

激光与光电子学进展

扫描策略对激光熔化沉积态 TC4 钛合金组织性能及残余应力的影响

单奇博¹, 刘忱¹, 姚静¹, 战宇², 刘常升^{1*}

¹东北大学材料科学与工程学院材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

²东北大学理学院力学系, 辽宁 沈阳 110819

摘要 采用不同的扫描策略,通过激光熔化沉积技术制备出 TC4 钛合金。通过光学显微镜(OM)、X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和电子万能材料试验机研究了扫描策略对 TC4 钛合金组织和性能的影响,利用 X 射线衍射法对 TC4 合金 XOZ 平面残余应力的演变和分布进行分析。结果表明,扫描策略影响了网篮组织的形态,进而影响了 TC4 合金的力学性能。TC4 样品在回旋扫描策略下的拉伸强度和屈服强度最大,分别为 1251.7 MPa 和 1250.0 MPa,而在单向扫描策略下 TC4 样品的拉伸强度和屈服强度最小,分别为 991.5 MPa 和 1010.9 MPa。残余应力在不同扫描策略下的变化很大,其中,分区回旋扫描所得试样的测试结果分布更均匀。不同扫描策略所得试样的总体应力水平排序依次为分区回旋扫描、往复扫描、回旋扫描、单向扫描。

关键词 激光光学; 激光熔化沉积; 扫描策略; 钛合金; 组织和性能; 残余应力

中图分类号 TG394

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1114002

Effects of Scanning Strategy on the Microstructure, Properties, and Residual Stress of TC4 Titanium Alloy Prepared by Laser Melting Deposition

Shan Qibo¹, Liu Chen¹, Yao Jing¹, Zhan Yu², Liu Changsheng^{1*}

¹Key Laboratory of Material Anisotropy and Texture of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

²Department of Mechanics, School of Science, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract In this paper, TC4 titanium alloys were prepared by laser melting deposition using different scanning strategies. The effects of scanning strategy on the microstructure and properties of TC4 titanium alloys were studied using optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy, and electronic universal material testing machine. In particular, the evolution and distribution of residual stress in the XOZ plane of the TC4 alloys were analyzed in detail using XRD. Results indicate that the scanning strategy affected the morphology of the basket microstructure, which in turn affected the mechanical properties of the TC4 alloys. The tensile and yield strengths of the TC4 specimen under the roundabout scanning strategy were the maximum (1251.7 MPa and 1250.0 MPa, respectively), while the tensile and yield strengths of the TC4 specimen under the unidirectional scanning strategy were the minimum (991.5 MPa and 1010.9 MPa, respectively). The residual stress varied substantially under different scanning strategies, with the test results of the partition roundabout scanning being distributed more

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-10-27; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(5177010928)

*E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn

uniformly. The order of the overall stress level of the specimens obtained using different scanning strategies was partition roundabout, reciprocating, roundabout, and unidirectional scanning.

Key words laser optics; laser melting deposition; scanning strategy; titanium alloy; microstructure and properties; residual stress

OCIS codes 140.3380; 140.3390; 340.7450; 040.7480

1 引言

TC4 钛合金具有十分优异的性能,即高比强度、高比韧性、高耐热性,以及良好的耐腐蚀性等,因此广泛应用于航空航天、海洋工程以及汽车制造等工业领域^[1-2]。激光熔化沉积(LMD)是以高能激光束作为移动热源,将粉末材料或丝材层层叠加直接制造零件,具有工序简单、制造周期短、材料利用率高特点^[3-4]。但是,LMD加工出的成形件有时候也不能满足最初的设计要求,主要原因是在制造过程中,成形件受热产生残余应力,进而出现变形等缺陷^[5-8]。激光扫描策略通过改变激光直接沉积过程中熔池输入热量和散失热量来影响成形件内部的组织结构及残余应力。Liu等^[9]的研究表明,激光扫描策略对增材制造 Inconel 718 合金组织和力学性能具有较大影响。Tabernero等^[10]研究指出,不同的激光扫描策略对激光直接金属沉积技术制备的 Inconel 718 合金的力学性能有显著影响。因此,激光扫描策略是金属增材制造过程的重要参数,对厘清激光熔化沉积成形过程中残余应力的演变与作用至关重要。本文分别采用往复扫描、单向扫描、回旋扫描、分区回旋扫描策略,重点研究激光扫描策略对激光熔化沉积 TC4 钛合金组织和力学性能的影响,以及残余应力的分布规律,以期优化 TC4 钛合金激光熔化沉积技术提供参考。

表 1 TC4 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 powder

Element	Ti	V	Al	C	Fe
Theoretical mass fraction /%	Bal.	3.5—4.5	5.5—6.75	<0.08	<0.3
Measured mass fraction /%	Bal.	3.82	5.83	0.023	0.068

采用标准金相试样制备方法制备 XOZ 截面金相试样,并用 Kroll 试剂进行腐蚀,使用日本 OLYMPUS 公司制造的 GX71 倒置式金相显微镜检测宏观组织,用 JEM-7001F 场发射扫描电子显微镜观察金相样品的高倍微观组织。采用 AG-X250kN 电子万能材料试验机对拉伸试样进行室

2 试验过程及方法

用尺寸为 60 mm×40 mm×5 mm、经过表面处理的钛合金(Ti-6Al-4V)板作为基体,用中航迈特生产的 TC4 合金粉进行试验。TC4 合金粉的粒度为 50~150 μm,外表呈球形,扫描电子显微镜形貌如图 1 所示,粉末的具体成分见表 1。

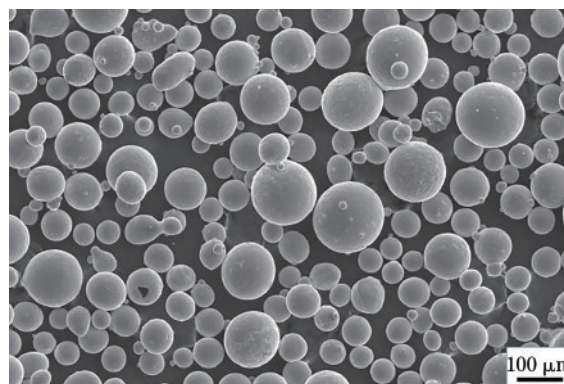


图 1 TC4 粉末 SEM 图

Fig. 1 SEM image of TC4 powder

采用沈阳镭泰克激光自动化科技有限公司生产的 RtPrint1001 激光熔化沉积设备,本试验一共选取 4 组样品。工艺参数如下:激光功率为 500 W,扫描速度为 600 mm/min,送粉速率为 1.5 r/min,激光束道次间距 $Y_B=1$ mm,搭接率为 30%,采用同轴送粉,保护气体为氩气。图 2 为扫描策略示意图。

温拉伸试验,拉伸速率为 0.5 mm/min,图 3 为拉伸试样取样示意图,图 4 所示为拉伸试样尺寸。采用 Smart Lab 型 X 射线衍射仪对样品进行物相分析。采用 μ -X360s 应力分析仪测试每个样品 XOZ 面的残余应力值,试验样品及测试点如图 5 所示。

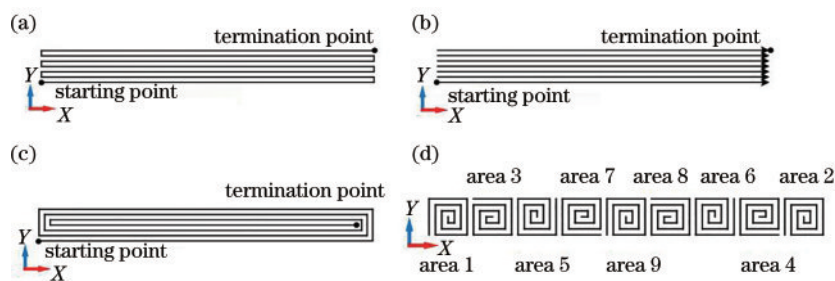


图 2 各扫描策略示意图。(a)往复扫描;(b)单向扫描;(c)回旋扫描;(d)分区回旋扫描

Fig. 2 Schematic of each scanning strategy. (a) Reciprocating scanning; (b) unidirectional scanning; (c) roundabout scanning; (d) partition roundabout scanning

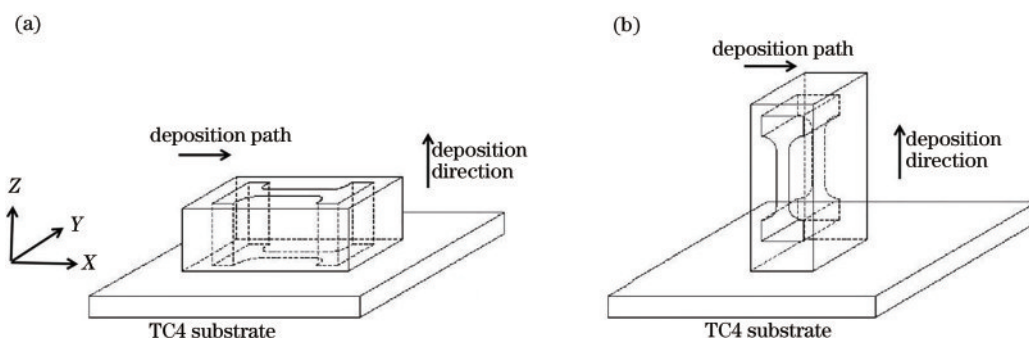


图 3 沿不同方向的拉伸试样取样示意图。(a)平行方向;(b)垂直方向

Fig. 3 Schematic of tensile specimen sampling along different directions. (a) Parallel direction; (b) perpendicular direction

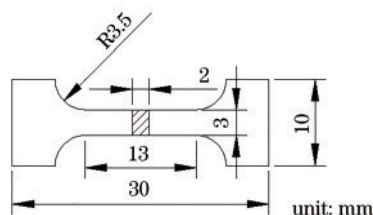


图 4 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 4 Schematic of size of tensile specimen

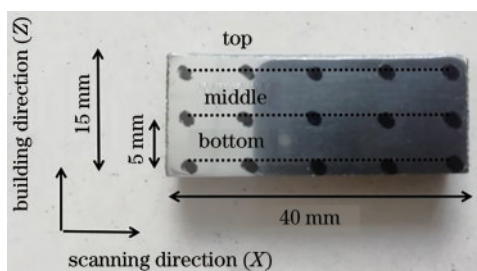


图 5 试验样品及测量点分布

Fig. 5 Test sample and layout of measuring points

3 分析与讨论

3.1 宏观组织形貌

图 6 所示为各扫描策略下沉积态 TC4 钛合金在 XOZ 面上的宏观组织,其中 L_1 和 L_2 为沉积层的

层间距离。由图 6 可知, XOZ 面由许多粗大的柱状晶组成,这些粗大的柱状晶贯穿多个沉积层且呈外延生长的状态,柱状晶保持着原始 β -Ti 的形态。在激光增材制造过程中,熔合线延伸至熔池顶部,温度梯度是逐渐降低的,凝固速度却逐渐增大,凝固开始的位置就是熔池线,因此原始 β -Ti 晶粒处在高温环境中,将沿着沉积的方向向外延生长。由于晶粒的结晶学取向不同,宏观组织出现明暗交替的现象,这已经在文献[11]的研究中得到验证。

观察看来,激光扫描方向与柱状晶主轴方向基本垂直。对比图 6(a)和图 6(b),发现图 6(a)的柱状晶较图 6(b)更加密集且晶界杂乱多变,图 6(b)中柱状晶的晶界分明且分布稀疏,这是因为往复扫描方式中同层各扫描道之间没有间歇时间,而单向扫描方式中同层扫描道之间存在一定的间歇时间,每一次热输入的冷却时间更长,温度梯度更大,受其他方向的热影响相对较小,柱状晶生长趋势明显且晶界明显。图 6(a)和图 6(c)的上述现象更加明显,回旋扫描方式下柱状晶较往复扫描方式下细小、杂乱且生长方向多变。这是因为回旋扫描方式在同层打印过程中有 4 个不同方向的扫描道,这就会导致热输入位置多变,温度梯度方向多变,从而导致柱

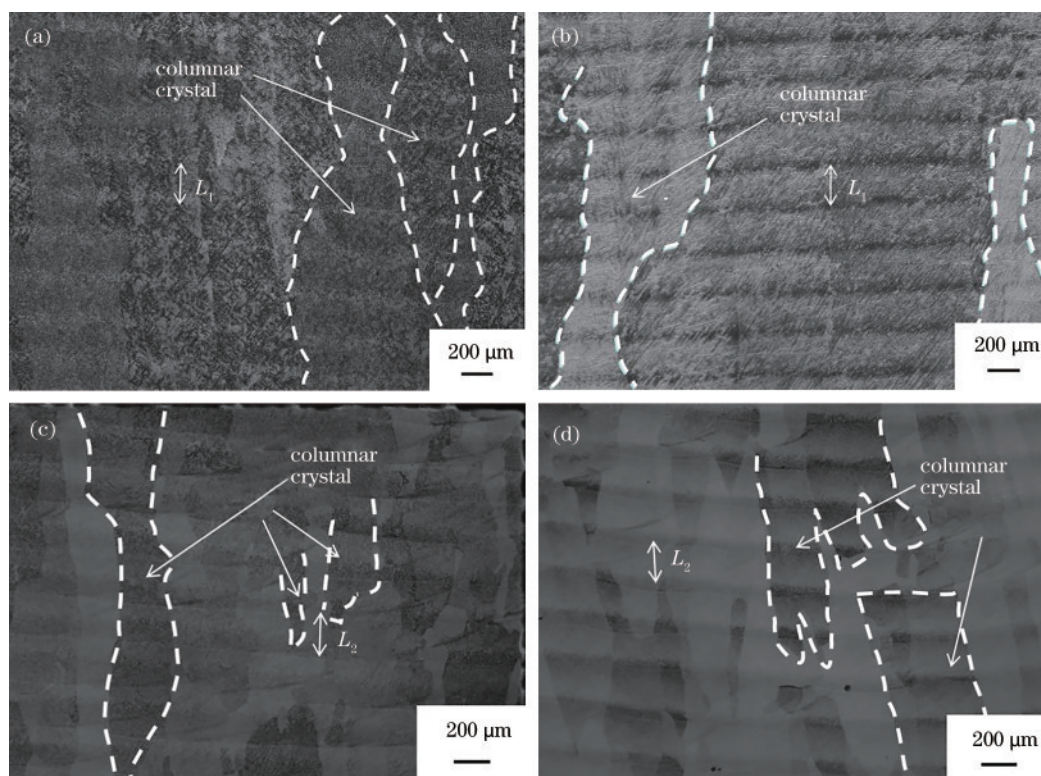


图 6 各种扫描策略下 XOZ 面的宏观组织。(a)往复扫描;(b)单向扫描;(c)回旋扫描;(d)分区回旋扫描
Fig. 6 Macrostructures of XOZ plane by various scanning strategies. (a) Reciprocating scanning; (b) unidirectional scanning; (c) roundabout scanning; (d) partition roundabout scanning

状晶生长方向杂乱多变。观察图 6(c)和图 6(d),发现分区回旋扫描方式得到的柱状晶分支较回旋扫描方式多,这是因为分区回旋扫描的每一个回型区域相对于回旋扫描方式小,4个扫描方向之间变化更快,不同方向之间的热输入位置变化更快,温度梯度方向多变导致柱状晶的生长方向出现差异,因此分区回旋扫描方式得到的柱状晶分支较多。

3.2 微观组织特征

激光熔化过程中 TC4 粉末瞬间达到熔点并形成熔池,温度达到 α 相变点以上, α 相向 β 相转变,待冷却后形成两相组织,且两相交错排列,犹如编制网篮的形状,称为网篮组织^[12]。观察图 7(a)、(c)、(e)和(g)发现,不同的扫描策略下试样的最终成形组织都为网篮组织。

观察对比图 7(a)和(c)、(b)和(d),发现往复扫描方式下钛合金试件的 α 相较单向扫描方式的粗大,单向扫描方式下 α 相呈细长状。这是因为往复扫描方式下扫描道激光热输入连续无停歇,而单向扫描方式下激光扫描道在沉积一条扫描道之后有一个扫描道时间的停歇,两者的热力时间间隔不同,因此单向扫描成形过程中冷却时间较长,冷却

速率较快,组织较细长。观察对比图 7(e)和(g)、(f)和(h),发现分区回旋扫描方式下的 α 相较回旋扫描方式的粗大,且存在断续 α 相,并且存在片层 $\alpha+\beta$ 形态。这是因为回旋扫描形成的“回”字扫描道较分区回旋扫描长,在相邻扫描道热影响之前有较长的冷却时间,冷却速率较快,组织较细长。

微观组织的变化与宏观的温度场密切相关,在不同扫描策略的激光熔化沉积成形过程中熔池形态基本一致,光斑周边区域出现明显的温度集中现象,熔池呈椭球形,几种扫描方式下的温度场存在差异^[13],主要是因为热力时间间隔不同,这也是微观组织不同的主要原因。

图 8 所示为不同扫描策略下 TC4 钛合金试件的 X 射线衍射图谱。由图 8 可知,单向扫描和回旋扫描的钛合金 β 相峰值强度较小,往复扫描和分区回旋扫描的钛合金 β 相峰值强度较大,说明其 β 相的体积分数较大,这与 SEM 微观分析结果一致。 α 相的衍射峰强度表征 α 相的粗化程度,往复扫描方式下试样的 α 晶粒最大,与上述微观组织分析结果一致。

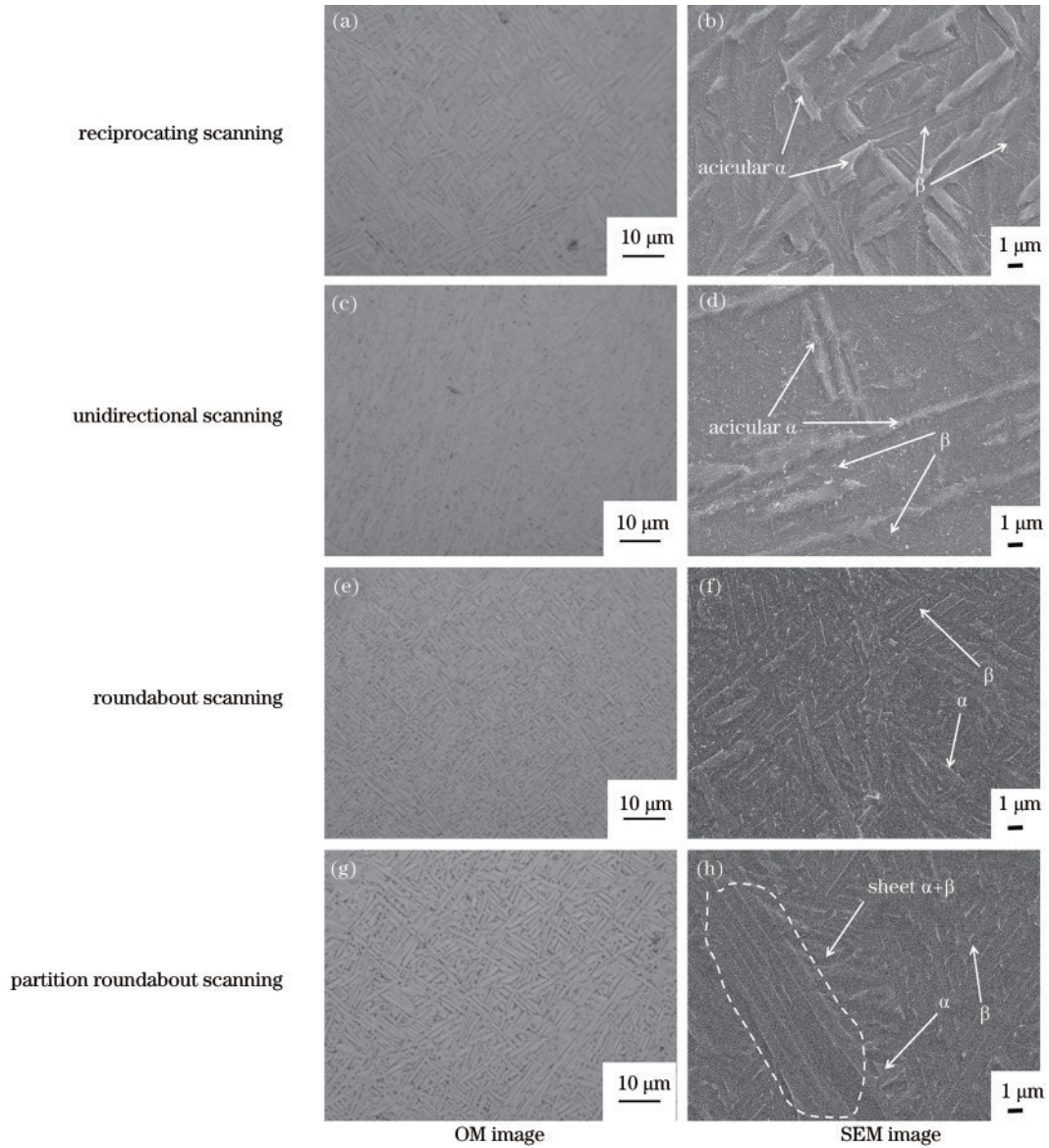


图 7 各种扫描策略下 XOZ 面的显微组织

Fig. 7 Microstructure of XOZ plane by various scanning strategies

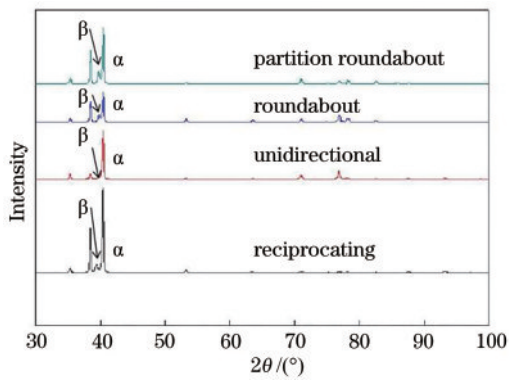


图 8 不同扫描策略下 LMD 成形 TC4 钛合金试样的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of TC4 titanium alloy samples produced by LMD using different scanning strategies

3.3 拉伸力学性能

表 2 所示为不同扫描方式下各样品的拉伸性能测试值, 每种方式都分别沿着平行于沉积方向(以下简称“平行方向”)和垂直于沉积方向(以下简称“垂直方向”)测试力学性能。平行方向上, 分区回旋扫描方式下试样的抗拉强度和屈服强度最大, 分别为 1088.3 MPa 和 1036.7 MPa, 单向扫描方式下试样的抗拉强度和屈服强度最小, 分别为 991.5 MPa 和 1010.9 MPa; 往复扫描方式下试样的延伸率最大 (13.2%), 回旋扫描方式下试样的延伸率最小 (10.3%)。垂直方向上, 回旋扫描方式下试样的抗拉强度和屈服强度最大, 分别为 1251.7 MPa 和 1250.0 MPa, 单向扫描方式下试样的抗拉强度和屈

表 2 激光熔化沉积 TC4 钛合金拉伸力学性能
Table 2 Tensile mechanical properties of laser melt-deposited TC4 titanium alloy

Tensile test direction	Scanning strategy	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%
Parallel to deposition direction	Reciprocating scanning	998.8	1017.0	13.2
Perpendicular to deposition direction		1116.8	1124.0	6.8
Parallel to deposition direction	Unidirectional scanning	991.5	1010.9	12.0
Perpendicular to deposition direction		1043.5	1048.2	4.7
Parallel to deposition direction	Roundabout scanning	1080.0	1023.3	10.3
Perpendicular to deposition direction		1251.7	1250.0	3.6
Parallel to deposition direction	Partition roundabout scanning	1088.3	1036.7	11.9
Perpendicular to deposition direction		1156.7	1170.0	3.2

屈服强度最小,分别为 1043.5 MPa 和 1048.2 MPa;往复扫描方式下试样的延伸率最大(6.8%),分区回旋扫描方式下试样的延伸率最小(3.2%)。

往复扫描与单向扫描两种扫描方式所得试样的力学性能大致相同,回旋与分区回旋两种扫描方式所得试样的力学性能大致相同。

在两个相互垂直的力学测试方向上,往复扫描方式所得试样的力学性能均优于单向扫描方式所得试样。对比图 6(a)和(b),发现柱状晶形态没有明显差别。而图 7(a)和(c)、(b)和(d)中,其主要组织均为网篮组织,差别是 α 相的形态不同,而组织决定性能,钛合金的抗拉强度主要由有效滑移长度决定^[14],相较于单向扫描方式,往复扫描方式所得试样的 α 相形态较粗,因此位错受到的阻碍较大,可有效缩短位错滑移长度,提高强度和延伸率。

从平行方向看,对比图 7(e)和(g)、(f)和(h),发现分区回旋扫描方式比回旋扫描方式所得试样的 α 相形态较粗,因此位错受到的阻碍较大,可有效缩短位错滑移长度,提高强度和延伸率。从垂直方向看,对比图 6(c)和(d),发现回旋扫描和分区回旋扫描所得试样组织都为分支较多的柱状晶。但是,分区回旋扫描所得试样的每一个“回”字部分较小,扫描道方向变化较快,热输入位置多变且温度梯度方向多变,柱状晶生长方向变化较快,因此柱状晶的分支较多。回旋扫描所得试样只有一个大的“回”字部分,扫描道方向变化较慢,热输入位置变化较慢且温度梯度方向变化较慢,柱状晶生长方向变化较慢,因此柱状晶分支较少。分区回旋扫描所得试样的柱状晶晶界数量要比回旋扫描所得试样的柱状晶晶界数量多,柱状晶晶数量界数量是力学性能差异的主要原因,应力作用在垂直方向上,会使柱状晶粒分开。因此在垂直方向上,分区回旋扫描所

得试样的强度和延伸率较回旋扫描所得试样低。

从力学性能来看,往复扫描方式和单向扫描所得试样分别与回旋和分区回旋扫描所得试样相比,前两者的 α 相均较后两者宽, α 晶粒变宽,塑性增强,强度降低^[15]。因此,前两者的抗拉强度和屈服强度较后两者低,而延伸率较后两者高。

从表 2 可以看到,不同扫描策略下沉积成形的 TC4 钛合金试样沿平行方向的延伸率远大于沿垂直方向的延伸率,拉伸性能具有各向异性的特点,性能的各向异性可以由组织的各向异性来解释^[16-17]。主要原因在于,如图 6 所示,沉积成形的 TC4 钛合金试样的 XOZ 面金相组织是由多个贯穿沉积层的粗大 β 柱状晶组成,在垂直方向上分布着更多的晶界,沿平行方向的水平晶界数量明显少于沿垂直方向的垂直晶界数量,在拉伸性能测试过程中,应力作用在垂直方向上,会使 β 柱状晶粒分开。因此,试样在垂直方向的延伸率较低,主要是由初始 β 柱状晶择优取向造成的^[18]。两个拉伸方向上晶界数量的差异应该是两个方向的延伸率不同的主要原因^[19]。同时,周庆军等^[20]提出新生成的沉积层会对前一层产生热处理效应,这种效应会使平行方向的拉伸样品内 α 相含量远高于垂直方向的拉伸试样,而 α 相对钛合金的塑性提高有很大帮助。

3.4 残余应力检测结果及分析

残余应力试验数据见表 3,其中拉应力用正应力表示,压应力用负应力表示。图 9 为 4 种扫描策略的总残余应力值柱状图。图 10 为 4 种扫描策略所测得的每个点的残余应力值。

观察图 9,不同扫描策略所得试样的总体应力水平排序依次为分区回旋扫描、往复扫描、回旋扫描、单向扫描。残余应力的主要成因是局部热输入造成温度分布不均匀,使得熔池及周围材料产生热

表 3 不同扫描策略所得试样的残余应力值

Table 3 Residual stress values of samples using different scanning strategies

Measuring position	Mean stress value /MPa			
	Reciprocating scanning	Unidirectional scanning	Roundabout scanning	Partition roundabout scanning
Top	41.2	127.4	119.8	64.8
Middle	19.2	68.2	50.8	15.4
Bottom	-56.0	136.2	29.2	-4.2

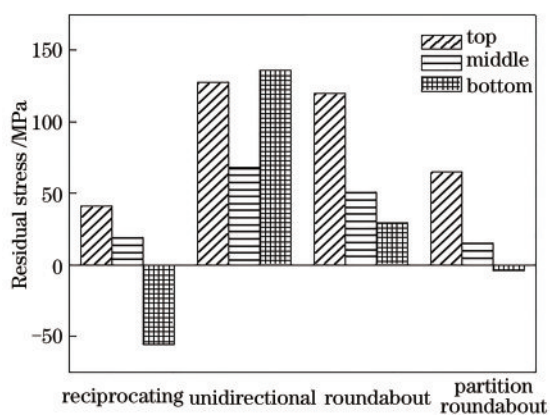


图 9 不同扫描策略所得试样的残余应力值对比

Fig. 9 Comparison of residual stress values of samples using different scanning strategies

应力,在冷却和凝固时相互制约而引起局部热塑性变形,进而产生热残余应力。不同的扫描方向会产生不同方向的热应力,部分热应力相互抵消,例如分区回旋扫描策略中每一个回旋试样部分与往复扫描试样和回旋扫描试样在同一沉积层中诱导出相反方向的应力,部分应力相互抵消后^[21],其残余应力低于单向扫描试样的残余应力。

观察图 10,往复扫描在 XOZ 面顶部和底部的残余应力沿 X 轴的变化趋势相似,呈现类 S 形状,沿 Z 轴分布无明显规律;单向扫描试样的残余应力在 XOZ 面中部沿 X 轴波动较大,中间点的残余应力最小,从左至右应力值整体呈增大趋势,沿 Z 轴分布无明显规律;回旋扫描试样在 XOZ 面顶部的残余应力最大,底部的残余应力最小;分区回旋扫描试样的残余应力在 XOZ 面上沿 Z 轴分布较均匀,沿 X 轴的拉应力与压应力交替波动^[22],中部和底部的残余应力值沿 X 轴变化规律相似,沿 Z 轴分布较均匀。

观察表 3,不同扫描策略所得试样的顶部呈拉应力状态,往复扫描与分区回旋扫描所得试样的底部呈压应力状态,单向扫描与回旋扫描所得试样的底部呈拉应力状态,单向扫描与回旋扫描所得试样的平均应力从顶部到底部都为拉应力。往复扫描

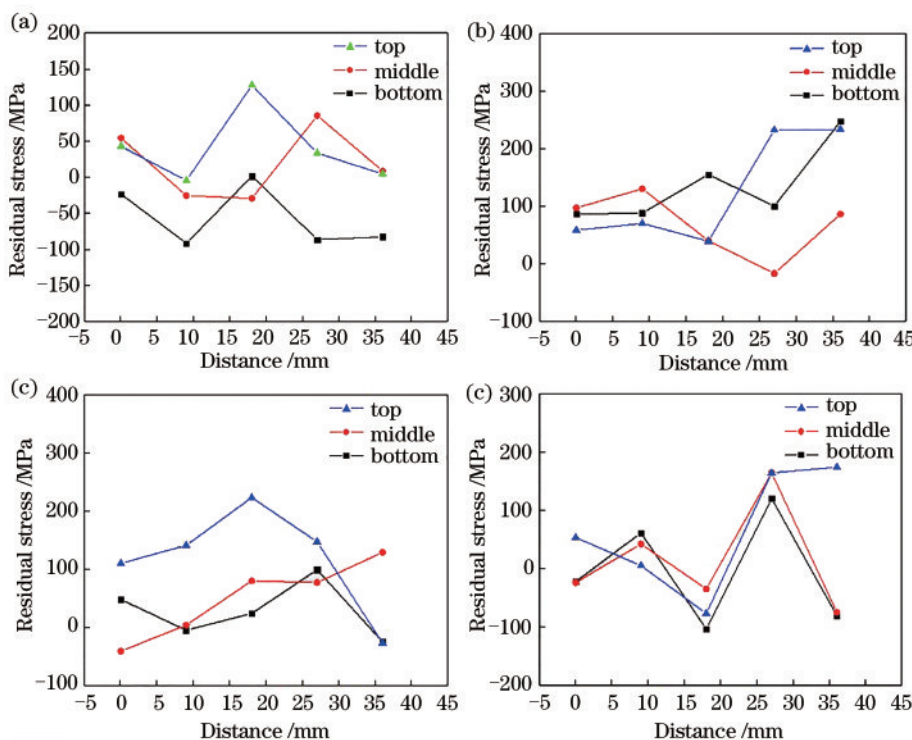


图 10 4 种扫描策略残余应力检测结果。(a)往复扫描;(b)单向扫描;(c)回旋扫描;(d)分区回旋扫描

Fig. 10 Residual stress detection results of four scanning strategies. (a) Reciprocating scanning; (b) unidirectional scanning; (c) roundabout scanning; (d) partition roundabout scanning

和单向扫描所得试样的底部应力值相对于中部、顶部整体较高,分别为 56.0 MPa 与 136.2 MPa,其中一个为压应力,一个为拉应力。而回旋扫描和分区回旋扫描所得试样的底部应力值相对于中部、顶部整体较小,分别为 29.2 MPa 和 4.2 MPa,其中一个为拉应力,一个为压应力。表 3 中列出的是不同部位的算术平均应力值,X 射线应力仪检测的是特定点的应力值,只代表检测点的应力,不能代表顶部、中部或者底部的整体应力水平,并且图 5 显示,底部和顶部并不是完全贴近底部和顶部边缘,这是 X 射线应力仪的使用局限导致的,但是每一个试样的残余应力是平衡的,并且测试结果误差小于 3%,重复性偏差小于 5%,对检测结果的影响很小^[23]。

4 结 论

研究了扫描策略对激光直接沉积 TC4 钛合金组织性能及残余应力的影响,得到如下结论:1)不同扫描策略代表了不同的成形方式,对 LMD 制备的 TC4 钛合金微观组织影响较小,主要影响网篮组织形态;2)不同的扫描策略对试样力学性能没有显著影响,但是由于 XOZ 面金相组织具有多个贯穿沉积层的粗大柱状 β 晶,因此试样的力学性能表现出各向异性;3)不同的扫描策略成形件 XOZ 面残余应力相差很大,每一个成形件的应力变化趋势不同,这与扫描策略密切相关。

参 考 文 献

- [1] Wang B K. Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC4 alloy for aviation [J]. *Industrial Heating*, 2019, 48(4): 24-26.
王炳坤. 航空用 TC4 合金组织与性能中热处理的影响机制分析[J]. *工业加热*, 2019, 48(4): 24-26.
- [2] Wang W B, Ma R X, Jing Z C, et al. Effect of solution-aging treatment on microstructure and properties of TC4 fabricated by laser three-dimensional printing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002003.
王文博, 马瑞鑫, 井志成, 等. 固溶时效处理对激光 3D 打印 TC4 合金组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1002003.
- [3] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components: process, structure and properties [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112-224.
- [4] Feng X T, Gu H, Zhou S F, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of TC4 titanium alloy cladding layer prepared with powder feeding laser additive manufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302003.
冯晓甜, 顾宏, 周圣丰, 等. 送粉式激光增材制造 TC4 钛合金熔覆层组织及电化学腐蚀行为的研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302003.
- [5] Tang C L, Wen J Q, Zhang W X, et al. 3D printing technology for titanium alloy and its defect [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(1): 38-47.
唐超兰, 温竟青, 张伟祥, 等. 钛合金 3D 打印成形技术及缺陷[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(1): 38-47.
- [6] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2015, 45(9): 1111-1126.
林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [7] Sun H J, Wei J, Zheng Z H, et al. Effects of laser process parameters on residual stress of pure titanium samples prepared by laser melting deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302014.
孙洪吉, 韦靖, 郑兆宏, 等. 激光工艺参数对激光熔化沉积纯钛样品残余应力的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302014.
- [8] Ma R X, Xu G J, Liu Z Q, et al. Effect of normalizing temperature on microstructures and tensile properties of laser three-dimensional-printed titanium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0702008.
马瑞鑫, 徐国建, 刘占起, 等. 正火温度对激光 3D 打印钛合金组织及拉伸性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0702008.
- [9] Liu F C, Lin X, Huang C P, et al. The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel-base superalloy Inconel 718 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 51: 4505-4509.
- [10] Taberero I, Lamikiz A, Martinez S, et al. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(6): 465-470.
- [11] Zhang X H, Lin X, Chen J, et al. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser solid

- forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(1): 142-147.
- 张小红, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TA15 合金组织及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(1): 142-147.
- [12] Yang G, Wang W D, Qin L Y, et al. Annealing treatment and basketweave structure deformation mechanism of laser deposition manufactured TA15 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(7): 1935-1942.
- 杨光, 王文东, 钦兰云, 等. 激光沉积 TA15 钛合金退火处理工艺及网篮组织变形机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(7): 1935-1942.
- [13] Chen D N. Finite element analysis of laser selective melting technology of titanium alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- 陈德宁. 钛合金激光选区熔化技术有限元分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [14] Zhao Z, Chen J, Lu X F, et al. Formation mechanism of the α variant and its influence on the tensile properties of laser solid formed Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 691: 16-24.
- [15] Qin L Y, Jin Z X, Zhao S, et al. Effect of α texture on mechanical behavior of TC4 alloy fabricated by laser deposition manufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0102007.
- 钦兰云, 金子心, 赵朔, 等. α 相织构对激光沉积制造 TC4 合金力学行为影响研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0102007.
- [16] Huo H, Liang Z Y, Zhang A F, et al. Anisotropy of mechanical properties of laser-cladding-deposited TC4 titanium alloy containing boron [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202008.
- 霍浩, 梁朝阳, 张安峰, 等. 激光熔覆沉积含硼 TC4 钛合金力学性能的各向异性[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202008.
- [17] Zhang J Z, Zhang A F, Wang H, et al. Microstructure and anisotropy of high performance TC4 obtained by micro forging laser cladding deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402009.
- 张金智, 张安峰, 王宏, 等. 微锻造激光熔覆沉积高性能 TC4 组织与各向异性[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402009.
- [18] Liu J, Liu Y T. Microstructures and mechanical properties of laser rapid prototyping deposited TC4 alloy [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(8): 1132-1136.
- 刘静, 刘逸婷. 激光快速成型 TC4 合金显微组织及力学性能[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(8): 1132-1136.
- [19] Xi M Z, Gao S Y, Liu B, et al. Effect of scanning pattern and annealing heat treatment on microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy formed by laser rapid forming process [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(2): 445-449.
- 席明哲, 高士友, 刘博, 等. 扫描方式和退火热处理对激光快速成形 TA15 钛合金组织与性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(2): 445-449.
- [20] Zhou Q J, Yan Z Y, Han X, et al. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC11 titanium alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1102005.
- 周庆军, 严振宇, 韩旭, 等. 激光熔化沉积 TC11 钛合金的组织与力学性能[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1102005.
- [21] Zhang Y F, Zhang H, Zhu Z Q, et al. Effect of deposition path on residual stresses of laser additive manufacturing structures [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(12): 1488-1494.
- 张义福, 张华, 朱政强, 等. 沉积路径对激光增材制造结构件残余应力的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(12): 1488-1494.
- [22] Mukherjee T, Zhang W, DebRoy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing [J]. *Computational Materials Science*, 2017, 126: 360-372.
- [23] Yao G, Zhang J, Lu Y H, et al. Applicability research on measuring residual stress of titanium alloy by X-ray test [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(14): 93-96.
- 姚罡, 张杰, 陆业航, 等. X射线法测试钛合金结构件残余应力的适用性研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(14): 93-96.