

激光参数对选区激光熔化高熵合金微磨削性能的影响

宋林原¹, 魏子淇², 尹馨苑³, 徐如矗¹, 温雪龙¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168;

3. 湖南工程学院 国际教育学院, 湖南 湘潭 411104)

摘要: 为了系统研究激光功率、激光扫描间距和激光扫描速度对高熵合金内部缺陷与微磨削性能的影响规律, 采用在不同激光工艺参数组合下选区激光熔化成形的 FeCoCrNiAl_{0.5} 高熵合金试件, 通过金相显微镜与扫描电镜分析材料内部气孔与微裂纹等缺陷特征。以微磨削力、表面粗糙度、磨削表面形貌和亚表面损伤为评价指标开展微磨削单因素试验, 定量分析不同激光参数制备试件的微磨削加工性能。结果表明, 适度提高激光功率可减少气孔和裂纹、提高致密度与强度, 使微磨削力增大、表面粗糙度降低; 增大激光扫描间距会削弱熔道搭接、增加内部缺陷, 虽磨削力降低, 但表面与亚表面损伤和粗糙度加剧; 适中的激光扫描速度有利于抑制缺陷、提高致密度和强度, 从而改善表面质量。

关键词: 选区激光熔化; 高熵合金; 微磨削; 激光工艺参数; 表面粗糙度

中图分类号: V261

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2026.04.001

The influence of laser parameters on the micro-grinding performance of selective laser melting of high-entropy alloys

SONG Linyuan¹, WEI Ziqi², YIN Xinyuan³, XU Ruchu¹, WEN Xuelong¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

3. International Education College, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: To systematically investigate the effects of laser power, laser scanning spacing, and laser scanning speed on internal defects and micro-grinding performance of high-entropy alloys, FeCoCrNiAl_{0.5} high-entropy alloy samples formed by selective laser melting under different combinations of laser process parameters were used. The characteristics of internal defects such as pores and microcracks were analyzed by using metallographic microscopy and scanning electron microscopy. Single-factor tests on micro-grinding were conducted by using micro-grinding force, surface roughness, ground surface morphology, and subsurface damage as evaluation indicators to quantitatively analyze the micro-grinding performance of samples prepared with different laser

收稿日期: 2025-12-10 修回日期: 2026-04-13 接受日期: 2026-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 52275412); 中央高校基本科研业务费专项资金(项目编号: N2403015)。

作者简介: 宋林原(1998—), 男, 辽宁大连人, 博士研究生, 主要研究方向为金属增材制造, E-mail: songly2@mail.neu.edu.cn;

温雪龙(1985—), 男, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为精密加工与磨削, E-mail: wenxl@mail.neu.edu.cn。

parameters. The results show that moderately increasing laser power can reduce pores and cracks, improve density and strength, increase micro-grinding force, and reduce surface roughness. Increasing the laser scanning spacing weakens the weld overlap and increases internal defects. Although the grinding force decreases, surface and subsurface damage and roughness are exacerbated. A moderate laser scanning speed is beneficial for suppressing defects, improving density and strength, and thus improving surface quality.

Key words: selective laser melting; high-entropy alloy; micro-grinding; laser process parameters; surface roughness

高熵合金由多种主元素接近等原子比构成,通常表现出优异的强度、塑性、耐磨和耐腐蚀性能,已成为材料领域的研究热点^[1-3]。近年来,选区激光熔化技术凭借按需成形和高材料利用率,在高熵合金制备中展现出广阔的应用前景^[4]。然而,极高的冷却速度和复杂的热循环使粉末经历瞬时熔化和快速凝固,易产生气孔与微裂纹等缺陷,并显著影响后续精密加工中的磨削力和表面质量^[5-7]。微磨削加工是一种适用于硬脆材料和难加工材料的精密加工方法。已有研究表明,材料的显微组织、硬度和内部缺陷对磨削力、表面粗糙度及亚表面损伤具有显著影响^[8-10]。许多学者对材料微磨削后的性能和微观组织进行研究,并取得了重要进展。Sun 等^[11]研究了 SLM-Al_{0.5}CoCrFeNi 高熵合金的组织特征与力学性能,结果表明,当激光能量密度达到 150 J/mm³时,试件的相对密度可达 99.92%,显微硬度为 270 HV,拉伸强度为 878 MPa,此时,晶粒尺寸比铸造试件更加细小。Gong 等^[12]研究了螺旋微磨具引起的蓝宝石表面质量、边缘断裂特征和亚表面损伤行为,并揭示了微磨削过程中蓝宝石亚表面损伤的形成机理。Ren 等^[13]对单晶硅展开侧磨试验,讨论了磨削参数与不同微磨削刀具对表面质量的影响,结果表明,进给速度对表面质量有显著影响,微磨具的磨损是影响磨削质量的关键。Liu 等^[14]深入分析了 Zr 基大块金属玻璃(bulk metallic glass, BMG)的微磨削特性,研究发现在高主轴转速下,去除 BMG 的方

法主要基于脆性去除与滑擦。

本文通过显微组织与内部缺陷分析,结合微磨削试验,从微磨削力、表面粗糙度、表面形貌和亚表面形貌等方面系统研究激光功率、扫描速度与扫描间距对高熵合金微磨削性能的影响规律,为高熵合金成形及其后续微磨削加工提供试验与理论参考。

1 试验材料与试件制备

1.1 粉末与成形设备

实验采用的高熵合金材料为 FeCoCrNiAl_{0.5}, 试件制备成形工艺采用选区激光熔化技术, FeCoCrNiAl_{0.5} 高熵合金选区激光熔化技术制备过程如图 1 所示。材料设计原子比为 Fe:Co:Ni:Cr:Al=1:1:1:1:0.5, 将 5 种金属单质粉末按配比称量后混合。初始粉末粒径范围约为 30 ~ 50 μm, 利用 QM-3SP2 型行星式球磨机进行混粉, 参数设定为:转速为 300 r/min, 球料比为 10:1, 球磨时间为 4 h。试样尺寸设计为 10 mm×10 mm×5 mm, 基板材料为 316 不锈钢。

微磨削加工试验示意图如图 2 所示。微磨削试验在 JX-1A 精密磨削机床上进行, 磨削过程中采用 MEFC-K3D60 动态测力仪实时监测磨削过程中的微磨削力信号, 利用与之配套的数据采集和处理软件对所测得的微磨削力进行采集和存储。

1.2 工艺参数设计

FeCoCrNiAl_{0.5} 试件的选区激光熔化制备

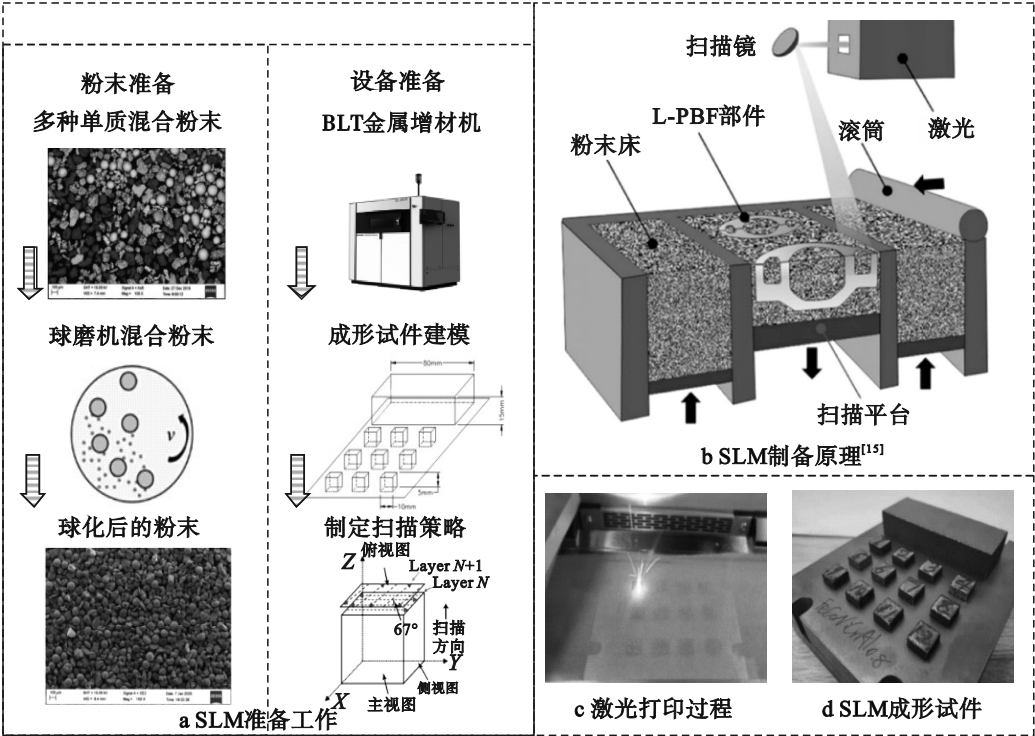


图1 FeCoCrNiAl_{0.5}高熵合金选区激光熔化技术制备过程

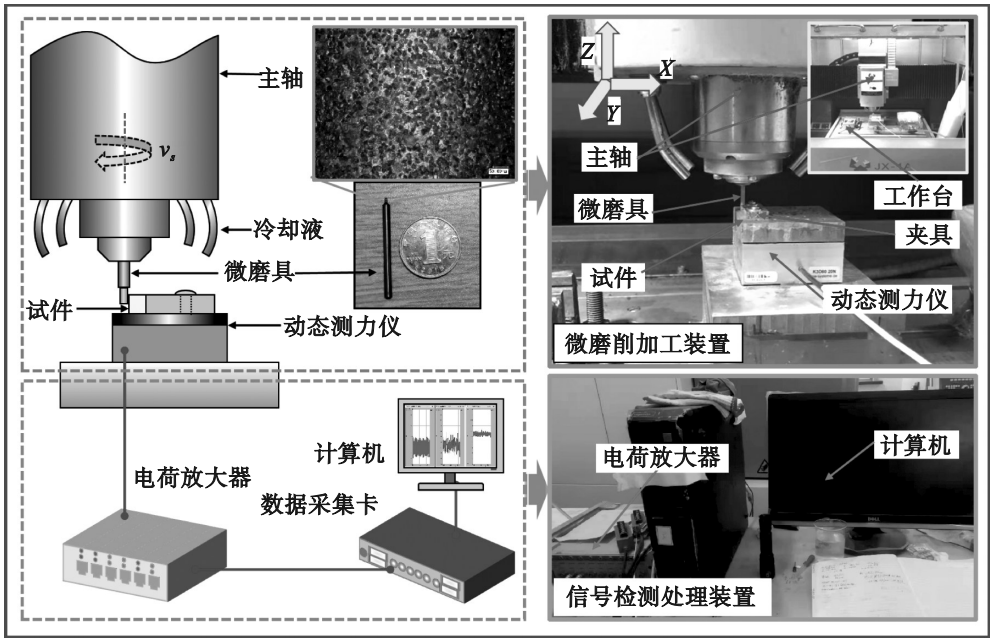


图2 微磨削加工试验示意图

方案选取的激光参数变量为激光功率 P 、激光扫描速度 v 和激光扫描间距 h ,试验工艺参数如表1所示。

为探究激光工艺参数对FeCoCrNiAl_{0.5}高熵合金微磨削性能的影响规律,针对不同激光工艺参数组合制备的FeCoCrNiAl_{0.5}高熵合金

试件进行微磨削单因素试验。微磨削试验中,设置磨削速度 V_s 为1.414 m/s,磨削深度 a_p 为10 μm ,轴向切深 a_e 为1 mm,设置进给速度 v_w 为试验变量,变量数值分别为20、40、70、100、200 $\mu\text{m/s}$ 。每组磨削参数下进行3次试验,取平均值作为有效数据。本次微磨削试验分别

采用侧磨与逆磨的加工方式。

表 1 试验工艺参数

编号	扫描速度 v ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	激光功率 P W	扫描间距 h mm	编号	扫描速度 v ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	激光功率 P W	扫描间距 h mm
1	200	350	0.05	6	600	300	0.05
2	400	350	0.05	7	600	400	0.05
3	600	350	0.05	8	600	350	0.06
4	800	350	0.05	9	600	350	0.07
5	600	250	0.05	10	600	350	0.08

1.3 激光能量密度方程

为定量表征选区激光熔化过程中单位材料所获得的能量输入,便于不同工艺参数组合的对比分析,本文采用激光能量密度作为综合评价指标。选区激光熔化中常用的能量密度包括线能量密度、面能量密度与体积能量密度。线能量密度表示激光沿扫描轨迹每单位长度输入的能量,其计算公式为

$$E_l = \frac{P}{v} \quad (1)$$

式中: P 为激光功率,单位为W; v 为扫描速度,单位为mm/s; E_l 为线能量密度,单位为J/mm。

面能量密度表示铺粉平面上单位面积接收的能量输入,其计算公式为

$$E_b = \frac{P}{vh} \quad (2)$$

式中: h 为扫描间距,单位为mm; E_b 为面能量密度,单位为J/mm²。

在考虑扫描间距与层厚的基础上,用体积能量密度表征单位体积材料所获得的能量输入,是本文用于关联成形缺陷与加工性能的主要指标,其计算公式为

$$E_v = \frac{P}{ht} \quad (3)$$

式中: t 为铺粉层厚,单位为mm; E_v 为体积能量密度,单位为J/mm³。

2 方法与结果讨论

2.1 高熵合金内部缺陷分析

由于激光—粉末—熔池间复杂作用及球化、氧化、飞溅等现象影响,成形过程中仍易产生杂质、气孔和微裂纹等缺陷^[16]。因此,有必要对激光选区熔化制备的FeCoCrNiAl_{0.5}高熵合金内部缺陷进行分析。图3为不同激光参数制备高熵合金的内部缺陷,主要缺陷类型为裂纹和气孔。裂纹主要源于激光快速凝固产生的大温度梯度及由此形成的孔洞^[17]。同时,由于Al熔点低、热膨胀系数大,易引起凝固组织间的热收缩和热裂。此外,Al的原子半径明显大于Fe、Cr、Co、Ni 4种元素的原子半径,FeCoCrNiAl_{0.5}高熵合金材料本身的高晶格畸变也会加剧裂纹的形成。气孔的主要成因为小孔诱导、原料粉末间隙形成、激光熔化过程中沿熔化边界挥发性物质或少量被困气体膨胀形成、由裂纹形成、被熔池表面波动困住而形成、凹陷带较浅时由于凹陷带波动而形成^[18]。

在不同激光功率 P 下(图3a—3d),当 $P=200$ W时,试件内部存在大量大尺寸圆形和长条形气孔及微裂纹,多由困气膨胀产生,并诱发长条状贯通裂纹;当 $P=250$ W时,气孔尺寸和数量显著降低,但仍有部分裂纹存在;当 $P=350$ W时,试件致密度最高,仅有少量微裂纹;当 $P=400$ W时,小型气孔及不规则裂纹又有所

增加。不同扫描间距 h 下(图 3e—3h),随着扫描间距增大,相邻熔道搭接率降低,凝固收缩间隙增大,导致不规则裂纹数量和尺寸增加^[19]。图 3i—3l 为不同扫描速度 v 下的微观形貌,当 $v=200$ mm/s 时,能量密度较高,形成大气孔和不规则裂纹;当 $v=400$ mm/s 时,气孔和裂纹明显减少;当 $v=800$ mm/s 时,裂纹和气孔

又趋于增多。综合对比可知,当 $v=600$ mm/s、 $P=350$ W、 $h=0.05$ mm 时,试件内部微裂纹和气孔最少。总体而言,裂纹和气孔的尺寸及数量随激光功率和扫描速度适度增大而减小,随扫描间距增大而增大,但参数过高或过低均会导致内部缺陷再次增多。

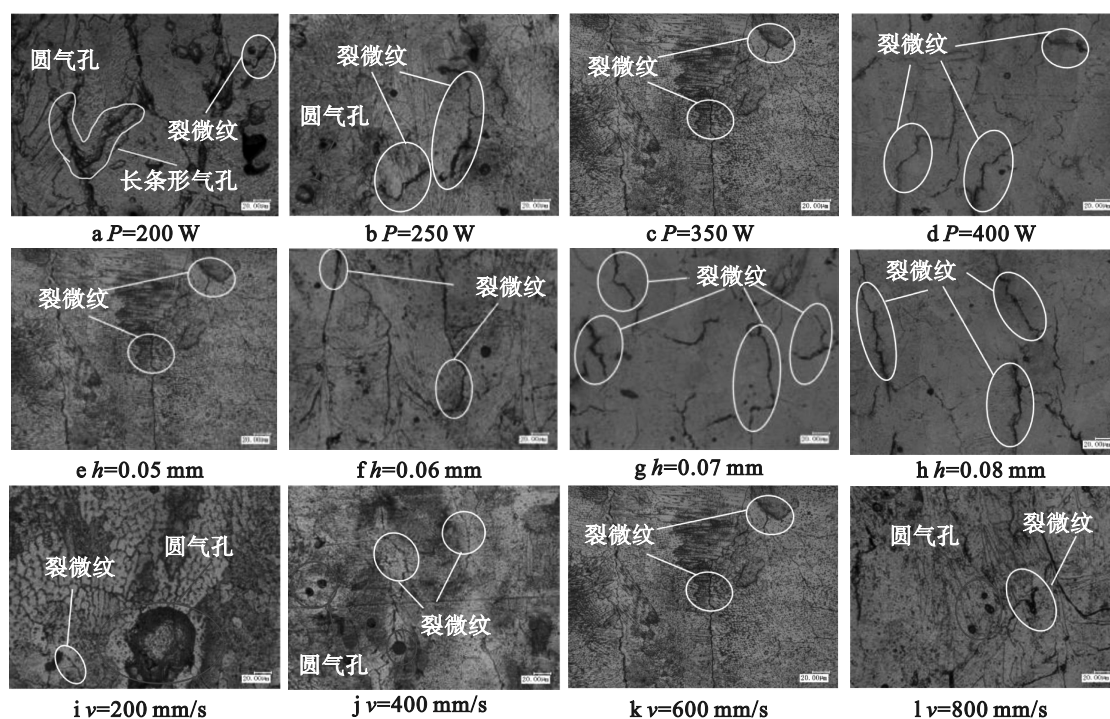


图3 不同激光参数制备高熵合金的内部缺陷

2.2 激光功率对微磨削性能的影响

图4为激光功率对微磨削力的影响。从图4可以看出,在磨削过程中4个高熵合金试件的切向与法向微磨削力整体上均随着进给速度的增大而增大。这是由于进给速度增大会导致未变形切屑厚度增大,从而提高微磨削力,符合常规的磨削加工规律。在相同进给速度下,微磨削力由大到小对应的激光功率依次为:350、400、250、200 W。随着制备试件的激光功率提高,即激光功率从200 W增加到350 W,微磨削过程中产生的磨削力增大。这是由于随着激光功率的增大,熔层间的冶金结合增强,使成形试件的内部裂纹与气孔等缺陷逐渐减少,材料的屈服强度将会提高。激光参数通过影响材料的力学性能,进而影响加工过程中的

微磨削力。随着材料强度的提高,磨粒切削工件成屑所需要的力将更大,因此微磨削时较高激光功率试件引起的磨削力也较高。如图4所示,当激光功率为400 W时,试样内部生成微裂纹数量增加,内部缺陷增多,这会导致材料的强度降低,从而微磨削力也随之降低。

图5为激光功率对表面粗糙度的影响。各试件的 R_a 、 R_z 均随进给速度的增大而升高。在同一进给速度下,表面粗糙度由大到小对应的激光功率依次为200、250、400、350 W,即随着激光功率的增加,粗糙度呈先下降后上升趋势。适中的激光功率(约350 W)可显著降低 R_a 与 R_z ,这是因为较高的致密度与硬度有助于抑制磨削表面的塑性撕裂和微观塌陷;功率过低(约200 W)时,内部气孔与裂纹较多,磨削过

程中易在缺陷处产生崩塌,导致粗糙度偏高;功率过高(约400 W)时,新增裂纹与气孔亦会

恶化表面形貌,使粗糙度略有回升。

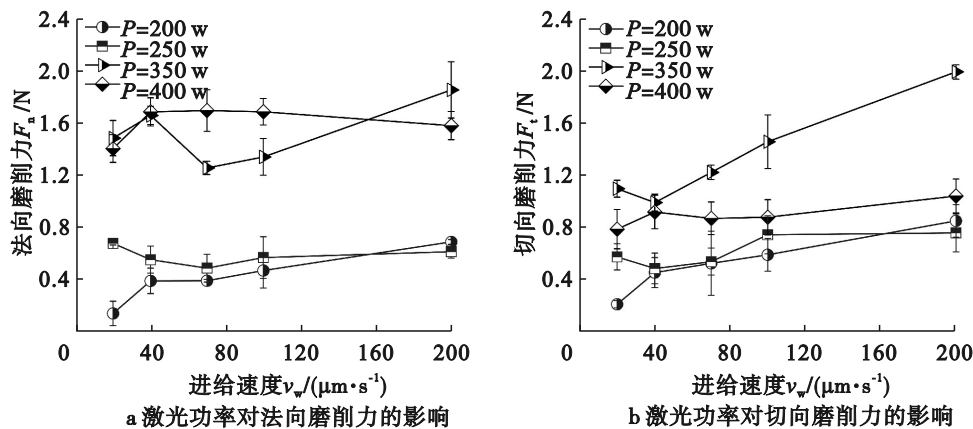


图4 激光功率对微磨削力的影响

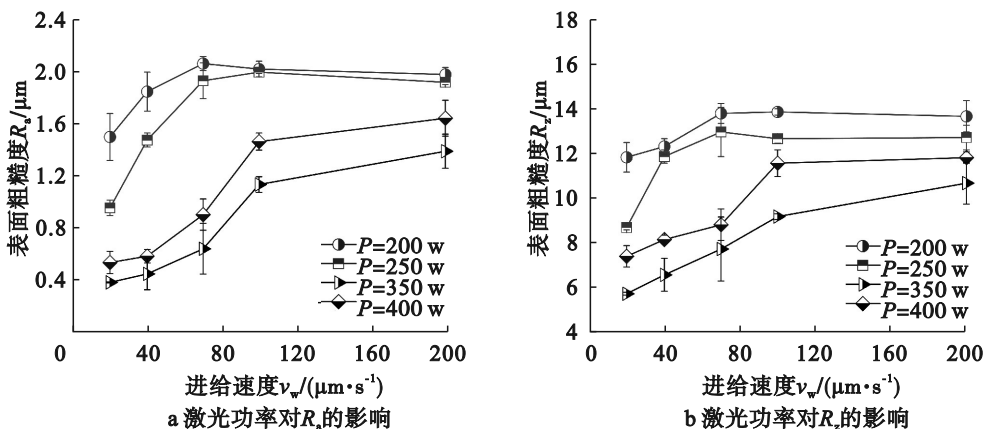


图5 激光功率对表面粗糙度的影响

图6为磨削速度为1.414 m/s、进给速度为70 $\mu\text{m/s}$ 、磨削深度为10 μm 时,4组不同激光功率制备高熵合金的微磨削表面三维轮廓形貌图。从图6中可以看出,随着制备过程中激光功率的增加,磨削表面取样区域的塑性变形程度减小,表面轮廓峰高与谷底的间距降低,轮廓平整度逐渐提高,单位面积内的轮廓一致性相对提高。因此在试件制备过程中,合理增强激光功率有助于提高高熵合金试件微磨削表面轮廓的平整度,从而提升微磨削加工表面质量。

图7为不同激光功率制备高熵合金试件微磨削表面形貌图。 $P=200$ W的试件的微磨削表面发生了较严重的撕裂,呈现鱼鳞状纹理,磨粒切削轨迹模糊,微磨削表面的加工质量较差。从二维和三维表面可以看出, $P=350$ W的

试件的微磨削表面的撕裂减轻,鱼鳞纹理减少,同时出现相对明显的耕犁沟壑与磨粒切削轨迹,表面缺陷相对减少,表面质量相对提高。表面形貌随激光功率的变化在表面粗糙度上也有体现,即磨削表面粗糙度 R_a 和 R_z 随激光功率的增大而减小。

图8为不同激光功率高熵合金的磨削截面。当 $P=200$ W时,大尺寸圆孔和长条形气孔较多,微磨削作用下这些缺陷易发生扩展并与表面相连,形成表面凹坑与裂纹,导致亚表面损伤严重;随着激光功率提高至250 W和350 W时,气孔诱导的亚表面裂纹明显减少,截面连续性改善;而当 $P=400$ W时,由于引入过高功率产生的原生裂纹成为磨削截面的主要缺陷,说明激光功率通过调控制备阶段的孔洞和裂纹分布,进而影响微磨削亚表面损伤程度。

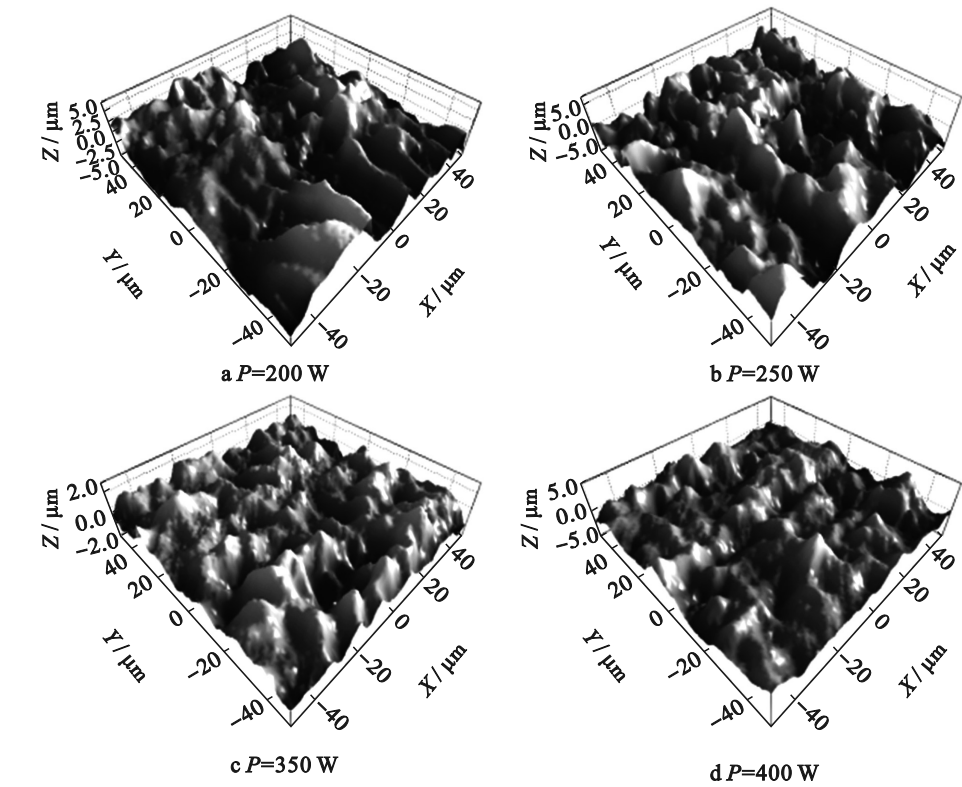


图6 不同激光功率制备高熵合金的磨削表面三维轮廓形貌图

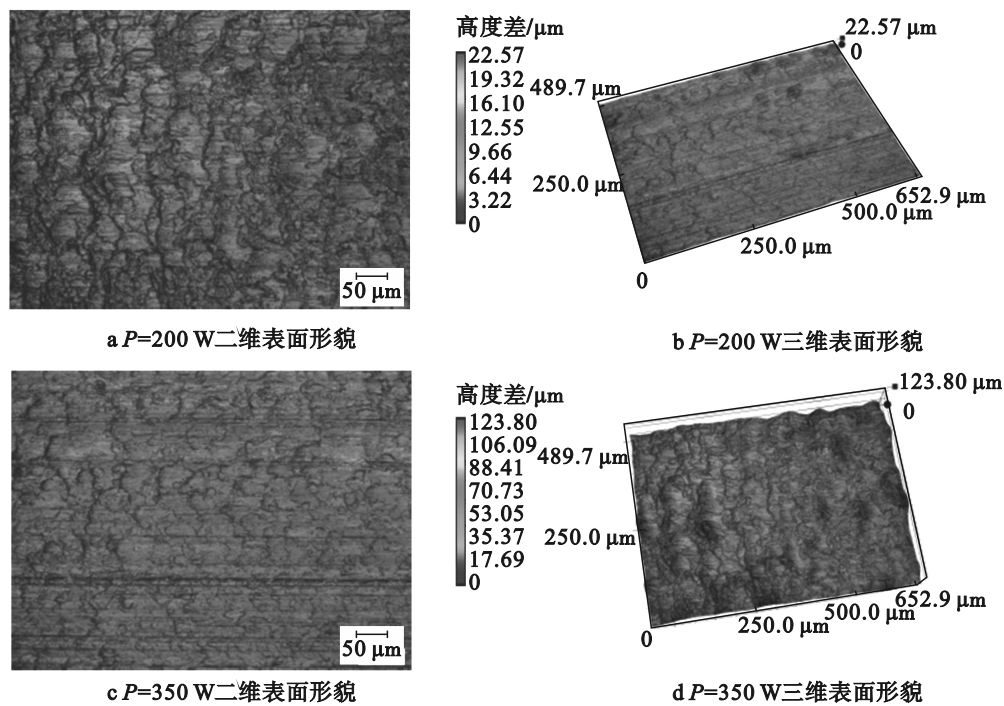


图7 不同激光功率制备高熵合金试件微磨削表面形貌图

2.3 扫描间距对微磨削性能的影响

图9为激光扫描间距对微磨削力的影响。不同激光扫描间距下制备的4个FeCoCrNiAl_{0.5}高熵合金试件在磨削过程中的微磨削力随着

进给速度的增大而整体呈现增大的趋势。从图9可以看出, $h=0.05\text{ mm}$ 时试件在加工过程中生成的微磨削力最高。随着制备过程中扫描间距的增大,试件微磨削过程中的微磨削力

整体呈现下降趋势。这主要是由于随着激光扫描间距的增大,材料内部裂纹缺陷增加,导

致材料的强度逐渐减小,加工时所产生的微磨削力也逐渐减小。

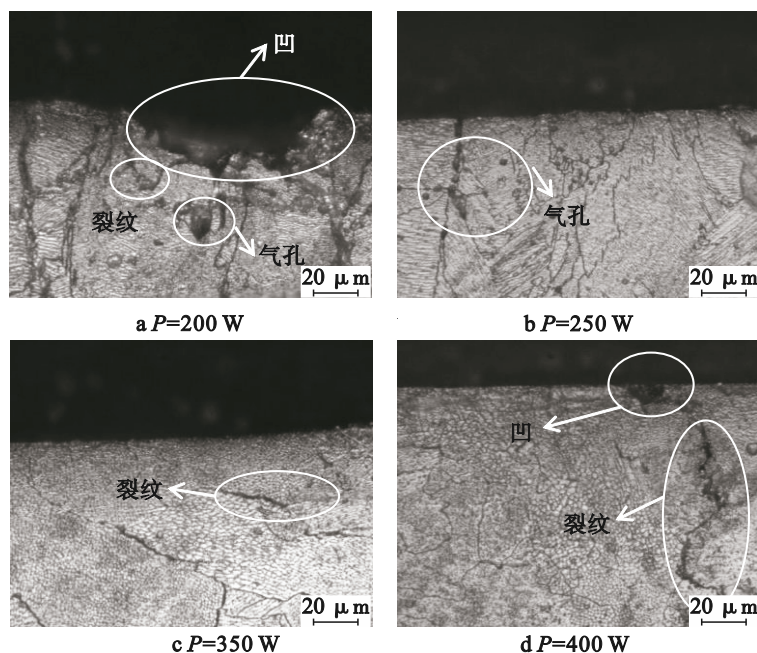


图 8 不同激光功率高熵合金的磨削截面

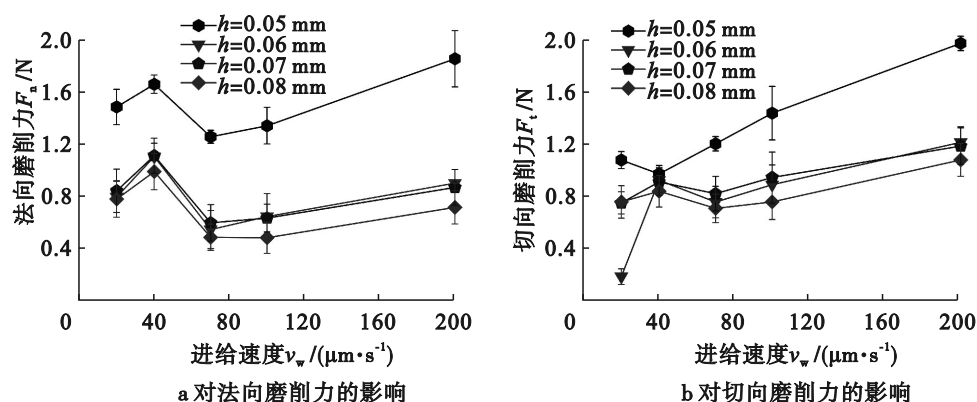


图 9 激光扫描间距对微磨削力的影响

如图 10 所示,在进给速度较小时,4 个试件的表面粗糙度 R_a 和 R_z 接近,而随着进给速度增大,表面粗糙度 R_a 和 R_z 逐渐产生较大变化。随着制备过程中激光扫描间距的增加,微磨削加工试件得到的表面粗糙度也相应增加。在进给速度从 $20 \mu\text{m/s}$ 增大到 $200 \mu\text{m/s}$ 过程中,激光扫描间距为 0.05 mm 试件的 R_a 和 R_z 分别从 $0.723 \mu\text{m}$ 和 $5.75 \mu\text{m}$ 增大到 $1.563 \mu\text{m}$ 和 $10.707 \mu\text{m}$,激光扫描间距为 0.07 mm 试件的 R_a 和 R_z 分别从 $0.592 \mu\text{m}$ 和 $4.745 \mu\text{m}$ 增大到 $2.185 \mu\text{m}$ 和 $15.7 \mu\text{m}$ 。因此,合理降低激光扫

描间距有助于改善 $\text{FeCoCrNiAl}_{0.5}$ 材料的微磨削加工表面质量。

图 11 为不同激光扫描间距高熵合金表面三维形貌图。由图 11 可知,随着扫描间距的增大,磨削表面凹坑加深,峰谷波动幅值增大,轮廓特征趋于杂乱无序,表面平整度与一致性显著降低。这说明过大的扫描间距导致内部裂纹与孔洞集中,在磨削时易产生局部塌陷和断裂,从而恶化表面质量。

图 12 为不同激光扫描间距下制备试件的磨削截面。 $h=0.08 \text{ mm}$ 试件的磨削表面鱼鳞状

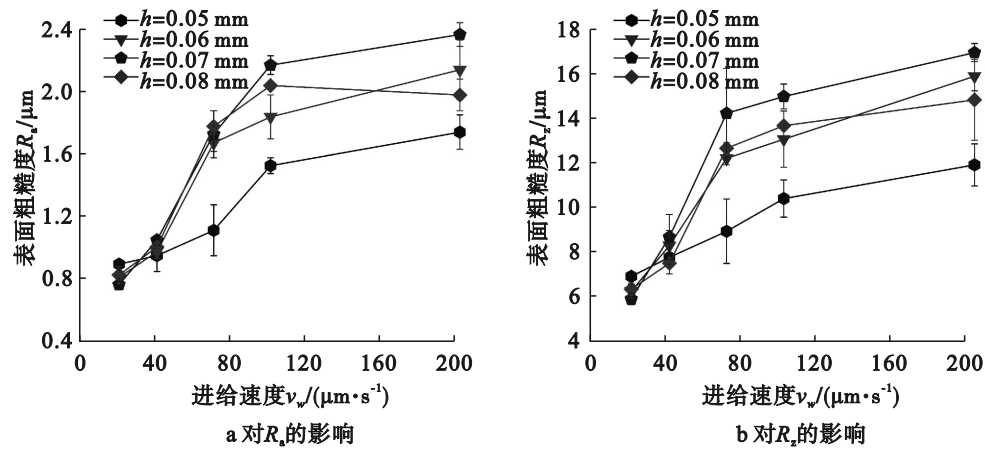


图 10 激光扫描间距对表面粗糙度的影响

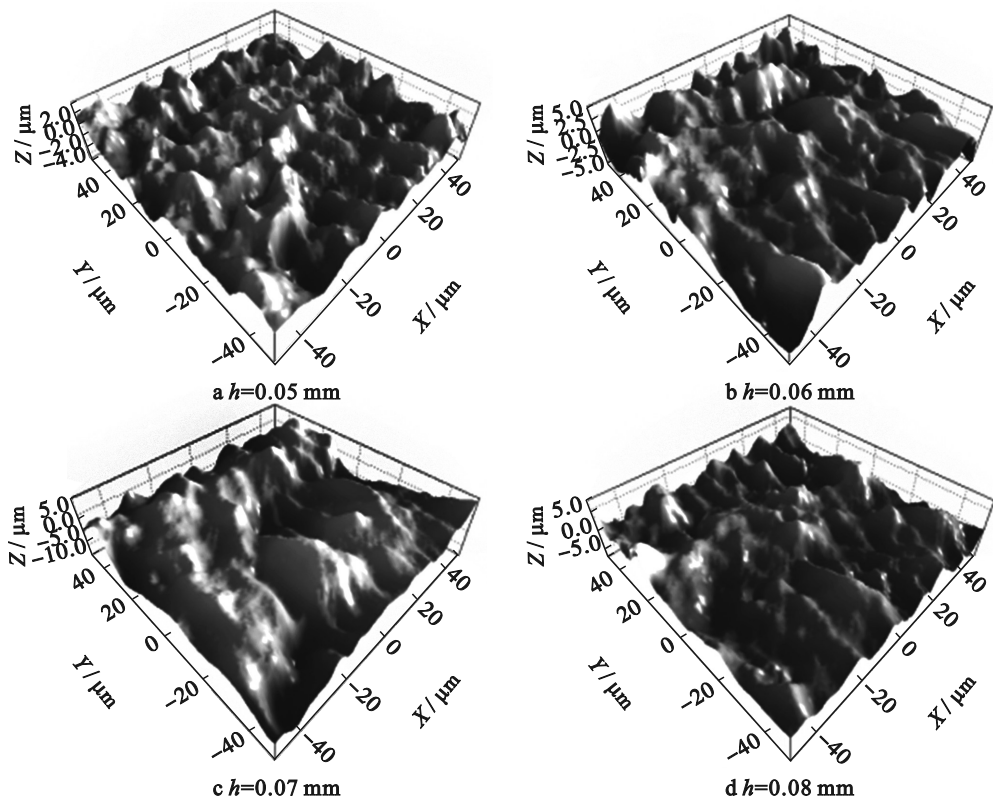


图 11 不同激光扫描间距高熵合金的磨削表面三维形貌图

特征明显,撕裂区、堆积区广泛分布,磨粒切削轨迹难以辨识,整体表面质量较差;而 $h=0.05$ mm 试件的磨削表面鱼鳞纹状特征相对较轻,磨削纹理较为清晰,表面质量显著提升。图 12 的磨削截面进一步表明,随着扫描间距的增大,原生微裂纹数量与尺寸显著增大,许多裂纹在磨削过程中进一步扩展并贯穿至表面,加重了亚表面损伤。因此,较小的扫描间距有利于抑制制备缺陷,避免在磨削中发生更严重

的损伤。

2.4 扫描速度对微磨削性能的影响

图 13 为激光扫描速度对微磨削力的影响。不同激光扫描速度制备的高熵合金试件在磨削过程中的微磨削力随着进给速度的增大出现增大的趋势。随着试件制备时激光扫描速度的增大,试件磨削中产生的微磨削力整体上呈现先增大后减小的趋势。激光扫描速度决定了激光停留在粉末表面的时间,随着激光扫

描速度的增大,材料内部的缺陷减少,材料强度提高,因此加工时的微磨削力增大。而当扫描速度较小时,用于熔化粉末的激光能量密度过大,容易产生严重的元素过烧,同时导致液滴飞溅而形成大气孔,降低材料的力学性能,

造成磨削过程中微磨削力的降低;而当扫描速度较大时,用于熔化粉末的能量密度减小,容易产生小气孔、微裂纹等缺陷,降低材料的强度,因此造成磨削过程中微磨削力的减小。

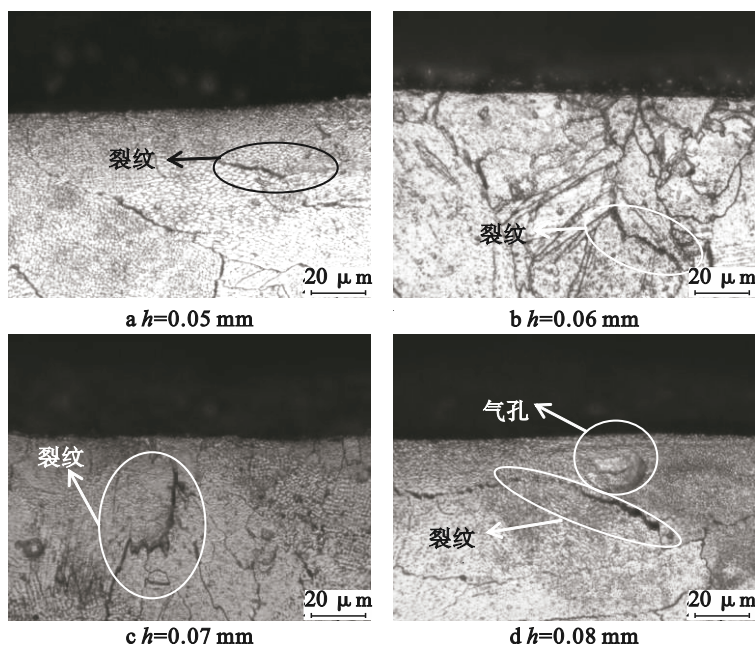


图 12 不同激光扫描间距下制备试件的磨削截面图

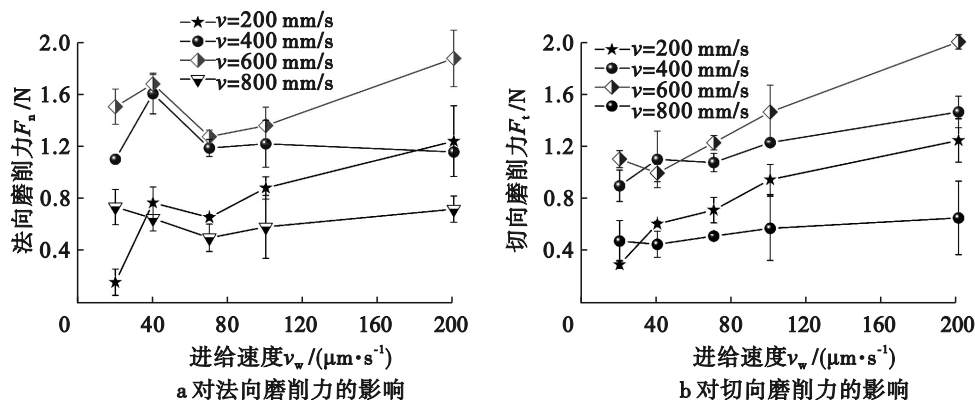


图 13 激光扫描速度对微磨削力的影响

图 14 为激光扫描速度对表面粗糙度的影响。随着制备高熵合金试件的激光扫描速度的增大,试件微磨削后的表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势。在进给速度从 $20\text{ }\mu\text{m/s}$ 增大到 $200\text{ }\mu\text{m/s}$ 的过程中,激光扫描速度为 200 mm/s 试件的 R_a 和 R_z 分别从 $1.255\text{ }\mu\text{m}$ 和 $9.825\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $13.95\text{ }\mu\text{m}$,激光扫描速度为 600 mm/s 试件的 R_a 和 R_z 分别从 $0.723\text{ }\mu\text{m}$

和 $5.75\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $1.563\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10.707\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明,激光扫描速度较小或较大情况下制备的试件都会导致较大的表面粗糙度,这是由于加工表面粗糙度与高熵合金内部的缺陷之间存在一定的关联,内部缺陷较少的材料的硬度与强度较高,这使得微磨削力增大,从而增大表面粗糙度。

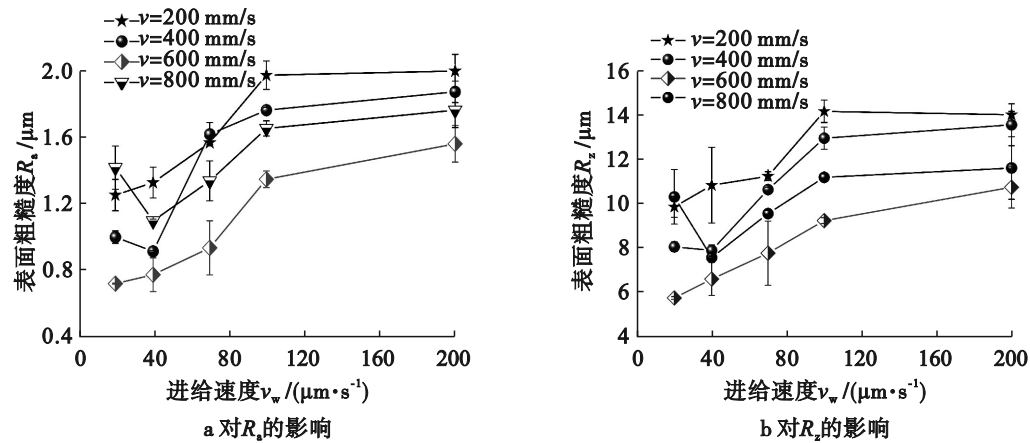


图 14 激光扫描速度对表面粗糙度的影响

图 15 为不同激光扫描速度制备的高熵合金的磨削表面三维形貌图。从图 15 可以看出,随着激光扫描速度的增大,取样点轮廓的凹坑与隆起起伏程度降低。激光扫描速度为 200 mm/s 的试件加工表面存在明显的凹坑,轮廓一致性差。当激光扫描速度为 350 mm/s 时,取样点轮廓的平整度相对较高。

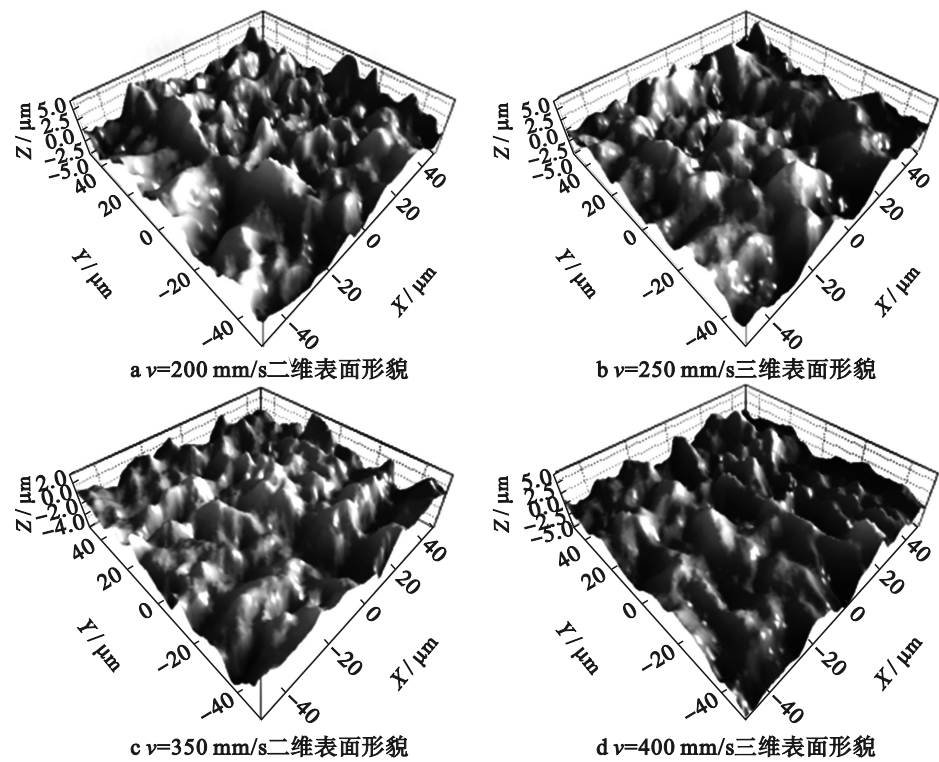


图 15 不同激光扫描速度制备的高熵合金的磨削表面三维形貌图

图 16 为不同激光扫描速度下制备的试件的微磨削加工表面形貌。当 $v=200$ mm/s 时,因能量密度过高导致 Al 元素大量挥发,内部气孔增多,材料硬度与强度减小,磨削过程中易出现细小磨屑黏附与“冷焊”现象,部分磨粒切削轨迹和鱼鳞状纹理被黏附磨屑覆盖,表面质量显著降低;当扫描速度提高至 600 mm/s 时,磨屑黏附现象明显减轻,但鱼鳞状纹理仍然存在,表明材料仍以一定的塑性去除为主。

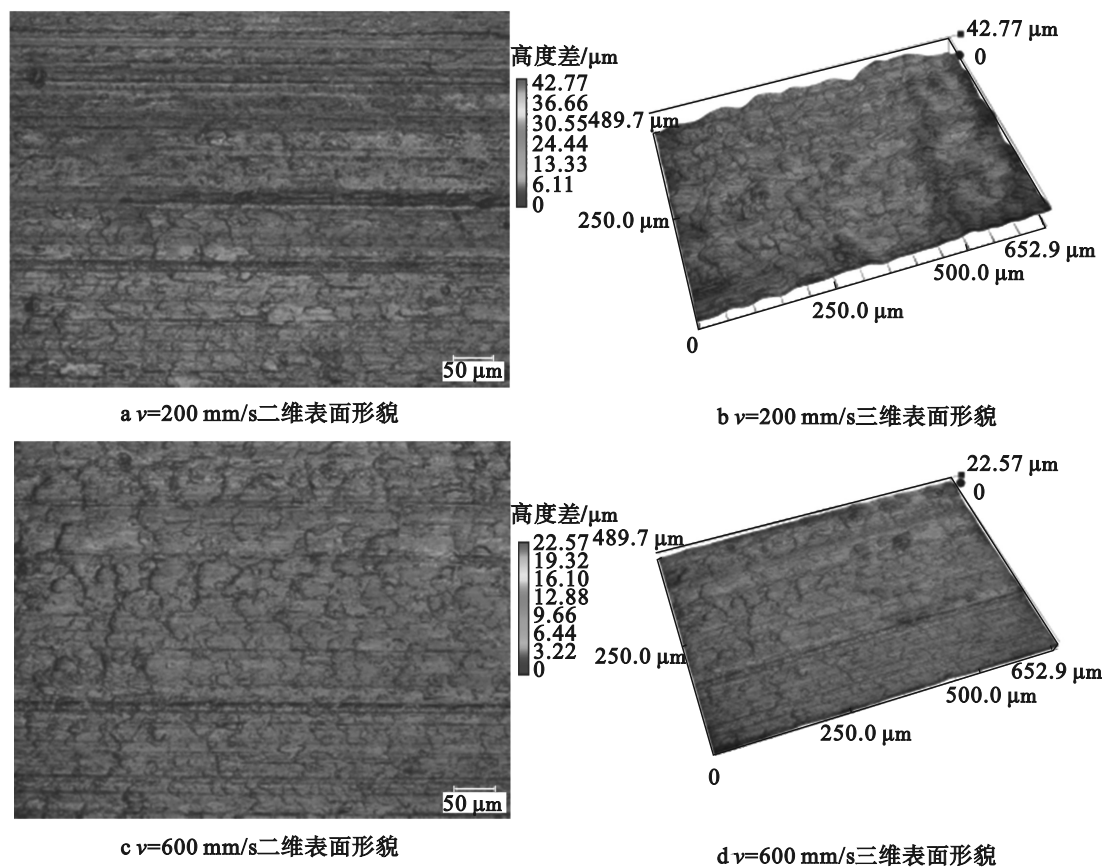


图 16 不同激光扫描速度下制备的试件的微磨削加工表面形貌

3 结论

本文以 $\text{FeCoCrNiAl}_{0.5}$ 高熵合金为研究对象,通过内部缺陷分析与微磨削单因素实验,系统研究了激光功率 P 、扫描间距 h 与扫描速度 v 对材料微磨削性能的影响规律,主要结论如下:

1) 激光功率对微磨削性能表现出“先改善、后劣化”的非线性特征。当功率由 200 W 提升至 350 W 时,高熵合金层间冶金结合增强、气孔与裂纹等缺陷减少,材料致密度与屈服强度增大,导致微磨削力增大、粗糙度下降、表面撕裂与鱼鳞状纹理减轻、磨粒轨迹更清晰;当功率提升至 400 W 时,微裂纹等缺陷增加,材料强度下降,使磨削力回落,粗糙度略升,同时原生裂纹更易在磨削中参与损伤形成并加剧亚表面缺陷。

2) 扫描间距增大将显著恶化微磨削表面

与亚表面质量。随着扫描间距从 0.05 mm 增至 0.08 mm,相邻熔道搭接率下降、裂纹与孔洞缺陷增多,使微磨削力整体下降;同时,粗糙度随扫描间距的增大而升高,三维轮廓表现为凹坑加深、峰谷波动增大、轮廓特征更无序、鱼鳞状撕裂与堆积区更明显、磨粒轨迹难以辨识。并且随着扫描间距的增大,原生微裂纹尺寸与数量越大,更易在微磨削载荷作用下扩展并向表面贯通,从而加重亚表面损伤风险。

3) 扫描速度对加工性能呈非线性影响。随扫描速度的增大,微磨削力总体呈现先增大后减小的趋势,表面粗糙度先减小后增大。当 $v=200$ mm/s 时,能量密度过高,易引发元素过烧与飞溅形成大气孔,并伴随 Al 元素逃逸导致硬度、强度下降,在微磨削中出现明显磨屑黏附与冷焊,磨粒轨迹与鱼鳞状纹理被覆盖,表面质量显著降低;当 $v=600$ mm/s 时,内部缺陷减少、材料强度提高,磨屑黏附现象得到抑制,

粗糙度降低,但仍存在一定撕裂特征;扫描速度过高时能量密度不足,小气孔与微裂纹等缺陷增多,导致强度下降并使粗糙度回升。

参考文献(References):

- [1] Yeh J W. Recent progress in high-entropy alloys [J]. *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 2006, 31(6): 633–648.
- [2] Xu Y H, Wang D Z, Wu S J, et al. Research progress on defect formation mechanism and process optimization of laser cladding high entropy alloy coatings [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 187: 112819.
- [3] 邱贺方,袁晓静,罗伟蓬,等. 增材制造 Al-CoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金研究进展[J]. *材料工程*, 2024, 52(1): 70–82.
- [4] 吴昊,于佳石,贾志强,等. 难熔高熵合金研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(2): 45–59.
- [5] Yap C Y, Chua C K, Dong Z L, et al. Review of selective laser melting: materials and applications [J]. *Applied physics reviews*, 2015, 2(4): 041101.
- [6] Jia H L, Sun H, Wang H Z, et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(9): 2413–2435.
- [7] 杨永强,王迪,吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 54–64.
- [8] 潘爱琼,张辉,王泽敏. 镍基单晶高温合金选区激光熔化成形工艺及组织[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 138–144.
- [9] Kong X G, Li Z H, Chen X T, et al. Convective heat transfer mechanism of bionic desert beetle micro-grinding tool/bone interface and micro-grinding experiment [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025, 253: 127611.
- [10] Li J, Liu F, Zhou W, et al. The influence of cracks in the coupling region of micro-grinding and laser stealth combined dicing on the quality of cutting side walls [J]. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024, 119: 856–866.
- [11] Sun K, Peng W X, Yang L L, et al. Effect of SLM processing parameters on microstructures and mechanical properties of Al_{0.5}CoCrFeNi high entropy alloys[J]. *Metals*, 2020, 10(2): 292.
- [12] Gong S Q, Zhu X M, Sun Y, et al. Experimental research on surface characteristics and subsurface damage behavior of monocrystal sapphire induced by helical micro abrasive tools[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(15): 21459–21472.
- [13] Ren Y H, Li C F, Li W, et al. Study on micro-grinding quality in micro-grinding tool for single crystal silicon[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42: 246–256.
- [14] Liu Y, Gong Y D, Sun Y, et al. Microgrinding characteristics of Zr-based bulk metallic glasses [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5/6/7/8): 2401–2417.
- [15] Guo Y N, Su H J, Yang P X, et al. A review of emerging metallic system for high-energy beam additive manufacturing: Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(9): 1407–1423.
- [16] Li D M, Zhang X, Qin R X, et al. Influence of processing parameters on AlSi₁₀Mg lattice structure during selective laser melting: manufacturing defects, thermal behavior and compression properties [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109182.
- [17] Gu P F, Qi T B, Chen L, et al. Manufacturing and analysis of VNbMoTaW refractory high-entropy alloy fabricated by selective laser melting [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, 105: 105834.
- [18] Hojjatzadeh S M H, Parab N D, Guo Q L, et al. Direct observation of pore formation mechanisms during LPBF additive manufacturing process and high energy density laser welding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 153: 103555.
- [19] 徐勇勇,孙琨,邹增琪,等. 选区激光熔化制备 Al_{0.5}CoCrFeNi 高熵合金的工艺参数及组织性能[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(1): 151–157.

(责任编辑:吴萍 英文审校:侯宁)