



铜合金与钢多材料激光粉床熔融研究进展

万里¹, 孟培培², 汪小康¹, 徐旭³, 吴志航³, 马云³, 蔡高参¹

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 锦鸿建设集团有限公司, 浙江丽水 323000;

3. 杭州盈铭深冷真空工程有限公司, 杭州 311700)

摘要: 激光粉床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)技术为实现铜合金与钢多材料构件在导热、导电性能和力学性能上的优势互补提供了新途径,但这两种材料显著的物理化学性质差异使界面成形面临严峻挑战。系统综述了铜合金与钢多材料激光粉床熔融的界面成形机制与性能调控策略。总结了 316L/CuCrZr、316L/CuSn10 和 M300/CuCrZr 等典型材料组合的特点,以及粉末输送系统的发展现状;分析了其界面扩散层、融合区、混合组织及晶粒细化区等典型微观结构特征,阐述了铜合金与钢多材料 LPBF 过程中热-力失配裂纹、粉末交叉污染及液态金属脆化等典型缺陷的形成机制;评述了面向铜合金与钢多材料界面的工艺参数优化、功能梯度设计以及后处理等界面调控方法及其作用规律;归纳了铜合金与钢多材料体系在综合力学性能与物理性能方面的研究结果,并与传统连接方法进行了对比,总结了 LPBF 在航空航天、热交换系统、高功率电机和精密传动部件等领域的应用进展,指出其当前面临的关键挑战,并展望了多物理场辅助工艺、混合式界面工程策略以及基于机器学习的智能监控等未来发展方向,旨在为铜合金与钢多材料 LPBF 的深入研究和工程应用提供系统性参考。

关键词: 多材料增材制造;激光粉床熔融;界面工程;显微组织演变;力学性能评估

中图分类号: TB331

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)07-0510-14

引文格式: 万里,孟培培,汪小康,等. 铜合金与钢多材料激光粉床熔融研究进展[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(4): 510-523.

Reference Format: WAN Li, MENG Peipei, WANG Xiaokang, et al. Research progress in multi-material laser powder bed fusion of copper alloys and steel[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(4): 510-523.

Research progress in multi-material laser powder bed fusion of copper alloys and steel

WAN Li¹, MENG Peipei², WANG Xiaokang¹, XU Xu³, WU Zhihang³, MA Yun³, CAI Gaoshen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Jinhong Construction Group Co., Ltd., Lishui 323000, China; 3. Hangzhou Yingming Cryogenic Vacuum Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311700, China)

Abstract: Laser powder bed fusion (LPBF) technology offers a new pathway for achieving complementary advantages in thermal conductivity, electrical conductivity and mechanical properties of multi-material components of copper alloys and steel. However, the significant differences in the physical and chemical properties of the two abovementioned materials pose critical challenges to interfacial bonding. This paper systematically reviewed the interfacial formation mechanisms and performance regulation strategies for LPBF of copper alloys and steel. First, it summarized the characteristics of typical material combinations including 316L/CuCrZr, 316L/CuSn10 and M300/CuCrZr, as well as the current development of powder delivery systems. Second, it analyzed the typical microstructural features, such as

收稿日期: 2026-02-03 网络出版日期: 2026-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52176048, 52572373); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2025C01165)

作者简介: 万里(2002—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事激光增材制造方面的研究。

通信作者: 蔡高参, E-mail: caigaocan@zstu.edu.cn

diffusion layers, fusion zones, mixed structures and grain-refined regions, and clarified the formation mechanisms of representative defects during LPBF, including thermal - mechanical mismatch cracking, powder cross-contamination and liquid metal embrittlement. Third, it reviewed the interfacial control strategies, including process parameter optimization, functionally graded design, and post-treatments, with emphasis on their mechanisms and effects. Fourth, it summarized the mechanical and physical properties of these multi-material systems and compared them with those achieved by conventional bonding methods. Finally, it outlined recent applications of LPBF in aerospace, heat exchange systems, high-power-density motors, and precision transmission components, identified the current key challenges, and future directions including multi-physics-field-assisted processes, hybrid interface engineering strategies, and machine-learning-based intelligent monitoring. This review aims to provide systematic reference for further research and engineering applications of multi-material LPBF of copper alloys and steel.

Key words: multi-material additive manufacturing; laser powder bed fusion; interface engineering; microstructure evolution; mechanical performance assessment

0 引言

高导热、高导电的铜合金与高强度、耐腐蚀的钢在性能上天然互补,二者的有机结合为航空航天热管理部件、集成式铸形冷却模具及先进电力电子器件等领域提供了理想的材料解决方案^[1-3]。然而,铜与钢在熔点、热导率 λ 、热膨胀系数 α 及激光吸收率 η 等热物理性质上存在显著差异,且Fe-Cu二元体系在热力学上固溶度有限^[4-5],使2种材料的高质量连接面临严峻挑战。传统的熔化焊、钎焊及扩散连接等技术难以协调上述矛盾,往往引发界面结合强度不足、残余应力过高及脆性相形成等问题^[6]。增材制造(Additive manufacturing, AM)^[7],特别是激光粉床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)技术^[8],凭借高设计自由度、近净成形、复杂结构一体化及材料局域可控分布等优势,为突破传统制造局限提供了新途径^[9-10]。

在航空航天、能源动力、模具制造等领域,单一材料往往难以同时满足高导热/高导电、高强度、耐腐蚀性及复杂构型等多重需求。例如,火箭发动机燃烧室既需要铜合金的高效散热能力以承受极端热流,又需要高强度合金的结构承载能力以抵御高压燃气;注塑模具则需兼顾高效冷却与耐磨性能。铜合金与钢的性能互补特性使其成为解决上述矛盾的理想材料组合,在热管理、结构承载一体化领域展现出广阔的应用前景。LPBF技术不仅能实现复杂几何结构的成形,还具备构建多材料与功能梯度结构的独特优势^[11],能够满足工业界对高复杂度、多功能集成部件的迫切需求^[12]。通过多材料布局与创新结构设计,LPBF技术已成为推动航空航天^[13-14]、生物医学^[15]、汽车制造^[16]等领域高性能部件发展

的重要手段。然而,LPBF过程具有极快的加热速率与冷却速率,这一特征对于铜合金与钢多材料制造既是优势,也是挑战。在强非平衡凝固条件下,2种材料热物性差异被进一步放大,熔池流动行为、温度场分布、残余应力演化及界面反应过程更为复杂,进而诱发裂纹、孔隙及液态金属脆化(Liquid metal embrittlement, LME)等一系列界面缺陷^[17]。

近年来,研究者围绕铜合金与钢多材料LPBF开展了大量工作,在材料组合选择、界面微观结构表征、缺陷形成机制及性能调控策略等方面积累了丰富的成果。已有综述从不同角度总结了多材料增材制造的研究进展。杨圣钊等^[18]综述了功能梯度增材制造的技术现状;孙金娥等^[19]综述了增材制造梯度材料的制备技术、组织结构与性能研究进展;Schneck等^[20]评述了LPBF金属混合及多材料制造的工艺与沉积策略,但未深入揭示热-力失配与LME的耦合机制;孙小婧等^[21]探讨了大物性差异多材料激光增材制造的界面问题及优化方法。现有相关综述虽覆盖了功能梯度增材制造、多材料增材制造及大物性差异材料界面行为等角度,对相关技术进展进行了归纳,为认识多材料增材制造的一般规律提供了重要参考,然而针对铜合金与钢这一兼具显著的热物性差异、复杂的冶金不相容性和广阔的工程应用前景的典型材料体系,现有综述仍缺乏系统梳理,尤其缺乏对该材料体系界面微观组织演化、热-力失配裂纹、粉末交叉污染与LME等关键问题的内在关联及调控路径的深入总结。这不仅制约了对铜合金与钢多材料LPBF界面成形规律的深入认识,也限制了该技术由实验研究向工程应用的进一步拓展。

基于此,本文聚焦铜合金与钢多材料LPBF成形中的界面成形与性能调控问题,采用文献归纳、分类

比较与综合分析相结合的综述方法开展系统梳理。首先,以典型材料组合与送粉工艺为切入点,在归纳已有研究成果的基础上,系统分析界面微观组织特征及其演化规律,阐释热-力失配裂纹、粉末交叉污染和LME等典型缺陷的形成机制;其次,围绕工艺参数优化、功能梯度设计及后处理等主要调控策略,总结界面调控的主要思路与作用规律,并结合界面力学性能、导热与导电性能以及典型应用案例,对现有研究进展进行综合评估;最后,在综合现有研究进展的基础上,归纳该领域面临的关键科学问题与技术瓶颈,并展望多物理场辅助工艺、混合式界面工程及智能监控与优化等未来发展方向,以期对铜合金与钢多材料LPBF的深入研究和工程应用提供系统性参考。

表1 铜合金与钢多材料LPBF典型材料组合的特性与应用场景

材料组合	铜合金特性	钢材特性	应用场景
316L/CuCrZr	高导热、高导电和中等强度	优良的耐蚀性、韧性和强度	航空航天 ^[22-23] 、汽车制造 ^[24-25] 、模具制造 ^[26]
316L/CuSn10	良好的铸造性能和耐磨性	优良的耐蚀性、韧性和强度	复杂冷却通道 ^[27] 、热交换器 ^[28-29]
M300/CuCrZr	高导热、高导电和中等强度	一般的耐腐蚀性、良好的韧性和超高强度	工业模具、高端注塑模具 ^[30-31]

注:CuCrZr合金的典型化学成分为Cr 0.50%~1.20%,Zr 0.03%~0.30%,余量为Cu;M300马氏体时效钢的典型化学成分为Ni 18.00%~19.00%,Co 8.50%~9.50%,Mo 4.50%~5.20%,Ti 0.50%~0.80%,Al 0.05%~0.15%,余量为Fe。

上述3种材料组合各具优势,但在LPBF多材料成形过程中均面临共性及个性挑战。共性方面,铜合金与钢在热导率、热膨胀系数及激光吸收率上差异显著,界面处易产生热-力失配裂纹与残余应力集中问题;Fe-Cu二元体系在固态下几乎不互溶,界面结合的本征条件薄弱,同时还存在LME风险;2种材料的协同成形工艺窗口窄,且对粉末交叉污染敏感,易在界面过渡区形成未熔合缺陷与组织各向异性等问题。个性方面,316L/CuCrZr组合中,CuCrZr对红外激光吸收率低,往往需要高能量输入才能实现充分熔化,但这又容易导致钢侧过热及合金元素蒸发问题^[24];316L/CuSn10组合中,CuSn10凝固区间宽,易产生偏析与微裂纹问题,界面处也更易形成脆性组织^[27];M300/CuCrZr组合则对LME尤为敏感,液态铜沿马氏体钢晶界渗透后会显著削弱界面结合能力^[32]。

因此,铜合金与钢多材料LPBF中的材料选择并非简单的性能叠加问题,而是热物性匹配、冶金相容性、工艺窗口及服役需求共同约束下的综合优化问题。实际设计中,应根据构件的热管理需求、承载要求和结构复杂程度,合理选择材料组合,并结合界面工程手段弥补材料本征不足,以实现界面的稳定成形与性能可控。

1 材料体系与工艺基础

1.1 材料特性与典型组合

在铜合金与钢多材料LPBF的研究中,材料组合的选择直接影响构件的最终性能、成形可行性及界面冶金行为。从现有研究看,该领域自2008年起步,近5年内成果增长较快,说明该方向已进入持续发展阶段。当前研究中较具代表性的材料组合主要包括316L/CuCrZr、316L/CuSn10和M300/CuCrZr这3类,分别对应耐蚀-导热协同、界面行为基础研究及高强模具应用等不同需求。表1总结了当前研究中主要的3类代表性材料组合及其主要应用场景。

1.2 LPBF工艺原理与粉末输送系统

1.2.1 工艺原理

LPBF是实现铜合金与钢多材料构件一体化成形的核心工艺,工艺示意图如图1所示^[33]。成形开始前,设备首先对成形腔与供粉腔进行预热,并通过压力与氧气监测装置调控成形舱内的环境,以维持低氧、稳定的成形氛围。成形过程中,成形腔的建造平台下降一个层厚 t 的距离,供粉腔同步上升并提供金属粉末,然后铺粉辊将金属粉末均匀铺展于建造平台,形成薄而均匀的粉末层;随后,在振镜扫描仪的控制下,Nd:YAG光纤激光器按照零件当前层的二维切片轮廓数据对指定区域进行选择性扫描,使金属粉末迅速熔化、熔合并与下层已凝固实体形成冶金结合;单层扫描结束后,建造平台下降1个层厚 t 的距离,进入下一层铺粉和扫描过程,如此循环直至构件制造完成。成形过程中多余的粉末可通过真空吸粉装置回收,备用粉末腔可用于粉末的补充与循环利用。

1.2.2 粉末输送系统

LPBF成形结构的核心在于通过激光对均质粉末层进行选择性加工^[34],但当制造目标从单一构件转向功能集成、性能梯度化的多材料零件时,如何实现多种材料在粉末床中的可控、精确与高

效分布成为多材料 LPBF 高质量成形的关键问题^[35-36]。因此,多材料 LPBF 的研究与创新同时也是粉末输送系统的重新设计与革新^[37-38]。现有多材料粉末输送系统主要分为刮刀送粉系统、超声辅助送粉系统、电子照相送粉系统以及刮刀与超声辅助送粉系统。

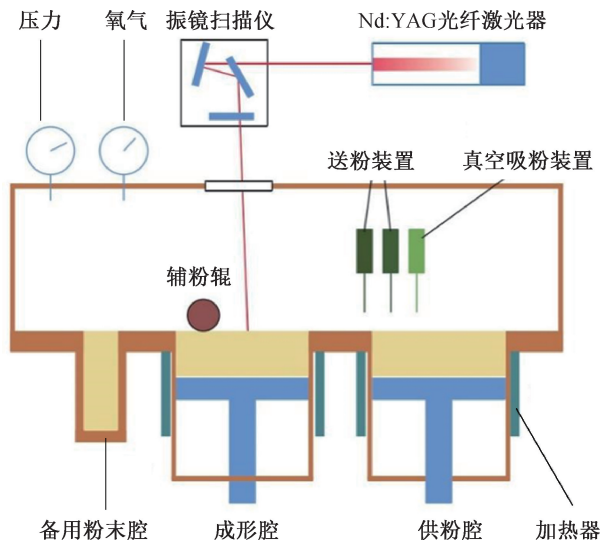


图 1 多材料 LPBF 工艺示意图^[33]

基于刮刀的双粉末送粉系统最早应用于多材料增材制造,其原理示意图如图 2(a)所示^[39]。该系统采用粉末重涂装置,通过刮刀的机械运动将 2 种粉末均匀铺设并平整至粉末床上,其核心部件包含 2 个可容纳不同粉末的旋转腔室,实现粉末的同步供给与涂覆。这种方式主要适用于沿构建方向的材料梯度变化,但难以在同一层内实现多材料的高精度分区铺设。由于不同粉末在流动性、粒径及堆积特性上存在差异,界面位置容易形成突变过渡,进而诱发孔隙和裂纹等缺陷,限制了其在异质材料复杂构件成形中的发展潜力。

基于超声辅助的双粉末送粉系统利用超声波振动实现粉末的精准输送,其原理示意图如图 2(b)所示^[39]。该系统由粉料斗、超声波换能器和喷嘴组成,通过超声波换能器产生高频振动,将高频电信号转化为机械振动,在喷嘴末端形成“筛抖”效应,有效破坏细粉团聚,实现微米级精度、稳定且连续的微量粉末输送,特别适用于流动性差的粉体。粉未经喷嘴直接沉积到粉末床上,可实现 A、B 两种粉末的分区铺设。然而,作为一种逐点沉积的技术,其固有的串行处理模式导致粉末铺设效率较低,在大面积粉末床或规模化制造场景中的应用受到显著制约。

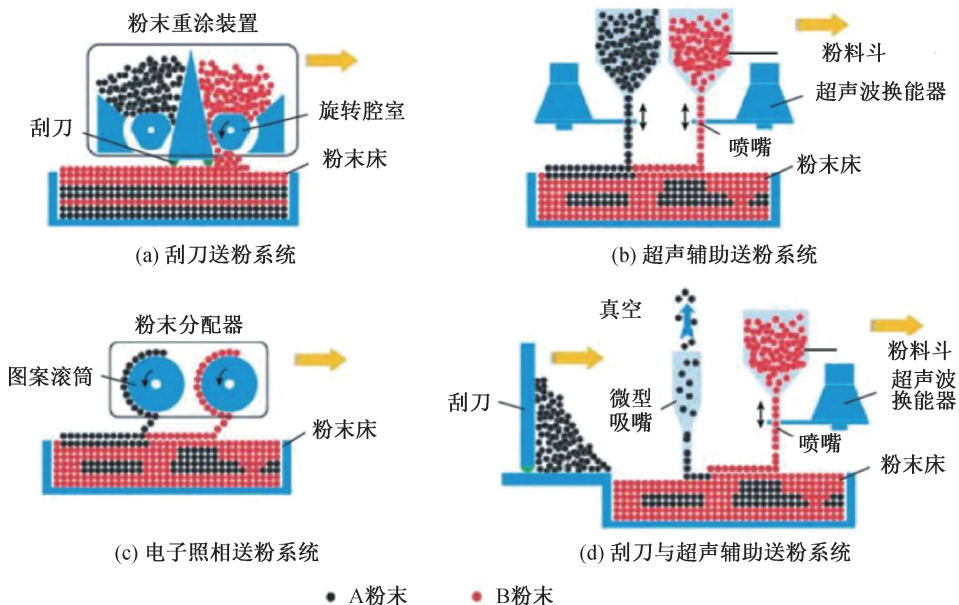


图 2 多材料 LPBF 粉末输送系统原理示意图^[39]

基于电子照相的双粉末送粉系统借鉴了激光打印机的静电成像原理,其原理示意图如图 2(c)所示^[39]。该系统通过粉末分配器与图案滚筒,利用静电力吸附带电粉末颗粒,将 A、B 两种粉末精确转移至粉末床指定位置。虽然该技术实现了快速、精准的粉末输送,但随着铺粉层厚增加,电场作用减弱,

且工艺参数控制不当时粉末容易发生非目标沉积,从而造成交叉污染。

相较之下,刮刀与超声辅助送粉系统兼顾了精准供粉与稳定整平,被认为是当前较有应用前景的方案之一,其原理示意图如图 2(d)所示^[39]。该系统结合了刮刀整平、超声辅助送粉与微型吸嘴真空抽

吸功能:先由刮刀完成大面积基础铺粉,再通过粉料斗、超声波换能器和喷嘴完成局部 B 粉末的精准送粉,同时配备真空抽吸装置清除多余粉末,保持粉末床的清洁。超声波振动不仅改善了粉末流动性,还确保了送粉过程即时启停控制,可实现 A、B 两种粉末在同一层内的高效、无交叉污染的分层铺设。

此外,研究者还开发了具有原位混粉能力或选择性粉末沉积能力的新型系统。例如,Liu 等^[40]采用具有原位粉末混合与进料能力的 LPBF 送粉系统,通过为每层定义特定粉末混合比与工艺参数,实现了沿构建方向的梯度过渡结构制造,从而精确控制能量密度输入并减少缺陷;Meyer 等^[41]使用集成选择性粉末沉积(Selective powder deposition, SPD)复涂器的 LPBF 系统,成功实现了 316L 与 CuCrZr 在同一层内的选择性铺设,从而制造出具有垂直界面和水平界面的三维多材料构件。

尽管上述技术取得了显著进展,但是粉末交叉污染与铺粉均匀性问题仍是制约界面质量的关键工艺瓶颈^[42]。优化铺粉动力学过程与控制参数,对于获得高质量粉床至关重要^[43]。

综上,铜合金与钢多材料 LPBF 的材料体系选择应综合考虑热物性匹配、冶金相容性和工程应用需求;工艺基础方面,多材料送粉系统虽已取得明显进展,但粉末交叉污染和铺粉稳定性仍是限制高质量界面成形的关键问题。材料组合设计与粉末输送控制是后续界面组织调控和缺陷抑制的基础。

2 界面组织特征与缺陷形成机制

2.1 界面微观结构特征

界面微观结构的形成是决定铜合金与钢多材料

LPBF 构件综合力学性能的核心因素。在快速非平衡凝固条件下,异质材料间的热物理性质差异与复杂的熔池流体动力学共同作用,塑造了界面区域独特的微观组织,其形态、宽度与成分梯度直接影响界面的力学行为和失效模式。因此,明确界面微观结构的特征及其演化规律,是开展界面性能主动调控的基础。

铜合金与钢界面区域通常呈现共有的微观结构特征,包括元素扩散层、融合区、漩涡状混合组织及晶粒细化区。其中,界面扩散层的存在表明 2 种材料之间发生了元素互扩散,是形成强冶金结合的重要依据,而界面附近细小的晶粒则有助于提高局部强度并抑制裂纹扩展。Chen 等^[44]在 316L 和 CuSn10 样品界面处观察到明显的元素扩散区,认为该区域对强冶金结合具有关键作用,但该研究未进一步量化扩散层厚度与工艺参数的关系,也没有解释为何扩散区晶粒细化现象在不同材料组合中表现不一。这说明,界面微观结构的形成机制仍需进一步结合动力学过程与数值模拟等方法开展更系统、更深入的研究。

界面形貌并非固定不变,而是与构建顺序密切相关。Meyer 等^[41]研究表明,在 316L 基底上打印 CuCrZr 时,由于钢基底热导率相对较低,熔池具有一定的预热效应,界面区域更易形成宽而不规则的漩涡状混合区;而在 CuCrZr 基底上打印 316L 时,铜侧的高导热性会使钢侧熔池快速冷却,从而形成更窄、成分梯度更陡峭的界面过渡区,界面形貌如图 3 所示。该结果表明,构建顺序能够通过改变热流边界条件显著影响界面组织形貌和元素分布特征。

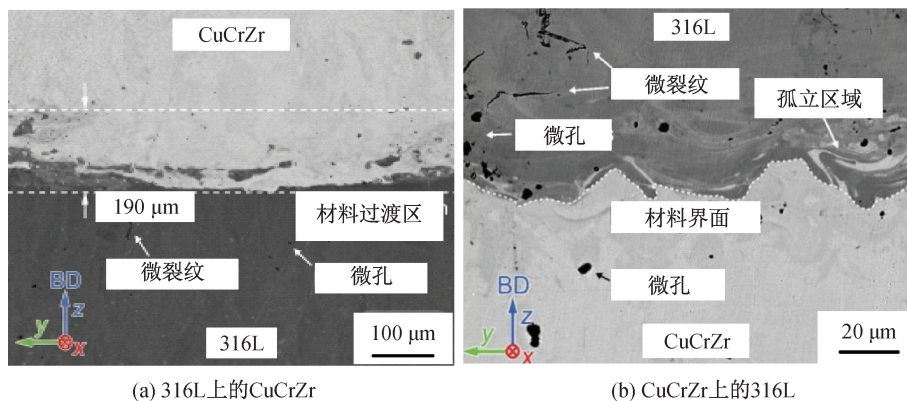


图 3 不同构建顺序下铜合金与钢界面 SEM 形貌图^[41]

除界面宽度和形貌外,凝固组织的细化程度也是影响界面性能的重要因素。在金属多材料部件中,针形凝固微观结构、精细颗粒等独特的微观结构

特征有助于增强界面键合^[45]。Tan 等^[46]采用 LPBF 制造了铜/钢双金属材料,发现冷却速率提高可显著细化界面晶粒,并降低界面孔隙率;界面孔隙

率 φ 仅为 0.042%;疲劳试验进一步表明,该双金属界面具有较高的结合可靠性,相关性能优于传统连接方法。

总体来看,铜合金与钢多材料 LPBF 的界面微观结构是热流、物质流与快速凝固共同作用下形成的非平衡组织。熔池中的 Marangoni 对流、反冲压力及局部成分波动对界面混合程度和晶粒演化具有重要影响。因此,深入理解熔池动力学与界面组织之间的关系,是实现界面微观结构主动设计和界面性能优化的关键。

2.2 界面缺陷形成机制

高质量界面制备是铜合金与钢多材料 LPBF 制造的核心目标,但由于铜合金与钢之间固有的热物理性质差异及冶金不相容性问题,界面区域在快速非平衡凝固过程中极易产生多种缺陷^[47-48]。这些缺陷主要可归纳为 3 类:热-力失配主导的裂纹与孔隙问题,粉末交叉污染引起的界面组织不均及各向异性问题,以及冶金不相容诱发的 LME 问题;上述缺

陷往往相互耦合,共同决定界面的成形质量和服役稳定性。

热-力失配是界面裂纹与孔隙形成的重要原因。铜合金与钢在热导率 λ 、热膨胀系数 α 及激光吸收率 η 方面差异显著,使熔池内温度分布和凝固行为高度不对称。Liu 等^[49]在早期的 316L/C18400 研究中虽实现了冶金结合,但钢侧仍出现裂纹与孔隙,并将其归因于热物性差异和铜沿奥氏体晶界的渗透,界面缺陷如图 4(a)所示。Mirzababaei 等^[50]进一步指出,热物性差异会导致固-液界面失稳,进而诱发凝固裂纹,界面缺陷如图 4(b)所示。Deillon 等^[51]则从温度场和应力场耦合角度阐明了 316L/CuCrZr 界面的开裂原因:由于 CuCrZr 热导率 λ 极高,热量在铜侧迅速散失,而在钢侧聚集,形成陡峭的温度梯度;同时,2 种材料热膨胀系数 α 不匹配,导致凝固收缩过程不协调,最终在钢侧界面附近累积较高拉应力,并诱发开裂问题,界面缺陷如图 4(c)所示。

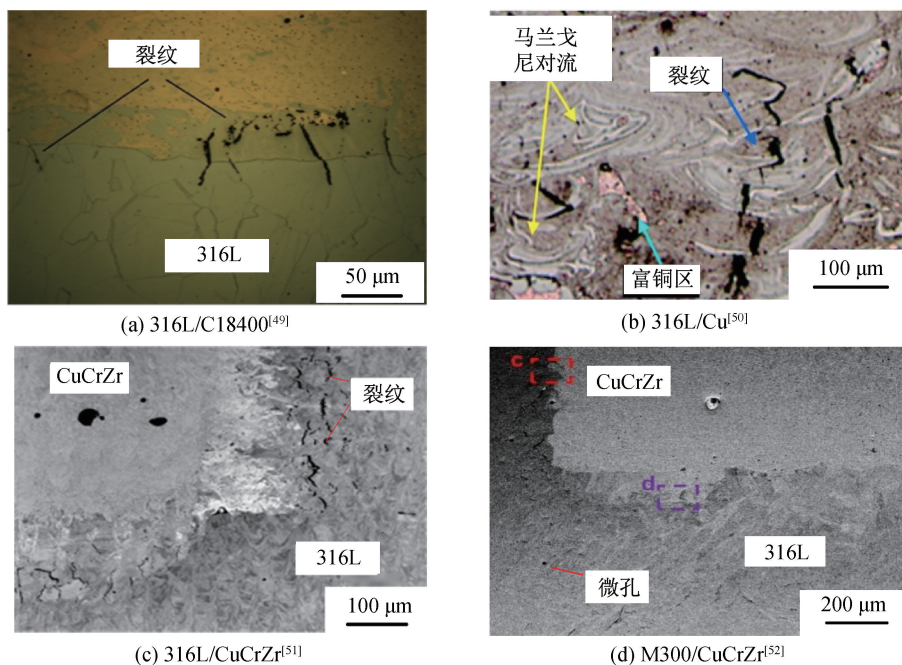


图 4 4 种不同铜钢结构界面缺陷图

粉末交叉污染是多材料 LPBF 中的另一类关键问题,它不仅会削弱材料边界的清晰度,还会引起界面组织和性能的方向性差异。Schneck 等^[52]发现,残留铜合金粉末可在工具钢晶界形成液态薄膜,从而诱发热裂纹。Li 等^[53]在采用 SPD 工艺制造 M300/CuCrZr 多材料结构时发现,先沉积的 CuCrZr 粉末会污染后沉积的 M300 区域,导致沿刮粉方向形成宽约 1.5 mm 的模糊过渡区,该区域中孔隙和微裂纹数量明显增加,界面缺陷如图 4(d)所

示。这表明,即便采用较先进的选择性铺粉方法,粉末污染仍难以完全避免,且会影响界面的稳定性和一致性。未来可重点开展 SPD 工艺粉末控制精度的优化研究,并开发适配异质界面形成过程的自适应调控工艺,从源头上抑制粉末交叉污染,最终实现高性能多材料模具的稳定制造。

LME 是铜合金与钢体系最具代表性的冶金失效问题之一。由于 Fe-Cu 二元体系在固态下几乎不互溶,界面结合的本征冶金基础较弱;在 LPBF 特

定的高频热循环作用下,液态或半液态铜容易沿钢侧晶界渗透,降低晶界结合力,在热应力作用下诱发脆性开裂^[51]。LME并非单一材料因素导致,而是冶金属性、热循环特征及外部应力状态共同作用的结果,因此LME抑制难度较大,也是当前铜合金与钢多材料LPBF研究的重点和难点。

此外,构建顺序也会影响缺陷的类型和分布特征。当在钢基底上沉积铜合金时,钢基底相对较低的热导率 λ 能够产生一定的预热效应,有助于稳定铜侧熔池,但往往会导致界面混合区拓宽;反之,当在铜合金基底上沉积钢时,铜的高热导性使钢侧熔池快速冷却,虽使界面形貌变得更清晰,但钢侧裂纹敏感性往往更高^[41]。这说明构建顺序不仅影响界面组织演化,也会改变缺陷形成的主导机制。

综上,铜合金与钢多材料LPBF中的界面缺陷主要源于热物性失配、冶金不相容和工艺扰动等的共同作用。热-力失配裂纹、粉末交叉污染和LME是3类最具代表性的缺陷,其形成机制既具有独立性,又存在耦合关系。当前多数研究仍以现象分析和定性解释为主,缺乏统一的定量判据和预测模型,后续需要结合原位监测、多物理场模拟和统计分析实现机制深化。

3 界面调控策略

铜合金与钢多材料LPBF过程中,由于熔点、导热系数和热膨胀系数等热物理性能存在明显差异,界面区域容易产生残余应力集中、组织不均及开裂等问题^[54]。这种物性失配导致的界面结合质量不佳问题,已成为多材料激光增材制造面临的主要挑战之一。为提升界面成形质量和服役性能,研究者主要从工艺参数优化、功能梯度设计和后处理等方面开展了系统研究。上述方法分别针对成形过程控制、界面结构设计和成形后缺陷修复发挥作用,是当前界面调控研究的3条主要路径。

3.1 工艺参数优化策略

工艺参数是影响多材料LPBF界面质量最直接的因素之一。激光功率 P 、扫描速度 v 、扫描间距 h 及层厚 t 共同决定体积能量密度 E ,而不同参数组合即使对应相近的能量密度,也可能导致明显不同的熔池行为和组织结果^[55]。对于铜合金与钢而言,参数优化的核心难点在于协调两种材料对能量输入的不同需求;铜合金因激光吸收率 η 较低,通常需要较高能量密度以保证充分熔化;但若能量输入过高,又会造成钢侧过热、元素蒸发、飞溅增加和热应力

加剧。

Wei等^[56]通过优化316L/CuSn10界面层的成形参数,显著改善了双金属界面的成形质量;研究表明,在界面过渡区域适当提高激光功率 P 、降低扫描速度 v 并优化扫描间距 h ,有助于抑制界面裂纹的萌生与扩展,减少孔隙缺陷。Yang等^[57]研究表明,提高体积能量密度有助于促进Fe与Cu原子在界面处的相互扩散,进而强化界面的冶金结合,在工艺参数最优化的情况下,316L/Cu界面剪切强度可达约43 MPa。尽管上述结果证实了参数调优的有效性,但由于各研究在材料体系、设备规格及评价标准上存在显著差异,相关参数区间的普适性仍需进一步验证。

除实验研究外,数值模拟也为工艺参数优化提供了重要依据。Mao等^[58]建立了耦合射线追踪算法的热-流体力学数值模型,深入探究了CuCrZr/316L多材料LPBF过程中的熔池动力学行为,结果表明:反冲压力和Marangoni对流是驱动2种不混溶材料在熔池中混合的关键机制;降低扫描速度 v 或提高激光功率 P 可延长熔池寿命、增强材料混合程度,并在高能量输入条件下形成有利于组织均匀化的CuCrZr岛状结构。Martendal等^[59]则提出了一种基于“缺乏融合”预测的层间功率递增策略,通过沿构建方向逐层增加功率并结合环形光斑,实现了较浅熔池控制,将材料混合层厚度限制在40 μm 以内,同时兼顾了抑制未熔合与减少铜污染。

近年来,机器学习在LPBF工艺优化中的应用逐渐增多。与传统的试错法相比,机器学习能够在高维参数空间中更高效地建立“工艺参数-成形质量-性能响应”之间的映射关系^[60]。Rankouhi等^[61]利用机器学习方法预测了316L/Cu多材料梯度结构的工艺参数,表明数据驱动方法在复杂多材料LPBF参数优化中具有良好应用潜力。

总体而言,工艺参数优化是目前最直接、最常用的界面调控手段,但其效果往往受材料组合、设备特性和工艺条件的显著影响,存在窗口窄、复现性不足和可移植性有限等问题。未来应加强机制模型与数据驱动方法的结合,推动工艺参数优化由经验试错向机制引导和智能决策转变。

3.2 功能梯度设计策略

功能梯度设计是缓解铜合金与钢界面性能突变、降低热应力集中的有效策略。对于热物性差异显著的异种材料,如果采用直接连接方式,界面区域往往因性能跳变过大而产生裂纹、孔隙或局部失效。

功能梯度设计通过在材料、组织或结构层面引入连续或阶梯式过渡,可在一定程度上实现性能平缓变化,从而改善界面稳定性。现有研究中的主要策略包括过渡层连接设计、界面结构设计以及成分梯度设计,常见的功能梯度设计方法如图 5 所示^[21]。

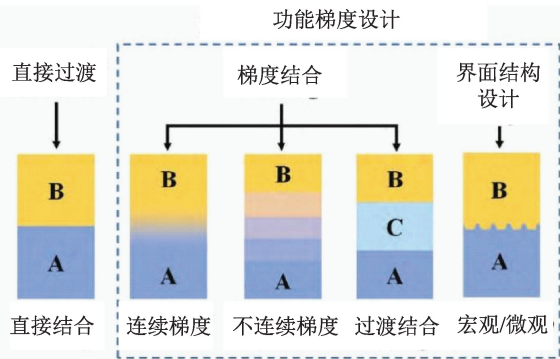


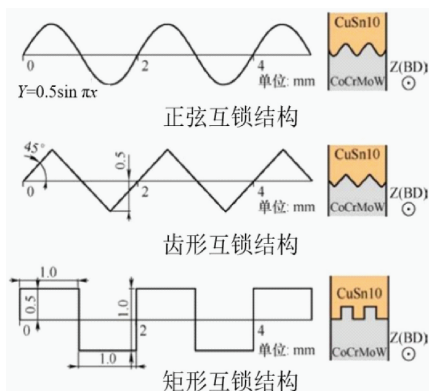
图 5 异质材料常见的功能梯度设计方法^[21]

注:A 与 B 表示异质材料,C 表示 A 与 B 过渡层的材料。

3.2.1 过渡层连接设计

过渡层连接设计是通过在铜合金和钢之间引入第三种材料,构建成分和性能中间区,以缓和热应力集中并改善冶金结合。该策略的关键在于选择与两侧材料均具有较好相容性的中间层材料,并通过合理的层厚和工艺控制实现稳定过渡。

Zhang 等^[62]在铜和不锈钢之间引入镍基合金 D22 作为过渡层,制成了 Cu-D22-SS 结构,结果表

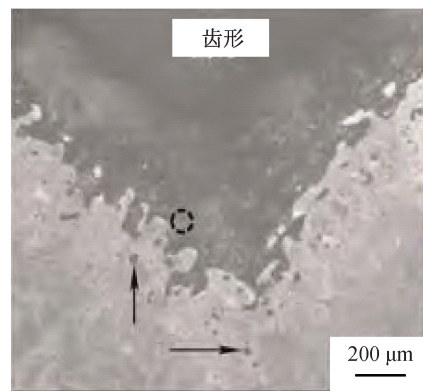


(a) 互锁结构设计图

明;Cu-D22 和 D22-SS 界面的结合强度值分别超过 226.0 MPa 和 648.2 MPa,显著高于 Cu-SS 直接连接的 124.0 MPa,同时导热性能和热扩散能力也明显提高。Li 等^[63]在 316L 和 CuCrZr 之间引入 IN718 沉淀强化镍基高温合金过渡层,发现 IN718-316L 界面实现了无裂纹、无明显孔隙的良好冶金结合,IN718-CuCrZr 界面区域和铜侧虽然仍存在少量匙孔和微小孔隙,但整体界面质量得到改善。这表明,引入合适过渡层是提升铜合金与钢界面结合质量的重要途径。

3.2.2 界面结构设计

界面结构设计包括宏观界面形貌设计和微观组织结构两方面^[21]。在宏观尺度上,通过构造特定的几何形貌,利用机械互锁(Mechanical interlocking)效应提高有效结合面积和载荷传递能力,从而弥补单纯冶金结合不足的问题;在微观尺度上,可通过调控界面区域的成分分布、相分布、晶粒形态及第二相特征,构建更有利于强韧化的界面组织。唐锦荣等^[64]利用新型超声振动辅助粉末输送系统,成功制备了具有齿形、正弦和矩形 3 种界面互锁结构的钴基合金/铜多材料零件,界面结构如图 6 (a)所示;其中齿形结构界面形成了约 200 μm 的连续混合区,未发现明显未熔合缺陷,且因机械互锁效应,界面显微硬度较其他结构更优,界面形貌如图 6 (b)所示。



(b) 齿形互锁结构 SEM 图

图 6 互锁结构设计图及 SEM 图^[64]

Peng 等^[65]在 IN718/316L 双金属中构建了仿珍珠层互锁结构,通过细晶冶金结合和裂纹偏转机制显著提升了拉伸强度与延展性。Wang 等^[66]在 316L/CuSn10 界面引入纳米 TiC,实现了对第二相分布、晶粒形态和界面能匹配的协调调控,从而实现了对热裂纹萌生与固态裂纹扩展的双重抑制,使抗拉强度从 372 MPa 提升至 526 MPa,为多材料增材

制造中强韧异质界面的构建提供了一种有效策略。上述研究表明,合理的界面结构设计不仅可增强结合强度,还有助于改善断裂韧性和裂纹扩展行为。

对于铜合金与钢体系而言,互锁结构还有望通过改变局部应力分布和熔池流动方式,缓解 LME 和热裂纹问题。因此,将界面结构设计与工艺优化、梯度设计相结合,是今后构建高强高韧异质界面的重要方向。

3.2.3 成分梯度设计

成分梯度设计通过在过渡区域中逐步改变铜和钢的比例,实现化学成分和物理性能连续或分级变化,从而缓解因性能突变导致的热应力集中和组织失稳。与单一过渡层相比,成分梯度设计更强调过渡区的连续性和可调性。

Baganis 等^[67]研究表明,在 316L/CuCrZr 多材料 LPBF 中,当过渡区 CuCrZr 含量控制在 50%~80%(质量分数)范围内时,可获得无裂纹、晶粒细化的双相组织;而当 CuCrZr 含量低于 40%(质量分数)时,则难以有效抑制开裂。Wen 等^[68]在 316L/CuSn10 梯度结构研究中发现,CuSn10 含量超过 40%(质量分数)的混合区具有较好成形性。Hu 等^[69]则通过功能梯度连接在 316L/CuCrZr 样品中获得了梯度晶粒尺寸和异质组织结构,显著提升了剪切强度和拉伸强度。需要指出的是,成分梯度设计并非层数越多越优。Yadav 等^[70]在铜/不锈钢梯度沉积研究中发现,采用过多级数、每级间隔 20%(质量分数)Cu 的阶梯式过渡,反而会因重复热循环增加凝固裂纹风险;相比之下,直接连接或采用单一 50%(质量分数)Cu 中间层反而更易实现无裂纹连接。

近年来,机器学习方法在功能梯度材料的成分优化设计中展现出巨大潜力。王世杰等^[71]系统综述了机器学习在功能梯度材料设计中的应用,指出通过神经网络、支持向量机等算法可建立“组分-工艺-性能”之间的高维映射模型,实现对梯度成分的精准预测与优化。刘海洲等^[72]提出了一种基于物理信息神经网络(Physics-informed neural networks, PINN)的功能梯度结构智能设计方法,以航天器精密载荷安装板为对象,通过优化陶瓷-金属材料梯度规律,实现了对指定位置局部温度与结构基频的协同调控。

总体而言,功能梯度设计是改善铜合金与钢界面性能的有效策略,但不同策略各有适用边界。过渡层设计可能引起新的冶金相容性问题,界面结构设计受制造精度和几何复杂度限制,成分梯度设计则需要统筹考虑成分跨度、层数和热循环效应。因此,未来需结合热力学计算、界面力学分析和智能优化方法,实现梯度结构的理性设计。

3.3 后处理策略

后处理是改善铜合金与钢多材料 LPBF 构件界面组织与性能的重要补充手段。由于 LPBF 工艺固有的快速加热和快速冷却特性,成形态构件内部往

往存在显著的残余应力、非平衡组织及微孔隙、微裂纹等缺陷,这些问题在异种材料界面附近尤为突出。因此,采用适当后处理工艺可在一定程度上释放应力、均匀组织、愈合缺陷并提升综合性能^[73],目前主流后处理技术主要包括热处理、热等静压及表面处理等。

热处理是应用最为广泛的后处理方法之一。适当退火处理能够有效降低界面残余应力、促进元素扩散并改善界面组织均匀性。Meyer 等^[41]对 316L/CuCrZr 多材料构件进行热处理后发现,界面区域元素分布更均匀,微观组织得到显著细化,同时材料的导热与导电性能均有所提升。对于含 M300 马氏体时效钢的体系,时效处理可促使强化相析出,从而显著提高钢侧强度,但需严格控制处理温度与时间,以避免因热膨胀系数 α 不匹配造成的界面损伤^[30]。对于 Fe-Cu 固态互溶度有限的体系,亚临界温度退火有助于释放应力并改善组织,而不过度加剧脆化倾向。

热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)技术在消除界面孔隙和愈合微裂纹方面具有明显优势。Deillon 等^[51]研究表明,对 CuCrZr/316L 多材料结构进行热等静压后,界面孔隙率 φ 显著降低,原先因 LME 诱发的微裂纹得到有效修复,界面结合强度提升幅度超过 40%,这是因为高温高压环境同时促进了界面扩散和应力均化。但热等静压成本较高,且参数设计必须兼顾两种材料的蠕变和相变行为,避免构件局部变形或组织过度软化。

表面处理技术主要用于改善服役环境适应性。例如,对应用于腐蚀环境中的铜合金与钢多材料构件,可采用钝化或涂层处理降低电偶腐蚀风险。Li 等^[31]研究发现,经化学钝化处理后,M300/CuCrZr 构件在模拟工业环境中的耐腐蚀性能明显改善,界面区域的优先腐蚀倾向受到抑制。此外,对于具有复杂内流道的热交换器件,化学抛光有助于降低流动表面粗糙度,减小流动阻力并提升换热效率。

后处理作为铜合金与钢多材料 LPBF 构件制备流程的最终调控环节,能够有效弥补成形过程的不足,实现微观组织的优化与性能的提升。值得注意的是,上述后处理技术虽能有效改善界面性能,但存在各自的局限:热处理可能引发界面过度扩散或相变;热等静压设备成本高昂且不适用于复杂内腔构件;表面处理对深层缺陷无能为力。因此,后处理应与前期的工艺优化和梯度设计形成闭环,例如针对特定缺陷类型选择匹配的后处理工艺,或采用热处理结合热等

静压的复合处理模式。目前,针对铜/钢体系的组合后处理研究尚少,是未来值得探索的方向。

总体来看,工艺参数优化、功能梯度设计和后处理是当前铜合金与钢多材料 LPBF 界面调控的 3 类主要方法。参数优化侧重于成形过程控制,梯度设计强调界面结构与性能过渡,后处理则用于组织优化和缺陷修复。三者各具优势,也各有局限。未来需要构建“成形参数-界面结构-后处理制度”协同优化框架,以实现界面质量和综合性能的系统提升。

4 界面性能评估与传统方法对比分析

4.1 界面综合性能评估

铜合金与钢多材料 LPBF 构件的最终服役性能取决于界面结合质量与材料本征性能的发挥。当前研究主要从界面结合强度、拉伸强度以及导热与导电性能等方面开展评价。

界面结合强度作为衡量铜/钢多材料 LPBF 构件冶金质量的核心指标,受工艺参数、界面形貌及后处理等多因素共同影响。Bi 等^[22]研究了 316L/CuCrZr 双金属构件的力学性能,结果表明,在激光功率 450 W、扫描速度 400 mm/s 条件下,试样抗拉强度(Ultimate tensile strength, UTS)为 290 MPa,屈服强度(Yield strength, YS)为 208 MPa,断后伸长率为 20%;经 450 °C 时效处理 2 h 后,抗拉强度和屈服强度分别提升至 521 MPa 和 434 MPa,说明适当热处理可通过析出强化和组织优化显著提升界面承载能力。Yang 等^[57]通过优化体积能量密度,使 316L/Cu 界面剪切强度达到约 43 MPa,也进一步验证了工艺调控对界面力学性能的重要作用。

导热与导电性能是铜合金与钢多材料 LPBF 构件相较于单一材料及传统连接构件的核心优势,其优劣取决于界面冶金质量与热处理工艺的协同优化。Meyer 等^[41]的研究表明,合适的热处理可进一步提升 CuCrZr/316L 双金属构件的导热性能。相比于传统钎焊连接,LPBF 构件由于界面实现了直接冶金结合,且不引入额外钎料层,因此界面热阻更低,更适合热管理要求较高的应用场景。

4.2 与传统制造方法的对比分析

传统连接方法主要分为熔化焊、钎焊和固相焊 3 大类。熔化焊通过局部熔化母材形成接头,但铜合金与钢材料物性差异大,焊接过程中容易出现热裂纹、偏析及热影响区组织粗化等问题;钎焊通过低熔点钎料实现连接,工艺相对成熟,但接头强度通常较低,且引入钎料层会增加界面热阻;固相焊能够避

免明显熔化问题,但仍可能出现 Kirkendall 空洞、脆性反应层和铜侧粗晶等缺陷,同时难以制造复杂三维结构^[74]。

相比之下,LPBF 多材料制造通过逐层堆叠与精确能量输入,可在复杂结构中实现材料的空间分布与界面主动设计,不仅能够一体化制造复杂内腔、随形冷却流道和拓扑互联结构,还可结合参数优化、梯度设计和后处理改善界面质量。例如,Zhang 等^[62]采用 D22 过渡层后,界面结合强度最高可达 648.2 MPa,明显高于传统连接方法。Tan 等^[46]制备的铜/钢双金属材料界面孔隙率仅为 0.042%,疲劳性能远优于传统扩散焊结构。因此,LPBF 在铜/钢异质连接领域的突出优势不仅体现在较高的界面结合强度,还体现在复杂构件的一体化制造能力和界面可设计性方面。它推动了铜/钢连接由传统“连接成形”向“结构-功能一体化设计制造”转变,为高端装备中的多功能构件设计提供了新的技术支撑。

综上所述,铜合金与钢多材料 LPBF 构件在界面结合强度、拉伸性能和导热与导电性能方面表现出良好潜力,部分研究结果已明显优于传统连接方法。与此同时,性能优势的实现高度依赖于界面缺陷控制和组织优化,后续仍需建立统一、系统的综合评价体系,以支撑不同材料体系和工艺条件下的性能对比与应用选型。

5 典型应用场景

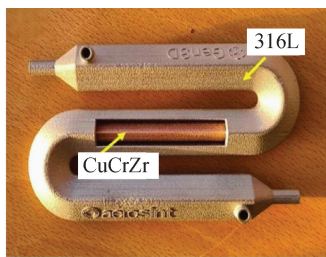
铜合金与钢多材料 LPBF 技术实现的性能集成与结构创新,使其构件在集散热、承载及耐蚀需求于一体的苛刻服役环境中展现出独特优势。目前,该技术已由实验室原理验证逐步向工程原型制备和性能验证拓展,应用场景主要集中在航空航天、热交换系统、高功率电机和精密传动部件等领域。

在航空航天领域,铜合金与钢多材料构件的应用主要面向高热流密度与高载荷耦合环境^[75-76]。其核心优势在于,能够一体化制造兼具复杂内流道与高强度外壳的再生冷却推力室部件,NASA 等机构已率先采用 LPBF 技术成形 GRCop-84 铜合金推力室部件,证实了铜合金复杂薄壁结构的可制造性^[77]。在此基础上,将高强度镍基合金或不锈钢与铜合金进行多材料 LPBF 一体化成形,以实现结构承载与高效散热的协同优化,已成为下一代液体火箭发动机燃烧室的关键技术路径之一。

在高效热交换系统中,多材料 LPBF 的优势更加突出。Aerosint SA 公司开发的 CuCrZr/316L 管

状热交换器将高热导铜合金流道与高强耐蚀的316L外壳集成为单一构件,构件如图7(a)所示^[78]。与传统分体加工和钎焊装配方式相比,该方法有效

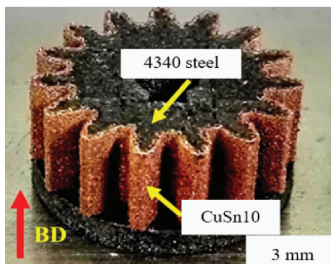
减少了泄漏风险和界面热阻,同时显著提升了流道设计自由度,可实现空间交错、薄壁和异形截面的复杂换热结构。



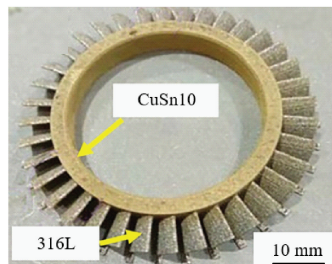
(a) 316L/CuCrZr热交换器^[78]



(b) 316L/CuCrZr电机线圈^[79]



(c) CuSn10/4340钢齿轮^[80]



(d) CuSn10/316L涡轮盘^[81]

图7 4种铜合金与钢多材料结构件的典型应用

在高功率密度电机与先进电磁器件中,LPBF技术为导电绕组、铁芯与冷却结构的一体化制造提供了可行方案。Oel等^[79]实现了CuCrZr/316L集中绕制定子齿的直接成形,将高导电铜合金线圈与钢基结构件集成,并同步构建复杂三维冷却流道,构件如图7(b)所示。这种结构-功能-热管理的一体化设计有效克服了高功率电机因温升限制功率密度的瓶颈问题,同时展现了多材料LPBF在热管理、电磁性能与结构轻量化协同设计方面的潜力。

在机械传动与精密制造领域,多材料LPBF也展示出较高应用价值。CuSn10/4340钢异质材料齿轮零件充分体现了多材料增材制造在复杂结构一体化成形方面的独特优势。该零件通过层内与层间材料的自由布置,在齿轮细小齿形间隙处精准成形了宽度仅0.5 mm的CuSn10铜合金外壁。这种精细的材料分布实现了CuSn10与4340钢基体的协同配合:前者凭借优异的耐磨性与导热性提升表面性能,后者则提供高强韧性以保障齿轮整体的结构强度,构件如图7(c)所示^[80]。这种异质材料组合突破了传统单一材料齿轮在齿面耐磨与齿体强韧之间的性能权衡,为航空航天变速器、重型机械传动系统等对关键部件性能要求严苛的场合提供了新的设计制造思路。此外,CuSn10/316L功能梯度涡轮盘通过在盘体和叶片之间建立材料渐变区,实现了导热性能与高温结构性能的协同匹配,有助于降低热应力

集中,提高热端部件的服役可靠性,构件如图7(d)所示^[81]。这一设计思路适用于航空发动机、燃气轮机、核能装备等对热疲劳抗力与结构可靠性要求极高的关键热端部件,为功能梯度结构在能源动力系统中的应用提供了可行路径。

总体来看,铜合金与钢多材料LPBF技术通过在同一构件中实现高导热、高强度与耐腐蚀等性能的协同集成,并结合复杂流道、拓扑互联等结构创新,在航空航天、高效热交换系统及高功率电机等高端工程领域展现出独特的应用价值。目前,该技术正从原理验证阶段向面向真实服役条件的原型开发与性能验证阶段跨越,其核心优势在于突破传统制造工艺在异质材料连接与复杂结构成形方面的局限,实现结构与功能的协同优化。

6 结语

本文围绕铜合金与钢多材料激光粉床熔融技术的研究进展进行了系统综述。从材料体系与工艺基础看,316L/CuCrZr、316L/CuSn10和M300/CuCrZr是当前研究较多的代表性组合;粉末输送系统已从单一刮刀发展为复合系统,但粉末交叉污染问题仍是限制界面质量提升的关键瓶颈。从界面组织与缺陷形成机制看,界面微观结构本质上是热流、物质流与快速凝固耦合作用形成的非平衡产物,其形貌和宽度显著受构建顺序、熔池流动和能量输入条件影

响;热-力失配裂纹、粉末交叉污染及LME是3类最具代表性的界面缺陷,也是限制铜合金与钢多材料LPBF稳定成形的关键问题。从性能调控策略看,工艺参数优化、功能梯度设计以及后处理均可在不同层面改善界面质量,其中参数优化适用于快速调节成形行为,梯度设计有利于缓解性能突变,后处理则有助于应力释放和缺陷修复,但三者仍需协同使用才能实现高质量界面的稳定构筑。从性能与应用角度看,经过合理调控后,铜合金与钢多材料LPBF构件在界面结合强度、拉伸性能及导热与导电性能方面已表现出明显优势,且在复杂流道热交换器、再生冷却构件、电机定子齿和功能梯度传动部件等方面展现出良好应用前景。

总体而言,铜合金与钢多材料LPBF研究已由早期的现象观察逐步转向机制分析与性能调控阶段,但整体仍处于实验室探索走向工程应用的过渡阶段。当前仍存在以下几个关键问题:a)对热-力失配与LME之间耦合机制的认识不足,尚缺乏具有普适性的缺陷判据与预测模型;b)粉末精准输送和污染抑制能力仍不足,多材料铺粉过程的稳定性和重复性有待提高;c)界面调控方法多以单一手段为主,尚未形成面向不同材料体系和服役需求的“工艺-结构-性能-后处理”一体化设计方法。

未来研究可重点从以下几个方面推进:a)发展结合热传导、熔池流动、应力演化和元素扩散的多物理场模型,建立界面组织与缺陷形成的跨尺度预测方法,为工艺设计提供机制依据;b)探索混合式界面工程策略,推动过渡层、成分梯度和互锁结构等多种界面工程手段的耦合应用,构建兼具高强度、高韧性和高导热能力的复合界面;c)基于机器学习的智能监控与工艺优化,加强机器学习和原位监测技术在多材料LPBF中的应用,建立由多源传感数据驱动的缺陷识别、质量预测和参数自适应优化体系。随着对界面调控、跨尺度制造与智能控制理解的不断深入,该技术有望在航空航天、能源装备等领域实现更广泛的工程应用。

参考文献:

[1] Zhai W G, Li G C, Zhou W. Evaluation of laser powder bed fusion-fabricated 316L/CuCrZr bimetal joint [J]. *Materials*, 2025, 18(7): 1434.

[2] Gradl P, Mireles O R, Katsarelis C, et al. Advancement of extreme environment additively manufactured alloys for next generation space propulsion applications[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 211: 483-497.

[3] 王迪, 邓国威, 杨永强, 等. 金属异质材料增材制造研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(1): 186-198.

[4] Wang D, Liu L Q, Tang J R, et al. Recent advances on additive manufacturing of heterogeneous/gradient metallic materials via laser powder bed fusion[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025, 7(6): 062007.

[5] 杨栈琳, 刘岩, 曹博强, 等. 增材制造铜/钢双金属材料研究进展[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(2): 117-129.

[6] 王恒, 李国艳, 李莎, 等. 铜/钢复合板制备工艺及界面调控研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35(1): 99-125.

[7] Zhou L F, Miller J, Vezza J, et al. Additive manufacturing: a comprehensive review[J]. *Sensors*, 2024, 24(9): 2668.

[8] Liu Z Z, Zhou Q H, Liang X K, et al. Alloy design for laser powder bed fusion additive manufacturing: a critical review[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(2): 022002.

[9] Sam M, Jojith R, Radhika N. Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment: a critical review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 1339-1377.

[10] 杨永强, 蒋梦龙, 邓澄. 铜钢功能材料增材制造研究进展[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(4): 14-24.

[11] Bandyopadhyay A, Zhang Y N, Oniuke B. Additive manufacturing of bimetallic structures[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(2): 256-294.

[12] 赵志斌, 王晨希, 张兴武, 等. 激光粉末床熔融增材制造过程智能监控研究进展与挑战[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(19): 253-276.

[13] Marques A, Cunha A, Gasik M, et al. Inconel 718-copper parts fabricated by 3D multi-material laser powder bed fusion: a novel technological and designing approach for rocket engine [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 122(3/4): 2113-2123.

[14] 陈理燃. 金属增材制造技术在航空零部件应用与发展研究[J]. *冶金与材料*, 2024, 44(5): 82-84.

[15] 顾冬冬, 李琳, 林鑫, 等. 多材料增材制造赋能整体构件多功能突破[J]. *中国激光*, 2026, 53(4): 0400101.

[16] Zhao N Z, Parthasarathy M, Patil S, et al. Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 68: 368-375.

[17] 王瑞鑫, 陈超越, 徐松哲, 等. 激光增材制造中残余应力形成机理、表征及调控方法的研究进展[J]. *材料工程*, 2024, 52(7): 15-32.

[18] 杨圣钊, 尹瀛月, 高建, 等. 功能梯度增材制造技术的研究现状及展望[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(21): 1-6.

[19] 孙金娥, 贾永玮, 张正威, 等. 增材制造梯度材料的研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2024, 34(4): 161-169.

[20] Schneck M, Horn M, Schmitt M, et al. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2021, 6(4): 881-894.

[21] 孙小婧, 袁丁, 韦超, 等. 大物性差异多材料激光增材制造界面研究进展(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(1): 250-266.

[22] Bi J, Zou J L, Zhu L J, et al. Microstructure, mechanical properties, and interface strengthening mechanisms of LPBF-

- fabricated 316L-CuCrZr dissimilar materials[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2025, 10(11): 9051-9066.
- [23] 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.
- [24] Mao S L, Yang B Q, Liu G, et al. Temperature distribution and residual stress evolution at the interface of CuCrZr/316 L multi-material by laser powder bed fusion[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109355.
- [25] Kuai Z Z, Li Z H, Liu B, et al. Microstructure and mechanical properties of CuCrZr/316L hybrid components manufactured using selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 955: 170103.
- [26] Jamili A M, Basu I, Cayron C, et al. Formation mechanism and microstructural characteristics of a body-centered cubic phase in 3D printed 316L-CuCrZr multi-material structures, combining laser powder bed fusion with foils [J]. *Scripta Materialia*, 2025, 268: 116844.
- [27] Kremer R, Etzkorn J, Palkowski H, et al. Corrosion resistance of 316L/CuSn10 multi-material manufactured by powder bed fusion[J]. *Materials*, 2022, 15(23): 8373.
- [28] Wang X Q, Tao Y K, Zhou Y, et al. Unraveling the dual cracking mechanism of 316L/CuSn10 heterostructures fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 4073-4087.
- [29] 陶亚坤, 张焱, 王晓强, 等. 激光选区熔化间断扫描成形高强度 316L-CuSn10 多材料研究[J]. *应用激光*, 2024, 44(7): 1-9.
- [30] 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.
- [31] Li X S, Saario T, Ikkäläinen T, et al. Corrosion behavior of additively manufactured M300-CuCr₁Zr by multi-material laser-based powder bed fusion[J]. *Electrochimica Acta*, 2024, 507: 145199.
- [32] Wu L, Das S, Gridin W, et al. Hot work tool steel processed by laser powder bed fusion: a review on most relevant influencing factors[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(7): 2100049.
- [33] 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.
- [34] Mussatto A. Research progress in multi-material laser-powder bed fusion additive manufacturing: a review of the state-of-the-art techniques for depositing multiple powders with spatial selectivity in a single layer[J]. *Results in Engineering*, 2022, 16: 100769.
- [35] 刘海鹏, 张百成, 曲选辉. 多材料增材制造: 部件设计、工艺及应用[J]. *制造技术与机床*, 2025(10): 35-47.
- [36] Mussatto A, Groarke R, Vijayaraghavan R K, et al. Laser-powder bed fusion of silicon carbide reinforced 316L stainless steel using a sinusoidal laser scanning strategy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 2672-2698.
- [37] 宋长辉, 付厚雄, 严仲伟, 等. 激光粉末床熔融成形内部质量缺陷及其调控方法[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402801.
- [38] 王晓强, 文世峰, 周燕, 等. 多材料增材制造研究现状及展望 [J]. *电加工与模具*, 2022(2): 1-14, 36.
- [39] Wei C, Li L. Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, 16(3): 347-371.
- [40] Liu L Q, Wang D, Han C J, et al. Additive manufacturing of multi-materials with interfacial component gradient by in-situ powder mixing and laser powder bed fusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 978: 173508.
- [41] Meyer I, Messmann C O, Ehlers T, et al. Additive manufacturing of multi-material parts: effect of heat treatment on thermal, electrical, and mechanical part properties of 316L/CuCrZr[J]. *Materials&Design*, 2025, 252: 113783.
- [42] Ceroni M, Gobber F S, Actis Grande M. Ultraviolet-Visible-Near InfraRed spectroscopy for assessing metal powder cross-contamination: a multivariate approach for a quantitative analysis[J]. *Materials & Design*, 2024, 242: 113023.
- [43] Mussatto A, Groarke R, O'Neill A, et al. Influences of powder morphology and spreading parameters on the powder bed topography uniformity in powder bed fusion metal additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101807.
- [44] Chen J, Yang Y Q, Bai Y C, et al. Single and multiple track formation mechanism of laser powder bed fusion 316L/CuSn10 multi-material[J]. *Materials Characterization*, 2022, 183: 111654.
- [45] Telasang G, Narayanaswamy S, Santhoshsarang D M, et al. Selective laser melting of stainless steel on the copper alloy: an investigation of the interfacial microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 80: 920-929.
- [46] Tan C L, Chew Y X, Bi G J, et al. Additive manufacturing of steel-copper functionally graded material with ultrahigh bonding strength [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 72: 217-222.
- [47] Wei C, Zhang Z Z, Cheng D X, et al. An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: from macro- to micro-scales[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(1): 012003.
- [48] Xiao P H, Wang L, Tang Y Y, et al. Effect of wire composition on microstructure and penetration crack of laser-cold metal transfer hybrid welded Cu and stainless steel joints [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 299: 127480.
- [49] Liu Z H, Zhang D Q, Sing S L, et al. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy[J]. *Materials Characterization*, 2014, 94: 116-125.
- [50] Mirzababaei S, Doddapaneni V V K, Lee K, et al. Remarkable enhancement in thermal conductivity of stainless-steel leveraging metal composite via laser powder bed fusion: 316L-

- Cu composite[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 70: 103576.
- [51] Deillon L, Beldarrain N A, Li X, et al. Coupling hot isostatic pressing and laser powder bed fusion: a new strategy to manufacture defect-free CuCrZr-316L steel multi-material structures[J]. *Materials&Design*, 2024, 241: 112914.
- [52] Schneck M, Horn M, Schindler M, et al. Capability of multi-material laser-based powder bed fusion; development and analysis of a prototype large bore engine component [J]. *Metals*, 2022, 12(1): 44.
- [53] Li X S, Pan Z H, Smolej L, et al. Towards manufacturing intra-layer multi-material mould tools with vertical interfaces using laser-based powder bed fusion[J]. *Materials&Design*, 2024, 243: 113056.
- [54] Nazir A, Gokcekaya O, Md Masum Billah 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.
- [55] 韦超, 杨潇, 鲁淑芬, 等. 激光多材料增材制造技术研究进展和展望[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(8): 26-34.
- [56] Wei C, Zhao Z, Tang J G, et al. Effect of interface-layer process parameters on forming quality of 316L/CuSn10 bimetallics fabricated via laser powder bed fusion[J]. *Materials Letters*, 2023, 336: 133896.
- [57] Yang J Q, Liu D H. Effects of processing parameters on joining strength of 316L-Cu interface in multi-materials laser powder bed fusion[J]. *Manufacturing Letters*, 2025, 44: 784-791.
- [58] Mao S L, Ren Z H, Liu G S, et al. The effect of processing parameters on the molten pool dynamics during laser powder bed fusion of CuCrZr/316L multi-material [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 1769-1785.
- [59] Martendal C P, Esteves P D B, Lüthi C, et al. Mitigating defects at copper-steel interfaces via a lack of fusion-informed power increment strategy in multi-material laser powder bed fusion[J]. *Materials&Design*, 2025, 258: 114597.
- [60] 封之夏, 张亮, 吴文恒, 等. 抗冲击超材料设计:机器学习与增材制造的协同创新[J]. *机械工程材料*, 2026, 50(2): 1-10.
- [61] Rankouhi B, Jahani S, Pfeifferkorn F E, et al. Compositional grading of a 316L-Cu multi-material part using machine learning for the determination of selective laser melting process parameters[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101836.
- [62] Zhang X C, Li L, Liou F. Additive manufacturing of stainless steel-Copper functionally graded materials *via* Inconel 718 interlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 2045-2058.
- [63] Li Z H, Kuai Z Z, Liu B, et al. Selective laser melting of 316L-CuCrZr bimetallic structure via IN718 transition layer [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 3819-3834.
- [64] 唐锦荣, 王迪, 刘林青, 等. 新型振动辅助粉末输送系统增材制造钴合金/铜合金界面互锁结构[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(23): 278-293.
- [65] Peng Y B, Shi Y S, Jin T T, et al. Structural design, interfacial behavior and mechanical properties of bimetallic nacre-like structures by laser powder-bed fusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 990: 174470.
- [66] 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.
- [67] Baganis A, Malamud F, Čapek J, et al. Phase formation and texture evolution in 316L-CuCrZr multi-material structures fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Materials&Design*, 2025, 256: 114358.
- [68] 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.
- [69] Hu Z P, Ma Z Q, Yu L M, et al. Functionally graded materials with grain-size gradients and heterogeneous microstructures achieved by additive manufacturing[J]. *Scripta Materialia*, 2023, 226: 115197.
- [70] Yadav S, Paul C P, Rai A K, et al. Elucidating laser directed energy deposition based additive manufacturing of copper-stainless steel functionally graded material: Processing and material behavior [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 92: 107-123.
- [71] 王世杰, 杨杰, 马硕, 等. 机器学习在功能梯度材料设计-制备中的应用综述[J]. *材料导报*, 2023, 37(21): 111-119.
- [72] 刘海洲, 赵阳, 黄意新. 面向热力学性能调控的航天器功能梯度结构智能设计研究[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2025, 55(2): 150-162.
- [73] Kantaros A, Ganetsos T, Petrescu F, et al. Post-production finishing processes utilized in 3D printing technologies [J]. *Processes*, 2024, 12(3): 595.
- [74] 杜正勇, 李宇轩, 刘煜纯, 等. 铜/钢异种金属焊接技术研究现状[J]. *焊接*, 2023(9): 1-23.
- [75] 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 液体火箭发动机增材制造技术研究进展[J]. *推进技术*, 2022, 43(5): 29-44.
- [76] 孙暄, 胡斌, 熊智慧, 等. 航空航天领域用增材制造金属材料的研究进展[J]. *上海金属*, 2024, 46(3): 1-12.
- [77] 李晶, 闫峰, 王锦, 等. 航天领域3D打印材料及工艺技术研究现状[J]. *粉末冶金工业*, 2024, 34(2): 116-126.
- [78] Wang D, Liu L Q, Deng G W, et al. Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(2): 329-365.
- [79] Oel M, Rossmann J, Bode B, et al. Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing of concentrated wound stator teeth[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2023, 7: 100165.
- [80] 吴伟辉, 杨永强, 毛桂生, 等. 激光选区熔化自由制造异质材料零件[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 517-526.
- [81] 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.