 Maraging Steel[J]. Materials & Design, 2017, 134: 23-34.
- [8] 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.
- [9] SONG T F, JIANG X S, SHAO Z Y, et al. Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion-

- Bonded Joints of Titanium TC4 (Ti-6Al-4V) and Kovar (Fe-29Ni-17Co) Alloys[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017, 24(10): 1023–1031.
- [10] ZAKIPOUR S, HALVAEE A, ALI AMADEH A, et al. An Investigation on Microstructure Evolution and Mechanical Properties During Transient Liquid Phase Bonding of Stainless Steel 316L to Ti-6Al-4V[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 626: 269–276.
- [11] BOUAYAD A, GEROMETTA C, BELKEBIR A, et al. Kinetic Interactions Between Solid Iron and Molten Aluminium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 363(1/2): 53–61.
- [12] YIN F C, ZHAO M X, LIU Y X, et al. Effect of Si on Growth Kinetics of Intermetallic Compounds During Reaction Between Solid Iron and Molten Aluminum[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 556–561.
- [13] SOLTANI TASHI R, AKBARI MOUSAVI S A A, MAZAR ATABAKI M. Diffusion Brazing of Ti-6Al-4V and Austenitic Stainless Steel Using Silver-Based Interlayer[J]. Materials & Design, 2014, 54: 161–167.
- [14] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, BELYAVINA N, et al. Evolution of Microstructures and Mechanical Properties During Dissimilar Electron Beam Welding of Titanium Alloy to Stainless Steel via Copper Interlayer[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 585: 114–122.
- [15] GAO M, MEI S W, WANG Z M, et al. Characterisation of Laser Welded Dissimilar Ti/Steel Joint Using Mg Interlayer[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(4): 269–276.
- [16] TEY C F, TAN X P, SING S L, et al. Additive Manufacturing of Multiple Materials by Selective Laser Melting: Ti-Alloy to Stainless Steel via a Cu-Alloy Interlayer[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100970.
- [17] 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.
- [18] 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, 2018, 9: 1400–1404.
- [19] ADOMAKO N K, NOH S, OH C S, et al. Laser Deposition Additive Manufacturing of 17-4PH Stainless Steel on Ti-6Al-4V Using V Interlayer[J]. Materials Research Letters, 2019, 7(7): 259–266.
- [20] XIA Y Q, DONG H G, ZHANG R Z, et al. Interfacial Microstructure and Shear Strength of Ti6Al4V Alloy/316L Stainless Steel Joint Brazed with $\text{Ti}_{33.3}\text{Zr}_{16.7}\text{Cu}_{50-x}\text{Ni}_x$ Amorphous Filler Metals[J]. Materials & Design, 2020, 187: 108380.
- [21] XIA Y Q, DONG H G, LI P. Brazing TC4 Titanium Alloy/316L Stainless Steel Joint with $\text{Ti}_{50-x}\text{Zr}_x\text{Cu}_{39}\text{Ni}_{11}$ Amorphous Filler Metals[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 849: 156650.
- [22] JIANG T, HOU J X, CHEN P, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V/316L Dissimilar Materials with FeCrCuV Medium-Entropy Alloy Transition Layer by Laser Metal Deposition[J]. Journal of Laser Applications, 2023, 35(3): 32004.
- [23] DIAO H Y, FENG R, DAHMEN K A, et al. Fundamental Deformation Behavior in High-Entropy Alloys: an Overview[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2017, 21(5): 252–266.
- [24] YE Y F, WANG Q, LU J, et al. High-Entropy Alloy: Challenges and Prospects[J]. Materials Today, 2016, 19(6): 349–362.
- [25] MIRACLE D B, SENKOV O N. A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts[J]. Acta Materialia, 2017, 122: 448–511.
- [26] DESHMUKH A A, RANGANATHAN R. Recent Advances in Modelling Structure-Property Correlations in High-Entropy Alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 204: 127–151.
- [27] TAKEUCHI A, INOUE A. Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element[J]. Materials Transactions, 2005, 46(12): 2817–2829.
- [28] WANG Z R, QIANG J B, WANG Y M, et al. Composition Design Procedures of Ti-Based Bulk Metallic Glasses Using the Cluster-Plus-Glue-Atom Model[J]. Acta Materialia, 2016, 111: 366–376.
- [29] AHMED W O. Can High-Entropy Interlayers Develop Intermetallic-Free Welded Joints of Dissimilar Metals?[J]. Eng, 2020, 1(2): 183–187.
- [30] GAO M, CHEN C, GU Y Z, et al. Microstructure and Tensile Behavior of Laser Arc Hybrid Welded Dissimilar

- Al and Ti Alloys[J]. Materials, 2014, 7(3): 1590–1602.
- [31] LI H L, CAO H Y, XIA H B, et al. Effects of Laser Power on the Microstructural Evolution and Mechanical Performance in Laser Dissimilar Welding of TC4 to SiCp/6092Al Composite[J]. Materials Characterization, 2023, 206: 113391.
- [32] HAO X N, LIU X. Molecular Dynamics Study on Microscale Residual Stress of Graphene/Aluminum Nanocomposites by Selective Laser Sintering[J]. Rare Metals, 2022, 41: 3677–3683.
- (责任编辑: 邓 彬)

Progress in Multi-Material Additive Manufacturing of Titanium/Steel Components

FAN Haiyang, WANG Chonghao

(Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai Shandong, 264000, China)

Abstract: An overview of the current research was provided on multi-material manufacturing of titanium/steel and the application of additive manufacturing (AM) technologies in this domain by reviewing the isolation effects of various interlayers on the reactive alloy components at the titanium/steel interface and examining the potential of medium and high-entropy alloys as interlayer materials. Through the analysis of microstructure and mechanical properties of the titanium/steel interface, the formation mechanisms of various intermetallic compounds in the transition zone were systematically discussed, while the impacts of process parameters and structural design on defect formation and elemental diffusion behavior at the multi-material interface were also investigated. The application of AM techniques in titanium/steel multi-material connections aims to provide insights for achieving defect-free, strong, and solidly bonded interfaces, and promotes the development of the packaging industry in a more efficient, environmentally friendly and intelligent direction.

Keywords: titanium; steel; multi-material; interlayer; laser additive manufacturing