

增材制造表面的胶接特性研究进展

赵金泽 王洁 刘子路 赵江澎 杨凯

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 增材制造(AM)技术因其高度的设计自由度和高效制造能力,已广泛应用于航空航天、生物医疗及汽车工业等领域。然而,增材制造部件的表面形貌、微观结构对胶接性能产生显著影响,限制了其在多材料集成和结构粘结中的应用。本文系统综述了增材制造表面的胶接特性,分析了表面粗糙度、微观组织及层状结构对粘结性能的影响,并重点探讨了优化胶接性能的策略,包括表面后处理和增材制造定制化结构设计。研究表明,通过合理控制AM工艺参数及表面改性,可显著提升胶接强度,为增材制造部件的高可靠性应用提供技术支撑。本文旨在为增材制造胶接技术的深入研究与工程应用提供理论依据和实践参考。

关键词 增材制造,表面形貌,胶接性能,表面处理

中图分类号:TB3;TG14

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.S1.003

Research Progress on the Adhesive Properties of Additive Manufactured Surfaces

ZHAO Jinze WANG Jie LIU Zilu ZHAO Jiangpeng YANG Kai

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Additive Manufacturing (AM) technology has been widely applied in the fields such as aerospace, biomedicine, and the automotive industry due to its high design flexibility and efficient manufacturing capabilities. However, the surface morphology and microstructure of AM-manufactured components significantly affect adhesive performance, limiting their application in multi-material integration and structural bonding. This paper systematically reviews the adhesive properties of additive manufactured surfaces, focusing on the effects of surface roughness, microstructure, and layered structure on adhesive performance. It also discusses strategies to optimize adhesive performance, including surface post-treatment and customized structural design in additive manufacturing. The research indicates that through the reasonable control of AM process parameters and surface modification, adhesive strength can be significantly improved, providing technical support for the high-reliability applications of AM components. This paper aims to provide theoretical and practical references for the in-depth study and engineering application of additive manufacturing bonding technology.

Key words Additive manufacturing, Surface morphology, Adhesive performance, Surface treatment

0 引言

增材制造(AM)技术通过逐层堆积材料的方式,实现了复杂结构的高效制造,突破了传统减材制造的局限性。近年来,随着金属、聚合物及复合材料增材制造技术的不断成熟,其应用已从实验室原型开发拓展至航空航天、生物医疗和汽车工业等关键领域^[1-2]。相较于传统制造依赖模具或刀具切削,AM技术基于三维模型切片数据,利用高精度能量源(如激光、电子束)或挤出系统逐层加工材料,赋予了前所未有的设计自由度。例如,在航空航天领域,传统制造方式需要多个部件装配而成的复杂燃油喷嘴,

如今可通过增材制造技术一次成型,从而减少部件数量、降低结构质量,并提升整体性能^[2]。

根据材料状态和能量输入方式的不同,当前主流的金属增材制造技术主要包括选区激光熔化(SLM)、电子束熔化(EBM)等,在高分子材料和复合材料领域,熔融沉积成型(FDM)也是最常见的增材制造技术之一。SLM采用高功率激光选择性熔化金属粉末,逐层构建零件,适用于高精度和高致密度零件制造^[3],这种方法制造的产品由于工艺过程中快速凝固和层间搭接,表面可能存在熔池边界纹理、球化效应及微孔缺陷^[4]。EBM利用电子束在高真空环境

收稿日期:2025-05-19

第一作者简介:赵金泽,1992年出生,硕士,高级工程师,主要从事树脂基复合材料加工及胶接装配等研究工作。E-mail:eddie_zhaojz@163.com

下熔化金属粉末,适用于制造钛合金等高温材料,由于电子束的热输入较大,熔池深度可达200~500 μm ,形成明显的熔融轨迹和柱状晶结构^[5]。虽然EBM制造的零件残余应力较SLM降低30%~50%,但表面粗糙度更大,往往需要后续机加工处理^[6]。FDM是最常见的聚合物增材制造技术之一,其原理是通过加热挤出热塑性材料,逐层沉积形成零件。FDM工艺简单、成本低,适用于快速原型制造和工程应用。然而,由于层间粘结依赖材料流动性和冷却固化特性,FDM零件的表面质量通常较差,存在明显的层纹、孔隙和翘曲问题^[7-8]。

在轻量化与功能化需求驱动的工业应用中,胶接技术是实现多材料集成或复杂装的关键,航天器中钛合金蜂窝结构与碳纤维蒙皮的连接、医疗植入物的生物相容性涂层粘结等,均依赖高性能的胶接工艺。增材制造的部件已经实现了单一材料的高度集成化,但在航空航天领域等复杂的工业场景,多材料连接仍然是不可避免的^[9-12]。AM技术作为一种新型的制造技术在实际应用中仍面临表面特性对后续加工,如胶接、涂层等工艺适应性不足的挑战。比如,晶格结构作为一种典型金属增材制造结构,相比传统制造方法可实现50%以上的轻量化减重,但其表面由于逐层堆积产生的阶梯效应和未熔合孔隙(粗糙度 R_a 高达20~50 μm),显著降低了与复合材料的胶接强度^[13]。此外,AM金属材料在快速冷却过程中易形成各向异性微观组织,如SLM成形钛合金的柱状晶结构,可能引发胶接界面的应力集中,影响接头的力学性能和长期可靠性^[2]。

另一方面,增材制造的灵活制造方式可实现胶接表面的定制化处理,为胶接接头的创新设计提供了新途径。通过自由形状设计,可以显著提升接头性能^[14]。

解析增材制造表面的物理化学特性与胶接性能的关联机制,是推动该技术向高附加值产业链延伸的关键环节。研究AM表面胶接特性的核心意义在于:(1)推动轻量化设计——通过胶接替代机械紧固,可进一步降低AM结构质量(如航空航天结构)^[15];(2)实现多材料集成——胶接是异质材料AM部件组装的可行方案^[16-17];(3)降低后处理成本——通过优化AM表面特性,可减少喷砂、抛光等传统后处理工序^[18]。

本文聚焦于增材制造表面的胶接特性,系统分析其影响因素,综述近年来主要研究进展,并探讨未来的发展方向,以期AM结构可靠性优化及多材料集成提供理论依据和技术参考。

1 增材制造表面的形貌

表面形貌是胶接技术领域关注的重点特性,被粘物表面的粗糙度经常被用作胶接接头的设计参数^[19],对基材的表面处理诸如机械打磨、吹砂等方法都会显著的改变基材的表面粗糙度,并通过粗糙度改变了的额外胶接接触面积、机械连锁等效应改善胶接接头的胶接强度。金属材料AM工艺中,未完全熔化的粉末颗粒易附着在结构表面,导致表面粗糙度增加^[13]。图1显示了EBM和SLM样品表面存在的未熔融的金属粉末^[20]。

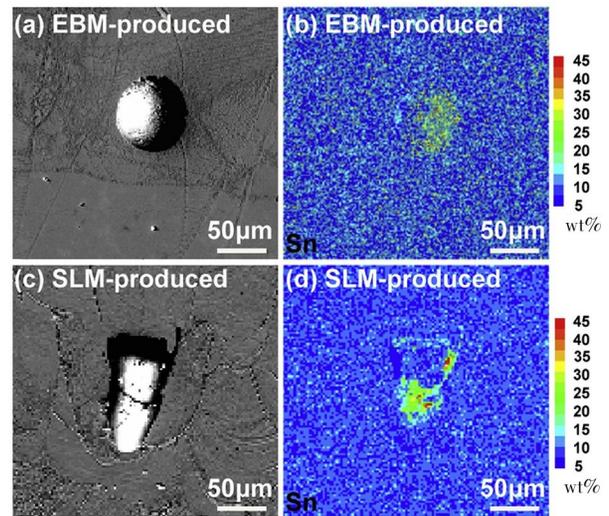


图1 EBM和SLM制造的材料表面分布未熔融的金属粉^[20]
Fig. 1 The surfaces of the materials manufactured by EBM and SLM are distributed with unmelted metal powder^[20]

激光重熔技术借助激光器发射的高能激光粒子束,对目标加工材料实施重复性加工。在此过程中,高能激光粒子束携带大量能量作用于材料表面,使材料局部区域迅速升温熔化,随后在冷却凝固过程中,实现对材料微观结构和性能的调控。李强等人^[21]研究了SLM增材制造中重熔次数对316L不锈钢构件表面粗糙度的影响规律,经过试验研究发现,激光重熔过程中,SLM的材料表面吸附的未完全熔化粉末颗粒在高能激光束的作用下进一步融化,原本突出的球形颗粒在重熔后逐渐融陷消失,减少了表面的离散凸起结构,初始打印形成的激光熔接痕在重熔时被再次加热,熔道搭接处的“峰谷”现象被抑制,熔接痕逐渐变浅、变细,最终与周围区域趋于平整,从而改善了材料的表面粗糙度,激光重熔前后材料表面形貌如图2所示。三次重熔后,轮廓算术平均偏差粗糙度(R_a)从8.437 μm 降至6.18 μm ,轮廓最大谷深(R_v)从82.68 μm 降至37.597 μm ,降幅达54.53%,表面平整度明显提升。

增材制造过程的工艺参数对材料表面性质有显著影响。针对熔融丝材制造(FFF),一种与FDM原理基本相同的高分子材料增材制造方法,FRASCIO

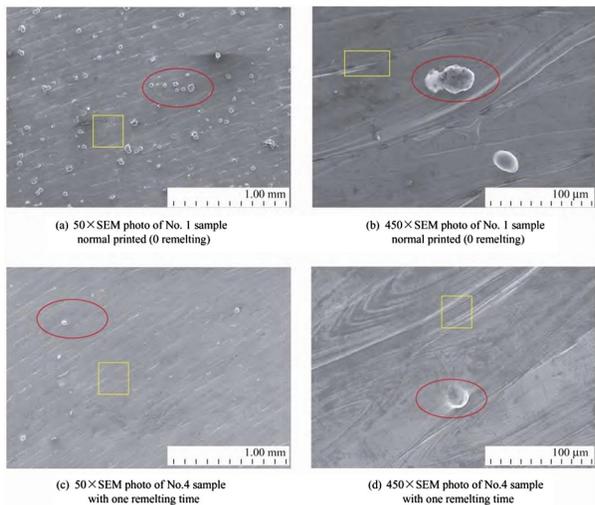


图2 SLM制造316L不锈钢构件的原始和一次激光重熔后表面SEM图像^[21]

Fig. 2 The original and primary laser remelting of 316L stainless steel components manufactured by SLM surface SEM image^[21]

等人^[22]开展了FFF工艺参数对材料表面性能的影响的研究,通过改变喷嘴温度、打印速度和层厚等参数,制造的丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)和聚乳酸(PLA)材料表面形貌、润湿性有显著变化。他们还系统探讨了熔FFF工艺参数对聚合物材料表面特性及胶接接头性能的影响机制^[23]。实验结果表明,挤出温度、打印速度和层厚度通过多尺度作用显著调控表面形貌,其中PLA的表面特征主要受打印速度主导,高速打印(120 mm/s)导致层间熔合不充分,形成尖锐台阶结构,其最大 Ra 达19.24 μm ;而ABS的粗糙度则由层厚度决定,层厚达到0.3 mm时将引发显著层积效应。

综上,增材制造的工艺特点塑造了其独特的表面特性。通过优化增材制造过程中的工艺参数,可以有效地调控材料表面的粗糙度、润湿性和接触角,从而影响胶接接头的质量。激光重熔技术和其他表面处理方法能够减少未完全熔化的粉末颗粒,抑制表面的离散凸起结构,使表面更加平整,提高接头的粘结强度。通过对这些因素的细致研究和优化,可以实现更高效、更可靠的增材制造胶接接头设计。

2 增材制造表面的胶接性能

增材制造的独特制造方式使其制品在微观结构、表面特征方面呈现的显著特性,深刻地影响着胶接接头的性能表现。从表面处理手段的差异,到粘结区几何参数的变化,再到增材制造自身的层状结构和各项异性特征,众多因素交织作用,共同塑造了增材制造基材胶接接头的性能特点^[24]。许多学者围绕增材制造方法制作的接头与传统制造表面的胶接

性能对比开展了深入研究,试图探寻其中的规律,为优化工艺提供铺垫。

通过实验和有限元方法,NGUYEN等人^[25]研究了SLM制造的钛合金表面的分层结构(微观粗糙度与宏观特征)对金属-金属及金属-复合材料胶接接头断裂韧性的影响。他们采用SLM技术制备Ti6Al4V试件,通过控制工艺参数制造了微观粗糙度($Ra \approx 12 \mu\text{m}$)且包含宏观特征(200 μm 沟槽或凹坑)的粘结基材表面,通过双悬臂梁(DCB)实验,SLM钛合金的固有粗糙度(10~15 μm)通过机械互锁显著提升胶接强度,无需额外处理即可达到喷砂+硅烷处理的Ti-Ti接头相当的力学性能;宏观凹槽特征,尤其是凸出的凹槽有效地改变裂纹路径,增加裂纹长度,引入混合模式裂纹扩展,可以显著提高胶接接头的I型断裂韧性。

ARDILA-RODRÍGUEZ等人^[26]研究了不同打印方向控制SLM制造的Ti6Al4V合金表面形态对Ti-Ti胶接接头性能的影响,作为对比,他们前期研究了吹砂处理的Ti-Ti胶接接头表面性能和力学性能^[27]。实验结果表明,不同的打印取向SLM制造的基材表面粗糙度变化很大,其中45°方向打印的表面粗糙度最大, Ra 可达10.85 μm ,显著的高于喷砂后材料表面的粗糙度($Ra \approx 2 \mu\text{m}$),直接通过SLM制造的Ti-Ti胶接接头即可达到喷砂后的Ti-Ti胶接接头相似的性能。

MORITZ等人^[28]使用EBM工艺增材制造具有不同表面结构(如槽形、钉状等)的钛样品,然后通过胶接和热直接连接方法与碳纤维增强聚醚醚酮复合材料(CF-PEEK)结合。为对比研究,还采用激光表面结构和传统铣削加工表面作为参考,强度测试结果显示,增材制造的钉状结构甚至超过了激光表面结构的粘结强度,展现了取代表面处理工序的巨大潜力。

SPAGGIARI等人^[29-30]在一项FDM制造的基材粘结接头研究中,通过FDM方法制作了几种不同的含宏观表面结构的胶接接头,但性能测试显示锯齿形结构等表面形态对胶接接头强度的提升作用有限,主要失效模式为基材断裂或应力集中导致的界面分离。

增材制造的工艺参数造就的不同表面形貌也深刻地影响着其表面制造的胶接接头,比如对于FFF方法,BERGONZI等人^[23]通过正交实验设计与双悬臂梁测试发现,工艺参数通过机械连锁与界面润湿双重机制影响I型断裂韧性(G_{Ic})。优化参数组合(如PLA在230 °C、30 mm/s、0.1 mm层厚)可使 G_{Ic} 初始值提升至0.35 N/mm,并诱导部分内聚破坏。研究

揭示,表面粗糙度 Ra 与 G_c 呈正相关,而润湿性通过调控胶黏剂扩散行为间接影响界面结合强度,该研究证明通过优化打印参数可有效提升胶接接头的抗断裂能力。

综上,不同的增材制造工艺,通过调控表面粗糙度、宏观结构特征及打印方向等参数,能够显著改善胶接接头的力学性能。尽管不同表面结构在不同材料和工艺下的表现存在差异,但总体来看,增材制造通过对层状结构和表面形貌的精准控制,为胶接接头提供了较传统制造方法更具优势的解决方案。

3 提升增材制造表面胶接性能的策略

为了提升增材制造(AM)制件的胶接性能,研究者们提出了多种创新的策略,涵盖了从表面处理到结构设计的多方面技术。特别是在后处理技术和定制化设计方面,增材制造提供了独特的优势,能够有效改善胶接接头的强度与韧性。

CAVALCANTI 等人^[32]研究了通过纤维增强提升增材制造塑料零件胶接强度的方法。如图3所示,他们通过压缩模塑工艺将纤维层压在PLA和ABS打印件表面,再用环氧树脂胶接单搭接接头进行测试。结果显示,curauá纤维增强的PLA接头失效载荷比纯PLA提升1.5倍,研究证明,纤维增强能通过机械互锁和应力分散显著提升胶接强度。

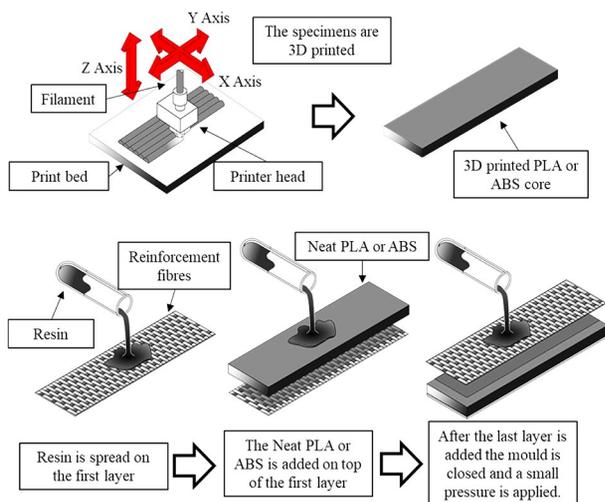


图3 在增材制造材料表面增加纤维层提高胶接接头强度^[32]
Fig. 3 The strength of the adhesive joint is improved by adding a fiber layer on the surface of the additive manufacturing material^[32]

增材制造技术甚至使不同材料之间无胶粘结成为可能。GIBSON 等人^[33]通过SLM的方法将Ti-6Al-4V粉末沉积碳纤维织物上,通过优化金属沉积过程的参数可以使金属能够渗透到碳纤维织物的一半深度,并具有一个定制过渡区域,制成图4示意的无胶黏剂的一面致密金属、一面树脂基复合材料的混合接头,为金属与复合材料混合结构提供无胶连接方案。



图4 金属-树脂基复合材料无胶黏剂连接的复合结构^[33]
Fig. 4 Composite structure of the metal and polymer matrix composite with adhesive-free connection

表面纹理化也是当前胶接领域的研究热点。已有研究表明,基材表面纹理可以通过增加接触面积、促进黏合剂渗透到基材中并增强机械互锁来改善粘接接头的机械性能,并且有序的结构化纹理(如规律的网格、沟槽)比随机纹理更能有效提升胶接强度和润湿性^[34],而增材制造技术在定制化表面设计方面,展现出了巨大的潜力。通过增材制造技术,可以精确控制基材的表面结构,甚至设计出具有特定功能的定制化表面,为胶接接头的性能提升提供了新的途径。

DUGBENOO 等人^[35]利用FDM工艺制造具有多孔(体积分数为50%)尼龙表面的连续纤维复合黏合体,将可用于黏合的面积增加了约150%,与黏合面经过行业规定的表面处理(ASTM标准2093—2003)的多层单搭接接头相比,AM定制多层的胶接接头极限强度和韧度分别提高了1.45倍和8倍。GARCIA 等人^[36]通过FDM工艺来在碳纤维增强材料表面添加结构纹理,相比纯胶黏剂接头,剪切强度提高了约832%,研究表明,结构纹理可以显著提高接头的能量吸收能力,从而提高胶接接头的整体性能。此外,增材制造工艺使得多材料增材制造(MMAM)成为可能^[37]。KUMAR 等人^[38-39]通过增材制造方法制造了拥有梯度化弹性模量分布的胶层,这种功能梯度胶接接头通过对胶接区域的材料杨氏模量进行梯度化设计,打破传统均匀材料的限制,利用模量的梯度变化优化接头力学性能,减少应力集中,提升整体结构的承载能力与可靠性。功能梯度胶接接头结构如图5所示,通过优化应力分布,使接头强度可提升100%、韧度提升169%。

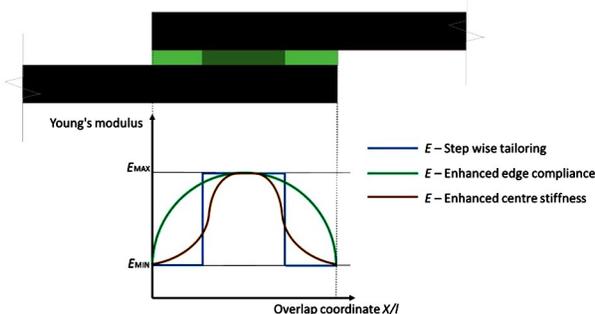


图5 功能梯度胶接接头结构示意图^[38-39]
Fig. 5 Schematic diagram of the structure of the functionally graded adhesive joint^[38-39]

MORANO 等人^[40]使用选择性激光烧结技术(SLS)制造具有不同表面和内部图案的聚酰胺试样,并使用由环氧黏合组成的DCB样品进行有限元模拟和实验,使用数字图像相关(DIC)和声发射(AE)技术监测裂纹扩展过程,研究发现,通过增材制造技术制造的正弦波界面图案的DCB试样比未进行处理的对照组峰值载荷提高了2.4倍,DIC监测显示裂纹在表面图案化的黏附材料中扩展速度较慢,表面图案通过诱导裂纹路径偏转和界面韧带桥接,有效地提高裂纹起始和扩展的阻力,从而提高了胶接接头的断裂韧度。

利用增材制造技术在复杂空间结构制造方面的优势,BÜHRING 等人^[41]将传统的面板-金字塔框架芯子-面板胶接结构利用增材制造技术一次性制造出来,通过消除胶接层提升了可靠性,促进复杂结构一体化制造。在此基础上,他们使用激光粉末床熔融(LPBF)技术制造了芯结构为金字塔形316L不锈

钢夹层试样,表面喷砂处理后,采用环氧结构胶Araldite2015进行粘结,并制作了三种接头进行对比:(1)等效几何接头(Eq. Geometry),与AM夹层接头外部尺寸相同的实体金属接头;(2)等效抗弯刚度接头(Eq. Flexural Rigidity),调整厚度使抗弯刚度与AM夹层接头相同的传统接头;(3)等效质量接头(Eq. Mass),调整厚度使质量与AM夹层接头具有相同的传统接头。实验结果表明,AM夹层接头在仅为等效几何接头41%质量的前提下,平均失效载荷与之基本相同。同时通过有限元分析表明,增材制造的金字塔芯夹层单搭接接头(Lattice SLJ)通过离散支撑结构显著降低了胶层的剥离应力峰值,其应力分布均匀性优于所有传统接头;在剪切应力方面,Lattice SLJ的峰值低于等效质量传统接头,但高于等效几何接头,显示其在轻量化(质量仅为等效几何接头的41%)与应力控制之间取得了优化平衡。4种结构的胶接接头的剥离应力、剪切应力如图6所示^[42]。

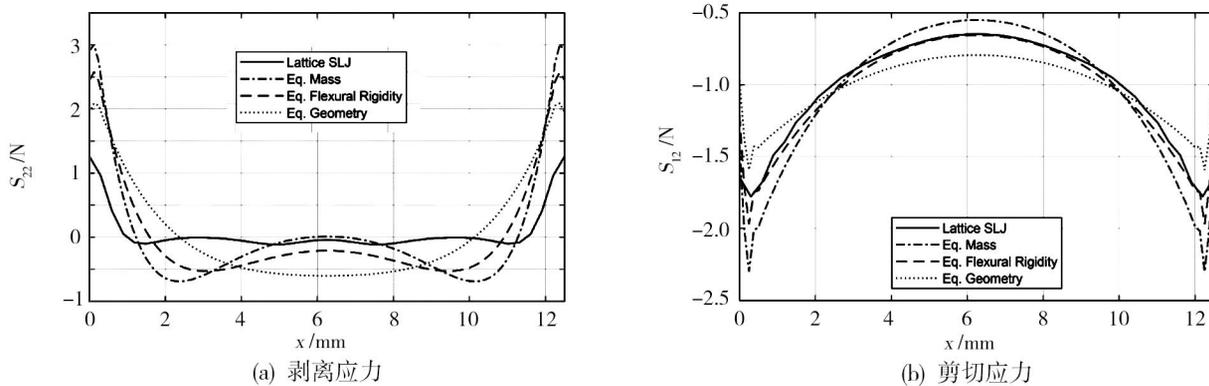


图6 四种结构的单搭接胶接接头胶层内应力分布^[42]

Fig. 6 The distribution of the stress within the adhesive layer of the single-lap adhesive joint with four different structures^[42]

综上所述,通过创新的后处理和定制化设计,多种有效的策略都可以提升AM材料制造的胶接接头力学性能。通过精确控制基材表面纹理、设计功能梯度接头和多材料混合结构等方法可以改善胶接接头的机械互锁、应力分布或优化接头结构,从而显著提高胶接接头的强度、韧性和可靠性。

4 结语

综述了增材制造表面特性对胶接性能的影响,分析了不同AM工艺对表面形貌、微观结构及层状结构的影响,并探讨了优化胶接性能的策略。研究表明,AM技术在制造过程中产生的表面粗糙度、微观组织对胶接强度有显著影响。通过合理控制AM工艺参数,采用激光重熔等表面处理方法,能够有效优化表面质量,提升胶接性能。同时,增材制造的定制化表面设计为胶接技术的创新应用提供了新的思路,在多材料集成与轻量化设计方面具有重要潜力。尽管当前在增材制造表面胶接特性研究方面取得了

一定进展,但仍存在诸多挑战和研究空白,未来可重点关注以下几个方面。

(1)增材制造表面胶接机理的深入研究:进一步探索不同增材制造工艺(如激光粉末床熔融、电子束熔融、熔融沉积建模等)制备的表面微观结构对胶接强度的影响机理,并结合实验和数值模拟方法揭示界面结合行为。

(2)先进表面改性技术的开发:研究更高效、可控的表面处理方法,如SLM成型过程协同的激光抛光、纳米涂层沉积等,以改善胶接界面的润湿性和界面结合性能。

(3)增材制造与胶接技术的协同优化:通过优化增材制造工艺参数、定制表面结构,包括定制化的规律纹理结构、仿生纹理结构等,实现胶接强度的提升,同时探索新型结构胶及增材制造专用粘结材料,提高整体粘结可靠性。

综上所述,增材制造表面胶接特性的研究不仅

有助于提高其工程应用可靠性,同时也为增材制造在多材料集成、轻量化结构设计等领域的发展提供了重要支持。未来,通过多学科交叉研究,结合先进制造技术、表面工程与粘结理论,有望进一步提升增材制造胶接结构的力学性能和耐久性,推动其在高端制造领域的广泛应用。

参考文献

[1] GIBSON I, ROSEN D, STUCKER B, et al. Additive manufacturing technologies [M]. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

[2] DEBROY T, et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112–224.

[3] KING W E, et al. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges [J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4): 041304–041304.

[4] GU D D, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms [J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133–164.

[5] MURR L, et al. Microstructures and mechanical properties of electron beam–rapid manufactured Ti–6Al–4V biomedical prototypes compared to wrought Ti–6Al–4V [J]. Materials Characterization, 2009, 60(2): 96–105.

[6] GONG H, et al. Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4V components produced by selective laser melting and electron beam melting [J]. Materials & Design, 2015, 86: 545–554.

[7] TIAN X, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 198–205.

[8] GALANTUCCI L, LAVECCHIA F, PERCOCO G. Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling [J]. CIRP annals, 2010, 59(1): 247–250.

[9] SINMAZÇELİK T, et al. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods [J]. Materials & Design, 2011, 32(7): 3671–3685.

[10] PARASHAR A, MERTINY P. Adhesively bonded composite tubular joints: Review [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 38: 58–68.

[11] KASPER Y, et al. Application of toughened epoxy–adhesives for strengthening of fatigue–damaged steel structures [J]. Construction and Building Materials, 2021, 275: 121579.

[12] SENA–CRUZ J, et al. The effect of surface treatment and environmental actions on the adhesive connection between GFRP laminate surface and fresh FRC [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119594.

[13] CHEN L Y, et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 增刊1

fascinated performances, and challenges [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 146: 100648.

[14] BORGES C S P, et al. From fundamental concepts to recent developments in the adhesive bonding technology: a general view [J]. Discover Mechanical Engineering, 2023, 2(1): 8–32.

[15] KARIZ M, KUZMAN M K, SERNEK M. Adhesive bonding of 3D–printed ABS parts and wood [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017, 31(15): 1683–1690.

[16] GALINSKA A. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—A review [J]. Part I: Bolted Joining. Polymers (Basel), 2020, 12(10): 2252.

[17] GALINSKA A, GALINSKI C. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part II: Riveting, clinching, non–adhesive form–locked joints, pin and loop joining [J]. Polymers (Basel), 2020, 12(8): 1681.

[18] 姚燕生,周瑞根,张成林,等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术 [J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525202–525202.

[19] BALDAN A. Adhesion phenomena in bonded joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 38: 95–116.

[20] LIU Y J, et al. Microstructure, defects and mechanical behavior of beta–type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting [J]. Acta Materialia, 2016, 113: 56–67.

[21] 李强,刘送永,王庆阳. 选择性激光熔化成形(SLM)增材制造重熔次数对316L构件表面粗糙度及磨损性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2024, 37(2): 170–181.

[22] FRASCIO M, et al. Additive manufacturing process parameter influence on mechanical strength of adhesive joints, preliminary activities [C]. In 17th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics (YSESM), Telc., Czech Republic, 2019.

[23] BERGONZI L, et al. A study on additive manufacturing build parameters as bonded joint design factors [J]. Journal of Adhesion, 2024, 100(5): 576–605.

[24] PULIDO A F C, et al. Adhesive joints for composite materials produced by additive manufacturing [C]. In 5th International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Technology (IMRMPT). Ran Jose de Cucuta, Colombia, 2019.

[25] NGUYEN A T T, et al. Hierarchical surface features for improved bonding and fracture toughness of metal – metal and metal–composite bonded joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 66: 81–92.

[26] ARDILA–RODRÍGUEZ L A, RANS C, POULIS J A. Effect of surface morphology on the Ti–Ti adhesive bond performance of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 110: 10.

[27] ARDILA–RODRÍGUEZ L A, et al. The influence of grit blasting and UV/Ozone treatments on Ti–Ti adhesive bonds and their durability after sol–gel and primer application [J].

International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 104: 102750.

[28] MORITZ J, et al. Additive manufacturing of titanium with different surface structures for adhesive bonding and thermal direct joining with fiber-reinforced polyether-ether-ketone (PEEK) for lightweight design applications[J]. Metals, 2021, 11(2):265.

[29] SPAGGIARI A, DENTI F. Mechanical strength of adhesively bonded joints using polymeric additive manufacturing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C—Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(10):1851–1859.

[30] SPAGGIARI A, FAVALI F. Evaluation of polymeric 3D printed adhesively bonded joints: effect of joint morphology and mechanical interlocking [J]. Rapid Prototyping Journal, 2022, 28(8):1437–1451.

[31] BÜRENHAUS F, MORITZER E, HIRSCH A. Adhesive bonding of FDM-manufactured parts made of ULTEM 9085 considering surface treatment, surface structure, and joint design[J]. Welding in the World, 2019, 63(6):1819–1832.

[32] CAVALCANTI D K K, DE QUEIROZ H F M, BANEJA M D. Performance enhancement of adhesive joints of additive manufactured parts by using different types of fibre reinforcements [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023, 124:103371.

[33] GIBSON T, et al. Hybrid Joining through additive manufacturing [C]. In Annual Conference and Exposition of the Society-for-Experimental-Mechanics on Experimental and Applied Mechanics, Costa MeRa, CA, 2015.

[34] NAAT N et al. Effect of surface texture on the mechanical performance of bonded joints: A review [J]. The

Journal of Adhesion, 2023, 99(2):166–258.

[35] DUGBENOO E, et al. Enhanced bonding via additive manufacturing-enabled surface tailoring of 3D printed continuous-fiber composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(12):1800691.

[36] GARCIA R, PRABHAKAR P. Bond interface design for single lap joints using polymeric additive manufacturing. Composite Structures, 2017, 176:547–555.

[37] FRASCIO M, et al. Review of tailoring methods for joints with additively manufactured adherends and adhesives[J]. Materials, 2020, 13(18):3949.

[38] KUMAR S, WARDLE B L, ARIF M F. Strength and performance enhancement of bonded joints by spatial tailoring of adhesive compliance via 3D printing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(1):884–891.

[39] KUMAR S, et al. Stress reduction of 3D printed compliance-tailored multilayers [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(1):1700883.

[40] MORANO C, et al. Crack propagation in adhesive bonded 3D printed polyamide: Surface versus bulk patterning of the adherends [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2024, 131:103660.

[41] BÜHRING J, NUÑO M, SCHRÖDER K U. Additive manufactured randwich structures: Mechanical characterization and uRage potential in small aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111:106548.

[42] BÜHRING J, et al. Experimental and numerical investigation of adhesively bonded additive manufactured Randwich structures with a pyramidal lattice core[J]. Journal of Adhesion, 2024, 100(5):323–339.