

搅拌对沉积态 2024 铝合金组织与性能演变的影响

吴凡¹, 万桂林², 杨洋¹, 黄佳强², 陈玮^{1*}, 孙中刚^{2**}¹中国航空制造技术研究院, 北京 100024;²南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816

摘要 利用搅拌摩擦技术,制备了不同工艺复合修复的激光熔化沉积 2024 铝合金,并且对这种复合工艺下制备的铝合金样品的显微组织和力学性能进行了研究。采用了直径为 10 mm 的搅拌头,搅拌摩擦工艺的旋转速度和进给速度分别为 800 r/min 和 50 mm/min。利用光学显微镜和维氏硬度计研究了复合制造 2024 铝合金的显微组织和力学性能。结果表明:与激光熔化沉积相比,经过 80% 搭接率搅拌的 2024 铝合金的显微组织得到了细化,呈现梯度分布;时效处理后,基板区的硬度为 135~140 HV,得到了显著提高,且经过搅拌后二次沉积的变形区域硬度可达到 160 HV,同时随着沉积次数的增加,硬度出现梯度分布。

关键词 激光技术; 铝合金; 增材制造; 搅拌摩擦增材制造; 人工时效; 固溶处理

中图分类号 TG146.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1402805

1 引言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 通过对实体结构模型进行三维切片,然后采用不同的热源将粉末或者丝材熔化后沉积于基板上,逐层堆积形成实体结构,相比传统制造技术,无需模具,制造流程短,加工效率低,因而被广泛用于航空航天等领域^[1-3]。激光熔化沉积 (Laser Melting Deposition, LMD) 是金属增材制造领域中得到最广泛应用的技术之一,采用高能量的激光将同轴送进的金属粉末熔化,并通过打印路径设计实现不同结构件的快速制造,既可以实现毫米级零部件的修复,还可以实现大型结构件的直接成形制备^[4-5]。LMD 技术是钛合金、铝合金、钢等大部分金属材料重要的增材制造方法,特别是在大型结构件制造领域应用潜力巨大。

铝合金具有低密度、高比强度、高抗腐蚀性及优异的加工性能等,是航空航天、汽车、轨道交通、船舶等领域的重要结构材料^[6-7]。其中,2024 是应用最为广泛的可热处理强化的 Al-Cu-Mg 系变形铝合金之一,是飞机蒙皮等结构的重要材料,因此其制造加工工艺被广泛关注^[8]。但 Al-Cu-Mg 合金的凝固温度范围较大,容易产生裂纹,同时其润湿性较差,在成型的过程中容易形成氧化膜,从而导致铝合金内部产生气孔、热裂倾向大等影响铝合金性能的缺陷,限制了其利用激光一体化成型制造的优势。针对铝合金激光增材制造

冶金缺陷问题,国内外学者进行了大量的探索研究。张虎等^[9]在研究 2024 铝合金激光选区熔化时发现,在能量密度达到 340 J/mm³ 时,粉末充分熔化且有足够的液相进入重沉积层间的间隙,组织致密度可以超过 99.8%,抗拉强度为 412 MPa,屈服强度为 276 MPa。李吉帅等^[10]在激光选区熔化 (SLM) 技术形成的致密 A12024 构件的基础上,对得到的 A12024 的构件进行热处理,得到沉淀强化的构件,抗拉强度达到 455 MPa,屈服强度为 368 MPa,超过了 A12024 的锻件水平。谷涛^[11]利用 LMD 技术制备了 2024 铝合金,发现组织不均匀,其工艺控制不当会产生粗大的 Al₂₀Cu₂Mn₃ 析出相,导致力学性能下降。综上,2024 铝合金作为应用最为广泛的变形铝合金,其增材制造研究尚不够系统,且整体成型组织缺陷难以控制,探索其善增材制造组织与缺陷的方法十分重要。

针对铝合金激光熔化增材制造中冶金组织与缺陷等问题,国内外学者提出了搅拌摩擦增材^[12-15]的固相增材方式,基于搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 理论,进一步改善铝合金激光熔化增材质量。搅拌摩擦焊通过搅拌头 (由搅拌针和轴肩组成) 的高速旋转,将焊缝内的丝材温度升高,从而软化丝材,最终实现材料连接^[15-17]。搅拌摩擦过程中不存在金属的熔化和凝固^[18-20],因此,将搅拌引入激光熔化沉积过程,对于改善组织,促进组织细化,避免激光成型的冶金缺陷具有重要意义。此外,张志强等^[21]通过引入超声辅

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2021-12-19; 录用日期: 2022-02-17

基金项目: 航空科学基金 (202000360T40001)

通信作者: *werner_nju@163.com; **sunzgg@njtech.edu.cn

助搅拌摩擦焊,对 7075 铝合金搅拌区的组织进行了研究,其研究表明,超声辅助搅拌摩擦焊优于搅拌摩擦焊,超声辅助的搅拌区组织更细小,疏松缺陷更少。还有 Baradarani 等^[22]也研究了超声对镁合金显微组织的影响,结果显示超声能使晶粒更细小。

鉴于上述情况,本文以高强变形 2024 铝合金为研究对象,在系统研究其激光熔化沉积工艺参数的基础上,借助搅拌摩擦对其沉积层进行处理,分析搅拌变形对其组织形成及其演变的影响,并通过热处理及处理后的硬度变化,研究了其复合制造工艺方法。

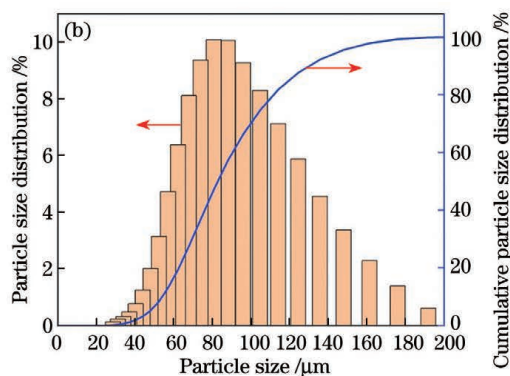
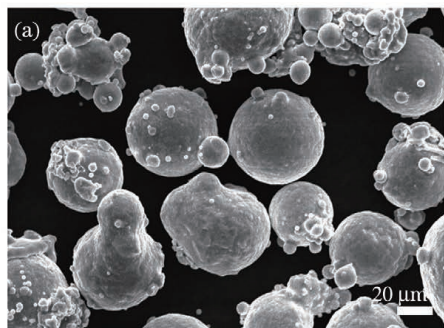


图 1 2024 铝合金粉末。(a)SEM 图;(b)粒度分布

Fig. 1 2024 aluminum alloy powder. (a) SEM image; (b) size distribution

表 1 2024 铝合金粉末的化学成分^[23]

Table 1 Chemical compositions of Al 2024 alloy powder^[23]

Element	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Ti
Mass fraction / %	Bal.	4.47	1.16	0.6	0.22	0.26	0.05	0.01

实验使用 RC-LMD-8060 激光熔化沉积系统,其激光器功率为 3 kW,光斑直径为 3 mm,通过同轴送粉加工头、气载式双桶送粉器、数控加工平台以及高功率水冷机等完成打印工作。在打印过程中,往密闭的工作舱中输送纯氩(氩气体积分数 $\geq 99.99\%$)以保证实验环境内的氧含量在较低的水平内,防止 2024 铝合金打印过程的高温氧化,采用正交实验法进行单道实现,其参数如表 2 所示,选择最优参数进行复合工艺验证实验。

2.2 搅拌摩擦处理

完成激光熔化沉积后,借助搅拌摩擦焊接装置,对其沉积组织进行搅拌,实现沉积组织的大塑性变形,使用的搅拌头直径为 10 mm,结合前期实验结果,选择的沉积层搅拌的工艺参数如下:旋转速度为 800 r/min,进给速度为 50 mm/min,并按照轴肩搭接率 80% 进行搅拌,搅拌深度为 3 mm,确保沉积层组织的完全搅拌,沉积层搅拌后,再次重复激光熔化沉积过程,对其变形组织进行重熔,观察其塑性变形后的组织演变。

2.3 微观组织与硬度检测

首先将样品用线切割机切割成 10 mm \times 10 mm \times 10 mm 厚度的样块,并分析其单道形貌。对金相试样依次用 600#、800#、1000#、1200#、1500#、3000#

2 实验方法与材料

2.1 激光熔化 2024 合金制备

本实验选用真空气雾化制备的 2024 铝合金球形粉末,粒径范围为 53~150 μm ,粉末微观形貌如图 1(a)所示,其粒径分布图如图 1(b)所示,主要化学成分如表 1 所示。利用激光熔化沉积进行 2024 铝合金增材工艺探索,然后对沉积层进行搅拌处理。在激光熔化沉积过程中,基板选择轧制态的 2024 铝合金板材,并进行表面喷砂处理,去除表面氧化物等。

砂纸打磨并进行机械抛光,随后用腐蚀液(HF、HNO₃、HCl 和 H₂O 的体积比为 2:5:3:90)对样品进行腐蚀,最后观察并分析金相组织。取热处理试样放入马弗炉中先固溶处理,其固溶温度选择 2024 常用的标准温度 490 $^{\circ}\text{C}$,保温时间 30 min 后淬火,淬火转移时间在 15 s 以内。取部分试样进行人工时效处理,时效温度选择 190 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 12 h。采用金相法分析其热处理后的微观组织演变,并进行硬度测试,微观组织采用 Zeiss-AxioCam MRc5 光学显微镜(OM)表征。显微硬度采用维氏显微硬度计表征。

3 结果与讨论

3.1 激光熔化沉积 2024 合金的单道熔池形貌演变

选择激光功率(P)为 1800,2000,2200 W,光斑直径(D)为 1.6,1.8,2.0 mm,扫描速度(V)为 360,480,600 mm/s 进行正交实验。图 2 为不同激光熔化沉积参数下 2024 合金单道熔池的显微形貌,其熔深(H)、熔宽(W)如表 2 所示。可以看出,扫描速度对单道沉积层的影响较为显著。对比图 1(a)~(g)可知,扫描速度对熔池形貌的影响较大,扫描速度达到 600 mm/s 时,熔池的熔宽、熔深明显增大;在激光功率为 2200 W 时,随着扫描速度的增加,单道高度由 0.29 mm 增

加至 0.37 mm。扫描速度不变时,随着激光功率的增大,熔池的熔宽和熔深也相应地增加,但激光功率对熔池形貌的影响比扫描速度的影响小。以上归因于铝合金本身对激光的吸收率较低,导热系数过大,在光斑直径恒定的情况下,铝合金对激光功率的要求较高,成形较为困难,然而一旦成形成功,在

某范围内,激光功率的升高对沉积宏观形貌的影响较小。此外,当激光扫描速度慢时,能量损耗大,散热多,导致熔宽与熔深变小,对铝合金成形不利;反之,当激光扫描速度快时,能量损耗小,散热少,熔宽与熔深增大,使沉积层与基材结合牢固,成形效果良好。

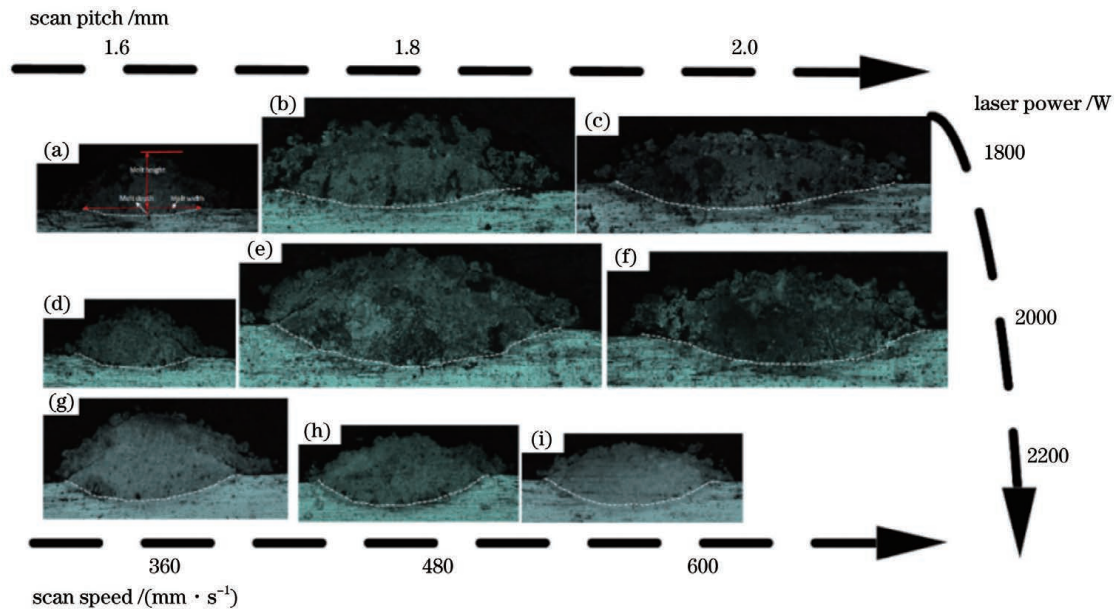


图 2 激光熔化沉积合金的单道截面形貌及金相对比

Fig. 2 Single-channel morphology and metallographic contrast of LMD alloy

表 2 2024 铝合金正交实验的参数

Table 2 Orthogonal experimental parameters of 2024 alloy

No.	P / W	$V / (mm \cdot s^{-1})$	D / mm	$W / \mu m$	$H / \mu m$
1	1800	360	1.6	1487.10	98.53
2	1800	480	1.8	2897.07	264.03
3	1800	600	2.0	3418.55	334.83
4	2000	360	1.6	1962.98	181.88
5	2000	480	1.8	3802.88	454.80
6	2000	600	2.0	4034.22	414.47
7	2200	360	1.6	1962.98	291.76
8	2200	480	1.8	3802.88	347.51
9	2200	600	2.0	4034.22	378.91

3.2 激光熔化沉积 2024 合金的多道显微组织

采用搭接率 50% 进行多道沉积实验,图 3(a)~(i)分别为 1~9 号不同激光熔化沉积工艺参数下 2024 合金多道次沉积态的显微组织演变图。结果表明:单层多道次激光熔化沉积后微观组织主要分为两个区域,即基板与沉积层界面结合区(A)和稳定打印组织区域(B)。其中,基板结合区域的显微组织具有沿着沉积方向的择优取向,且多为柱状晶结构,当功率较低($P=1800 W$)时,随着扫描速度的增加,其择优取向更为显著,基板与沉积界面结合处的柱状晶显著,但同

时可以发现,随着扫描速度的增加,沉积区域内晶粒的整体等轴化趋势明显。功率为 2200 W 的增材区组织晶粒随着扫描速度的增加而变小,呈现细小均匀的等轴晶组织。铝合金沉积组织的形成与受热循环密切相关。在激光熔化沉积过程中,熔化速度快,由于激光沉积的是微小熔池,其冷却速度往往达到 $10^2 \sim 10^4 K/s^{[11]}$,因此其凝固过程与焊接的小孔效应相当,容易产生柱状晶。尽管基板处的铝合金散热较快,初始温度低,但是多次循环受热后,在基板与沉积层界面结合处,其晶粒仍出现了较为明显的择优取向,最终形成了柱状晶,而

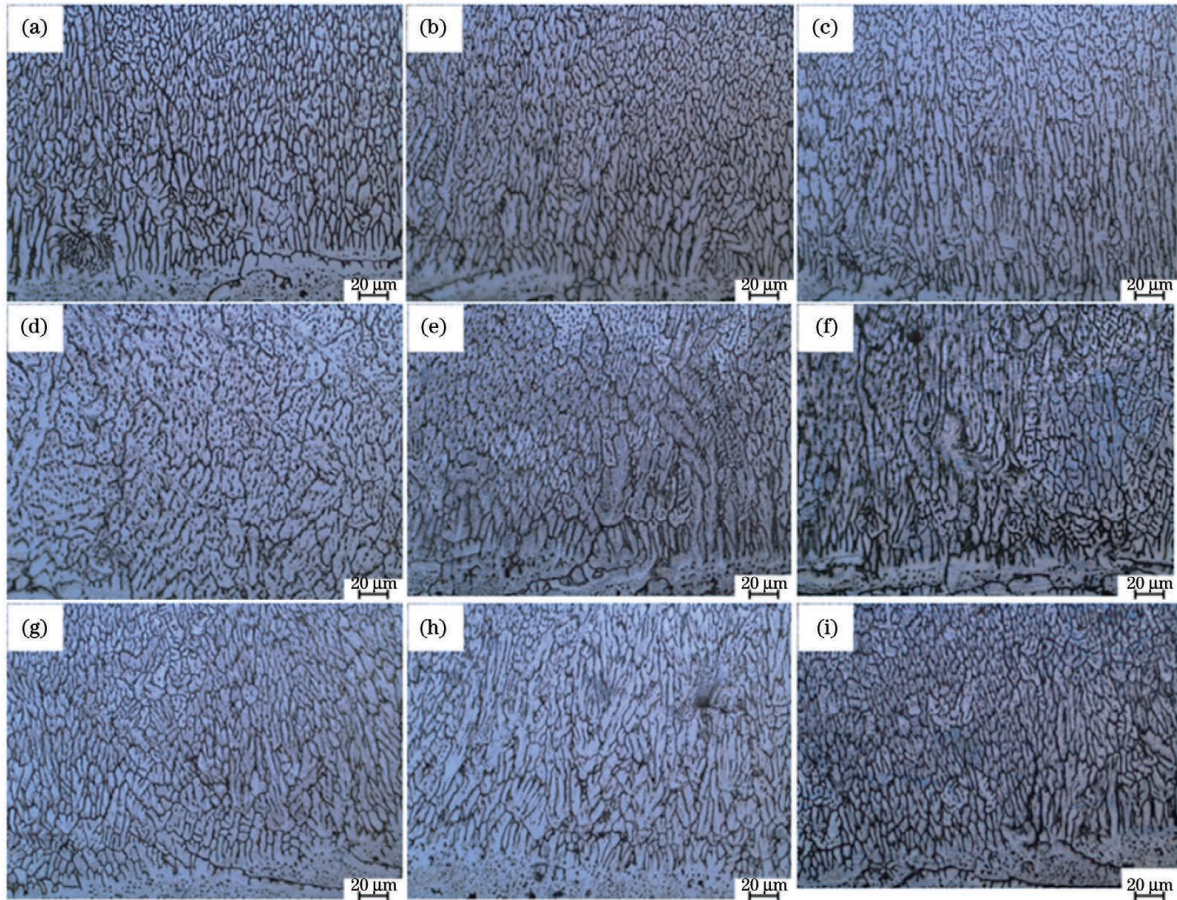


图 3 激光熔化沉积态的显微组织对比。(a) $P=1800\text{ W}$, $V=360\text{ mm/s}$, $D=1.6\text{ mm}$; (b) $P=1800\text{ W}$, $V=480\text{ mm/s}$, $D=1.8\text{ mm}$; (c) $P=1800\text{ W}$, $V=600\text{ mm/s}$, $D=2.0\text{ mm}$; (d) $P=2000\text{ W}$, $V=360\text{ mm/s}$, $D=1.6\text{ mm}$; (e) $P=2000\text{ W}$, $V=480\text{ mm/s}$, $D=1.8\text{ mm}$; (f) $P=2000\text{ W}$, $V=600\text{ mm/s}$, $D=2.0\text{ mm}$; (g) $P=2200\text{ W}$, $V=360\text{ mm/s}$, $D=1.6\text{ mm}$; (h) $P=2200\text{ W}$, $V=480\text{ mm/s}$, $D=1.8\text{ mm}$; (i) $P=2200\text{ W}$, $V=600\text{ mm/s}$, $D=2.0\text{ mm}$

Fig. 3 Microstructural comparison of 2024 alloy obtained by LMD. (a) $P=1800\text{ W}$, $V=360\text{ mm/s}$, $D=1.6\text{ mm}$; (b) $P=1800\text{ W}$, $V=480\text{ mm/s}$, $D=1.8\text{ mm}$; (c) $P=1800\text{ W}$, $V=600\text{ mm/s}$, $D=2.0\text{ mm}$; (d) $P=2000\text{ W}$, $V=360\text{ mm/s}$, $D=1.6\text{ mm}$; (e) $P=2000\text{ W}$, $V=480\text{ mm/s}$, $D=1.8\text{ mm}$; (f) $P=2000\text{ W}$, $V=600\text{ mm/s}$, $D=2.0\text{ mm}$; (g) $P=2200\text{ W}$, $V=360\text{ mm/s}$, $D=1.6\text{ mm}$; (h) $P=2200\text{ W}$, $V=480\text{ mm/s}$, $D=1.8\text{ mm}$; (i) $P=2200\text{ W}$, $V=600\text{ mm/s}$, $D=2.0\text{ mm}$

在单层多道沉积下,沉积层的上部则由于冷却速度较快,形成了等轴晶。循环多层沉积时在循环受热作用下将形成柱状晶,因此,在沉积单层后进行搅拌有利于重熔后的再结晶细化。结合熔池形貌及单层多道实验结果,确定功率 2200 W、光斑直径 2.0 mm、扫面速度 600 mm/s、搭接率 50% 为最终的复合工艺参数。

3.3 激光熔化沉积-搅拌复合处理后 2024 合金的显微组织演变

选择前期铝合金搅拌摩擦获取的工艺参数(旋转速度为 800 r/min,进给速度为 50 mm/min),为保障整个沉积区域的均匀搅拌,选择 80% 的搭接率进行循环搅拌。激光熔化沉积-搅拌复合处理后沉积的微观组织如图 4 所示,可以看出,整个区域内发生了均匀的变形,受工艺的限制,单层边缘区域未能得到搅拌。经过搅拌处理后,靠近块体边缘位置出现明显的搅拌痕迹,如图 4(a1)所示,其搅拌区与未搅拌区的组织差异显著,搅拌处晶粒显著细化,在金相显微镜下难以辨别

晶粒尺寸。在基板与沉积层结合处,仍保留了部分沉积态的柱状晶,如图 4(a2)所示,这主要是搅拌深度与搅拌搭接区域内部分变形不足和搅拌深度不够造成的。从基板界面结合处的沉积方向,可以看到明显的具有梯度结构的晶粒细化。沿梯度方向,各过渡层之间的结合良好,组织由基板处的少量柱状晶转变为极其细小的等轴晶。沉积层组织顶部受到搅拌针强烈的机械搅拌作用,摩擦生热,在搅拌过程中不仅发生了塑性变形,组织细化,其组织内部在热循环作用下达到了临界变形量并发生了动态再结晶^[24-25]。随着搅拌次数的增加,其沉积层内的温度不断升高,与传统的搅拌摩擦焊接一样,在强烈的塑性变形下由于位错密度较大,组织内开始不断产生晶核,动态再结晶所形成的晶粒来不及长大,因此形成细小均匀的等轴晶。

3.4 激光熔化沉积-搅拌-沉积处理后多道复合显微结构的演变

对沉积层完成搅拌后,取下样品进行二次激光

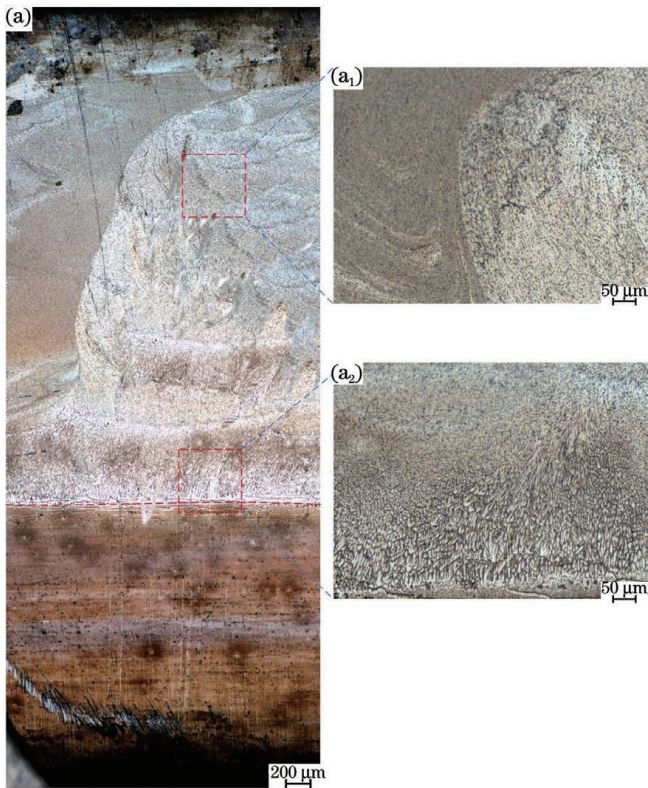


图 4 激光熔化沉积-搅拌后的微观结构

Fig. 4 Microstructures after LMD-stirring

熔化沉积,图 5 为二次激光熔化沉积后沿着沉积方向的截面的微观组织分布图。结果表明,沿着沉积方向,在搅拌摩擦-激光熔化沉积复合处理下,沉积层组织包含四个特征区域:搅拌轴肩影响区、二次激光熔化与搅拌界面结合区、二次沉积稳定区、基板界面结合区。其四个典型的复合增材 2024 铝合金组织分别如图 5(a1)、(a2)、(a3)、(a4)所示。由图 5(a1)可知,二次激光熔化沉积后,其顶部组织相比直接沉积的组织晶粒细化显著,且分布均匀;在二次沉积与搅拌界面结合处,在搅拌摩擦侧出现了具有晶粒梯度分布的等轴晶粒,如图 5(a2)所示,在二次激光沉积处侧,首先出现了沿着熔池方向的微小柱状晶后迅速变形等轴化;在搅拌核心区域内,在激光熔化沉积的二次受热影响下,变形的晶粒略有长大,如图 5(a3)所示,基板结合处变化较小,二次熔化的热力对其影响较小,与搅拌后的组织相近^[26]。搅拌与二次激光沉积复合合金界面处的组织出现梯度分布的晶粒,其主要原因在于,激光熔化沉积后搅拌带来的大量冶金缺陷在二次重熔及受热过程中作为形核质点,为晶粒的凝固生长带来了大量的形核质点;同时这些形核质点被卷入顶部熔池区,造成顶部沉积层组织的进一步细化。经过循环激光熔化沉积-搅拌-激光熔化沉积后,微观组织在宏观上呈现出超细晶、细晶、等轴晶交替的梯度状态,这也表明,搅拌-激光沉积复合处理对于制备梯度结构材料具有重要意义^[27]。

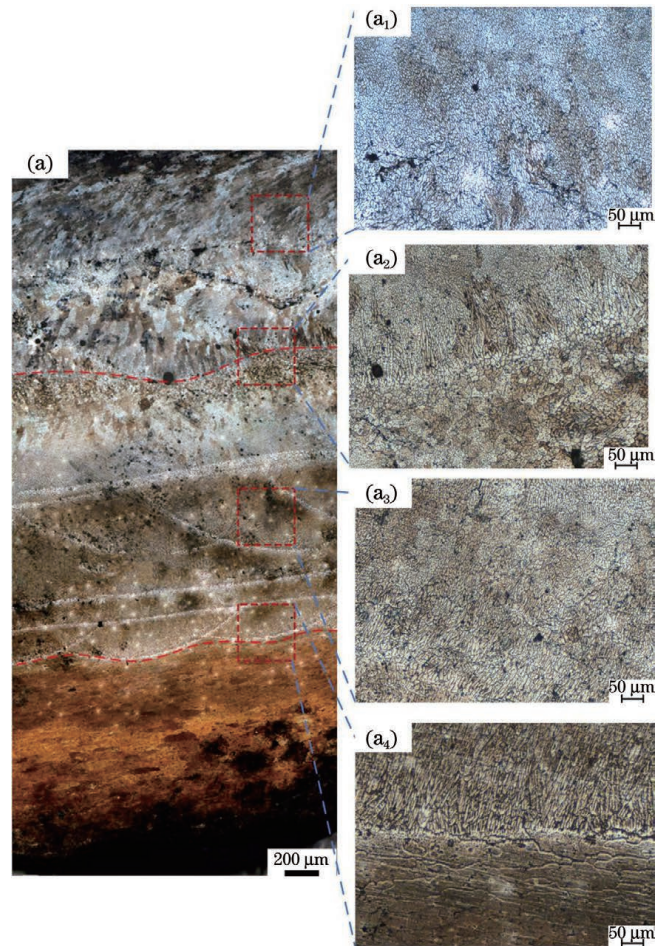


图 5 垂直激光熔化沉积-搅拌-沉积合金的截面微观结构

Fig. 5 Cross-sectional microstructures of LMD-stirring-deposition alloy

3.5 复合增材后 2024 合金固溶时效显微组织演变

复合成型后对沉积态组织进行了固溶+人工时效处理,获得的 T6 状态合金的显微组织如图 6 所示。固溶热处理后,合金整体晶粒尺寸长大,基板经过热处理后同样出现明显的析出相颗粒[图 6(a)],结合形貌,我们认为析出相主要是 θ 相 Al_2Cu ,这是 2024 合金的主要析出相,基板材料沉淀析出相尺寸较大,且多为晶界处的析出相,这与其制造过程密不可分^[28]。激光-搅拌复合区域内的 2024 合金晶粒整体仍为等轴组织,且晶粒较为细小,其微观组织分布与沉积态相似,仍然分为四个区域,且不同区域内的晶粒仍呈现梯度分布,二次沉积顶层区域内的沉积态组织仍为等轴组织, θ 相 Al_2Cu 相比基板处的更为细小,且分布主要集中在晶内;在搅拌与沉积界面处[图 6(c)],搅拌区域内的晶粒仍然为等轴晶,且呈现梯度分布,沉积后呈现出外延柱状生长枝晶组织特点,枝晶具有一定的方向性[图 6(b)、(c)],析出相也十分细小。搅拌区域内的组织细小[图 6(d)],并出现了再结晶长大,析出相多为晶内析出,与沉积态相比,枝晶间的析出相有一定的溶解, Al_2Cu 更细小,且呈均匀弥散分布。

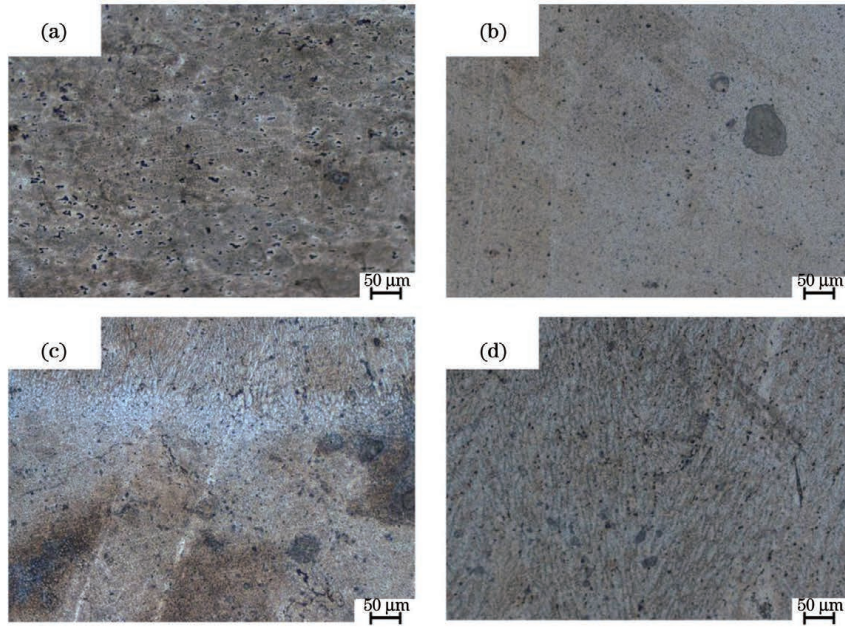


图 6 时效合金的显微组织:(a)基板;(b)二次沉积后的顶部区域;(c)搅拌与沉积后的界面处;(d)搅拌区域

Fig. 6 Microstructures of aging alloy. (a) Substrate; (b) top area after secondary deposition; (c) interface after deposition and stirring; (d) stirring area

3.6 复合增材制造合金热处理后的硬度分布规律

激光熔化沉积后铝合金未能达到最终使用状态,因此需要对其进行热处理以保障其最终性能,但是 2024 合金的激光熔化沉积研究较少,其热处理制度需要系统研究。为此对沉积态组织进行固溶+自然时效和人工时效处理。铝合金硬度是其性能的重要表征,实际生产中常用其作为检验性能的主要手段。因此,本文利用硬度变化来研究热处理制度及制造工艺对其

性能的影响。图 7 所示为激光熔化沉积-搅拌-激光熔化沉积复合工艺下 2024 合金固溶-人工时效后的显微硬度。图 7(a)为硬度测试的主要区域,A'、B'和 C'分别代表基板区域、沉积后的搅拌区和搅拌后的二次沉积区。按照金相组织特征及其分布,首先对基板处进行测试,对应区域内选择 5 个点进行测试,如图 7(c)、(d)所示。主要考量非沉积基板的硬度变化,结果表明,基板固溶+人工时效后硬度主要为 135~140 HV,

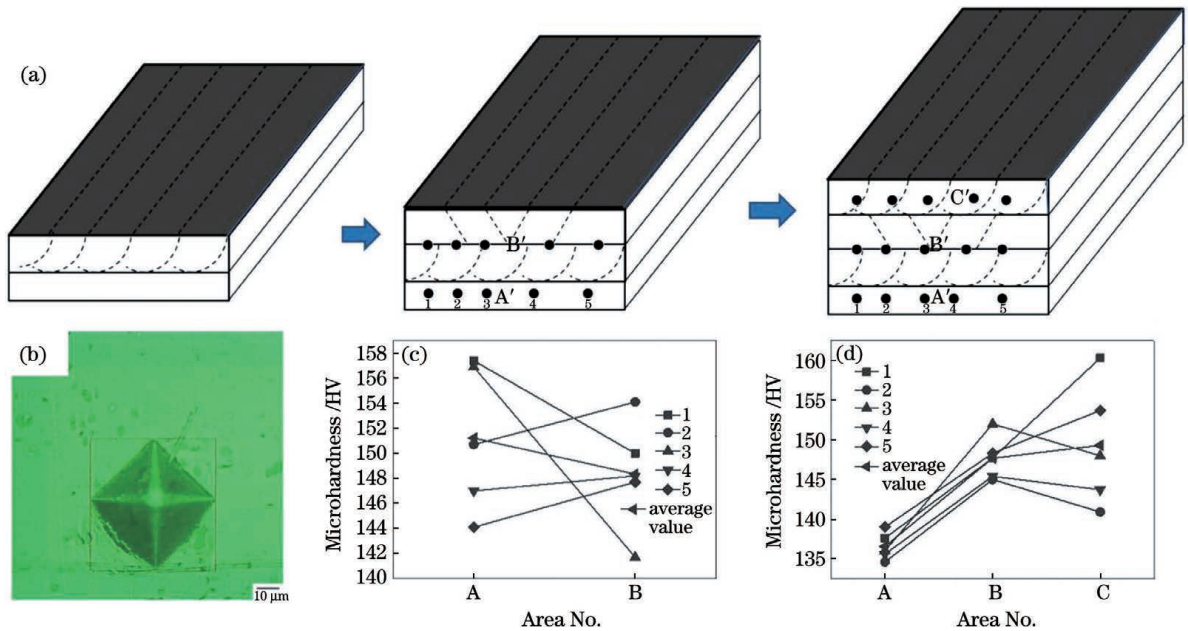


图 7 沉积方向 2024 合金的显微硬度。(a)硬度测试示意图;(b)硬度测试微观照片;(c)激光熔化沉积+搅拌热处理后的硬度分布;(d)激光熔化沉积+搅拌+激光熔化沉积热处理后的硬度分布

Fig. 7 Microhardnesses of 2024 alloy along deposition direction. (a) Schematic of hardness test; (b) micrograph of hardness test; (c) hardness distributions after LMD+stirring heat treatment; (d) hardness distributions after LMD+stirring+LMD heat treatment

硬度与 2024 合金 T6 状态的硬度基本一致;对于激光沉积-搅拌处理的样品,经过固溶+人工时效处理后,硬度相比基体明显增大,且沿着沉积方向逐渐增大,在搅拌区域最高点硬度最大,最高可到 147 HV,相比原始合金,硬度提升了近 23%;搅拌沉积后,组织搅拌与沉积界面处、搅拌中心区域、二次沉积区域内的硬度均增大,其中,二次沉积区域内的硬度最高达到 160 HV。相比谷涛^[11]的研究,复合成型硬度的提高与沉积态组织的致密性有关,仅采用激光熔化沉积工艺制备样品,铝合金内部的冶金缺陷尤其是柱状晶显著,且内部析出相主要在晶界析出,导致性能的下降。经过搅拌复合沉积后,一方面大塑性变形为组织提供了细小的晶粒。从硬度分布可以看出,晶粒细小的区域内的硬度明显较高,搅拌区域内的硬度分布相对比较均匀,而在二次激光熔化沉积区域内,搅拌搭接区域的硬度明显较高,组织更细,而在沉积熔池中心,硬度则有一定的下降。另一方面,大塑性变形不仅实现了晶粒的细化,更重要的是为变形铝合金沉淀析出相的弥散强化提供了动力,搅拌增材后其析出相多为晶内析出,起到了与传统变形铝合金预拉伸相似的作用,且析出相尺寸更为细小,因此在双重作用下,硬度得到了大幅提升^[29-31]。

4 结 论

通过激光熔化沉积正交实验以及单层多道实验,获得了铝合金在不同工艺条件下的熔深、熔宽和组织的演变规律,确定了激光熔化沉积最优工艺参数为 2200 W、光斑直径 2.0 mm、扫面速度 600 mm/s,搭接率 50%。

通过组织分析发现,搅拌摩擦处理能明显细化晶粒,均匀化组织,并能减少冶金缺陷。在搅拌区沉积出具有方向梯度的晶粒,其生长方向垂直于基板,且晶粒出现尺寸减小的趋势。随着沉积层数的增加,组织呈现细小均匀晶粒,没有明显的方向性。沿梯度方向,各过渡层之间结合良好,整体观察到明显的梯度结构。

沉积组织进行后处理后,硬度分析表明,沿着沉积方向,硬度呈现上升趋势,且变形量越大,硬度值越大,其中搅拌区的硬度达到 147 HV,二次沉积后硬度最高可达 160 HV,这是晶粒细化及其沉淀析出相的晶内均匀析出且形态细小所引起的。

参 考 文 献

- [1] 董鹏, 李忠华, 严振宇, 等. 铝合金激光选区熔化成形技术研究现状[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 607-611.
Dong P, Li Z H, Yan Z Y, et al. Research status of selective laser melting of aluminum alloys[J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 607-611.
- [2] 贺瑞军, 王华明. 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金组织特征研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(6): 18-22.
He R J, Wang H M. Microstructure features of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(6): 18-22.

- [3] 戴晓琴, 石全举, 赵宇, 等. 激光熔化沉积 NiTi 基金属间化合物涂层的微结构与性能[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702008.
Dai X Q, Shi Q J, Zhao Y, et al. Microstructure and performance of NiTi-based intermetallic compound coatings by laser melting deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702008.
- [4] Bartkowiak K, Ullrich S, Frick T, et al. New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 393-401.
- [5] 季霄, 孙中刚, 唱丽丽, 等. 激光熔化沉积 Ti6Al4V/Inconel625 梯度耐高温涂层组织演变为研究[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102008.
Ji X, Sun Z G, Chang L L, et al. Microstructure evolution behavior in laser melting deposition of Ti6Al4V/Inconel625 gradient high-temperature resistant coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102008.
- [6] 范丽, 陈海龔, 董耀华, 等. 激光熔覆铁基合金涂层在 HCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2018, 54(7): 1019-1030.
Fan L, Chen H Y, Dong Y H, et al. Corrosion behavior of Fe-based laser cladding coating in hydrochloric acid solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(7): 1019-1030.
- [7] 戴圣龙, 张坤, 杨守杰. 先进航空铝合金材料与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Dai S L, Zhang K, Yang S J. Advanced aeronautical aluminum alloy materials technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [8] 魏娟娟, 米国发, 许磊, 等. 激光增材制造铝合金及其复合材料研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 27-31.
Wei J J, Mi G F, Xu L, et al. Research progress on laser additive manufacturing of aluminum alloy and its composite[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(8): 27-31.
- [9] 张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成形高强 Al-Cu-Mg 合金研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503007.
Zhang H, Nie X J, Zhu H H, et al. Study on high strength Al-Cu-Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0503007.
- [10] 李吉帅, 戚文军, 李亚江, 等. 选区激光熔化工艺参数对 Ti-6Al-4V 成形质量的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(10): 65-69, 91.
Li J S, Qi W J, Li Y J, et al. Influence of process parameters of forming characteristics on Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting[J]. Materials Review, 2017, 31(10): 65-69, 91.
- [11] 谷涛. 高强度铝合金 Al 2024 激光增材制造组织与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Gu T. Microstructure and properties of high strength aluminum alloy Al2024 laser additive manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [12] Yadav V K, Gaur V, Singh I V. Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and fatigue crack growth rate in welded AA-2024[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 779: 139116.
- [13] Roodgari M R, Jamaati R, Aval H J. Fabrication of a 2-layer laminated steel composite by friction stir additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 51: 110-121.
- [14] Perry M E J, Griffiths R J, Garcia D, et al. Morphological and microstructural investigation of the non-planar interface formed in solid-state metal additive manufacturing by additive friction stir deposition[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101293.
- [15] 傅徐荣, 邢丽, 黄春平, 等. 静轴肩搅拌摩擦增材制造 2024 铝合金的组织特征[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1591-1598.
Fu X R, Xing L, Huang C P, et al. Microstructure of 2024 aluminum alloy by stationary shoulder friction stir additive manufacturing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(8): 1591-1598.
- [16] 王忻凯, 邢丽, 徐卫平, 等. 工艺参数对铝合金搅拌摩擦增材制造成形的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(5): 8-12.
Wang X K, Xing L, Xu W P, et al. Influence of process

- parameters on formation of friction stir additive manufacturing on aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(5): 8-12.
- [17] 黄斌. 基于静轴肩搅拌摩擦焊的增材制造技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
Huang B. Study on additive manufacturing technology based on the principle of stationary shoulder friction stir welding [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [18] Griffiths R J, Garcia D, Song J, et al. Solid-state additive manufacturing of aluminum and copper using additive friction stir deposition: process-microstructure linkages[J]. *Materialia*, 2021, 15: 100967.
- [19] Ardalanniya A, Nourouzi S, Jamshidi Aval H. Effects of multipass additive friction stir processing on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Cu_p/Al-Zn laminated composites [J]. *JOM*, 2021, 73(10): 2844-2858.
- [20] 孙金睿, 朱海, 赵华夏, 等. 铝合金搅拌摩擦增材制造工艺参数对成型效果的影响[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(15): 37-42.
Sun J R, Zhu H, Zhao H X, et al. Influence of process parameters of friction stir additive manufacturing of aluminum alloy on forming effect[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(15): 37-42.
- [21] 张志强, 何长树, 赵凤, 等. 7075-T6 合金超声辅助搅拌摩擦焊接头搅拌区组织与力学性能[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(12): 1708-1714.
Zhang Z Q, He C S, Zhao S, et al. Microstructure and mechanical properties of the stirred zone of ultrasonic assisted friction stir welded joint of 7075-T6 alloy [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(12): 1708-1714.
- [22] Baradarani F, Mostafapour A, Shalvandi M. Effect of ultrasonic assisted friction stir welding on microstructure and mechanical properties of AZ91-C magnesium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(12): 2514-2522.
- [23] Coşkun A, Gündüz S. An investigation on cold, warm and hot deformation behaviour of Al2024 alloy under as-received, solution heat treated, peak aged and over aged conditions[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2020, 59(3): 297-305.
- [24] 孙文昊, 范永强, 张国涛, 等. SiC_p/Al 复合材料的激光焊接接头组织与性能对比[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002105.
- Sun W H, Fan Y Q, Zhang G T, et al. Comparison of structure and performance of laser welded joints of SiC_p/Al composite materials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002105.
- [25] 贾阳, 王克鸿, 杨立, 等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊微观组织分析[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(21): 180-182.
Jia Y, Wang K H, Yang L, et al. Analysis on microstructure of 6061 Al alloy with friction stir welding [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(21): 180-182.
- [26] 吴叶军, 周志明. 3A21 铝合金厚板搅拌摩擦焊组织及性能研究[J]. *轻合金加工技术*, 2019, 47(8): 48-52.
Wu Y J, Zhou Z M. Analysis of microstructure and properties in friction-stir welding of 3A21 aluminum alloy plate [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2019, 47(8): 48-52.
- [27] 黄金鑫, 孙中刚, 常辉, 等. 激光增材制造 Ti6Al4V-Inconel718 功能梯度材料的成分变化和微观结构演变[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(8): 2813-2819.
Huang J X, Sun Z G, Chang H, et al. Compositional changes and microstructure evolution of Ti6Al4V-Inconel718 functionally graded materials by laser additive manufacturing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(8): 2813-2819.
- [28] Prillhofer R, Rank G, Berneder J, et al. Property criteria for automotive Al-Mg-Si sheet alloys [J]. *Materials*, 2014, 7(7): 5047-5068.
- [29] 张欣, 苏蓓. 2024 铝合金的高温拉伸性能[J]. *金属热处理*, 2019, 44(4): 156-160.
Zhang X, Su R. High temperature tensile properties of 2024 aluminum alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(4): 156-160.
- [30] 田绪亮, 周建忠, 李京, 等. 深冷激光喷丸强化对 2024-T351 铝合金微观组织的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902004.
Tian X L, Zhou J Z, Li J, et al. Effect of cryogenic laser peening on microstructure of 2024-T351 aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902004.
- [31] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.

Effect of Stirring on Microstructure and Properties of As-Deposited 2024 Aluminum Alloy

Wu Fan¹, Wan Guilin², Yang Yang¹, Huang Jiaqiang², Chen Wei^{1*}, Sun Zhonggang^{2**}

¹ AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

² College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China

Abstract

Objective Carrying capacity is the core indicator of the value of a rocket. The weight of a rocket and its carrying capacity are trade-offs. Reducing the dead weight of a rocket and improving its structural efficiency are the keys to obtain a high carrying capacity. As an aerospace structural material, aluminum (Al) alloys are widely developed as aviation structural materials with a low melting point and high specific strength. Al alloys used as fuselage materials have become an important direction for future civil passenger aircraft material selection, and the laser melting deposition (LMD) technology needs to be developed urgently. The alloys have problems such as large hot cracking tendency and microstructural inhomogeneity that influence the properties of Al2024. In order to solve the problem of low strength of Al2024 alloys in additive manufacturing, the emerging friction stirring technology has been widely studied in which the Al2024 alloys are used. First, a two-layer gradient structure covered with a laser melting deposition layer and a stirring layer is fabricated on the substrate surface by combining the friction stirring technique. The resulting surface is then laser

deposited. Friction stirring combining with laser cladding results in ultrafast laser hybrid fabrication. This gradient structure exhibits high strength, high toughness, and is resistant to fracture risk.

Methods The diameter of the stirring head is 10 mm, and the friction stirring process parameters are the rotation speed of 800 r/min and the feeding speed of 50 mm/min. First, using the friction stirring technology, laser fusion deposited 2024 aluminum alloys repaired by different processes are prepared, and the microstructures and mechanical properties of Al alloy samples prepared by this composite process are studied. Next, the microstructures and mechanical properties of the composite-fabricated Al2024 alloys are studied with an optical microscope and a Vickers hardness tester to analyze the relationship between the process and their microstructures and properties.

Results and Discussions The results show that the microstructures of Al2024 alloys stirred with an overlap ratio of 80% are refined and present a gradient distribution compared with those by LMD. Through the orthogonal experiment of laser fusion deposition and the single-layer multi-channel experiment, the evolution law of penetration depth and width of an Al alloy under different process conditions and the evolution law of microstructures are obtained. The spot diameter of 2.0 mm, the scanning speed of 600 mm/s, and the overlap rate of 50% are chosen as the final composite process parameters (Figs. 4 and 5). Through the microstructural analysis, it is found that the friction stirring treatment can significantly refine the grains, homogenize the structure, and reduce metallurgical defects. On the other hand, crystal grains with a directional gradient are deposited in the stirring zone, the growth direction of which is perpendicular to the substrate, and the size of the crystal grains tends to decrease. As the number of deposited layers increases, the microstructure presents fine and uniform grains without obvious directionality. Along the gradient direction, the transition layers are well combined, and the obvious gradient structure characteristics are observed as a whole (Fig. 6). After the aging treatment, the hardness of the substrate region is in the range of 135–140 HV, which is significantly improved. And with the addition of the stirring zone, the hardness after secondary deposition can reach 160 HV. In addition, as the number of depositions increases, a gradient distribution of hardness appears.

Conclusions In the present study, friction stirring welding is carried out by the heat generated by the metal through friction. The difference from traditional friction welding is that it not only rubs the metal surface, but also uses a stirring rod to insert into the metal for friction (stirring), so that the depth of welding and the depth of bonding are greatly improved. Friction stirring welding does not need welding wire and has a small heat-affected range, which is especially suitable for occasions that are prone to cracking and deformation. At present, the scope of application of this technology is limited, mainly in the field of aerospace exploration and application. In this study, a novel gradient-structured aluminum alloy is successfully fabricated by the laser + stirring technology, and the surface is composed of periodic deposition layers covered with a stirring layer. After aging treatment, the hardness after secondary deposition can reach 160 HV, which indicates that LMD can also achieve ultra-high hardness. Our study shows that gradient alloys with comprehensive mechanical properties can be obtained through a rational design.

Key words laser technique; aluminum alloy; additive manufacturing; friction stirring additive manufacturing; artificial aging; solution treatment