

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.002

Ti6Al4V/NiTi 异种合金连接技术研究进展

胡凯明^{1,2}, 盛瑞², 林开杰²

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324; 2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: Ti6Al4V 钛合金与 NiTi 形状记忆合金的异种材料连接在航空航天自适应结构及生物医疗器械等领域具有重要应用前景, 可同时满足高比强度、耐腐蚀性与形状记忆/超弹功能需求。然而, 两种材料在热物性、相变行为及化学反应特性上的显著差异, 易在连接过程中引发界面缺陷、脆性 Ti-Ni 金属间化合物生成及功能性能退化, 制约工程应用。本文以 Ti6Al4V/NiTi 体系为对象, 系统综述了传统焊接与增材制造技术在界面组织演化、缺陷控制及性能调控方面的研究进展, 分析了界面反应特征及其对力学性能和形状记忆行为的影响, 并总结关键共性问题与针对性解决思路, 展望其在航空航天与生物医疗领域的未来发展方向。

关键词: 异质金属; 异种连接; 焊接; 激光增材制造; 电弧增材制造

中图分类号: TG453.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)01-0019-27

Research Progress on Joining Technologies for Ti6Al4V/NiTi Dissimilar Alloys

HU Kaiming^{1,2}, SHENG Rui², LIN Kaijie²

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China; 2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The dissimilar joining of Ti6Al4V titanium alloy and NiTi shape memory alloy has attracted considerable attention for applications in aerospace adaptive structures and biomedical devices, where high specific strength, corrosion resistance, and shape memory or super elastic functionality are simultaneously required. However, pronounced differences in thermophysical properties, phase transformation behavior, and chemical reactivity between the two materials make the joining process highly susceptible to interfacial defects, the formation of brittle Ti-Ni intermetallic compounds, and degradation of functional performance, thereby limiting engineering applications. Focusing on the representative Ti6Al4V/NiTi material system, this paper systematically reviews recent progress in conventional welding and additive manufacturing techniques with respect to interfacial microstructural evolution, defect control, and property tailoring. The interfacial reaction characteristics and their effects on mechanical performance and shape memory behavior are analyzed, key common challenges and corresponding mitigation strategies are summarized, and future research directions toward aerospace and biomedical applications are discussed.

Key words: heterogeneous metals; dissimilar joining; welding joining; laser additive manufacturing; wire arc additive manufacturing

随着航空航天^[1]、国防军事^[2]、轨道交通^[3]、生命医疗^[4]等领域对装备轻量化、高性能化和多功能化的要求日益迫切, 单一材料难以满足装备中不同部件的性能和功能需要, 多种材料的复合设计和一

基金项目: 中国商飞-南航大飞机研究院联合创新研究基金(UAA25002)。

收稿日期: 2025-12-12; **修订日期:** 2026-01-24

通信作者: 林开杰, 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高性能金属激光粉末床熔融、面向增材制造的仿生结构设计、燃料电池金属双极板设计及增材制造等。E-mail: kaijie_lin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 胡凯明, 盛瑞, 林开杰. Ti6Al4V/NiTi 异种合金连接技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1): 19-45. HU Kaiming, SHENG Rui, LIN Kaijie. Research progress on joining technologies for Ti6Al4V/NiTi dissimilar alloys[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(1): 19-45.

体化使用在各个领域得到了广泛的应用。在航空航天领域中,民用客机的飞机座椅导轨由钛合金板和铝合金肋复合构成^[5];航天主发动机燃烧室由铜合金和镍合金复合构成^[6]。在汽车制造领域中,宝马 5 系的白车身结构由高强钢和铝合金复合构成^[7];新能源汽车动力电池中铝合金和铜合金复合而成的焊接件正逐步替代纯铜载流元件^[8]。在核能电力领域,反应堆压力容器低合金钢壳体与奥氏体不锈钢管道之间由镍基高温合金连接^[9];"华龙一号"的衬里由低合金钢和不锈钢复合构成。在化工冶金领域,用于酸性油气开采的管道由低碳钢和镍基合金复合构成^[10];冶金工业中电解锰的阴极板由紫铜与不锈钢复合构成^[11];转炉炼钢工程的氧气管道由铜管和不锈钢管复合构成^[12]。将异种金属材料进行复合,被视为实现材料性能按需分布的重要策略。"The right materials in the right position"的理念,是实现装备轻量化、高性能及多功能化目标的关键材料工程手段。

Ti6Al4V 与 NiTi 异种连接在智能结构与轻量化装备中同样具有广泛应用前景,如图 1 所示。在航空航天领域,这种异种合金连接可用于开发轻量化的智能执行器和变形结构,提供设计灵活性以实现多功能设备制造^[13]。具体而言,该连接技术可应用于飞机发动机的自适应锯齿涡轮气体喷嘴,其中 NiTi 的形状记忆效应允许喷嘴根据温度变化实时调整形状以降低噪声,而 Ti6Al4V 提供高强度和高耐热结构支撑,实现发动机效率优化和噪声控制^[14]。此外,该异种连接还可用于航空发动机的振动阻尼器,利用 NiTi 的超弹性和阻尼特性减少发动机叶片或涡轮组件的振动疲劳,而 Ti6Al4V 确保整体结构耐久性,适用于高应力环境如涡轮机壳体或支撑支架,提升飞行安全性和维护效率^[15]。

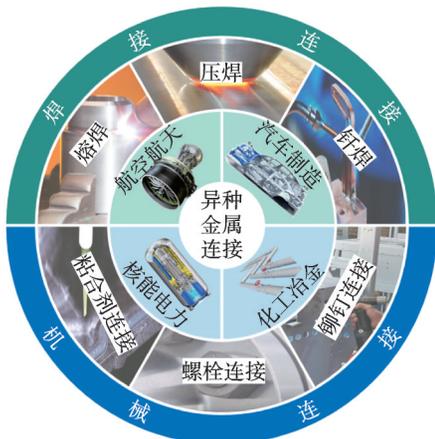


图 1 异种金属连接应用领域及主要技术

Fig.1 Application fields and key technologies of dissimilar metal joining

在生物医疗领域, NiTi 的超弹性和形状记忆效应结合 Ti6Al4V 的高强度和生物相容性,可用于制造智能植入物,如骨骼修复支架和血管支架,提高设备的适应性和耐用性^[15]。这些应用突显了异种连接技术在提升装备性能方面的潜力。

本文聚焦异质金属的机械连接、焊接、激光增材制造,重点对 Ti6Al4V/NiTi 异质金属连接的国内外最新研究进行梳理和分析,分析该异种金属材料连接的关键问题及相关的解决措施,并对这一连接的未来方向进行展望。

1 异质材料传统连接方法

目前,异种金属材料常用的传统连接技术可概括为两大类,机械连接和焊接。常见的机械连接细分工艺方法包括:粘合剂连接、螺栓连接、铆钉连接等;焊接的细分工艺方法包括:电弧焊、激光焊、旋转摩擦焊、搅拌摩擦焊、电弧熔钎焊、激光自熔钎焊、扩散焊等。相比于机械连接技术,焊接技术具有结构重量轻、工序简单、焊缝气密性好、接头美观等优点。但目前,异种材料连接仍存在系列问题,哈尔滨工业大学的冯吉才教授发表在《航空学报》的综述论文“异种材料连接研究进展”中指出:“异种材料的连接可以最大程度发挥材料各自的性能,是获得优异性能的异种材料复合结构的关键”,但是目前异种材料连接仍存在“异种材料润湿性差”“界面反应难以控制”“界面残余应力大”及“界面物相及应力预测难”等关键科学问题亟待解决^[16]。

1.1 机械连接

异质材料机械连接方法主要包括粘合剂连接、螺栓连接、铆钉连接,其中粘合剂连接是使用粘合剂将两种材料粘接在一起,如图 2 所示^[17-19]。粘合剂可用于各种材料连接,同时粘合接头具有良好的密封性,可以防止水、化学物质的渗透腐蚀;特别是在航空领域中,因其相对于螺栓连接、铆接等连接方式具有很少的应力集中,从而避免了结构断裂^[20]。然而某些粘合剂在高温环境下会严重降低胶粘剂的强度,进而影响连接强度^[21];其次潮湿环境下会加速接头裂纹扩展速率,这种效应在高温环境会更加明显^[22];同时在低温环境下,厚胶粘剂接头在低温下的粘接强度降低,难以适应航空工作环境^[23]。

螺栓连接作为一种典型的机械连接装配方式,其过程是使用螺栓和螺母将两个带有通孔的零件进行紧固连接。螺栓连接因其具有安装轻便、工艺分离易定义和重复使用等独特优势,因而广泛应用于航空航天、武器装备、能源化工和交通运输等行

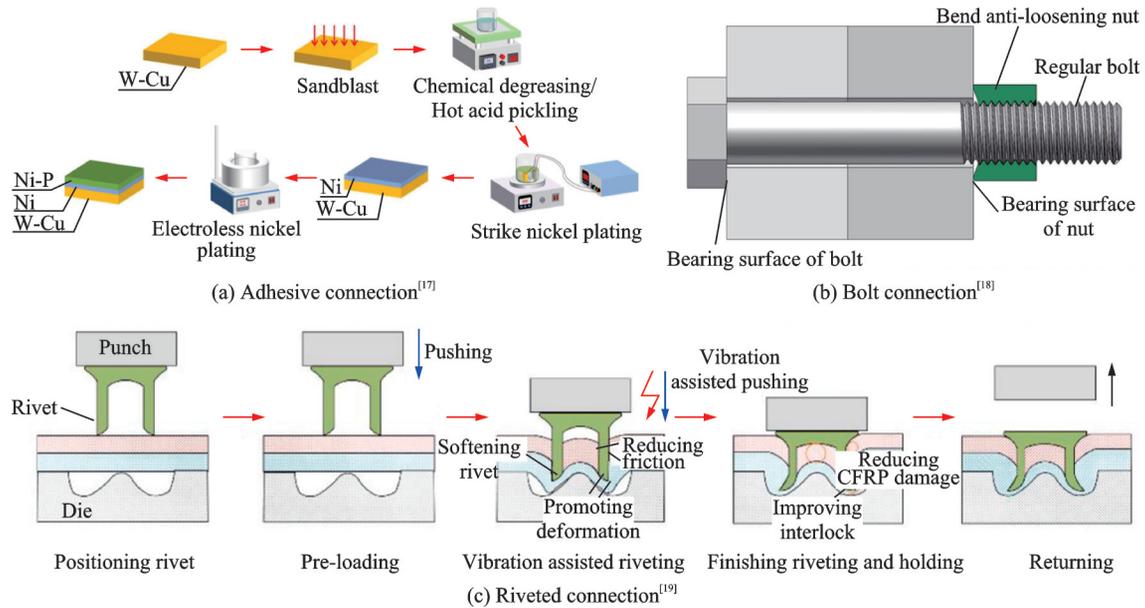


图 2 机械连接示意图

Fig.2 Schematic diagram of mechanical connection

业^[18]。相对于焊接方式,在连接的过程中没有热量产生,因此不会影响连接部件材质的微观结构,例如在航空航天领域中,为了保证飞机部件的结构完整度,机翼组件经常使用专门设计的螺栓连接,进而便于后期高效维修。然而在周期性载荷、过渡扭矩等环境下,会导致螺栓紧固件的松动;其次在腐蚀性环境下,螺栓本征材料性能下降,因而无法承受其工作环境下的载荷,进而发生螺栓连接的失效。

铆钉连接如自冲铆接有着独特的优势,如无须预先制孔、无烟雾、无火花和低噪声、无须表面处理、高静态和疲劳性能高等独特优势,在航空航天、汽车等行业迅速发展和广泛应用^[24]。自冲铆接可用于连接多层材料或混合材料,用于通过驱动铆钉穿过上板,随后传入下板,然后在合适的模具的引导下迫使铆钉在下板内扩口形成稳固的机械结构。文献[25]研究了自冲铆接连接不同厚度的AA6111-T4铝和HSLA340钢板的疲劳行为,发现板材失效和铆钉失效之间存在竞争关系,在低载荷水平下主要为板材失效,而在高载荷水平下主要为

铆钉失效。然而铆钉连接方式容易在复合材料结构中发生铆接损伤,限制了新一代着落器部件连接水平的提高^[26]。

1.2 焊接

焊接是一种通过局部加热、加压或两者结合将两个或多个金属或非金属材料连接在一起的工艺,如图3所示^[27-29]。而焊接又可以分为熔焊、压焊、钎焊3大主要类型,熔焊是通过加热局部区域使其熔化,冷却后形成焊缝,进而使两部分金属结合在一起,根据施加热源的方式又可以分为激光焊、电弧焊、气焊等,其中激光焊接是一种利用高密度激光对材料进行熔焊的方法,材料吸收激光辐射的能量,使其转化为热能并迅速熔化形成熔池,随后迅速冷却并凝固形成焊缝。激光焊因其对热输入的精准控制、自动化程度高、焊接速度快以及热影响区小而被认为是连接异质金属的优势方法之一。然而,在焊接过程中,两种金属原子会发生强烈扩散,因而在焊接接头中容易产生较多的脆性金属间化合物,最终导致接头处出现热裂纹^[30]。

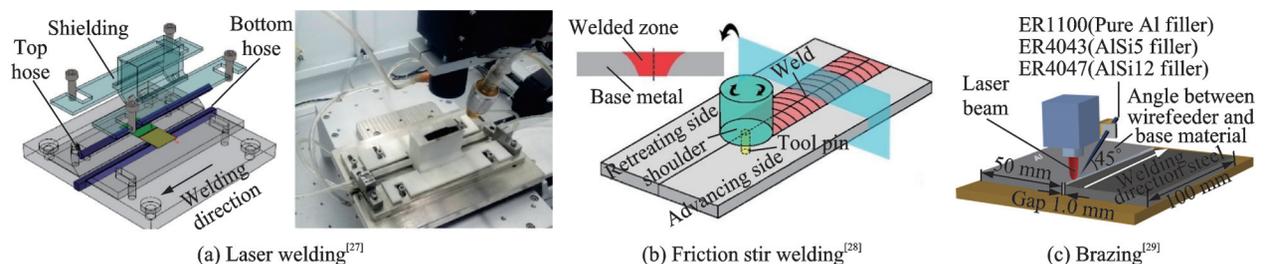


图 3 焊接示意图

Fig.3 Schematic diagram of welding

压焊是通过加压的方式使金属发生塑性变形、挤碎表面的氧化物,使纯净金属紧密接触并结合在一起。其中最为典型的压焊为搅拌摩擦焊,其主要包括 4 个阶段:进给阶段、保压阶段、焊接阶段和缩回冷却阶段^[31]。起初将旋转的工具(通常由销和肩部组成)插入两个工件的接触面之间,工具的旋转和向下施加的压力导致工件材料在工具周围产生塑性流动和热量,形成焊接区,随着工具沿焊接线移动,材料被搅拌并混合,最终形成固态焊缝,焊接完成后,焊缝区域逐渐冷却,形成具有特定微观结构的焊接接头^[28]。研究发现,搅拌摩擦焊的工艺参数对多材料的性能影响至深,文献^[32]采用搅拌摩擦焊连接了铝 5186 和低碳钢板,并研究了焊接速度、工具倾斜、销的几何形状和切入深度对接头微观组织和抗拉强度的影响,适当的焊接参数可减少脆性金属间化合物的形成,提高接头强度。然而搅拌摩擦焊工艺会引起微观结构变化、残余应力和变形,不当的工艺参数可能导致隧道缺陷、气孔和脆性金属间化合物的形成,影响接头强度,不适用于复杂零件成形^[30,33]。

钎焊是利用熔点低于连接金属的钎料,加热至钎料熔化但连接金属不熔化,通过熔化的钎料润湿和扩散实现连接^[34]。钎焊能够使用相对较低的熔化温度进行连接异质金属,过程中热量输入明显相对较低,降低了热变形和热影响区的可能^[35]。但也存在一定的局限,在较高的连接速度下会形成波浪形的边缘,这将会进一步影响连接效率以及焊接接头的质量^[36]。同时,在进行异质金属钎焊连接时,焊缝处的脚趾的陡峭程度会因成形时的热应力积累而显著影响^[37]。

当前,制造领域正朝轻量化、高性能及多功能化方向不断发展,对零部件多材料、复杂结构及一体化制造的需求日益迫切。从材料角度,镁合金、铝合金、钛合金等轻质高强金属及镍基高温合金、高熵合金、形状记忆合金等功能性金属,正逐渐替代高强钢、不锈钢等黑色金属。但是,这类高性能/多功能金属的成形性远不及钢铁等黑色金属,且这类金属的组成元素更为活泼,异种金属在结合时冶金反应调控难度更大。从结构角度,点阵结构、薄壁结构、拓扑结构等轻量化结构及仿生结构等多功能结构正逐步替代板材、管材、棒材等简单结构型材。但是,这类轻量化/多功能结构往往形状复杂,传统成形方法难以加工。因此,传统机械连接及焊接等连接方式已无法满足轻量化、高性能、多功能异种金属构件的材料-结构一体化成形需求,急需发展新的异种金属材料构件一体化成形技术。

2 异质材料增材制造连接方法

经过三十余年的发展,金属增材制造技术已从“只能成形致密度不高、无法实际使用的金属原型构件^[38]”的原型制造工艺,发展到“能够成形可直接使用的航空发动机复杂流道喷嘴构件^[39]及大尺寸运载火箭筒体^[40]等金属构件”的成熟制造技术。随着激光器技术、计算机技术以及机械工程技术等硬件技术的不断发展,以及增材制造专用材料、成形工艺、基础原理等理论机制的不断突破,金属激光增材制造已成为制造业中不可缺少的关键技术。目前,金属增材制造已能实现近全致密铝合金、钛合金、钢、镍基高温合金等金属材料构件的制造,材料的力学性能接近锻件水平。未来,除了进一步开发可用于增材制造的金属材料、提升材料力学性能之外,研发多功能化金属构件也是拓展金属增材制造应用领域的重要方向。2016年,美国德克萨斯大学 MacDonald 教授团队发表于《Science》的论文提出了通过多工艺 3D 打印可实现构件的多功能,其中一个重要的途径就是通过复合增材制造工艺实现多材料打印,以实现构件的多功能^[41]。2021年,南京航空航天大学 Gu 教授团队发表于《Science》的论文指出,“材料-结构-性能一体化驱动的增材制造需要将不同的材料可控地打印在不同的位置,以满足构件多样化的性能需求”^[42]。由此可见,异种金属材料增材制造是增材制造领域未来的一个重要发展方向,也为异种金属构件的材料-结构一体化成形提供了崭新的途径。

传统异种金属连接方法(如机械连接与焊接)虽已广泛应用,但存在显著局限性。机械连接虽避免了热输入,但易造成应力集中、增加结构重量,且难以实现气密性与复杂形状的适配;焊接连接虽能形成冶金结合,却因异种金属间显著的物理与化学性质差异,导致界面极易生成脆性金属间化合物,造成接头脆化、强度与延展性大幅下降,同时高热输入与热循环不可避免地诱发残余应力、微裂纹及功能退化。此外,传统连接对复杂几何结构与功能梯度设计的适应性差、疲劳性能不足,难以满足现代装备轻量化、高性能与多功能化的服役需求。与之相比,增材制造连接技术展现出独特优势:可通过精准调控热输入与材料沉积路径,有效抑制脆性相过渡生长并实现成分-微结构梯度过渡;支持原位合金化与多材料集成,避免传统焊接的冶金不相容性;同时柔性高,能成形复杂仿生结构并结合后热处理优化界面组织,从而实现力学性能与功能特性的协同提升,为异种金属构件的一体化、高性能制造提供了全新路径。

2.1 激光粉末床熔融

激光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)技术的基本工艺流程遵循离散-堆积的增材制造原理,如图4所示^[42-46]。首先,基于计算机辅助设计软件构建零件的三维实体模型,并通过切片软件将该模型离散化为一系列二维截面轮廓数据。随后,将切片数据导入成形设备,驱动其执行层状制造循环:铺粉装置在成形基板上均匀铺设一层精确量的金属粉末;高能激光束依据当前层截

面轮廓数据,在粉末床上进行选择性扫描熔化,熔池随后急速冷却凝固形成致密实体。当前层制造完成后,成形缸精确下降一个层厚,供粉缸同步上升,铺粉装置重新铺粉,激光束依照下一层数据进行扫描熔化,并与下层实现冶金结合。此过程逐层迭代,直至零件完全成形,其间未熔粉末始终作为临时支撑。最后,零件被包埋于粉末中冷却,取出后经清粉、线切割分离基板及必要的后处理,获得最终构件^[47]。

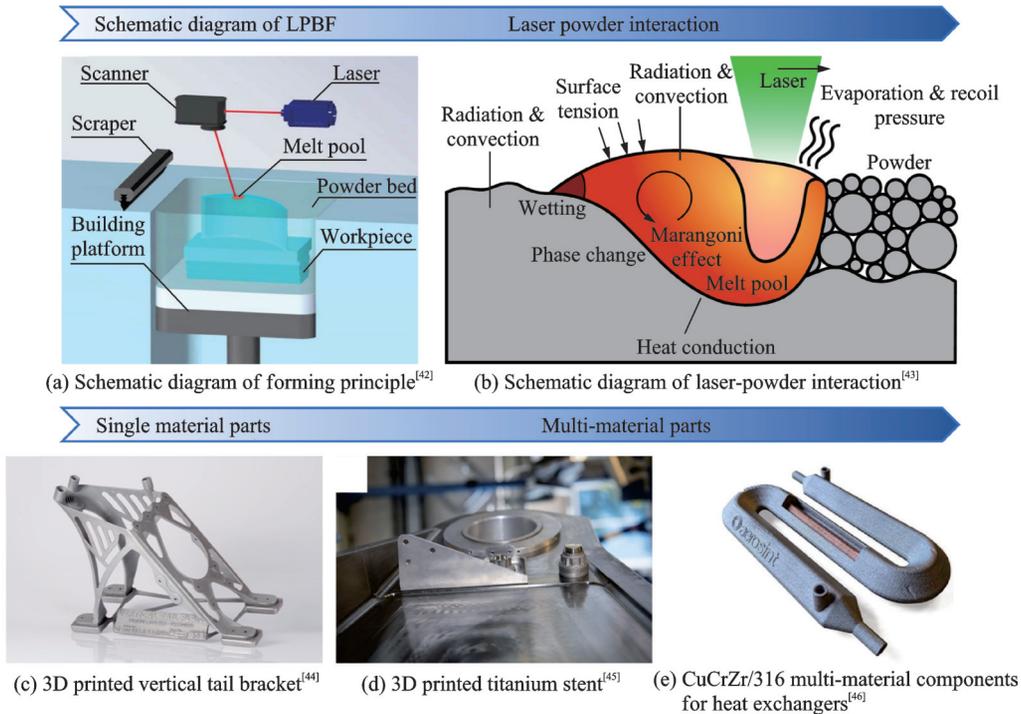


图4 LPBF技术

Fig.4 LPBF technology

相对于其他增材制造工艺,LPBF技术的成形柔性高,可以实现复杂结构零件的高精度成形。但是对于异种金属构件的成形,LPBF相比于激光直接能量沉积、电弧增材制造等基于送粉/丝的增材制造技术,存在材料切换灵活性不高、不同材料之间容易交叉污染以及异种粉末回收困难等问题。

围绕上述问题,国内外研究人员开展了异种金属铺粉装置的研发,并对多种材料体系的LPBF工艺开展了研究探索。2007年,德国萨克森激光研究所的研究人员^[48]设计了交替式铺粉装置,该装置是通过两个或两个以上的圆盘以圆周运动方式将粉末扫至成形基板上,从而实现高度方向上异种金属材料的成形。2018年,德国巴伐利亚激光中心的研究人员^[49]研发了电照相铺粉装置,其工作原理是利用光线照射光电导板使其带电,然后带电光电导板从粉料缸中将粉末吸附并移动到成形基板上,通过对光电导板背面施加电场使粉末落至成

形缸,通过吸附-放置不同金属粉末实现层间异种金属材料的成形,如图5所示^[48-53]。2019年,中国华南理工大学Yang教授团队^[50]开发了双料斗落粉式LPBF成形设备,该设备包括两组粉末进料装置,通过粉末流动调节器监测和控制不同粉末罐的进料速度,最终使用该设备获得了具有较好界面结合的316L/CuSn10异质材料。同年,英国曼彻斯特大学Li院士团队^[51]设计了逐点多喷嘴超声铺粉和逐点单层除粉相结合的铺粉装置,实现了层间和层内316L/Cu10Sn异种金属材料的制备。2022年,德国Fraunhofer铸造复合材料和加工技术研究所的研究人员^[52]设计了一种抽吸式铺粉装置,在传统铺粉装置的基础上添加了粉末去除装置,在成形第一种材料结束时,使用抽吸装置除去未成形的粉末,再进行第二种材料的铺粉并选择性成形,最终使用该设备获得了具有较好冶金结合效果的工具钢/铜合金异质材料。2023年,美国Lawrence Livermore国家实验室的研究人员^[53]提出了用于金

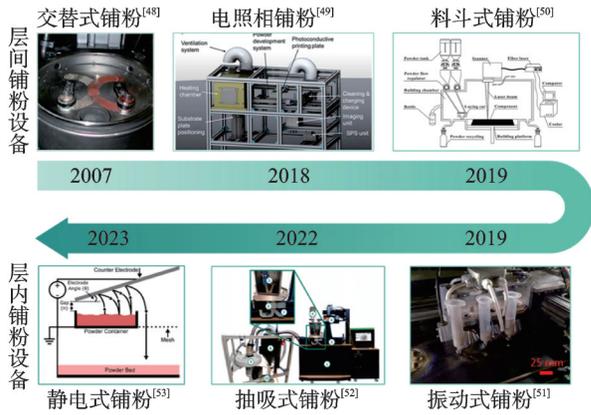


图5 LPBF 异种材料铺粉设备的发展历程

Fig.5 Development history of LPBF dissimilar material powder spreading equipment

属粉末层图案化沉积的静电粉末铺放技术。该技术由位于接地粉末容器上的对电极组成,当电极和粉末容器之间产生适当的电场时,粉末颗粒在电极和粉末容器之间反弹,同时缓慢迁移并沉积在成形基板上,最终实现了层内图案式多材料的铺放。

在多材料增材制造过程中,由于粉末不可避免地混合而产生交叉污染,该污染又是回收利用的主要挑战,因为粉末原料中的杂质会导致打印出的零件质量较差。意大利 Errico 等^[54]提出在异质材料构件制造过程中实施分层原位光学监测系统的工作,评估两种材料之间的界面实际轮廓与理论轮廓的偏差,进而验证不同材料之间是否存在污染,确保生产组件的高质量,而无须额外的昂贵和耗时的

检查;德国 Fraunhofer 铸造研究所的 Horn 等^[55]提出了通过筛选进行分选和回收不同粒度分布的二元金属粉末混合物,研究了多个筛选工艺循环对不同粒度分布的多材料粉末混合物进行再加工的影响,实现了混合粉末的高效回收。

随着技术的不断迭代,异种金属材料粉末的精准铺放、精准回收等技术难题正逐渐被攻克,粉末交叉污染、难以回收利用等工程问题也在被逐步解决。可见,从设备硬件角度看,利用 LPBF 成形异质金属构件是可行的。

2.2 激光定向能量沉积

如图 6 所示^[40,42,56-58],激光定向能量沉积(Laser directed energy deposition, LDED)技术是将激光束对准基材表面,形成一个小熔池,通过氩气将粉罐中的粉末输入熔覆头喷嘴并进一步喷入熔池,粉末在熔池中与基材融合,形成液态的合金;根据设定的路径数据,激光器和材料送料装置协调运动,逐层沉积材料,逐渐构建出指定的成形件^[59]。LDED 技术通常由激光光斑直径、激光功率、扫描速度和粉末供给速率几个关键参数决定,这些参数均会影响激光体能量密度,进而影响粉末沉积过程^[60]。LDED 的工作原理图如图 6(a,b)所示^[42,56],离焦距离^[61]、扫描间距^[52,62]、扫描策略^[60]等其他激光工艺参数均会影响零件成形过程中的热流分布,进而影响成形件微观组织演变。因此,在 LDED 中,需要确定优异的工艺参数窗口,以获得各向同性的零件。

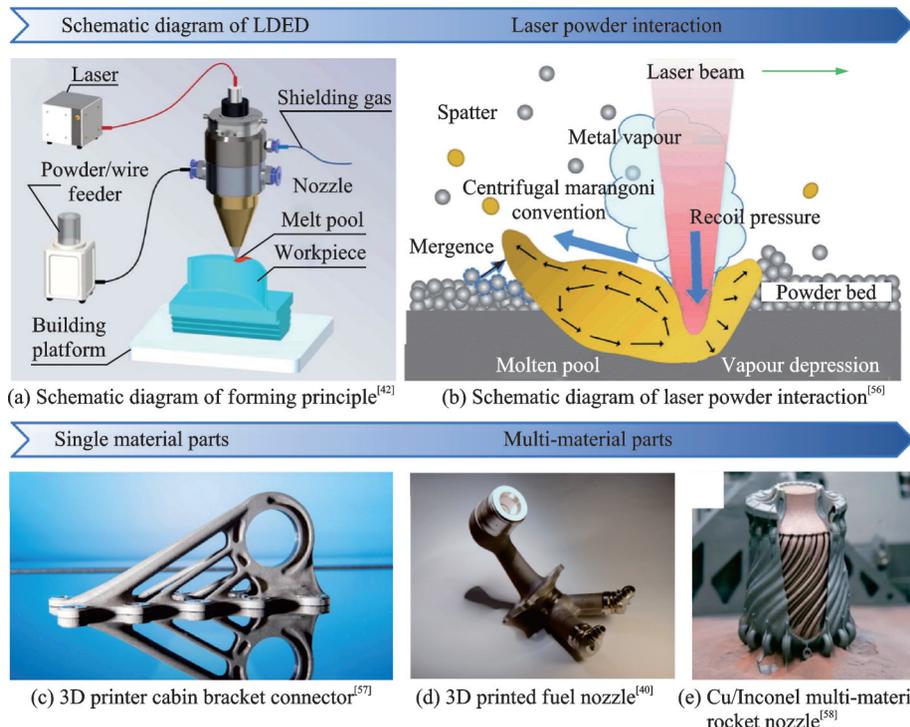


图6 LDED 技术

Fig.6 LDED technology

LDED工艺作为一种净成形部件的增材制造方法,在成形多材料构件领域具有独一无二的优势:其一,具有快速成形的能力,缩短生产周期,提高经济效益;其二,可以通过调控粉末的输入,进而成形多材料。LDED成形多材料是通过改变粉末的输送量和种类,进而实现层间及层内多材料,使得多材料界面成分梯度变化,进而获得界面无缺陷的多材料构件^[63]。目前,在LDED成形多材料的研究中,主要研究重心在高强度耐腐蚀合金,其中Ti6Al4V具有较高的强度重量比和良好的耐腐蚀性,是多材料零件中应用最广的材料,除了钛合金外,铬镍铁合金(尤其是IN718、IN625)和不锈钢(316L、304)也是LDED成形多材料中的重点材料。在LDED多材料成形中,高能激光束与基板相互作用,形成一个移动的动态熔池。为了保证成形过程的连续性,需要通过同轴喷嘴稳定且持续地将金属粉末送入熔池,最终实现高致密度的多材料构件。在成形过程中,金属粉末的流动性和粒径等因素直接影响构件的最终质量。较大粒径的粉末可能在成形时难以充分熔化,导致熔池黏度增加,

从而影响液态金属的铺展并引起球化现象。如果粉末杂质含量过高,可能会在成形过程中蒸发产生气体,从而形成气孔,严重影响构件的质量。激光工艺参数作为成形过程核心输入,如激光功率、扫描速度和粉末输送速率,均会影响熔池的形态,进而影响金属构件的成形质量。LDED的逐层累加特性使已沉积的层在激光辐照期间受到新一层热输入的影响,导致重复的热循环作用,从而引起构件内部复杂的微观组织变化。此外,反复的热循环还会导致构件内部的残余应力积累,可能引发裂纹和翘曲变形等问题。

2.3 电弧增材制造

电弧增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)是一种电弧焊衍生的技术,金属丝通过电弧的热能熔化,熔融金属按照一定的顺序进行沉积形成金属零件,或包覆两种材料以形成复合材料。根据热源的形式可以分为3类:基于气体保护金属电极弧焊增材制造(GMAW-AM)、基于气体保护钨极电弧焊增材制造(GTAW-AM)和基于等离子弧焊增材制造(PAW-AM)^[64],如图7所示^[65]。

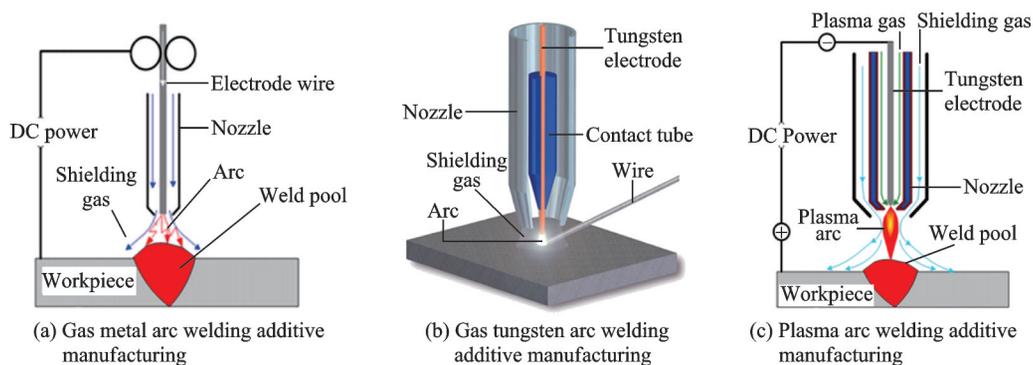


图7 电弧增材制造原理图^[65]

Fig.7 Schematic diagram of wire arc additive manufacturing^[65]

在GMAW-AM中,使用连续供给的金属焊丝作为电极,电弧在电极和工件之间往返撞击,金属焊丝熔化后,进一步通过工作台和焊枪之间的相对运动,进而实现金属液滴依次沉积在基板表面上,凝固后即可成形金属构件,成形的过程中,全程通入保护气体(如氩气或氦气),以防止熔融金属在冷凝过程中发生氧化^[66]。GMAW-AM技术通常由焊枪速度、工作台速度和焊接速度等工艺参数决定,这些参数均会影响热输入,进而影响粉末沉积速率^[67]。GMAW-AM成形效率较高,同时能够成形各种材料,操作简便,然而,对于成形比较精细的结构,不易控制。

在GTAW-AM中,使用非消耗性的钨电极和基板之间生成电弧,在电弧的作用下,金属焊丝熔

化并在基板表面上形成熔池,冷凝后即可完成成形^[68]。金属焊丝通过其前缘进入熔池,熔化并沉积在基板表面上,过程中通过氩气或氦气的保护,确保焊接过程中金属不会被氧化。GTAW-AM拥有更加优异的焊缝成形以及更高的强度,尤其适合高强度环境的零件成形;此外成形过程中能够精细控制热量的输入以及沉积的速度,极易适合于成形复杂结构形状以及薄壁结构^[69]。然而,成形效率低、设备复杂、操作复杂是其主要的技术弊端。

在PAW-AM中,电弧是通过钨电极与工件之间短接形成的,惰性气体流经电弧区时被迅速电离,气体变为导电状态,这使得电流可以在电极和工件之间流动,形成更强的电弧^[70]。气体被电流

加热并电离,形成等离子体,高流量的等离子体将在基板表面形成一个熔池,金属焊丝通过其前缘进入熔池,熔化并沉积在基板表面上,冷却后即可完成成形。PAW-AM在成形过程中,熔池的热影响区较小,使得材料的微观组织发生较少的变动,进而可以使成形件维持材料的原始性能^[71];同时由于可以实现较高的熔池深度/宽度比,非常适合大规模构件的成形,基于PAW的AM可以成形更高质量的焊缝,但其高额的维护成本是制约技术发展的关键要素之一。

基于电弧增材制造的发展,进一步发展出多线电弧增材制造,其技术原理是将不同的线材集合到单个电弧增材设备中,这种集成允许成形空间上不同材料的零件,进而为工程师们提供更加畅想的空间,以根据服役环境需求优化工件属性。这种方法有效改善了粉末床熔融工艺在打印速率、设备和粉末成本的不足,成形过程中无须昂贵的热源以及金属粉末,而是采用相对节约的电弧和金属丝原料,使整体工艺更加经济^[65]。同时,多线电弧增材提高了成形效率,进而用更少的材料实现快速生产。在多线电弧增材制造过程中,工艺参数对成形零件的尺寸精度和性能控制至关重要,电流、电压以及送丝速率等参数对确保金属焊丝与基板之间的充分熔合、控制焊缝沉积形状具有重要影响^[72]。

2.4 共性问题

铁合金、镍合金、铝合金、钛合金以及钨合金是目前异种金属激光增材制造主要研究的材料。通过优化成形工艺参数以及不同材料体系成分设计,可对两种具有优异性能的异种金属材料进行一体化激光增材制造,实现“The right materials in the right position”,使不同材料的性能/功能得到充分发挥,以满足航空航天、生物医疗、化工冶金等领域的服役需要。国内外许多科研单位均开展了异种金属材料激光粉末床熔融成形研究,如英国曼彻斯特大学李琳院士团队、华南理工大学杨永强教授团队、北京科技大学张柏成教授团队、北京工业大学张冬云教授团队、南京航空航天大学顾冬冬教授团队等。表1汇总了目前激光增材制造典型异种金属材料体系的相关文献^[73-82]。总结现有研究结果,激光增材制造成形异种金属材料仍存在以下共性挑战:

(1) 界面孔隙、裂纹等缺陷调控难

激光增材制造异种金属材料的界面往往存在较多的成形缺陷,缺陷的主要类型为孔隙和裂纹。孔隙的产生主要是因为异种材料所对应的激光成形工艺不同,在界面处由于工艺参数的不匹配容易

造成低熔点材料的气化或高熔点材料的熔化不充分,导致界面处出现气孔或未熔合孔隙。裂纹的生成是由于不同材料具有不同的热膨胀系数,它们在激光快速加热和快速冷却的过程中会经历不同程度的体积变化^[30]。这种非均匀变形行为会在界面处产生热应力,极易导致界面处形成裂纹。界面上孔隙和裂纹等缺陷问题是制约激光粉末床熔融异种金属材料应用的一大挑战。

(2) 界面脆性金属间化合物控制难

界面脆性金属间化合物的生成是异种金属材料界面易开裂的一大诱因。目前研究的异种材料体系中,钨-铜体系、钢-铜体系不易发生冶金反应,具有较好的成形性^[76-80],也是目前文献报道较多的材料体系;钢-镍体系在界面处可形成韧性较好的界面产物,避免了界面开裂^[81];而钛-铜体系、钛-铝体系、钛-钴体系以及镍-钛体系^[82-85]在界面处形成的大多数金属间化合物均呈现明显的脆性,导致界面塑韧性下降,在残余应力作用下极易发生开裂等问题。

(3) 性能/功能“1+1>2”目标实现难

与单一金属材料构件相比,异种材料的复合有望充分发挥两者的性能优势,使其获得更加优异及多元的综合性能。如在特定的位置使用特定的材料,可在不影响构件整体力学性能的同时,实现局部高导热性、耐腐蚀性、耐磨性和高导电性等功。但受限于现有异种材料的成形质量,目前激光粉末床熔融异种材料的研究主要围绕剪切测试、拉伸测试等界面结合性能测试,对异种材料功能性及整体构件服役性能的研究较少。

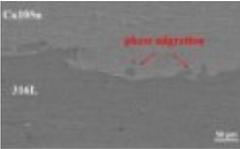
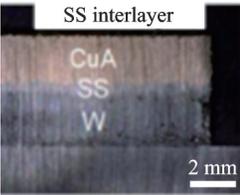
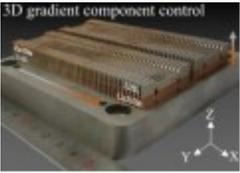
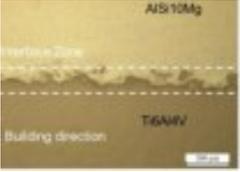
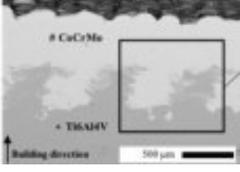
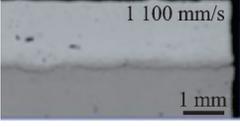
2.5 解决措施

针对上述共性挑战,当前研究主要通过以下策略进行缓解:由不同材料热物性差异和工艺参数不匹配引起的界面孔隙、裂纹等成形缺陷,可主要通过优化成形工艺参数(如激光功率、扫描速度和重熔策略)与精准调控热输入加以缓解;由成分突变和元素快速互扩散导致的脆性金属间化合物生成问题,则重点依赖成分梯度过渡设计、功能梯度结构构建(如离散梯度策略排除易裂组成范围)及界面反应调控(如引入中间层或原位合金化)等手段加以控制;而在异种材料服役条件下综合性能难以充分发挥的问题,则须通过功能梯度化设计和界面微观结构优化(如晶粒细化与相分布调控),实现力学性能与功能需求在空间尺度上的协同匹配,从而接近或实现“1+1>2”的性能提升目标。

在工艺优化方面,重点通过工艺参数优化和激光重熔来调控熔池形貌、稀释率及界面反应行为,

表 1 激光粉末床熔融典型异种金属材料体系文献汇总

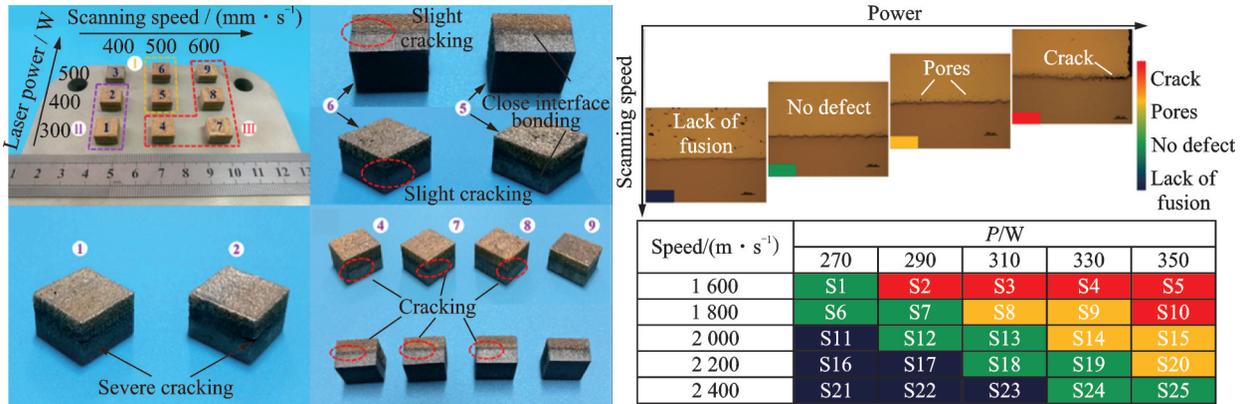
Table 1 Summary of literature on typical dissimilar metal material systems fused by laser powder bed

序号	材料	示意图	性能	文献
1	316L/CuSn10/ Inconel 718 multiple materials within a layer		Microhardness: 316L \approx 220 HV, IN718 \approx 320 HV, Cu10Sn \approx 120 HV	73
2	316L/CuSn10 multi-material between layers		Not quantified	74
3	316L/CuCrZr multi-material between layers		UTS, vertical integration: (318.2 \pm 7.2) MPa UTS, horizontal integration: (519.8 \pm 6.2) MPa	75
4	W/CuA multi-material between layers		Not quantified	76
5	CuSn10/ 316L multi-material between layers		Not quantified	77
6	Inconel 718/ 304L multi-material between layers		Not quantified	78
7	Ti6Al4V/CuSn10 multi-material between layers		Ti-Cu intermetallic phases with hardness $>$ 1 000 HV	79
8	Ti6Al4V/ AlSi10Mg multi-material between layers		Not quantified	80
9	Ti6Al4V/ CoCrMo multiple materials within a layer		Not quantified	81
10	Ti6Al4V/ AlMgScZr multi-material between layers		Tensile strength \approx 200 MPa	82

从而抑制缺陷形成并改善界面冶金结合质量。在功能梯度设计方面,则通过成分过渡、梯度过渡以及界面结构设计等手段,实现不同金属间物理与化学性质的渐变匹配,降低热膨胀和弹性模量不匹配导致的残余应力,提升界面结构稳定性和力学性能。通过上述两类策略的协同应用,可系统性提升异质金属界面的成形质量和服役可靠性。

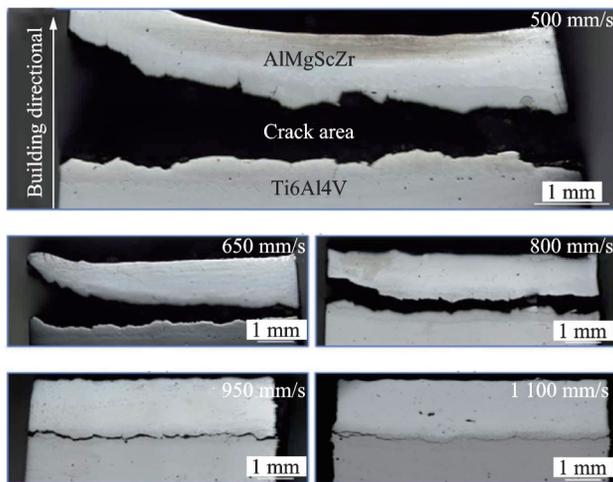
2.5.1 异质材料成形工艺优化

国内外研究人员开展了多种材料体系的激光增材制造工艺研究探索,如图 8 所示^[79-80,82-83]。华中科技大学 Chen 等^[83]通过调整激光功率、扫描速度等工艺参数,成功成形了界面无缺陷的 316 L/CuSn10 异质金属样品以及双金属晶格结构;北京工业大学 Zhang 教授团队^[80]通过调节激光功率和

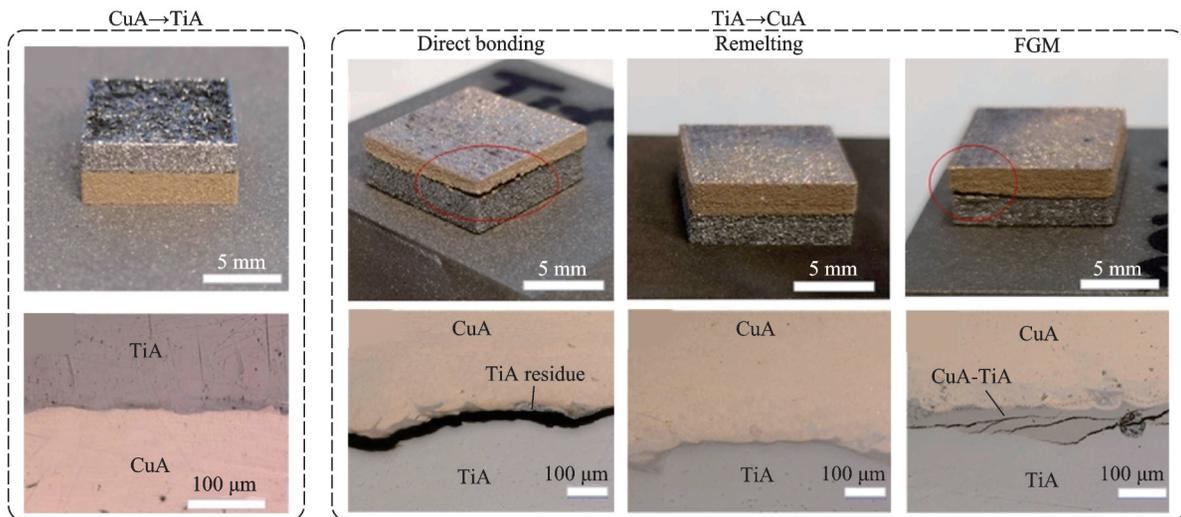
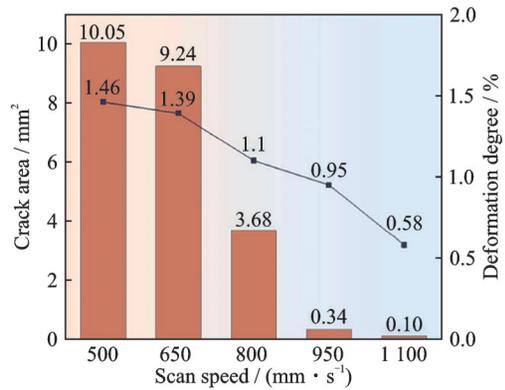


(a) Process optimization of 316L/CuSn10 heterogeneous metal^[83]

(b) Process optimization of Ti6Al4V/AlSi10Mg heterogeneous metal^[80]



(c) Process optimization of Ti6Al4V/AlMgScZr heterogeneous metal^[82]



“CuA→TiA” means to print CuA first, then TiA; “TiA→CuA” means to print TiA first, then CuA.

(d) Optimization of scanning strategy for Ti6Al4V/CuSn10 heterogeneous metal interface^[79]

图 8 典型异种金属建模工艺特性

Fig.8 Process characteristics of typical dissimilar metal joints

扫描速度,研究了 Ti6Al4V/AlSi10Mg 异质金属的界面反应机理,实现了 Ti6Al4V/AlSi10Mg 异质金属界面宏观无裂纹的成形;重庆大学 Zhang 等^[75]通过控制激光功率、扫描速度等工艺参数,研究了工艺参数对 316L/CuCrZr 界面缺陷和性能的影响,得到了界面冶金结合良好的 316L/CuCrZr 异质金属;南京航空航天大学 Gu 教授团队^[82]通过调整 AlMgScZr 的工艺参数,研究了成形过程中残余应力的发展以及工艺参数对界面金属间化合物的影响,得到了 Ti6Al4V/AlMgScZr 异质金属界面宏观无裂纹的金属构件;美国航空公司 Li 等^[84]提出在 CuCr1Zr 与硬质 M300 工具钢异质金属界面加入相应的界面层工艺参数,实现了 CuCr1Zr/M300 异质金属界面无缺陷的成形。

此外有其他学者提出在通过再熔化和再结晶的细晶强化以及扫描策略可以显著改善异质金属界面结合性,如英国曼彻斯特大学 Li 院士团队^[79]在成形异质金属构件的第二种金属时进行适当层数的重熔,实现了 Ti6Al4V/CuSn10 物性显著差异的异质金属构件界面宏观无裂纹的成形;华南理工大学 Yang 教授团队^[51]通过优化工艺参数和扫描策略,得到了 316L/CuSn10 异质金属界面冶金结合良好的金属构件。

综上所述,通过对增材制造的工艺参数进行优化,可以实现对不同物性材料金属进行热输入调控,能够降低成形过程中的界面残余应力,减少界面处脆性金属间化合物的形成,进而实现异质金属界面的良好冶金结合。然而,在多材料激光粉末床熔融成形过程中,其中涉及的工艺参数较多,如激光功率、扫描速度、扫描策略等,这些参数的优化过程需要大量的时间资源,进而导致参数优化受到阻碍。在 Ti6Al4V/NiTi 异种激光焊接中,工艺参数对界面性能的影响呈现显著的量化关系。主要通过调控激光功率、焊接速度、激光偏移量以及中间层厚度等参数,实现对脆性 Ti₂Ni 相生成、裂纹抑制和力学性能的优化。例如:激光偏置可减少 Ni 元素扩散,显著降低 Ti₂Ni 相体积分数,从而消除横向裂纹,并将接头抗拉强度提升至 300~520 MPa,断裂应变达 3%~5.6%^[13]。此外,降低热输入可减薄脆性相厚度(30%~50%)、缓解残余应力、避免固化裂纹^[13]。这些量化关系表明,结合激光偏移与中间层策略,能有效控制界面脆性相并显著提升接头性能。这些量化关系还表明,精准优化工艺参数和中间层策略,能有效控制界面脆性相并实现性能提升,为航空航天智能执行器和生物医疗植入物的可靠连接提供指导。

2.5.2 异质材料功能梯度化设计

功能梯度设计可以沿激光扫描方向或成形方向进行布置,以在不同尺度上实现材料性能的渐变匹配,其核心内容主要包括:过渡连接、梯度连接以及界面结构设计,如图 9 至 11 所示^[76,85-94]。其中,过渡连接是指在两种异质金属之间引入第三种材料,通过形成中间过渡层来缓和成分和性能的不匹配。该过渡材料需要同时具备与两侧金属良好的冶金结合能力,并具有一定的互溶性,以确保形成稳定的过渡组织,减少脆性相生成并提升界面整体性能^[95-97]。由于不同材料之间物理性质差异和化学反应,直接连接可能会生成脆性金属间化合物或不均匀熔合,导致连接区域性能下降,中间层可作为缓冲区,能够显著降低这类问题的发生。通过精确调控中间层的成分和厚度,可以有效避免不同材料间性能差异所带来的界面失效等问题,从而优化不同材料之间的结合质量,最终提升构件的整体性能。同时,通过使用不同中间层材料,使同一构件在不同区域具备不同的性能,可满足复杂功能设计的需求。

围绕过渡连接,国内外研究人员开展了多种材料体系的过渡层激光增材制造研究探索,Zhang 等^[85]在成形 Cu/SS316L 异质金属的 LDED 过程中,由于 Ni 与 Fe 和 Cu 的相容性非常好,同时该过渡层材料具有高导热性,进而促使整体异质金属导热性的提高,因此选择镍基合金 Deloro22 作为过渡层,最终实现了 Cu/D22/SS316L 异质金属界面无开裂的成形。Wei 等^[76]研究了 CuA 与 W 之间的过渡连接,由于少量的镍等金属元素的添加可以有效降低 W 的烧结活化能,进而降低烧结温度,并同时通过无序晶界的改变加速 W 的扩散,另外,Ni 与 Cu 之间的相容性非常好,因此选择质量分数为 10%~13% 的 Ni 的 316LSS 作为过渡层,最终实现了 W/316LSS/CuA 异质金属界面宏观无裂纹的成形。Zhang 等^[86]在成形 Ti6Al4V/AlCuMg 异质金属的 LPBF 过程中,由于 Cu 与 Al 和 Ti 的相容性较好,Cu 与 Ti 一起表现结构过冷,进而促进等轴晶粒的形成并提高界面抗开裂性能,同时 Cu 层可以阻碍 Al 原子和 Ti 原子之间的扩散,进而阻碍 Ti-Al 脆性金属间化合物,因此选择 Cu 层作为过渡层,最终实现了 Ti6Al4V/Cu/AlCuMg 异质金属界面无缺陷的成形。Jeong 等^[87]利用由 Inconel718 和 Ti6Al4V 中的主要成分组成的 Ti-Nb-Cr-V-Ni 作为过渡层,由于每层表现出相似的热物性和较低成分梯度变化,因此可以减少成形过程中每层产生的热应力,进而降低产生裂纹的可能性。此外,该过渡层具有扩散迟缓的特征,这进一步阻止了异

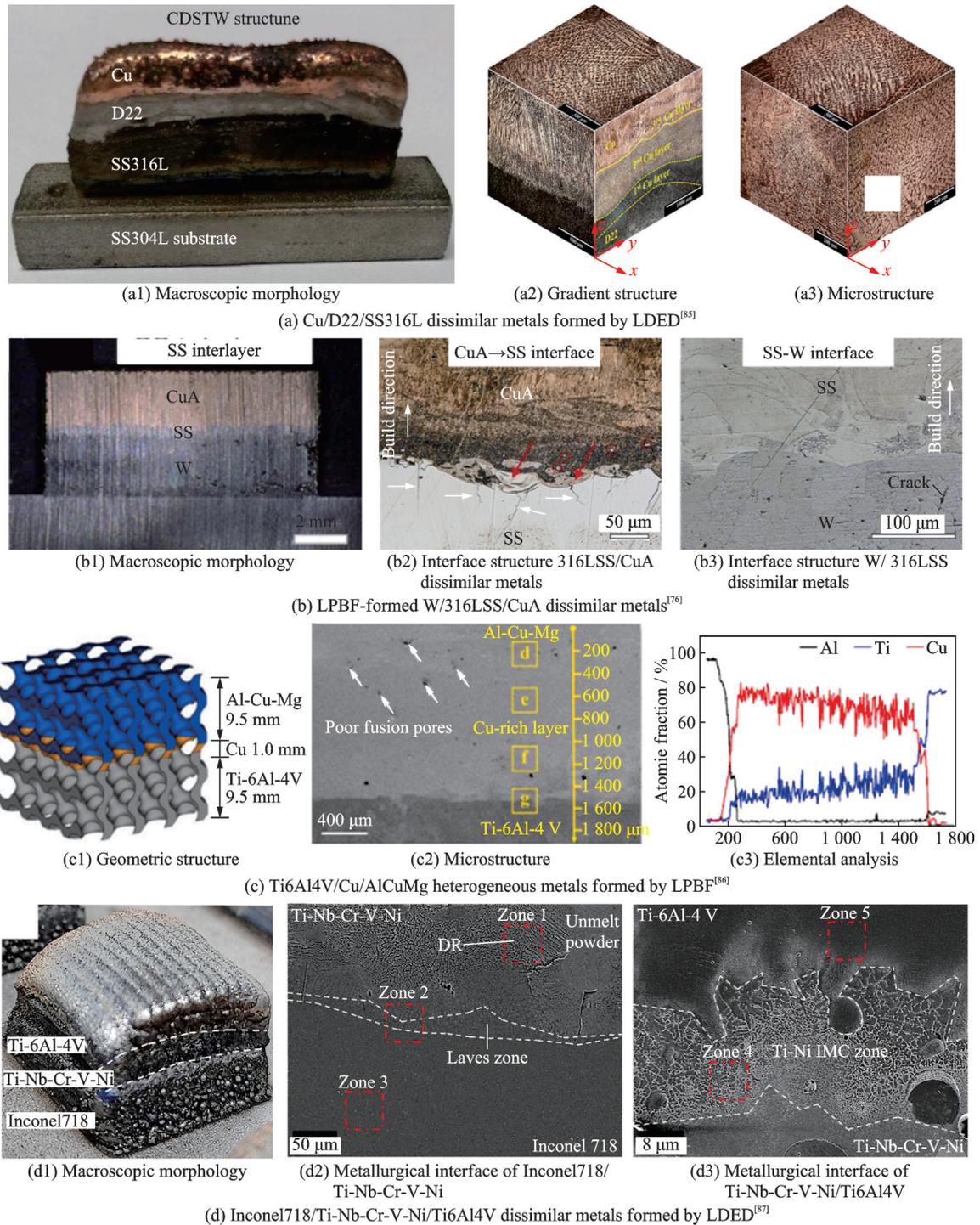


图 9 典型异种金属连接过渡设计特性

Fig.9 Transitional design characteristic of typical dissimilar metal joints

质金属间的元素扩散,进而减少界面处的脆性金属间化合物的生成,最终实现了 Inconel718/Ti-Nb-Cr-V-Ni/Ti6Al4V 异质金属界面无缺陷的成形。Li 等^[98]选择 IN718 作为 316L/CuCrZr 异质金属的过渡层,由于 Ni 与 Cu 和 Fe 的相容性非常好,同时使用 IN718 作为过渡层可以防止 Cu 元素向 Fe 元素的扩散,进而防止铜渗入而引起贯穿裂纹的出现,铜在 IN718 金属中的扩散也会使得镍的各种性能得到改善,最终实现了 316L/IN718/CuCrZr 异质金属界面无气孔和裂纹等缺陷,实现了良好的冶

金结合。综上所述,通过在异质金属的界面添加过渡层,可以有效阻隔异质金属间的元素,从而避免脆性金属间化合物的形成,进而实现异质金属界面的良好冶金结合。综上所述,通过成分过渡可以避免异质金属间元素扩散,进而避免脆性金属间化合物的生成,最终实现界面无缺陷的异质金属。

Ti6Al4V 与 NiTi 异种合金连接(尤其是激光焊和扩散焊)中,Pd(钯)被认为是目前效果最好且相对通用的中间过渡层材料。这主要源于其在热力学上优先形成低能量的 Ti-Pd 化合物(如 TiPd

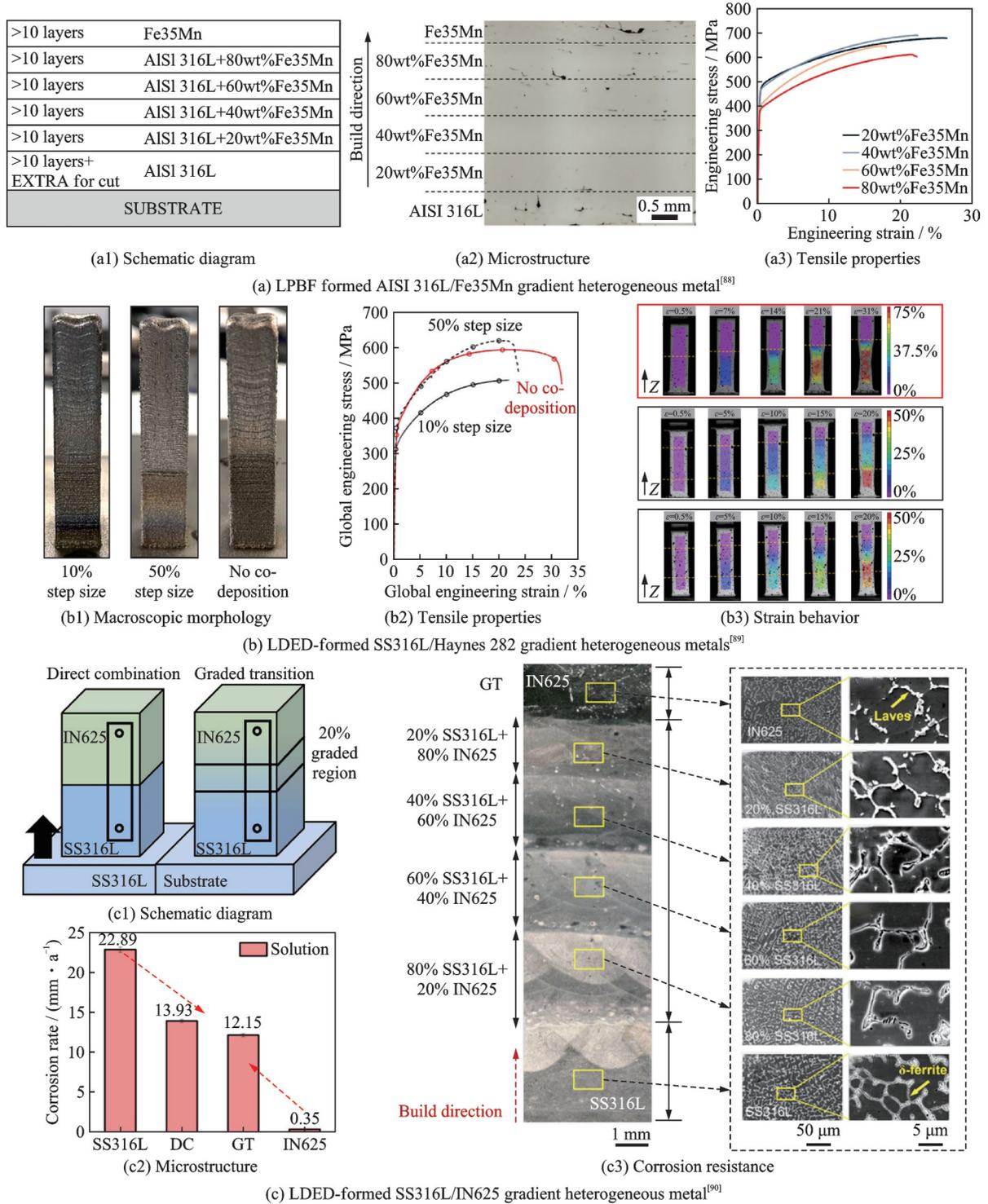


图 10 典型异种金属连接梯度设计特性

Fig.10 Gradient design characteristic of typical dissimilar metal joints

和 Ti₂Pd),显著抑制脆性 Ti₂Ni 相的生成,从而减少界面脆化和开裂风险,同时提升接头拉伸强度、延展性和 NiTi 的超弹性恢复能力,特别是在抑制冶金不相容性和残余应力方面表现突出。

梯度连接是指通过逐渐过渡材料成分来连接两种或多种材料,而不是在层与层之间形成明显的界面^[99-104]。通过这种方式,可以减少不同材料之间热膨胀系数、热导率、熔点等差异引起的应力、裂纹等问题。通过在沉积过程中逐层变化材料的成

分,从而在不同材料之间形成一个平滑过渡的“中间层”,过渡层的组成和性能逐步变化,使得不同区域的性能也逐渐发生过渡,最终提升构件的整体性能和结构完整性。

该技术具有以下优点:(1)降低界面应力。通过梯度过渡的方式,可避免两种热物性差异较大材料之间的突变,减小界面处应力集中,提高界面结合质量。(2)优化材料性能。同一构件中,不同区域可以使用最合适材料,实现区域性能的优化,

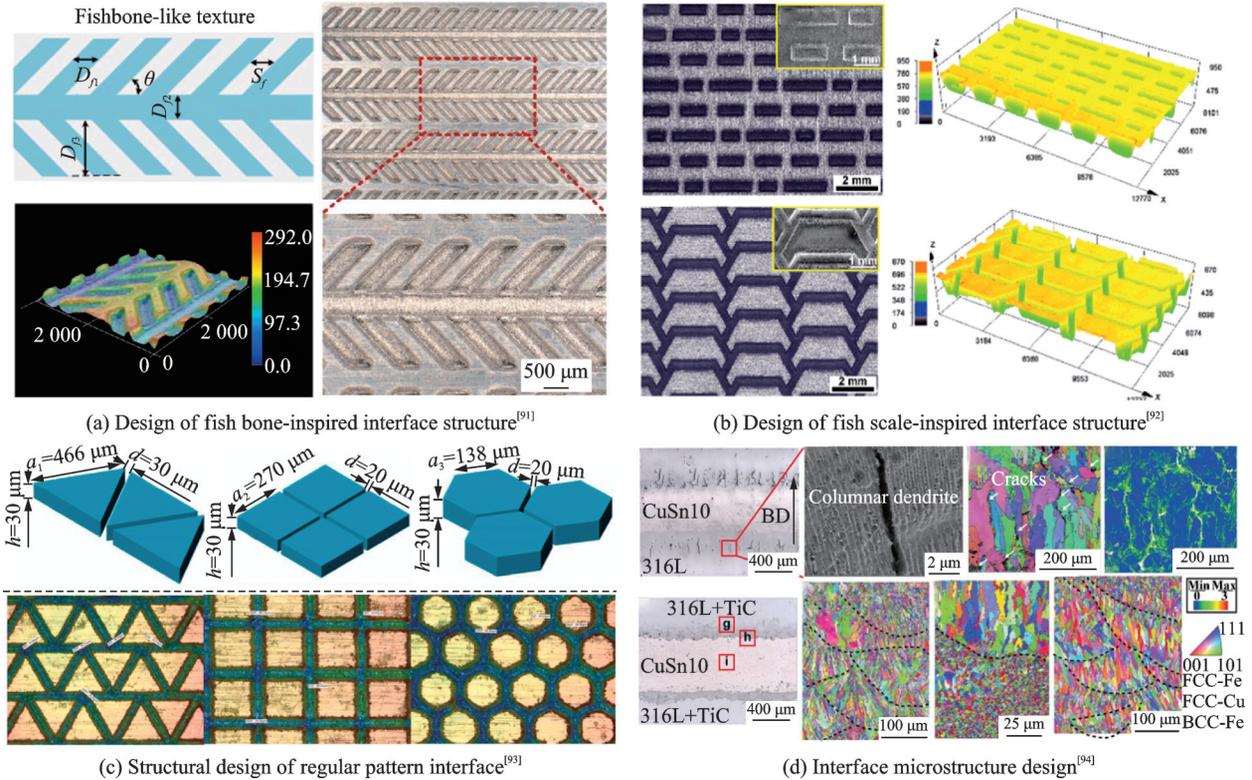


图 11 典型异种金属连接仿生设计特性

Fig.11 Bionic design characteristic of typical dissimilar metal joints

也可通过合理设计梯度过渡,提升构件的综合性能,如抗冲击、耐磨损、耐腐蚀等。传统多材料连接容易形成金属间化合物,而梯度过渡的方式,能够有效减少这些脆性金属间化合物的形成。Demir等^[88]采用LPBF技术成形了AISI 316L/Fe35Mn异质金属,通过向AISI 316L粉末中添加Fe35Mn粉末,进而控制整体粉末中的Mn含量逐渐增加,使得Ni、Cr和Mo逐渐被Mn替代,最终实现了AISI 316L/Fe35Mn异质金属界面无缺陷的成形。MacDonald等^[89]通过LDED技术成形了SS316L/Haynes 282梯度异质金属,使用了3种梯度过渡策略:直接连接、10%梯度过渡和50%梯度过渡,最终发现梯度过渡中更小的成分过渡可以缓解热物性差异界面而引起的应变。Kim等^[105]采用LDED技术成形了Ni20Cr/Ti6Al4V梯度异质金属,通过显微组织的观察,发现在成形过程中,界面在冷却过程中会诱导碳化铬沉淀,铬碳化物的存在进而导致热积累难以释放,最终引发晶界裂纹,而梯度过渡缓解了碳化铬沉淀的形成,进而改善了成形过程中的热裂纹。Zhang等^[90]采用LDED成形了SS316L/IN625梯度异质金属,使用了两种成形策略:直接连接和梯度过渡,研究发现梯度过渡的样品具有更加优越的耐腐蚀性能,这是由于界面采用梯度过渡可以缓解界面处化学成分的突然变化,进而避免局部电偶腐蚀。综上所述,通过梯度过渡可以避免异质金属间的化学成分的突然变化,进

而减少界面脆性金属间的化合物的生成,最终实现界面冶金结合良好的异质金属。

界面结构设计包括界面形状图案设计以及界面微观组织调控。界面的图案设计,通过调控异种金属的两者面积占比以及设计两者金属的排布空间,提高界面的结合能力,而两者金属的排布空间又可以借鉴生物的微观结构,生物的组织器官通常由多种材料以特定的结构形态结合,并发挥独特的功能或性能。如人体的骨骼由骨胶原纤维等有机物与羟基磷灰石等无机物组合而成,为人体提供足够的支撑及一定的韧性;海洋中贝壳类生物的壳体由硬脆的矿物质和软韧的有机物以层状形式堆叠而成,为贝壳生物提供了坚韧的外壳以抵御天敌的捕食。美国麻省理工学院机械工程学院院长Boyce教授团队以硅藻缝合线、菊石壳体缝合线等生物结构为灵感设计了仿生粘接接头界面结构,发现不同的仿生界面结构设计可使接头的力学性能更加多样化,以适应不同的服役工况要求^[106]。南京航空航天大学占小红教授团队、上海市激光先进制造技术协同创新中心团队及杭州电子科技大学许静教授团队,在铝合金/树脂基复合材料界面上引入了仿贝壳、仿鱼骨^[91]、仿鲨鱼皮、仿鱼鳞^[92]及规则图形^[93]等图案结构,研究了仿生界面图案对铝合金/碳纤维复合材料激光焊接头结合强度的影响,发现界面图案的引入可提高碳纤维复合材料在铝合金表面的润湿性,同时仿生图案结构可在界面

处实现机械自锁效应,两者共同作用实现了接头结合强度的大幅提升。Wang等^[94]则通过界面微观组织的改变实现了无明显裂纹的316L/CuSn10异质金属的界面优化。在成形316L/CuSn10异质金属的过程中对316L粉末进行添加纳米TiC颗粒,可以显著减小晶间液态铜膜的体积和应力集中程度,从而阻碍钢铜熔合区热裂纹的成核和扩展。由上述研究可见,界面仿生图案设计能有效提升异种材料界面的结合性能,同时也可以通过粉末改性调控界面微观组织,进而实现目标异质金属的连接。

3 Ti6Al4V/NiTi异种材料连接技术

本文分别综述了异种金属传统连接技术与增材制造连接技术的研究进展,系统总结了界面缺陷易形成、脆性金属间化合物难以抑制以及综合性能

难以协调等共性问题。然而,上述问题在不同材料体系中的表现形式和工程影响程度存在显著差异。其中,Ti6Al4V与NiTi形状记忆合金由于在热物性参数、晶体结构、相变行为及服役功能需求等方面具有显著不匹配特征,其异种连接过程中的界面反应更为复杂、组织调控难度更高,成为当前异种材料连接领域中极具代表性和挑战性的研究对象。特别是在连接过程中,Ti-Ni脆性金属间化合物的生成、相变行为对界面完整性和功能性能的影响,以及成形热历史对形状记忆效应稳定性的影响,均与前文所述的共性问题高度关联但又更加突出。因此,有必要将Ti6Al4V/NiTi体系作为典型案例加以单独讨论,如图12所示^[92-94,107-108],以进一步揭示共性问题在具体材料体系中的表现特征及其针对性解决思路。



图12 NiTi形状记忆合金在各领域的代表性应用

Fig.12 Representative applications of NiTi shape memory alloy in various fields

镍钛形状记忆合金是一种典型的多功能金属材料,除了具有特殊的形状记忆效应之外,还具有超弹性、高强度、高耐蚀性及生物相容性等特点。目前,镍钛形状记忆合金通常以丝、板、簧、管、钉和圈等元器件形式,应用于航空、航天、智能装备及生物医疗等领域。波音777-300ER飞机发动机的外涵道尾喷处,安装了以NiTi作为驱动器的可变形智能锯齿结构,该锯齿结构可根据飞机起飞段、巡航段发动机喷射气流温度的不同变化角度,从而实现起飞时降低发动机噪声、巡航时不影响发动机推力的智能调节效果。

美国国家航空航天局(NASA)利用NiTi SMA代替了传统的重型液压系统,实现了可折叠机翼系统减重80%^[107]。NASA利用编制的方法将NiTi SMA丝制成了火星探测车的车轮,借助NiTi超弹性及形状记忆的特点,应对火星表面的复杂地形^[108]。NASA利用NiTi SMA制备了纳立方星的太阳能电池板折展机构,在实现结构轻量化的同时达到了节能的效果^[109]。2015年,《Science》

期刊报道了韩国首尔国立大学和美国哈佛大学研究人员在仿水龟微型机器昆虫方面的研究,通过微型机器昆虫NiTi SMA腿的形状记忆效应,可实现仿水龟微型机器昆虫在水面完成跳跃^[110]。2020年,《Science Robotics》期刊报道了美国南加州大学学者利用NiTi合金丝材作为微驱动器成功制造了一个重量仅为88毫克的仿昆虫自驱动爬行机器人^[111]。利用良好的生物相容性及独特的超弹性特征,NiTi在口腔正畸领域广泛使用,如弓丝、托槽、根管锉等;利用NiTi的超弹性及形状记忆性能,广泛应用于各种血管内植入器械及腔道内植入器械,如外周血管支架、脑动脉瘤支架、主动脉覆膜支架、消化道支架、气管支架、耳道支架等。

随着装备的不断轻量化及智能化,对金属构件的减重及多功能要求日益迫切,单一的NiTi材料已难以满足需求。此外,由于NiTi较低的屈服强度,使其不能作为主承力材料,同时较高的成本也限制了其广泛应用。以Ti6Al4V为代表的钛合金

具有良好的力学性能、抗蠕变性、耐蚀性及生物相容性,在航空航天、生物医疗等领域有着广泛的应用。将 NiTi 与 Ti6Al4V 连接,既能发挥 NiTi 独特的性能和功能,又能有效降低整体构件的成本、提高综合力学性能,实现“1+1>2”的效果。

3.1 机械连接及焊接技术

基于文献报道,目前 NiTi 与 Ti6Al4V 异种材料连接方法包括螺栓连接、粘接、焊接等,其中焊接技术受到了国内外学者的广泛关注,并开展了大量的研究工作,如图 13 所示^[27,112-116]。研究人员尝试

利用钎焊、搅拌摩擦焊、高能束焊等方法焊接 NiTi 与 Ti6Al4V 异质金属。Quintino 等^[117]通过纳米银基钎料成形了 NiTi/Ti6Al4V 的钎焊重叠接头,虽然 Ag 与 Ti 的相容性很好且可以形成固溶体,但 Ag 在 Ti 中的溶解度较低且会形成金属间化合物,因此成形的钎焊接头的结合质量较差。Chen 等^[112]通过搅拌摩擦焊成形了 Ti6Al4V/NiTi 多材料,研究发现在 475 r/min 的恒定转速下,以 23.5 mm/min 的焊接速度获得无缺陷接头,其拉伸强度为 269 MPa,延伸率为 3.8%,在 Ti₂Ni 金属间

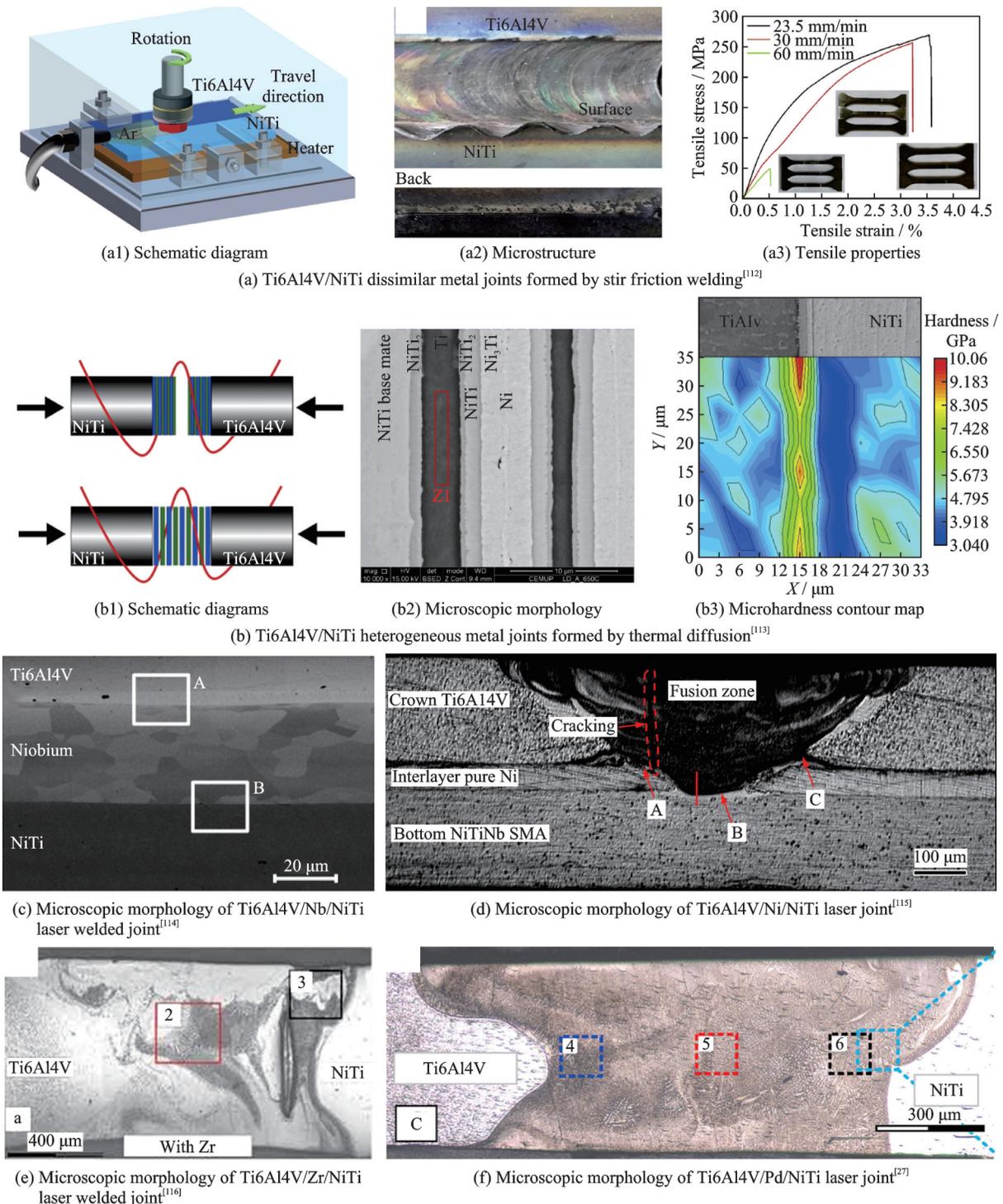


图 13 异种金属焊接

Fig.13 Dissimilar metal welding

化合物区断裂。搅拌摩擦焊在焊接过程中温度低于母材的熔点,有利于减小热影响区的范围,因此不会发生热裂纹、液化裂纹、焊缝气孔或偏析现象等凝固缺陷。Ramos等^[113]发现 Ti_2Ni 随着扩散键合温度的降低而减少,因而研究使用Ni/Ti多层薄膜以及交替的Ni和Ti箔降低NiTi/Ti6Al4V反应辅助扩散键合温度的可行性,结果表明:使用Ni/Ti多层薄膜可以在600℃下加工连接,而对于交替的Ni和Ti箔,只能在650℃下获得连接,成功获得了较少过渡区的NiTi/Ti6Al4V多材料。然而热压扩散连接设备要求较高,同时工艺流程复杂,因而不适用于大规模生产。

相比其他焊接工艺,激光焊及电子束等高能束焊对原材料形状适应性强,具有能量密度高、焊接精密度高及焊接变形小的优势,被认为是NiTi与Ti6Al4V异种材料连接的合适焊接方法。哈尔滨工业大学陈国庆教授团队、北京航空航天大学郭伟教授团队、电子科技大学曾志教授团队、南昌航空大学陈玉华教授团队、加拿大滑铁卢大学先进材料连接中心、葡萄牙里斯本大学CENIMAT国家科研中心等国内外研究团队,开展了NiTi与Ti6Al4V异种材料高能束焊接相关研究。研究发现两者直接焊接时,在界面处将形成 Ti_2Ni 脆性金属间化合物,导致裂纹形成影响焊接接头机械性能^[118-119];通过在界面引入Nb^[114]、Cu^[120]、Ni^[115]、Pd^[27]、Zr^[116]、

Co^[121]等过渡金属层,可有效抑制脆性金属间化合物的形成,从而控制裂纹的形成。高能束焊具有加工效率高、设备成本低等特点,适用于板材、管材等大尺寸金属型材的大批量焊接。但随着航空航天等领域对金属构件轻量化程度的要求不断提高,利用激光粉末床熔融技术成形的NiTi拓扑优化结构^[122]、仿生结构^[123]等复杂结构构件,在航空航天领域得到了推广应用。此类NiTi复杂结构构件同样存在与Ti6Al4V异种金属配合使用的需求,而传统的高能束焊接受限于成形灵活性已很难满足,急需发展新的异种金属材料构件一体化成形技术。

3.2 增材制造连接

目前,有关Ti6Al4V/NiTi异种金属材料激光粉末床熔融的研究较少(图14),公开报道中仅检索到葡萄牙米尼奥大学研究人员^[124]的研究:利用商用单材料激光粉末床熔融设备,采用成形中途开仓换粉的方式,实现了Ti6Al4V/NiTi异种金属点阵结构构件的成形;界面分析表明,两种金属间实现了较好的冶金结合,异种材料点阵结构的剪切强度约为33 MPa(NiTi点阵结构剪切强度为25.5 MPa, Ti6Al4V点阵结构剪切强度为47.1 MPa)。该研究证明了利用激光粉末床熔融成形Ti6Al4V/NiTi异种金属构件的可行性。但是,该论文未深入研究异种材料在结合处的显微组织及物相,对构件的形状记忆等功能也未做深入分析。

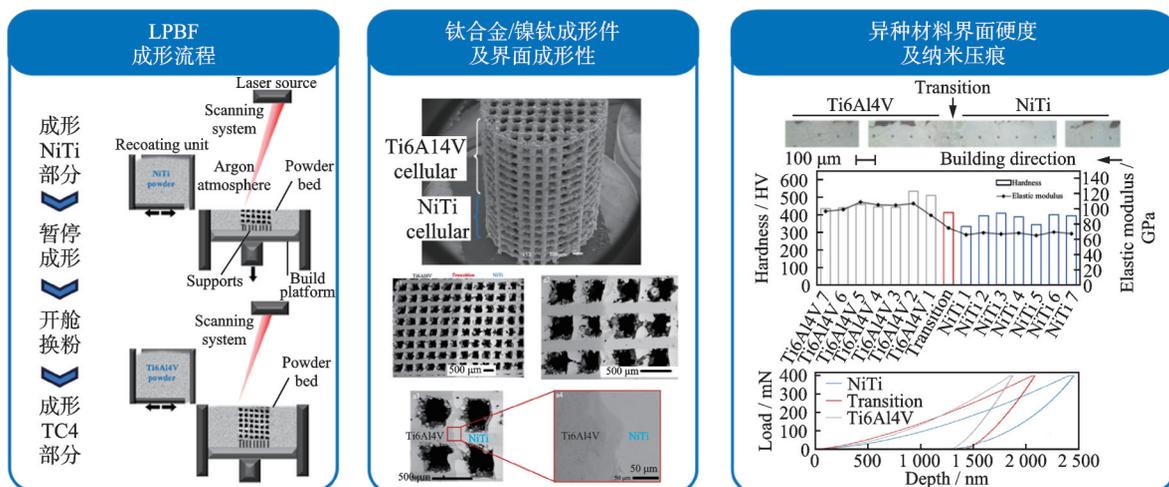


图14 现有LPBF成形Ti6Al4V/NiTi异种金属材料相关研究^[124]

Fig.14 Existing research on LPBF forming of Ti6Al4V/NiTi dissimilar metal materials^[124]

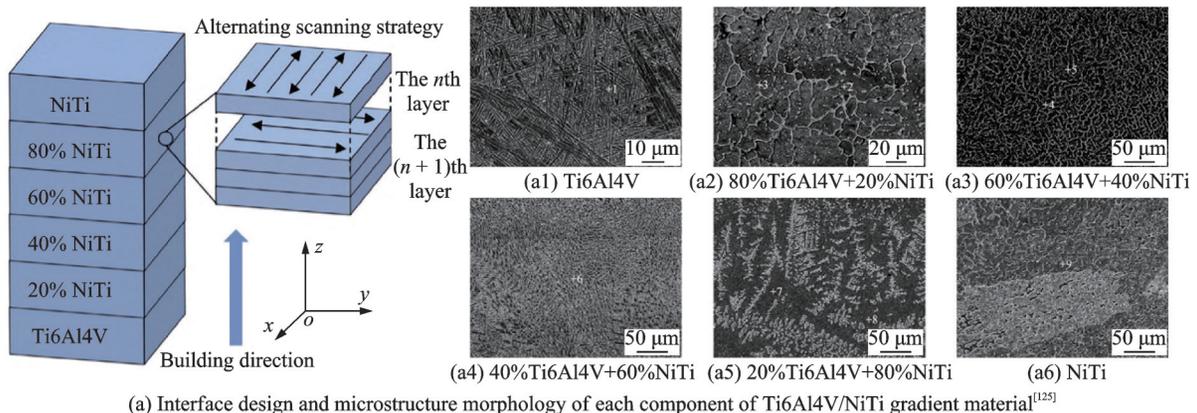
Ti6Al4V钛合金和NiTi形状记忆合金在弹性模量(109 GPa vs 68 GPa)、屈服强度(860 MPa vs 200 MPa)、拉伸强度(1 000 MPa vs 800 MPa)等力学性能上存在较大差异。异种金属材料构件在受力状态下由于力学性能上的差异,导致不同材料区域形变不同步,容易在界面处产生应力集中等问题,影响构件整体力学性能。通过界面成分梯度过

渡、选择合适过渡层等方法,可缓解由于异种材料热物性差异及过多脆性金属间化合物导致的界面开裂等问题。

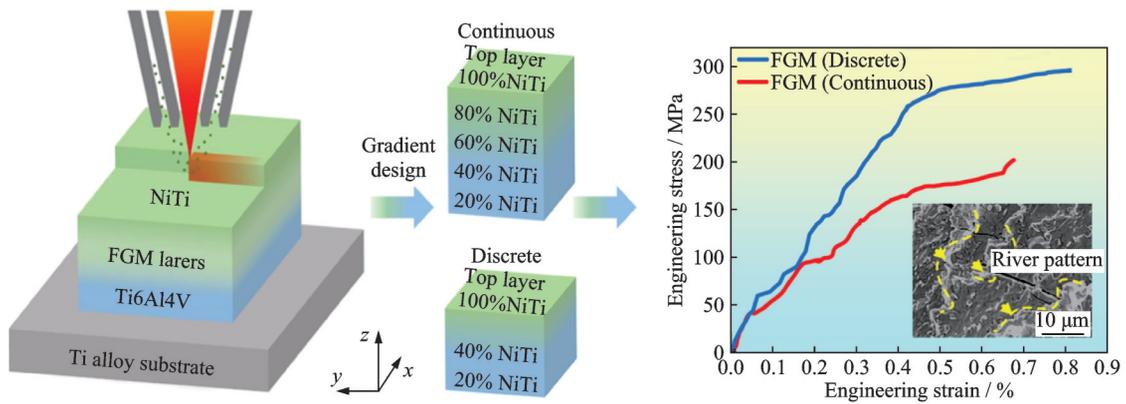
在激光直接能量沉积中,已经有学者进行了Ti6Al4V/NiTi异种金属材料研究(图15),例如姜鹏飞等^[125]通过成分梯度渐变的仿生理念,设计了Ti6Al4V/NiTi仿生梯度功能材料;其界面组织表

现为多种晶粒形貌和形状不规则共晶组织组成的不均匀组织,组织微观结构发生一系列变化: $\alpha + \beta$ 双相组织 \rightarrow 柱状晶+不规则共晶结构 \rightarrow 柱状晶 \rightarrow 等轴晶 \rightarrow 等轴晶+柱状晶;界面最大显微硬度为 730.9 HV,其主要是由于 Ti_2Ni 相的存在,拉伸强度为 202 MPa,拉伸断面具有明显脆性断裂特点,同时存在多个次级裂纹沿晶扩展的特点。Zhang 等^[126]进一步优化界面梯度成分,通过热力学原理,选择性地排除有缺陷的成分范围,提出一种离散成分梯度界面, Ti6Al4V/NiTi 异种金属材料实现了 296.2 MPa 的拉伸强度,与连续成分梯度相

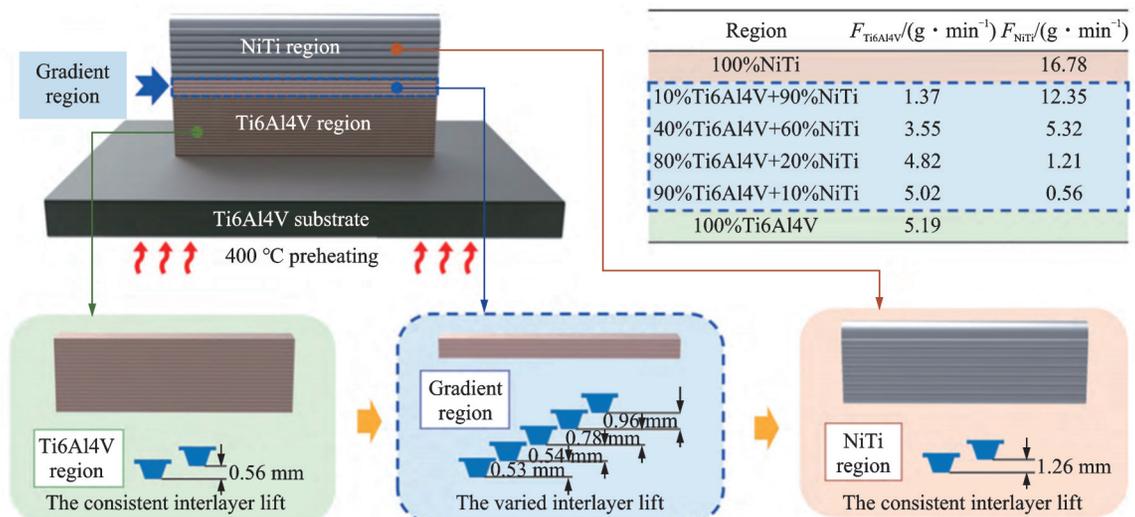
比,拉伸强度提高了 46.3% 以上。高佳丽等^[127]采用激光熔化同步输送异种合金粉末沉积成形工艺,基于等能量密度成形法及基板热管理实现了成分梯度过渡 Ti6Al4V/NiTi 异种金属材料的一体化沉积成形,经界面成分梯度优化后,梯度层界面呈现良好的冶金结合。由上述研究发现,通过在 Ti6Al4V 和 NiTi 之间引入成分过渡层,能够有效缓解两种金属材料之间的性能差异,从而避免成形过程中界面高热应力的产生,进而有效抑制增材制造 Ti6Al4V/NiTi 异种金属材料界面的裂纹,提高材料的综合力学性能。



(a) Interface design and microstructure morphology of each component of Ti6Al4V/NiTi gradient material^[125]



(b) Interface design and mechanical properties of Ti6Al4V/NiTi discrete gradient materials^[126]



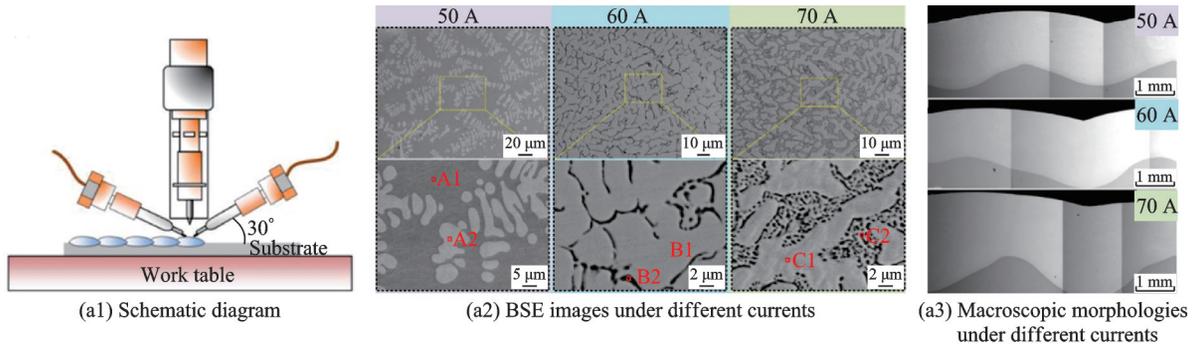
(c) Gradient composition design of Ti6Al4V/NiTi based on equal energy density forming method and substrate thermal management^[127]

图 15 异种金属 LDED 增材连接

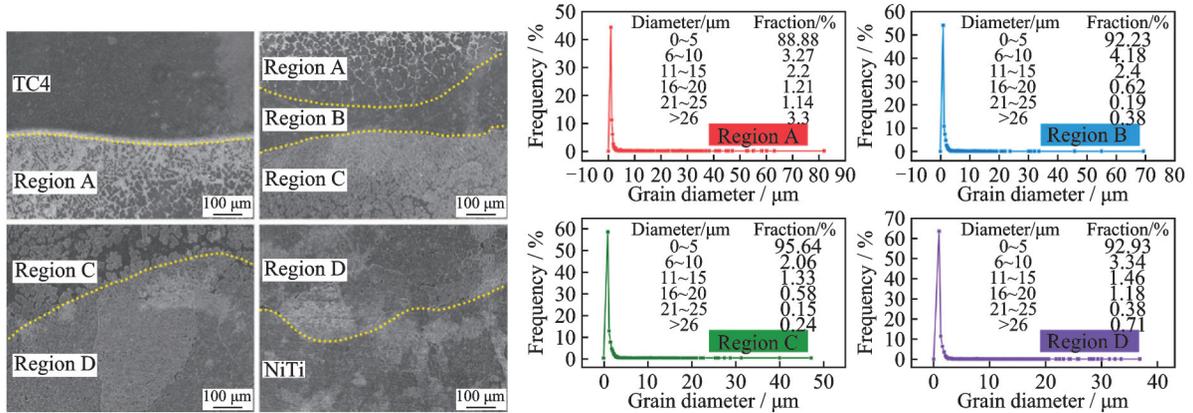
Fig.15 LDED additive joining of dissimilar metals

在电弧增材制造中,也存在着许多学者进行了Ti6Al4V/NiTi异种金属材料研究(图16),例如,Wang等^[128]通过WAAM技术在Ti6Al4V基板上双线原位合金化沉积NiTi,研究了电弧电流对NiTi的微观结构、相组织的影响,最终实现Ti6Al4V基板上致密且无缺陷的NiTi基涂层。Jiang等^[129]通过MWAAM技术成功成形了仿生梯度异质的Ti6Al4V/NiTi异种金属结构,其界面物相演变为 $\alpha\text{-Ti}+\beta\text{-Ti}\rightarrow\alpha\text{-Ti}+\text{NiTi}_2\rightarrow\text{NiTi}_2\rightarrow\text{NiTi}_2+\text{NiTi}\rightarrow$

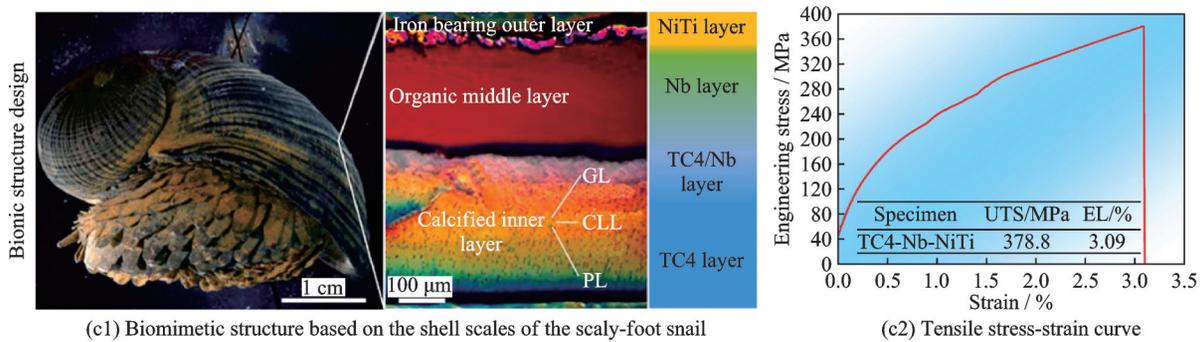
$\text{NiTi}+\text{Ni}_3\text{Ti}$;试样具有极佳的压缩强度($1\,533.33\pm 26$) MPa),主要归因于梯度区域的良好过渡,该区域表现出细小晶粒和较小的Schmidt因子值差异;试样也获得了较好的力学性能,其极限断裂应力和应变分别为($1\,533.33\pm 26$) MPa和 $28.3\%\pm 6\%$ 。Jiang等^[130]受鳞角蜗牛鳞片外壳的启发,设计了一种仿生异质层状结构,通过MWAAM技术成形了仿生层状非均相结构的Ti6Al4V/Nb/NiTi异质金属,试样的极限抗压强度为1 419.87 MPa,其极限



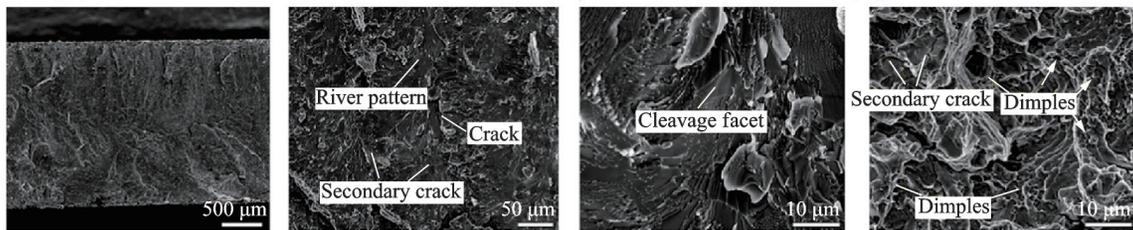
(a) Dual-wire in-situ alloyed deposition of NiTi on Ti6Al4V substrate^[128]



(b1) Microstructures of different regions
(b2) Grain statistics
(b) Ti6Al4V/NiTi gradient heterogeneous metal interface fabricated by WAAM^[129]



(c1) Biomimetic structure based on the shell scales of the scaly-foot snail
(c2) Tensile stress-strain curve



(c3) Fracture morphologies of the tensile specimen

(c) WAAM-fabricated Ti6Al4V/NiTi heterogeneous metal with biomimetic transition layer^[130]

图 16 异种金属 WAAM 增材连接

Fig.16 WAAM additive joining of dissimilar metals

拉伸应力和延伸率分别为 378.8 MPa 和 3.09%, 拉伸断口表现出以脆性断裂为主的混合断裂。由上述研究可见, 通过在 Ti6Al4V 和 NiTi 之间引入成分过渡层或金属阻隔层, 能有效抑制增材制造 Ti6Al4V/NiTi 异种金属材料界面的裂纹, 提高材料的综合力学性能。

针对异种合金连接中的脆性相形成行为, 在 Ti6Al4V 与 NiTi 异种合金连接过程中, 由于 Ti 与 Ni 元素之间强烈的化学亲和力, 界面反应区极易生成多种脆性金属间化合物, 这些化合物是导致接头力学性能劣化和失效的主要原因。研究表明, 最常见的金属间化合物为 Ti_2Ni 相^[131-132], 通常以连续层状形式出现在界面中心或靠近 Ti6Al4V 一侧, 其硬度显著高于母材, 脆性大、弹性模量高, 易引起应力集中并成为裂纹萌生与扩展的优先路径, 从而导致接头呈现脆性解理断裂特征, 拉伸强度和延展性大幅下降, 常仅为母材的 50% 以下。此外, Ni_3Ti 相^[130, 133-134] 常伴随 Ti_2Ni 出现于靠近 NiTi 一侧, 进一步加剧界面脆化并促进固化裂纹或横向裂纹的形成; $AlNi_2Ti$ ^[130, 135-136] 等 Ti-Al-Ni 三元相也较为常见, 由于 Ti6Al4V 中 Al 元素的参与而生成, 同样表现出较高脆性并协同降低接头的整体韧性和抗疲劳性能。少数情况下还可观察到 $TiNi$ 或 Al_3Ti 等相, 虽脆性相对较弱, 但仍对界面微观结构均匀性和热膨胀系数匹配造成不利影响。大量文献一致证实, 这些脆性金属间化合物层的存在是 Ti6Al4V/NiTi 接头失效的根本机制, 因此抑制其形成与生长已成为提升接头性能的关键研究方向。

对于 NiTi 形状记忆性能保持行为, 在激光焊接中, 高热输入易诱发脆性 Ti_2Ni 等金属间化合物的过渡形成, 造成界面脆化并显著降低 NiTi 的超弹性恢复能力, 导致循环载荷后不可恢复应变增加至 1% 以上, 而采用 Pd 中间层可将 Ti_2Ni 体积分数降至 10% 以下, 维持超弹性并实现接头拉伸强度达 520 MPa、伸长率 5.6%^[37]。类似地, 在电弧增材制造(如 WAAM)中, 多层沉积的热循环会促进 Ni-rich 沉淀和二次相生成, 减少参与马氏体转变的 NiTi 相体积分数, 表现为相变焓降低、温度范围拓宽和滞后减小, 严重削弱形状记忆效应和超弹性, 可通过后热处理恢复转变峰值和功能特性, 这些热循环诱发的退化机制强调了优化工艺参数和引入过渡层的重要性, 以确保 NiTi 的功能完整性^[130]。

对于过渡层材料对性能的影响行为, 直接焊接(无过渡层)时 Ti_2Ni 体积分数通常高达 70%~83%, 接头极易发生脆性断裂; 引入过渡层后, Ti_2Ni 的生成均受到不同程度的抑制, 其中 Pd 中间层效果最为显著, 可将 Ti_2Ni 体积分数降至 10% 以下,

接头拉伸强度提升至 520 MPa, 伸长率达 5.6%, 并较好保留 NiTi 的超弹性(循环后不可恢复应变 $\approx 1\%$)^[37]。Nb 中间层抑制效果次之(Ti_2Ni 体积分数降至 20%~40%), 接头强度通常在 400~480 MPa, 适用于激光焊和增材制造^[130]; Cu 和 Ni 中间层对 Ti_2Ni 的抑制能力较弱(体积分数仍 $> 50\%$), 且 Cu 易形成 Ti-Cu 脆性相^[120], Ni 则可能加剧 Ni-rich 相沉淀^[115], 导致接头延展性较差; Co 中间层抑制效果有限, 常伴随较多残余脆性相^[121]。这些数据表明, Pd 是目前抑制界面脆性相、提升接头综合性能的最优过渡层选择, 而 Nb 作为成本相对较低的替代方案也具有较好的工程应用潜力。优化过渡层厚度、工艺参数及后续热处理可进一步提升抑制效果。

综合对比焊接、LPBF^[137]、LDED^[138] 以及 WAAM^[139] 等连接与制造方法, 可以发现不同技术路线在界面控制能力、成形效率及制造成本等方面呈现出明显差异。传统焊接方法在成形效率和设备成本方面具有优势, 但其热输入大、界面冶金反应剧烈, 界面缺陷与脆性金属间化合物控制难度较高; LPBF 依托精细粉末与高空间分辨率热输入, 在界面成分与组织调控方面具有较强优势, 但成形效率较低、设备及材料成本较高; LDED 在成形尺寸与沉积效率方面兼具一定灵活性, 界面控制能力介于 LPBF 与焊接之间, 适合开展成分过渡与梯度结构设计, 但系统复杂度和综合成本较高; WAAM 具有显著的高效率和低材料利用成本优势, 适用于大尺寸结构制造, 但热输入大、界面组织精细调控能力相对有限。上述对比表明, 不同方法在工程适用场景和关键技术挑战上各具侧重, 其界面调控能力、效率与成本之间普遍存在权衡关系。

4 展望与结束语

本文主要回顾了近年来异质金属连接的技术以及各种技术的研究现状, 并对其关键性问题及相关解决方案进行了讨论, 最终对 Ti6Al4V/NiTi 异质金属的连接进行了研究现状的回顾。异质金属连接技术正朝着多样化的方向进步, 但随着科学技术的发展、新材料的更迭以及应用场景的革新, 异质金属将会有效发挥其技术优势, 相比于传统焊接方法, 增材制造在处理 Ti6Al4V/NiTi 异种合金连接时展现出独特的优势。首先, 增材制造允许精确调控热输入和材料沉积过程, 能够有效抑制界面脆性金属间化合物的过渡生成(如 Ti_2Ni 相), 从而最小化热影响区、减少裂纹和孔隙等缺陷, 提高接头的整体力学性能和疲劳寿命。其次, 增材制造支持功能梯度材料的构建, 实现材料成分的渐变过渡,

避免传统焊接中常见的冶金不相容性和残余应力集中问题,适用于复杂几何结构的成形。最后,增材制造的柔性高,可集成多材料打印,提升连接效率并降低生产成本,但是在当前状态下依然有较多的关键技术问题有待于探索和研究。

(1) 工艺参数实时调控能力不足。异质金属在成形过程中对热输入高度敏感,极易诱发裂纹、孔洞和脆性相等缺陷。因此,精准控制热-力-冶金过程是首要关键问题。未来发展需要依赖高速相机、红外/近红外成像及高温测温等原位监测手段开展实时数据获取^[128],并结合深度学习与在线反馈控制,实现对缺陷萌生机制的识别与参数自动调优,从根本上提升界面冶金质量。

(2) 成分匹配难导致脆性金属间化合物易形成。异质金属间显著的物理与化学性质差异,使得成分过渡策略复杂化,稍有不慎就会生成脆性金属间化合物降低连接强度。为解决此核心矛盾,需要发展离散化梯度连接方法,并利用相变模拟工具对多元成分体系进行预测筛选,从源头上规避脆性金属间化合物的成比例组合,实现界面成分的最优化布局。

(3) 缺乏可稳定形成韧性组织的中间层材料。目前多数材料体系仍缺乏与两侧金属同时兼容的中间层材料,导致在焊接、增材或电弧增材过程中界面组织难以韧化。未来研究须面向特定材料体系开发相匹配的中间层,使界面倾向形成韧性相而非脆性金属间化合物,从而降低界面脆性并显著提升界面结合性能。

(4) 界面结构设计能力不足,难以阻断裂纹扩展。传统平面冶金界面无法有效提升界面强度与裂纹抗扩展能力。发展新型仿生互锁结构,可显著增强界面刚度、强度与抗裂性能,同时降低成形过程中的应力集中与残余应力积累,是改善界面可靠性的关键结构化路径。

(5) 力学性能协同优化难度大。Ti6Al4V/NiTi异种合金连接中,Ti与Ni强亲和力易生成Ti₂Ni等脆性金属间化合物,导致接头强度-延展性严重失衡,同时热循环诱发残余应力与微裂纹,难以实现高强度与高韧性的协同提升。为解决此核心矛盾,需要发展多丝电弧增材制造结合Nb/Pd等高效过渡层的仿生梯度异质结构设计,并利用多物理场模拟与机器学习工具对界面微结构演变进行预测优化,从源头上调控脆性相体积分数与应力分布,实现接头强度与延展性的最优化协同,同时提升疲劳性能与服役可靠性。

面向 Ti6Al4V/NiTi 异种材料连接的工程应用需求,未来研究应在共性发展方向的基础上进一

步强化材料体系针对性。首先,针对 Ti-Ni 体系中脆性金属间化合物易生成的问题,有必要发展适用于 Ti/Ni 体系的韧性中间层与成分过渡设计原则,通过引入具有高固溶度或延缓 Ti-Ni 直接反应的过渡元素,构建可控的界面反应路径,以抑制连续脆性相的形成。其次,须系统揭示成形热历史对 NiTi 相变行为及形状记忆/超弹性能稳定性的影响机制,明确不同连接与增材工艺条件下界面邻域相变特征与功能衰减规律,从而为工艺窗口优化提供依据。再次,应结合 Ti6Al4V 与 NiTi 在弹性模量和变形机制上的显著差异,发展面向服役载荷条件的界面结构与功能梯度协同设计方法,实现力学承载能力与功能响应之间的匹配与协同。最后,有必要引入多尺度表征与模拟手段,构建界面反应、组织演化与性能响应之间的关联模型,为 Ti6Al4V/NiTi 异种材料连接工艺的设计与工程应用提供定量化指导。

参考文献:

- [1] 廖文和,戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 347-360.
LIAO Wenhe, DAI Ning. Development and challenge of lightweight design and manufacturing technology for aerospace structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 347-360.
- [2] 陈航,张凤强,李通,等. 多元材料微纳精度复杂分布技术的新进展[J]. 材料导报, 2023, 37(8): 129-140.
CHEN Hang, ZHANG Fengqiang, LI Tong, et al. Latest progress of distribution technologies of multi-materials with micro/nano precision and complex patterns[J]. Materials Reports, 2023, 37(8): 129-140.
- [3] LIU Y D, CARNEGIE C, ASCROFT H, et al. Investigation of adhesive joining strategies for the application of a multi-material light rail vehicle[J]. Materials, 2021, 14(22): 6991.
- [4] PALMQUIST A, JOLIC M, HRYHA E, et al. Complex geometry and integrated macro-porosity: Clinical applications of electron beam melting to fabricate bespoke bone-anchored implants[J]. Acta Biomaterialia, 2023, 156: 125-145.
- [5] ROPER S W K, LEE H, HUH M, et al. Simultaneous isotropic and anisotropic multi-material topology optimization for conceptual-level design of aerospace components[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(1): 441-456.
- [6] GRADL P R, TEASLEY T W, PROTZ C S, et al. Advancing GRCoP-based bimetallic additive manufacturing to optimize component design and applications

- for liquid rocket engines[C]//Proceedings of AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum. Virtual Event: AIAA, 2021: AIAA2021-3231.
- [7] TRZEPIECIŃSKI T, NAJM S M. Current trends in metallic materials for body panels and structural members used in the automotive industry[J]. *Materials*, 2024, 17(3): 590.
- [8] SADEGHIAN A, IQBAL N. A review on dissimilar laser welding of steel-copper, steel-aluminum, aluminum-copper, and steel-nickel for electric vehicle battery manufacturing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107595.
- [9] AYGÜN B. High alloyed new stainless steel shielding material for gamma and fast neutron radiation[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52(3): 647-653.
- [10] JENA G, PHILIP J. A review on recent advances in graphene oxide-based composite coatings for anticorrosion applications[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 173: 107208.
- [11] 李宁. 紫铜与不锈钢搭接搅拌摩擦焊工艺研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
LI Ning. Copper/stainless steel lap joint by friction stir welding process research and application[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [12] SHI X B, YAN W, XU D K, et al. Microbial corrosion resistance of a novel Cu-bearing pipeline steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(12): 2480-2491.
- [13] TESHOME F B, SHEN J J, OLIVEIRA J P, et al. Strengthening synergies of various interlayers in NiTi to Ti6Al4V dissimilar laser joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 331: 118516.
- [14] XIE M M, MENG M Q, HAN J, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V/Ni-Ti bimetallic structures fabricated by multi-wire arc additive manufacturing[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27(23): e202501292.
- [15] CAVALEIRO A J, OLIVEIRA J P, RAMOS A S, et al. Multiscale characterization of NiTi shape memory alloy to Ti6Al4V dissimilar laser welded joints: Reasons for inherent brittleness[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111853.
- [16] 冯吉才. 异种材料连接研究进展[J]. *航空学报*, 2022, 43(2): 1-37.
FENG Jicai. Research progress on dissimilar materials joining[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(2): 1-37.
- [17] ZOU J X, MA C, LIU H, et al. Exploration of pre-treatment process and wettability of high bonding Ni-P coatings on W-Cu composites for electronic packaging [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 673: 160911.
- [18] CHEN F, ZHANG J N, WANG C C, et al. Three-dimensional mechanical characteristics analysis of bolted joints and loosening mechanism[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 157: 107894.
- [19] SHAO C, LIN J, GUAN Y J, et al. Low-frequency vibration assisted self-pierce riveting (LV-SPR) of carbon fiber reinforced composite and aluminum alloy[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2024, 197: 104147.
- [20] RUDAWSKA A. Adhesive joint strength of hybrid assemblies: Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites: Experimental and numerical verification[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(7): 574-582.
- [21] LIU S F, CHENG X Q, ZHANG Q, et al. An investigation of hydrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 431-440.
- [22] TRACY J, YIN Y K, YANG J, et al. Environmentally assisted crack growth in adhesively bonded composite joints[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102: 368-377.
- [23] BANG C S, KIM J G, LEE D G. Performance improvement by glass fiber of adhesively bonded metal joints at the cryogenic temperature[J]. *Composite Structures*, 2013, 96: 321-331.
- [24] LI D Z, CHRYSANTHOU A, PATEL I, et al. Self-piercing riveting—A review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5): 1777-1824.
- [25] HUANG L, BONNEN J, LASECKI J, et al. Fatigue and fretting of mixed metal self-piercing riveted joint[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 83: 230-239.
- [26] CAO Z Q, ZUO Y J. Electromagnetic riveting technique and its applications[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(1): 5-15.
- [27] HEIDARZADEH A, MIRONOV S, KAIBYSHEV R, et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 117: 100752.
- [28] DEGHANI M, AMADEH A, AKBARI MOUSAVI S A A. Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 433-441.
- [29] YANG B Y, XIA H B, GONG J F, et al. Improvement of tensile and deforming abilities of Al/steel laser welded-brazed joints by addition of Si[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 186: 112684.

- [30] MA B, GAO X D, HUANG Y J, et al. A review of laser welding for aluminium and copper dissimilar metals[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109721.
- [31] PADHY G K, WU C S, GAO S. Friction stir based welding and processing technologies—Processes, parameters, microstructures and applications: A review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1): 1-38.
- [32] JACQUIN D, GUILLEMOT G. A review of microstructural changes occurring during FSW in aluminium alloys and their modelling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 288: 116706.
- [33] SINGH J, KHAN M S, OLIVEIRA J P, et al. Brazing of high-strength steels: Recent developments and challenges[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 115: 289-309.
- [34] 高泽, 刘博, 郑立彦, 等. 硬质合金与结构钢钎焊结构低温力学性能试验[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(3): 404-410.
GAO Ze, LIU Bo, ZHENG Liyan, et al. Experiment of low temperature mechanical properties for brazing structure of hard alloy steel and structural steel[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(3): 404-410.
- [35] MATTULAT T, WOIZESCHKE P. The influence of the ratio between the wire and process velocities on the wetting process during laser brazing[J]. *Production Engineering*, 2020, 14(4): 523-534.
- [36] AL ZAMZAMI I, DAVISON B, SUSMEL L. Nominal and local stress quantities to design aluminium-to-steel thin welded joints against fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 123: 279-295.
- [37] TESHOME F B, PENG B, OLIVEIRA J P, et al. Role of Pd interlayer on NiTi to Ti6Al4V laser welded joints: Microstructural evolution and strengthening mechanisms[J]. *Materials & Design*, 2023, 228: 111845.
- [38] 王华明.“增材制造”带来制造技术革命[J]. *科学与现代化*, 2013(1): 53-54.
WANG Huaming. “Additive manufacturing” brings about a revolution in manufacturing technology[J]. *Science & Modernization*, 2013(1): 53-54.
- [39] AEROSPACE G. Manufacturing milestone: 30000 additive fuel nozzles[EB/OL]. [2025-11-24]. <https://www.geaerospace.com/news/articles/manufacturing/manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>.
- [40] RELATIVITY S. Large-scale additive manufacturing [EB/OL]. [2025-11-24]. <https://www.relativityspace.com/additive>.
- [41] MACDONALD E, WICKER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. *Science*, 2016, 353(6307): aaf2093.
- [42] GU D D, SHI X Y, POPRAWE R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. *Science*, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [43] LÜTHI C, AFRASIABI M, BAMBACH M. An adaptive smoothed particle hydrodynamics (SPH) scheme for efficient melt pool simulations in additive manufacturing[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2023, 139: 7-27.
- [44] EOS. Sogeti-additive manufacturing for the new A350 XWB[EB/OL]. [2025-11-24]. https://www.eos.info/zh/var/assets/01_parts-and-applications/case_studies_applications_parts/_case_studies_pdf/en_cases/cs_m_aerospace_sogeti_en.pdf.
- [45] AIRBUS. First titanium 3D-printed part installed into serial production aircraft[EB/OL]. [2025-11-24]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-09-first-titanium-3d-printed-part-installed-into-serial-production>.
- [46] AEROSINT. Selective powder deposition for multi-metal 3D printing[EB/OL]. [2025-11-24]. <https://aerosint.com/>.
- [47] JI W M, ZHOU R H, VIVEGANANTHAN P, et al. Recent progress in gradient-structured metals and alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 140: 101194.
- [48] REGENFUß P, EBERT R, EXNER H. Laser micro sintering—A versatile instrument for the generation of microparts[J]. *Laser Technik Journal*, 2007, 4(1): 26-31.
- [49] STICHEL T, BRANDL T, HAUSER T, et al. Electrophotographic multi-material powder deposition for additive manufacturing[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 249-253.
- [50] CHEN J, YANG Y Q, SONG C H, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L/CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 752: 75-85.
- [51] WEI C, SUN Z, CHEN Q, et al. Additive manufacturing of horizontal and 3D functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(8): 081014.
- [52] BARETH T, BINDER M, KINDERMANN P, et al. Implementation of a multi-material mechanism in a laser-based powder bed fusion (PBF-LB) machine [J]. *Procedia CIRP*, 2022, 107: 558-563.
- [53] ELTON E S, WU Z H, TROKSA M, et al. Electrostatic powder spreading for metal powder bed fusion applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 61: 103330.
- [54] ERRICO V, POSA P, FUSCO A, et al. Intralayer

- multi-material structure stainless-steel/nickel-superalloy fabricated via laser-powder bed fusion process[J]. *Manufacturing Letters*, 2023, 35: 11-15.
- [55] HORN M, PRESTEL L, SCHMITT M, et al. Multi-material additive manufacturing-recycling of binary metal powder mixtures by screening[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 93: 50-55.
- [56] LIU J G, WEN P. Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process[J]. *Materials & Design*, 2022, 215: 110505.
- [57] AIRBUS. Printing the future: Airbus expands its applications of the revolutionary additive layer manufacturing process[EB/OL]. [2025-11-24]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-04-innovative-3d-printing-solutions-are-taking-shape-within-airbus>.
- [58] NAZIR A, GOKCEKAYA O, MD MASUM BIL-LAH K, et al. Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials[J]. *Materials & Design*, 2023, 226: 111661.
- [59] LIU S Y, SHIN Y C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review[J]. *Materials & Design*, 2019, 164: 107552.
- [60] GONNABATTULA A, THANUMOORTHY R S, BONTHA S, et al. Process parameter optimization for laser directed energy deposition (LDED) of Ti6Al4V USIng single-track experiments with small laser spot size[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110861.
- [61] MUKHERJEE M. Significance of defocussing distance in laser based directed energy deposition of steel powders: Effect on clad geometrical characteristics and process parameter maps[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 184: 108618.
- [62] WHITT A, SEEDE R, YE J H, et al. A process optimization framework for laser direct energy deposition: Densification, microstructure, and mechanical properties of an Fe Cr alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 434-449.
- [63] FEENSTRA D R, BANERJEE R, FRASER H L, et al. Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2021, 25(4): 100924.
- [64] PASKUAL A, ÁLVAREZ P, SUÁREZ A. Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 358-362.
- [65] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1): 465-481.
- [66] NAGAMATSU H, SASAHARA H, MITSUTAKE Y, et al. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100896.
- [67] KAZMI K H, SHARMA S K, DAS A K, et al. Wire arc additive manufacturing of ER-4043 aluminum alloy: Effect of tool speed on microstructure, mechanical properties and parameter optimization[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(10): 5120-5133.
- [68] GOKHALE N P, KALA P, SHARMA V. Thin-walled metal deposition with GTAW welding-based additive manufacturing process[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(12): 569.
- [69] WANG X L, WANG A M, LI Y B. Study on the deposition accuracy of omni-directional GTAW-based additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282: 116649.
- [70] WANG L, ZHANG Y L, HUA X M, et al. Twin-wire plasma arc additive manufacturing of the Ti-45Al titanium aluminide: Processing, microstructures and mechanical properties[J]. *Intermetallics*, 2021, 136: 107277.
- [71] AHIALE G K, OH Y J, CHOI W D, et al. Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes[J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19(5): 933-939.
- [72] BANAEI S A, KAPIL A, MAREFAT F, et al. Generalised overlapping model for multi-material wire arc additive manufacturing (WAAM)[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, 18: e2210541.
- [73] WEI C, LI L, ZHANG X J, et al. 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 245-248.
- [74] GU H, WEI C, LI L, et al. Multi-physics modelling of molten pool development and track formation in multi-track, multi-layer and multi-material selective laser melting[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: 119458.
- [75] MAO S L, ZHANG D Z, REN Z H, et al. Effects of process parameters on interfacial characterization and mechanical properties of 316L/CuCrZr functionally graded material by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899: 163256.
- [76] WEI C, LIU L C, GU Y C, et al. Multi-material additive manufacturing of tungsten—Copper alloy bimetallic structure with a stainless-steel interlayer and associated bonding mechanisms[J]. *Additive Manufac-*

- ing, 2022, 50: 102574.
- [77] WEN Y J, WU X K, HUANG A K, et al. Laser powder bed fusion of immiscible steel and bronze: A compositional gradient approach for optimum constituent combination[J]. *Acta Materialia*, 2024, 264: 119572.
- [78] LI Y H, LIU Z Z, WEI Z Y, et al. Inhibition of interfacial cracks in 304L-Inconel718 bimetal fabricated via laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 94: 104463.
- [79] WEI C, LIU L C, CAO H T, et al. Cu10Sn to Ti6Al4V bonding mechanisms in laser-based powder bed fusion multiple material additive manufacturing with different build strategies[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 51: 102588.
- [80] WU X P, ZHANG D Y, YI D H, et al. Interfacial characterization and reaction mechanism of Ti/Al multi-material structure during laser powder bed fusion process[J]. *Materials Characterization*, 2022, 192: 112195.
- [81] BARTOLOMEU F, CARVALHO O, GASIK M, et al. Multi-functional Ti6Al4V-CoCrMo implants fabricated by multi-material laser powder bed fusion technology: A disruptive material's design and manufacturing philosophy[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 138: 105583.
- [82] HUANG G J, LIN K J, GU D D, et al. The influence of building parameters on residual stress, interfacial structure, and cracking control of laser powder bed fusion processed Ti6Al4V/AlMgScZr multi-material parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 330: 118479.
- [83] CHEN K Y, WANG C, HONG Q F, et al. Selective laser melting 316L/CuSn10 multi-materials: Processing optimization, interfacial characterization and mechanical property[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283: 116701.
- [84] LI X S, SUKHOMLINOV D, QUE Z Q. Microstructure and thermal properties of dissimilar M300-CuCr1Zr alloys by multi-material laser-based powder bed fusion[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2024, 31(1): 118-128.
- [85] ZHANG X C, PAN T, CHEN Y T, et al. Additive manufacturing of copper-stainless steel hybrid components using laser-aided directed energy deposition[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 80: 100-116.
- [86] ZHANG J L, WANG X B, GAO J B, et al. Additive manufacturing of Ti6Al4V/AlCuMg multi-material structures with a Cu interlayer[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 256: 108477.
- [87] JEONG H I, KIM D H, LEE C M. Multi-material deposition of Inconel718 and Ti6Al4V using the Ti-Nb-Cr-V-Ni high entropy alloy intermediate layer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 3217-3227.
- [88] DEMIR A G, KIM J, CALTANISSETTA F, et al. Enabling multi-material gradient structure in laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 301: 117439.
- [89] MACDONALD B E, ZHENG B L, FIELDS B, et al. Influence of co-deposition strategy on the mechanical behavior of additively manufactured functionally integrated materials[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 61: 103328.
- [90] ZHANG S Y, DAI H L, LI Y J, et al. Additive manufactured corrosion-resistant SS316L/IN625 functionally graded multi-material in hydrofluoric acid (HF) environment[J]. *Corrosion Science*, 2024, 230: 111926.
- [91] BU H C, LI X, LI B B, et al. Enhanced interfacial joining strength of laser wobble joined 6061-T6 Al alloy/CFRTP joint via interfacial bionic textures pre-construction[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 261: 110787.
- [92] LI J, ZHAO Y, ZHANG X, et al. Influence of bionic texture on the mechanical properties of 6061Al/CFRTP laser joints[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205: 112393.
- [93] XU J, YANG X Y, LIAO Y H, et al. Analysis of bonding enhancement mechanism of micro-nano bionic texture on hybrid composites[J]. *Composites Communications*, 2024, 50: 102004.
- [94] WANG X Q, ZHOU Y, WEN S F, et al. Dual crack inhibition mechanism of nano-TiC in steel-copper heterostructures formed by laser powder bed fusion[J]. *Materials Research Letters*, 2023, 11(11): 949-956.
- [95] MENDAGALIEV R V, EVDOKIMOV D D, FIRSOV A M, et al. Direct laser deposition of austenitic and martensitic steel gradient layers[J]. *Metals and Materials International*, 2023, 29(5): 1555-1562.
- [96] MENDAGALIEV R V, KLIMOVA-KORSMIK O G, TURICHIN G A, et al. Direct energy deposition of Cu-Nb functionally graded layers for dissimilar joining titanium alloys and steels[J]. *Materials Letters*, 2022, 324: 132721.
- [97] MENDAGALIEV R V, IVANOV S Y, EVSTIFEEV A D, et al. Direct energy deposition of functionally graded layers for the Ti-Fe compound[J]. *Vacuum*, 2024, 219: 112750.
- [98] ZHANG X C, LI L, LIOU F. Additive manufacturing of stainless steel-Copper functionally graded materials via Inconel718 interlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 2045-2058.
- [99] GHANAVATI R, LANNUNZIATA E, NOROUZI

- E, et al. Design and development of SS316L-IN718 functionally graded materials via laser powder bed fusion[J]. *Materials Letters*, 2023, 349: 134793.
- [100]GHANAVATI R, NAFFAKH-MOOSAVY H, MORADI M, et al. Residual stresses and distortion in additively-manufactured SS316L-IN718 multi-material by laser-directed energy deposition: A validated numerical-statistical approach[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 108: 292-309.
- [101]LI K, ZHAN J B, ZHANG M, et al. A functionally graded material design from stainless steel to Ni-based superalloy by laser metal deposition coupled with thermodynamic prediction[J]. *Materials & Design*, 2022, 217: 110612.
- [102]QU H Z, CHEN H, ZHANG J J, et al. Microstructure, mechanical properties, and surface integrity of austenitic-martensitic stainless steel functionally graded materials prepared by laser additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(20): 10805-10821.
- [103]ZHANG X C, WANG T T, YE J C. Micro-deformation behavior of laser melting deposited multi-gradient TC4/TC11 alloy under tension-tension cyclic loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 154: 107659.
- [104]DARAM P, SINGH A, HIROTO T, et al. Compositionally graded titanium to aluminum processed by laser powder bed fusion process: Microstructure evolution and mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 903: 146638.
- [105]KIM E J, LEE C M, KIM D H. Study on the characteristics of functionally graded materials from Ni20Cr to Ti6Al4V via directed energy deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 955: 170263.
- [106]LIN E, LI Y N, ORTIZ C, et al. 3D printed, bio-inspired prototypes and analytical models for structured suture interfaces with geometrically-tuned deformation and failure behavior[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 73: 166-182.
- [107]NASA. NASA tests new alloy to fold wings in flight [EB/OL]. [2025-11-19]. <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasa-tests-new-alloy-to-fold-wings-in-flight/>.
- [108]NASA. Superelastic tire[EB/OL]. [2025-11-24]. <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-99>.
- [109]NASA. Shape memory alloy mechanisms for cubesats [EB/OL]. [2025-11-24]. <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-135>.
- [110]KOH J S, YANG E, JUNG G P, et al. Jumping on water: Surface tension-dominated jumping of water striders and robotic insects[J]. *Science*, 2015, 349 (6247): 517-521.
- [111]YANG X F, CHANG L L, PÉREZ-ARANCIBIA N O. An 88-milligram insect-scale autonomous crawling robot driven by a catalytic artificial muscle[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eaba0015.
- [112]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.
- [113]CAVALEIRO A J, RAMOS A S, BRAZ FERNANDES F M, et al. Follow-up structural evolution of Ni/Ti reactive nano and microlayers during diffusion bonding of NiTi to Ti6Al4V in a synchrotron beamline[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 116354.
- [114]OLIVEIRA J P, PANTON B, ZENG Z, et al. Laser joining of NiTi to Ti6Al4V using a Niobium interlayer [J]. *Acta Materialia*, 2016, 105: 9-15.
- [115]ZHONG Y, XIE J L, CHEN Y H, et al. Microstructure and mechanical properties of micro laser welding NiTiNb/Ti6Al4V dissimilar alloys lap joints with nickel interlayer[J]. *Materials Letters*, 2022, 306: 130896.
- [116]TESHOME F B, PENG B, OLIVEIRA J P, et al. Dissimilar laser welding of NiTi to Ti6Al4V via Zr interlayer[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2023, 38(4): 461-470.
- [117]QUINTINO L, LIU L, HU A, et al. Fracture analysis of Ag nanobrazing of NiTi to Ti alloy[J]. *Soldagem & Inspeção*, 2013, 18(3): 281-286.
- [118]SONG P, ZHU Y, GUO W, et al. Mechanism of crack formation in the laser welded joint between NiTi shape memory alloy and TC4[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42: 6-9.
- [119]LIU J P, CHEN G Q, MA Y R, et al. Formation mechanism and control of welding cracks in dissimilar materials of Ni50Ti50 SMA and Ti6Al4V[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 552-564.
- [120]SHOJAEI ZOERAM A, AKBARI MOUSAVI S A A. Effect of interlayer thickness on microstructure and mechanical properties of as welded Ti6Al4V/Cu/NiTi joints[J]. *Materials Letters*, 2014, 133: 5-8.
- [121]TESHOME F B, PENG B, OLIVEIRA J P, et al. Microstructure, macrosegregation, and mechanical properties of NiTi to Ti6Al4V dissimilar laser welds using Co interlayer[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(12): 9777-9790.
- [122]LIU X, GU D D, YUAN L H, et al. Topological optimisation and laser additive manufacturing of force-direction-sensitive NiTi porous structures with large deformation recovery behaviour[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19: e2365860.

- [123] YUAN L H, GU D D, LIU X, et al. Design and additive manufacturing of bionic hybrid structure inspired by cuttlebone to achieve superior mechanical properties and shape memory function[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(5): 055001.
- [124] BARTOLOMEU F, COSTA M M, ALVES N, et al. Additive manufacturing of NiTi-Ti6Al4V multi-material cellular structures targeting orthopedic implants [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106208.
- [125] 李星燃, 刘政麟, 姜鹏飞, 等. 激光增材制造 Ti6Al4V/NiTi 仿生功能梯度材料的界面特征及性能[J]. *焊接学报*, 2023, 44(10): 27-33, 134.
LI Xingran, LIU Zhenglin, JIANG Pengfei, et al. Interfacial characterization and properties of Ti6Al4V/NiTi laser additive manufactured functional gradient materials[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(10): 27-33, 134.
- [126] LI X R, LI Q, NIE M H, et al. Constructing the discrete gradient structure for enhancing interfacial bond strength of Ti6Al4V/NiTi heterostructured materials [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 214: 266-271.
- [127] 高佳丽, 汪徐, 郝云波, 等. Ti6Al4V/NiTi 异质功能材料原位梯度增材成形与界面组织演化[J]. *中国激光*, 2024, 51(10): 194-204.
GAO Jiali, WANG Xu, HAO Yunbo, et al. In-situ gradient additive forming and interfacial microstructure evolution of Ti6Al4V/NiTi heterogeneous functional material[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(10): 194-204.
- [128] WANG J, PAN Z X, WANG L, et al. In-situ dual wire arc additive manufacturing of NiTi-coating on Ti6Al4V alloys: Microstructure characterization and mechanical properties[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 386: 125439.
- [129] JIANG P F, NIE M H, ZONG X M, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4/NiTi bionic gradient heterogeneous alloy prepared by multi-wire arc additive manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 866: 144678.
- [130] JIANG P F, NIE M H, TENG J Z, et al. Multi-wire arc additive manufacturing of TC4-Nb-NiTi bionic layered heterogeneous alloy: Microstructure evolution and mechanical properties[J]. *Materials Characterization*, 2023, 202: 113001.
- [131] TERRY B, SHELTON A, STRAUSS A. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding between butted, thin sheet NiTi and Ti6Al4V[J]. *Welding in the World*, 2025, 69: 1-13.
- [132] ZANG Y H, XIE J L, CHEN Y H, et al. Resistance spot welded NiTi shape memory alloy to Ti6Al4V: Correlation between joint microstructure, cracking and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2025, 253: 113859.
- [133] YE X, XIA P, PAN N X, et al. Microstructure study of NiTi alloy deposition using double-wire arc additive manufacturing[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2025, 56(2): 2020-2034.
- [134] MOKHLES M, ZEBARJAD S M, DANESHMANESH H, et al. Enhancing Ni-Ti shape memory alloy diffusion bonding with Ti/Ni reactive multilayer foils[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 2024, 19(1): 18.
- [135] CHEN H, ZHANG Z, HAO X H, et al. Microstructure and tribocorrosion properties of NiTi/AlNi₂Ti ternary intermetallic alloy[J]. *Vacuum*, 2021, 184: 109928.
- [136] SIMÕES S, VIANA F, RAMOS A S, et al. Reaction zone formed during diffusion bonding of TiNi to Ti6Al4V using Ni/Ti nanolayers[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(21): 7718-7727.
- [137] 顾冬冬, 戴冬华, 夏木建, 等. 金属构件选区激光熔化增材制造控形与控性的跨尺度物理学机制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(5): 645-652.
GU Dongdong, DAI Donghua, XIA Mujian, et al. Cross-scale physical mechanisms for structure and performance control of metal components processed by selective laser melting additive manufacturing[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017, 49(5): 645-652.
- [138] 陈超, 张梦莹, 李文龙, 等. 钛合金熔丝增材制造的研究现状与应用领域[J]. *南京航空航天大学学报(自然科学版)*, 2025, 57(1): 1-19.
CHEN Chao, ZHANG Mengying, LI Wenlong, et al. Research status and application field of additive manufacturing of titanium alloy fused wires[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition)*, 2025, 57(1): 1-19.
- [139] 陈超, 任柏桥, 傅彦, 等. 电弧增材制造 304 不锈钢显微组织与断裂行为[J]. *南京航空航天大学学报(自然科学版)*, 2025, 57(3): 557-561.
CHEN Chao, REN Boqiao, FU Yan, et al. Microstructure and fracture behavior of 304 stainless steel prepared by wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition)*, 2025, 57(3): 557-561.