

不只堆叠，更要融合——激光粉末床打印 CoCrMo–Ti6Al4V 复合材料的工艺优化

From Layering to Bonding: A Process Strategy for CoCrMo–Ti6Al4V Composite Fabrication Using Selective Laser Melting

供稿|林思静，金涂蔚，陈岑 / LIN Sijing, JIN Tuwei, CHEN Cen

内容导读

本研究聚焦钴铬钼合金（CoCrMo）与钛合金（Ti6Al4V）的跨材料体系复合制备难题，系统开展了基于选择性激光熔融（SLM）技术的复合制造工艺研究。通过优化激光功率这一关键工艺参数，并结合外部支撑件辅助，实现异质材料的界面冶金结合。微观表征表明，CoCrMo 疏松层的引入可有效缓解异质材料间的热应力失配，使界面结合强度显著提升。研究证实，基于参数-结构双维度调控策略，可稳定制备具有稳定异质界面的 CoCrMo–Ti6Al4V 复合材料。

增材制造（AM）又称“3D 打印”，是一种基于离散-堆积原理，融合计算机辅助设计（CAD）、材料加工与成形技术，可实现结构性能一体化复杂零件快速制备的先进制造技术^[1-2]。该技术能够显著缩短加工周期并最大限度地减少材料浪费^[3-6]，深刻改变了金属零件的制造方式。根据成形原理的不同，增材制造技术可分为熔融沉积成形（FDM）、光固化立体成形（SLA）、分层实体制造（LOM）、电子束选区熔化（EBM）、选择性激光熔融（SLM）、定向能量沉积（DED）、电子束熔丝沉积成形（EBF）等^[7-9]。依据工艺原理的不同，金属增材制造技术可以分为定向能量沉积和粉末床熔化（PBF）

2 大类^[10]。在金属增材制造领域，最具代表性的 2 种技术当属基于粉末床熔化技术的选择性激光熔融（SLM）和基于同步送粉技术的激光定向能量沉积（LDED）^[11]。SLM 使用的原材料是小粒径金属粉末，在激光熔化过程中能实现均匀熔化和固化。激光束聚焦到特定位置的金属粉末，使其瞬间熔化形成一个极小的熔池。一层金属粉末熔化和固化后，建造台下降一个微小的距离为下一层金属粉末提供空间。这个过程不断重复，直到制备出整个零件^[12]。SLM 使用高能激光束作为热源实现金属熔融成形，可以小批量、快速近净成形具有高精确定性的复杂零件^[13]。基于同步送粉技术的 LDED 是 DED 的一种代

作者单位：浙江理工大学，浙江 杭州 310018

表性技术,具有成形精度高、速度快且加工尺寸限制小的优点。该技术主要通过输送气流裹挟金属粉末进入高功率激光热源作用区域,使材料熔化沉积在基体表面凝固后形成熔覆层,通过逐道扫描逐层搭接实现构件的制备^[14]。然而现阶段,在实际加工过程中,LDED成形件仍受制于表面质量差、尺寸偏差大等形貌缺陷^[15],以及微裂纹、孔洞等冶金缺陷^[16-17]。

增材制造技术可以通过更换原材料实现在单个构件内特定位置处不同材料组分的精确成形。多材料增材制造技术凭借其设计的高自由度与制造的迅速响应性,通过结合多种材料的优势特性,能够快速灵活地满足复杂环境下零件的多功能需求^[18],如耐腐蚀性、生物相容性及高韧性等。然而,异质材料体系间固有的热物理参数差异(如热膨胀系数、熔点等)与冶金相容性不足,导致制造过程中易诱发界面残余应力累积、晶格畸变及金属间化合物析出等缺陷,严重影响异质界面的结构完整性与力学性能。针对这一挑战,基于SLM技术的多材料界面冶金结合机制研究,成为先进制造与临床医学工程领域的前沿方向。Neirinc等^[19]研发的滚筒式铺粉系统,其核心在于通过机械调控实现粉末的精确空间定位。该系统通过滚筒旋转与平台运动的协同控制,在构建区域逐行沉积生成二维图案,可同时使用2种以上的材料(每个独立滚筒对应一种材料),并通过多轴联动实现多种材料的熔合成形。Ke等^[20]采用激光近净成形(LENSTM)和等离子体喷射沉积技术在Ti6Al4V上制备了梯度羟基磷灰石(HA)涂层,用于骨植入物的制造。具体而言,先在Ti6Al4V基体上制备质量分数为3%的HA梯度过渡层,随后通过等离子体喷射施加MgO-Ag₂O-HA复合涂层,使2种涂层界面结合牢固无间隙。由于激光近净成形形成的梯度层热障效应,既可减缓骤冷过程,又能缩小等离子体涂层与基体之间显著的热膨胀系数差异,使得梯度HA涂层的粘接强度较无过渡层试样提升了52%。Ali等^[21]针对SLM过程中的残余应力问题,提出了粉末床预热调控策略。研究发现,在SLM成形Ti6Al4V时,熔池高冷却速率导致的马氏体相变是材料延展性降低的主要原因。通过将粉末床预热到570℃,能够有效抑制

残余应力累积,并同时提高屈服强度和延展性。

本研究针对现有多材料金属增材制造技术普遍存在的设备改造需求大、操作复杂度高等局限,提出基于粉末原位切换的SLM复合成形新策略,以Ti6Al4V和CoCrMo合金粉末为基础材料进行研究。作为探索性实验,本研究旨在将CoCrMo合金熔覆于钛合金表面。理想情况下,CoCrMo合金层越厚越好,但实际应用中需根据性能要求合理控制涂层厚度。在2种不同金属材料的结合过程中,硬脆性金属间化合物的形成往往不可避免,这些化合物的存在会增加界面裂纹的发生概率,甚至导致材料分层^[22]。为缓解这一问题,在预实验阶段尝试在CoCrMo-Ti6Al4V复合材料结合界面处添加过渡层,分别采用钽(Ta)、铬(Cr)、钼(Mo)等难熔金属作为过渡层材料,以期降低高激光能量密度激光打印时异质材料间的热应力失配。但实验结果表明,Ta、Cr、Mo等过渡层未能有效抑制界面缺陷。由于基体和覆层材料的热膨胀系数差异较大,在快速熔凝过程中产生了无法协调的残余应力,导致界面裂纹产生,最终效果不佳。基于预实验结论,本文针对SLM制备过程中在结合界面处出现的残余应力和成形缺陷等问题,重点进行了激光能量密度调控与界面结构优化。最终确定采用较低的激光能量密度,并结合外部支撑结构设计,优化了CoCrMo-Ti6Al4V复合材料的SLM制备工艺。

材料与方法

实验材料与仪器

本实验选用材料如下:Ti6Al4V粉末、CoCrMo粉末(韩国Genoss Co., Ltd.),粉末具体成分见表1及表2;丙酮(分析纯,纯度≥99.5%,杭州双林化工试剂有限公司);无水乙醇(分析纯,纯度≥99.9%,Aladdin生化科技股份有限公司)。

表1 Ti6Al4V粉末成分(质量分数) %

Al	V	C	Fe	O	N	H
5.50~6.75	3.5~4.5	≤0.08	≤0.3	≤0.12	≤0.03	≤0.0015

实验中涉及的仪器为SLM打印机(EOSINT M280,德国EOS公司);场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, Tescan Mira 4,捷克Tescan公司)。

表2 CoCrMo 粉末成分 (质量分数)

Cr	Mo	Si	Mn	Fe	Ni	C	P	S	O	N	W
28.44	6.33	0.79	0.26	0.04	0.017	0.024	0.003	0.002	0.049	0.123	<0.2

实验方法

> Ti6Al4V 与 CoCrMo 单材料制备

为了优化高精度激光束的工艺参数，确保 Ti6Al4V 和 CoCrMo 各自能打印出致密、无内部缺陷的成形层，避免单个材料内部出现分层或未熔合现象。本研究采用 CAD 软件设计了样品的三维结构，并将设计数据输入 SLM 设备中，使用德国 EOSINT M280 系统打印了直径为 10 mm、厚度为 2 mm 的 Ti6Al4V 与 CoCrMo 单材料薄圆柱形样品，以探究制备 Ti6Al4V 和 CoCrMo 单材料的最佳工艺。打印采用的激光能量密度按式 (1) 计算：

$$E = \frac{P}{v \cdot t \cdot h} \quad (1)$$

式中： E 为激光能量密度， J/mm^3 ； P 为激光功率， W ； v 为扫描速度， mm/s ； t 为铺层厚度， mm ； h 为扫描线间距， mm 。

影响 SLM 金属打印质量的主要因素有扫描速度、激光功率、扫描间距、铺层厚度及铺层方式等^[23]。激光能量密度过高易引起分层和熔化现象，因此本研究通过尝试多种参数组合，最终选定激光功率 180 W、扫描速度 1500 mm/s、扫描线间距 0.06 mm、铺层厚度 0.03 mm 的参数组合，形成能量密度为 $66.67 \text{ J}/\text{mm}^3$ 的高精度激光束，用于打印出致密的 Ti6Al4V 和 CoCrMo 单材料成形层。

成形时，首先在基板上均匀铺设一层 Ti6Al4V 或 CoCrMo 金属粉末；随后依据 CAD 模型数据，采用能量密度为 $66.67 \text{ J}/\text{mm}^3$ 的高精度激光束对粉末进行选择扫描熔化，形成当前截面。每层成形后，设备自动铺设新粉末层，重复激光束扫描熔化过程，并与已固化层实现冶金结合，通过逐层堆叠实现三维实体构建。

> SLM 工艺参数优化

在开展复合材料成形实验前，对过渡层 CoCrMo 的 SLM 成形工艺进行了参数优化。初步试验中，系统考察了激光功率（包括 50、60、70、80、100 和 180 W）对成形质量的影响。结果表明，仅在激光功率为 50 W 时能形成较厚的疏松多孔结构涂层；其余功率下均因能量过高导致表面过度熔化，而未达到预期效果。鉴于低能量易形成疏松多孔结构，为提高致密性，进一步优化了扫描速度，测试了 500、600、700、800、1200 及 1500 mm/s 等参数。结果显示，随着扫描速度降低，能量密度相应提高，但堆叠层厚度减小，未能完成 30 层打印。该现象主要归因于不同材料间热膨胀系数差异以及残余应力的累积，致使熔融过程异常并出现层间分层。在 50 W 激光功率下，第 30 层表面存在大量未完全熔化的颗粒，会对材料力学性能产生不利影响。通过系统调整激光功率、扫描速度、线间距与粉末层厚度等参数，获得较优的打印工艺组合。表 3 列出了优化后的 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料 SLM 成形工艺参数组合。

使用 CAD 软件设计了 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料三维模型。通过综合考虑材料的物理特性及激光加工参数，将厚度约 2 mm、直径 8 mm 的 Ti6Al4V 合金作为基体；其上为厚度 0.9 mm、直径 10 mm 的 CoCrMo 疏松层；最上层为厚度 0.09 mm、直径为 10 mm 的 CoCrMo 致密层。

> 锁扣结构设计

本实验设计了具有机械互锁特征的钛合金（Ti6Al4V）基底结构辅助成形，见图 1，其锁扣单元的几何参数为：底部宽度 100 μm 、顶部宽度 200 μm 、高度 200 μm ，单元间底部横向间距 300 μm 、

表3 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料的 SLM 工艺参数

材料与结构	激光功率/W	扫描速度/(mm/s)	扫描线间距/mm	层厚/mm	打印层数/层	激光能量密度/(J/mm ³)
Ti6Al4V层	180	1500	0.06	0.03	66	66.67
CoCrMo疏松层	50	1500	0.06	0.03	30	18.52
CoCrMo致密层	180	1500	0.06	0.03	3	66.67

顶部横向间距 $200\ \mu\text{m}$ 。在交替沉积阶段,通过铺粉系统将 CoCrMo 合金粉末填充至钛基底锁扣单元间的凹槽结构区域,并采用 SLM 工艺逐层熔覆成形。

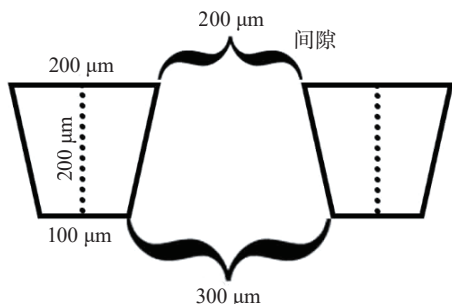


图1 Ti6Al4V 基底结构设计

➤ 特殊设计的外部支撑结构

为缓解异质材料界面残余应力,同时设计了

图2所示的外部支撑结构辅助成形,首先使用 $66.67\ \text{J}/\text{mm}^3$ 的高激光能量密度激光打印 Ti6Al4V 合金基体,并通过 $18.52\ \text{J}/\text{mm}^3$ 的低能量密度激光在直径 $8\ \text{mm}$ 的 Ti6Al4V 基体上精确熔覆直径为 $10\ \text{mm}$ 的 CoCrMo 疏松层。该低热输入可有效避免下层 Ti6Al4V 基体过熔,同时能量密度略高于 CoCrMo 粉末的熔化阈值,能在实现粉末颗粒间粘结、形成稳定结构的同时,保留部分未熔颗粒和孔洞。这些结构可以有效地吸收异质材料界面在冷却过程中因热膨胀系数不匹配而产生的残余应力,从而抑制裂纹萌生。最终阶段恢复使用 $66.67\ \text{J}/\text{mm}^3$ 的高能量密度激光完成 CoCrMo 致密层熔覆,以完成 CoCrMo-Ti6Al4V 复合金属材料的制备。制备完成后,使用镊子移除外部支撑件。

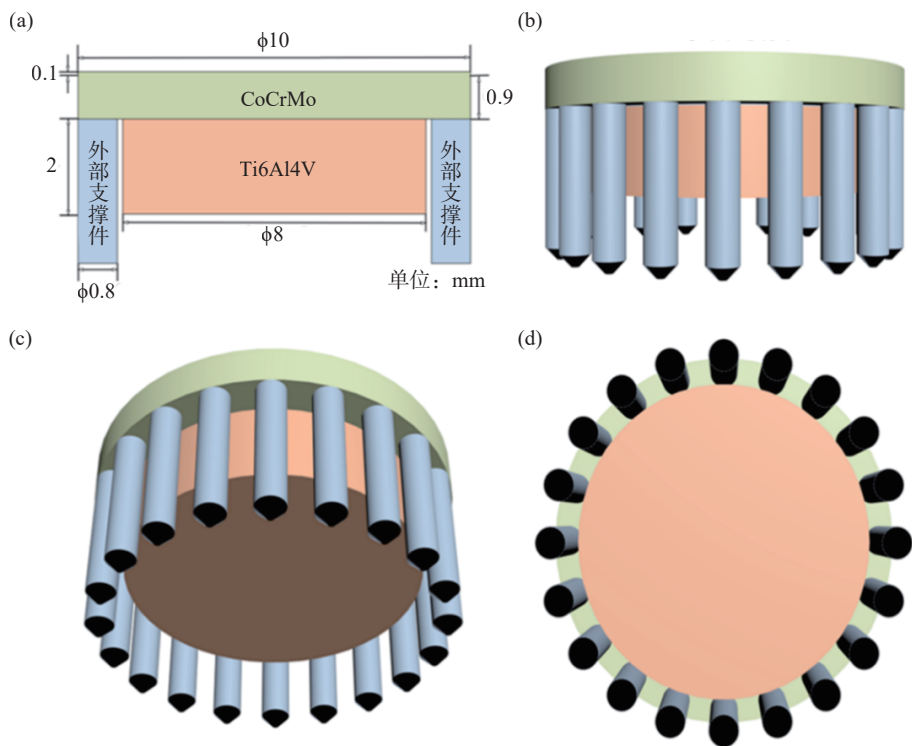


图2 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料制备的外部支撑件: (a) 2D 示意图; (b) 3D 视图-侧面; (c) 3D 视图-斜侧面; (d) 3D 视图-底面

➤ 场发射扫描电镜测试

分别使用 200、400、600 与 1000 目砂纸对 Ti6Al4V 与 CoCrMo 单材料试样表面进行梯度打磨。使用环氧树脂对 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料进行包埋,经侧切后采用相同流程进行梯度打磨。每次打磨后均使用超纯水超声清洗 $5\ \text{min}$,并立即以氮

气吹干表面。更换砂纸时,需将试样旋转 90° 后继续打磨,待上一次的磨痕消失后重复上述清洗吹干步骤。最后使用 $0.5\ \mu\text{m}$ 金刚石抛光剂对表面进行抛光,直至获得具有镜面效果的平滑表面。使用导电胶将样品固定在样品装载台,使用场发射扫描电镜观察其微观形貌,研究复合材料的界面结合情况。

剪切实验

将 CoCrMo–Ti6Al4V 复合材料固定在如图 3 所示的不锈钢自制载具上，然后将其安装于万能试验机上，精确调整试样使结合界面与施加载荷的方向平行，并使用 G 型夹具来对载具进行辅助固定，以防止其在加载过程中发生偏移。将拉伸加载速度设置为 0.5 mm/min，记录样品断裂时的剪切力。界面结合强度按式 (2) 计算：

$$T = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中：\$T\$ 为剪切强度，MPa；\$F\$ 为样品断裂时的剪切力，N；\$A\$ 为材料结合界面的接触面积，mm²。

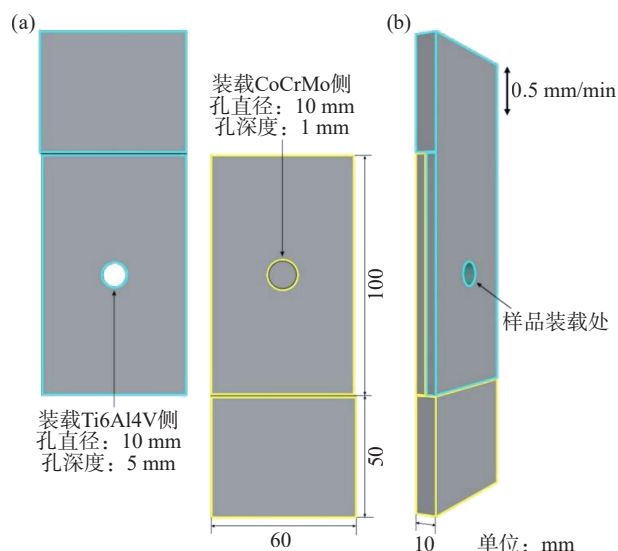


图3 CoCrMo–Ti6Al4V 复合材料剪切实验的不锈钢自制载具：(a) 剪切载具组件示意图；(b) 剪切载具装配图

结果与讨论

SLM 工艺参数优化

前期试验阶段采用直接沉积策略，将 CoCrMo

合金逐层熔覆于 Ti6Al4V 基体表面。通过扫描电镜观察截面结构，发现存在显著的层间剥离与异常熔透现象，导致无法形成期望的复合结构。这些缺陷可能是材料间物理性质的差异、结合界面不兼容性及激光能量密度过高等协同作用的结果。

因此，本文从降低激光功率入手进行优化：下层（疏松层）CoCrMo 采用 50 W 的低激光功率（共 30 层，厚度 0.9 mm）；上层保持 180 W 的标准激光功率（共 3 层，厚度 0.09 mm），扫描速度与扫描线间距均保持不变。该方案虽有效抑制了界面过熔缺陷，但引发了复合材料边缘翘曲变形及径向裂纹扩展，如图 4 所示，表明单一参数调节难以完全消除热应力失配的影响。

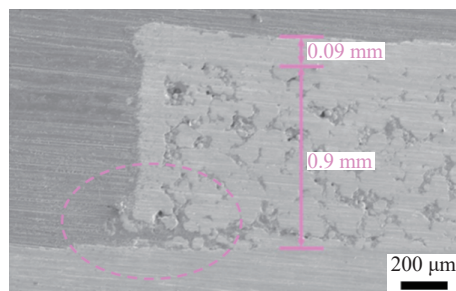


图4 CoCrMo–Ti6Al4V 复合金属材料的结合界面形貌图

采用锁扣结构设计制备试样分析

本研究还设计了具有机械互锁特征的钛合金（Ti6Al4V）基底结构以改善复合金属的结合（图 5）。实验发现，锁扣结构最多只能实现 7 层（厚度约 200 μm）的打印，无法满足打印 300 层的需求。虽尝试采用先打印 30 层疏松层再打印 3 层致密层的策略，但出现了边缘卷翘现象，导致实验失败。横截面观察表明，互锁结构处的 CoCrMo 填充层呈现局部致密度不均，导致界面附近发生内聚断

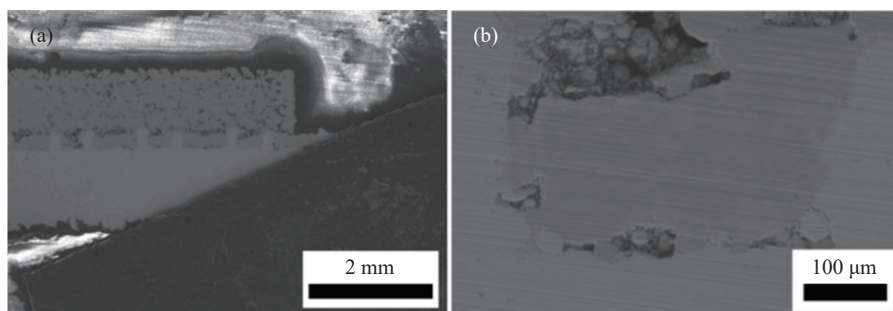


图5 不同放大倍数下采用基底结构设计制备的 CoCrMo–Ti6Al4V 组织形貌

裂。这归因于无法将 CoCrMo 粉末完全均匀且严密地填充在 Ti6Al4V 凹陷处, 导致局部区域填充不足, 从而形成未熔合缺陷。故锁扣结构设计未被采用。

采用特殊设计的外部支撑结构制备试样分析

采用前述通过调控激光能量密度, 使用特殊设计的外部支撑结构的方法, 成功制备了 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料。图 6 为通过场发射扫描电镜观察到的该复合金属材料结合界面形貌。可见, CoCrMo 疏松层内部存在因激光能量密度较低而形成的未完全熔化的粉末颗粒, 且与 Ti6Al4V 基体结合较为紧密; 但在 CoCrMo 疏松层内部也观察到由内部应力而导致的少量微裂纹。CoCrMo 致密层与疏松层之间的过渡均匀、无缝且结合紧密, 无明显界面分隔。

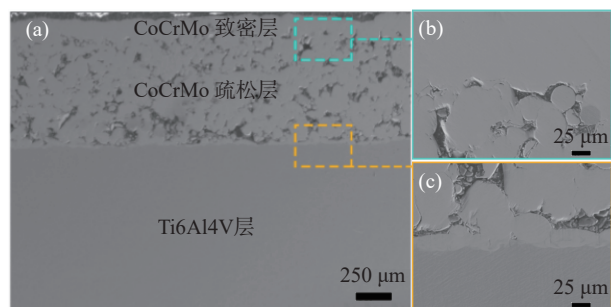


图 6 CoCrMo-Ti6Al4V 复合金属材料的结合界面形貌图: (a) CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料; (b) CoCrMo 致密层与疏松层结合界面; (c) CoCrMo 疏松层与 Ti6Al4V 层结合界面

界面剪切强度分析

为定量评价复合材料界面结合质量, 对 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料进行了剪切实验。图 7 展示了该材料界面在剪切加载下的力-时间曲线。剪切测试表明, 最大剪切力为 2155 N, CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料的界面结合强度为 (43.21 ± 1.07) MPa。顾慧等^[24]对 SLM 制备的 CoCr 合金及 Ti6Al4V 合金的金瓷结合强度进行了比较, 结果显示, 2 种材料的金瓷结合强度分别为 26.71 与 21.50 MPa。Shirasu 等^[25]通过 SLM 制备了钛基底, 并将其与碳纤维增强酚醛树脂复合材料通过热压共结合, 剪切试验显示, 具有圆柱形结构的样品呈现了最高的粘接强度 (20.60 MPa)。Yoo 等^[26]研究了 2 种粘结剂对 SLM 制备的 CoCr 金属与陶瓷间剪切强度的影响, 测试结果表明, 未使

用粘结剂试件的平均剪切强度为 35.29 MPa, 添加 2 种粘结剂后, 平均剪切强度分别提高至 38.38 与 42.56 MPa。通过与上述研究的对比分析, 本研究获得的 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料在受到剪切载荷时表现出了高效的力学响应与稳定性, 展示了其作为工程材料的可靠性。这一优异的力学性能与场发射扫描电镜观察到的致密、无宏观裂纹的界面形貌相一致。

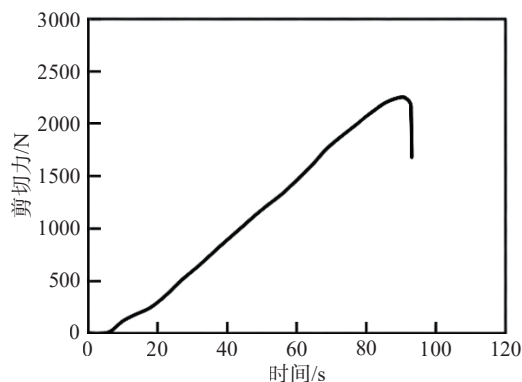


图 7 CoCrMo-Ti6Al4V 材料结合界面剪切力-时间曲线

结束语

本研究采用 SLM 技术, 通过调控激光能量密度并结合外部支撑结构制备的 CoCrMo-Ti6Al4V 复合材料内部结构成形良好。CoCrMo 疏松过渡层及外部支撑结构的存在, 有效缓解了异质材料热应力失配问题, 从而显著提升了 CoCrMo 与 Ti6Al4V 材料界面结合强度。

参考文献

- [1] 袁宇成, 宋军, 罗加杰, 等. 激光熔丝定向能量沉积增材制造技术研究现状与发展趋势. 材料工程, 2025, 53(5): 1
- [2] 刘文萍, 付仕明, 张景旭. 迈向商业航天新时代: 极端环境金属材料服役行为的挑战与展望. 金属世界, 2026(4): 53
- [3] Kawalkar R, Dubey H K, Lokhande S P, et al. A review for advancements in standardization for additive manufacturing. Mater Today Proc, 2022, 50(5): 1983
- [4] Kotadia H R, Gibbons G, Das A, et al. A review of laser powder bed fusion additive manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties. Addit Manuf, 2021, 46: Art No. 102155
- [5] 徐亮, 梁永仁, 叶梦元. 基于激光闪射法测量 3D 打印铝合金的热物性参数. 金属世界, 2025(4): 86
- [6] 勒进, 张勇. 增材制造高熵合金的组织结构和性能. 金属世界, 2025(1): 1

- [7] Liu X G, Shang Y H, Liu J F, et al. 3D printing-enabled *in-situ* orientation of BaTi₂O₅ nanorods in β -PVDF for high-efficiency piezoelectric energy harvesters. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(11): 13361
- [8] Li T, Peng Z, Lü Q, et al. SLS 3D printing to fabricate poly(vinyl alcohol)/hydroxyapatite bioactive composite porous scaffolds and their bone defect repair property. *ACS Biomater Sci Eng*, 2023, 9(12): 6734
- [9] Kurzynowski T, Pawlak A, Smolina I. The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry. *Arch Civ Mech Eng*, 2020, 20: 23
- [10] 赵宇辉, 贺晨, 邹健, 等. 外场对激光熔化沉积 Al-Mg-Sc-Zr 合金组织性能的影响. *光学学报*, 2023, 43(2): 151
- [11] 张晓强. Inconel 738 合金激光定向能量沉积过程中的裂纹形成与抑制研究 [学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2021
- [12] 王铭宇, 李述军, 和正华, 等. 激光功率和扫描速度对 SLM 制备 Ti5553 合金性能的影响. *材料研究学报*, 2025, 39(8): 583
- [13] 王继浩, 刘凯歌, 张雪峰, 等. 热等静压对激光选区熔化增材制造 GH3230 高温合金微裂纹与组织的影响. *航空制造技术*, 2024, 67(3): 55
- [14] 黄辰阳, 陈嘉伟, 朱言言, 等. 激光定向能量沉积的粉末尺度多物理场数值模拟. *力学学报*, 2021, 53(12): 3240
- [15] Motta M, Demir A G, Previtali B. High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition. *Addit Manuf*, 2018, 22: 497
- [16] Darshan T, Himanshu S. Investigating microstructure and defects evolution in laser deposited single-walled Ti6Al4V structures with sharp and non-sharp features. *J Manuf Process*, 2020, 56: 928
- [17] Wang X B, He X F, Wang T S, et al. Internal pores in DED Ti-6.5Al-2Zr-Mo-V alloy and their influence on crack initiation and fatigue life in the mid-life regime. *Addit Manuf*, 2019, 28: 373
- [18] Hasanov S, Alkunte S, Rajeshirke M, et al. Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges. *J Manuf Mater Process*, 2021, 6(1): 4
- [19] Neirinck B, Li X S, Hick M. Powder deposition systems used in powder bed-based multimetal additive manufacturing. *Acc Mater Res*, 2021, 2(6): 387
- [20] Ke D X, Vu A A, Bandyopadhyay A, et al. Compositionally graded doped hydroxyapatite coating on titanium using laser and plasma spray deposition for bone implants. *Acta Biomater*, 2019, 84: 414
- [21] Ali H, Ma L, Ghadbeigi H, et al. *In-situ* residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V. *Mater Sci Eng: A*, 2017, 695: 211
- [22] Razzaq S, Pan Z X, Li H J, et al. Joining dissimilar metals by additive manufacturing: A review. *J Mater Res Technol*, 2024, 31: 2820
- [23] Jia H L, Sun H, Wang H Z, et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): A review. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, 113: 2413
- [24] 顾慧, 张颖, 吴云兵, 等. 激光选区熔化成形钴铬合金及钛合金金瓷结合强度的研究. *中国实用口腔科杂志*, 2020, 13(2): 82
- [25] Shirasu K, Mizutani M, Takano N, et al. Lap-shear strength and fracture behavior of CFRP/3D-printed titanium alloy adhesive joint prepared by hot-press-aided co-bonding. *Int J Adhes Adhes*, 2022, 117: Art No. 103169
- [26] Yoo S Y, Kim S K, Heo S J, et al. Effects of bonding agents on metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloys fabricated by selective laser melting. *Materials*, 2020, 13(19): 4322

作者简介: 林思静 (2004—), 女, 上海人, 学生。2023 年就读于浙江理工大学生物技术专业, 主要研究方向: 医用金属材料表面改性。通信地址: 浙江省杭州市钱塘区 2 号大街 928 号; E-mail: 11602145328@163.com。

通信作者: 陈岑 (1985—), 女, 湖北省武汉人, 副教授。2013 年毕业于华中科技大学生物医学工程专业, 主要研究方向: 医用金属材料表面改性、硬组织修复、神经组织工程、心血管药物洗脱支架。通信地址: 浙江省杭州市钱塘区 2 号大街 928 号; E-mail: chencen@zstu.edu.cn。