

激光微熔覆沉积成形工艺参数对 TC4 钛合金沉积组织的影响

姚波^{1,2}, 林峰¹, 马旭龙¹

(1. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

(2. 陆军航空兵学院, 北京 101123)

摘要: 通过改变激光微熔覆沉积制造过程中的激光功率和扫描速度, 研究了成形工艺参数对 TC4 合金组织和显微硬度的影响。结果表明: 激光微熔覆沉积组织可以为贯穿整个熔覆层的外延生长的柱状晶, 也可能下部晶粒延续着前一层柱状晶生长, 最上部为快速凝固的枝晶薄层。宏观上存在明暗 2 个组织区域, 当 P/V 值小于 40 W s mm^{-1} 时, 成形试样的显微组织顶部区域为明区, 下部为暗区。2 个区域的组织都为细长针状马氏体, 明区组织更细密。同时, 明区的硬度要比暗区高, 并且随着激光功率的增加或扫描速度的减小, 顶部明区的宽度增加, 而明区和暗区的硬度都呈下降趋势。反之则为暗区在上, 明区在下。此时, 明区的组织仍然是细针状的马氏体组织。暗区是由于发生了固溶时效处理, 细针状马氏体组织粗化, 同时暗区的硬度要高于明区的硬度。

关键词: 激光微熔覆; TC4; 工艺参数; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)02-0439-06

激光熔覆沉积制造技术是将激光熔覆技术与快速成形技术相结合发展起来的一种增材制造技术。经过二十多年的发展, 金属粉末的激光熔覆沉积制造技术取得了很大发展。钛合金尤其是 TC4, 由于具有比强度高和抗蚀性优异等特性, 在航空航天、化学工业、医药工程和休闲行业具有非常重要的应用价值和广阔的应用前景。因此 TC4 一直是激光熔覆沉积技术的研究热点, 国内外学者对其成形的工艺、组织和性能等进行了广泛的研究^[1-4]。

目前的激光熔覆沉积技术中主要是针对航空航天大型结构件的制造研究比较多。多采用大功率的激光器, 熔池尺寸为 2~3 mm。针对小熔池成形微小零件的研究目前还比较少。随着国防、航空航天、医学和生物工程等技术的发展, 产品零件的微型化为激光熔覆沉积技术的发展提供了新的空间^[5], 同时也对该成形技术提出了新的挑战。

基于此, 本研究在实验的基础上, 探讨了激光微熔覆成形过程中, 激光功率、激光扫描速度和成形高度对成形组织的影响规律。

1 实验

成形零件是在自行建立的激光微熔覆沉积制造成

形系统上完成的。该实验系统由最大输出功率为 200 W, 波长为 1070 nm 的光纤激光器、数控三维移动平台、VHX-500K 数字显微镜观察系统和送粉系统组成。其中送粉方式采用的是一种基于微流体数字化喷射的粉末精确输送方式。关于这种送粉方式, 在以前的文章中进行了详细的研究^[6]。在送粉喷嘴周围有氩气作为成形的保护气体。图 1 为激光微熔覆沉积成形过程示意图。成形环境为开放式成形。

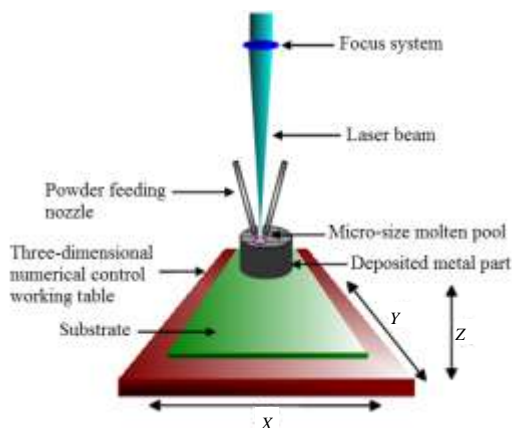


图 1 激光微熔覆沉积工艺原理

Fig.1 Schematic diagram of the laser micro cladding deposition process

收稿日期: 2015-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助 (50975152)

作者简介: 姚波, 女, 1974 年生, 博士生, 清华大学机械工程系, 北京 100084, 电话: 010-62782938, E-mail: yaobo9@mails.tsinghua.edu.cn

实验中采用单道多层熔覆方式制备试样。基材为纯钛板，实验前用砂纸打磨掉其表面的氧化皮，再用丙酮清洗干净。实验用粉末采用球形的 TC4 粉末，粉末粒度 45~150 μm。粉末形态如图 2 所示。成形工艺参数如表 1 所示。

激光微熔覆成形后，制备分析测试试样。利用 OLYMPUS 光学显微镜 (OM) 对试样进行显微组织观察。利用 MN-3 型显微硬度计 (维氏压头) 进行硬度测试，加载载荷为 200 g，加载时间为 10 s。

2 结果与讨论

2.1 激光微熔覆沉积 TC4 钛合金的宏观组织形态

在激光微熔覆沉积成形过程中，由于熔池小，熔池的冷却速度比大熔池的激光熔覆沉积工艺更加快，在熔覆沉积的过程中更易于形成柱状晶。如图 3 所示，可以明显地观察到沿沉积高度方向的柱状晶和平行于激光扫描方向的熔覆层间的层带。根据成形过程中热量散失条件的不同，柱状晶可以贯穿整个熔覆层 (如图 3a)，也可能下部晶粒延续着前一层的柱状晶生长，最上部为快速凝固的枝晶薄层 (如图 3b)。

实验研究发现，不同成形参数下制备的 TC4 试样，宏观上均可观察到如图 3 所示的明暗截然分开的 2 个区域。其中图 3a 的明区位于熔覆层的顶部不到 10 层的厚度，而图 3b 中熔覆层顶部为暗区，明区在暗区的下面。

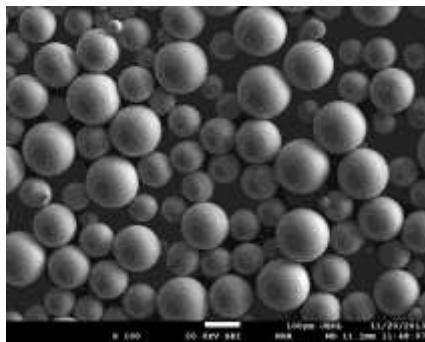


图 2 TC4 粉末形态

Fig.2 SEM image of TC4 powder

表 1 激光微熔覆成形工艺参数

Table 1 Processing parameters of the laser micro cladding deposition process

Laser power/W	Scan velocity/mm s ⁻¹	Powder feeder		Increment of Z axis/mm
		Frequency /Hz	Voltage/V	
60~90	2~5	30	40	0.1
65	2	30	40	0.1

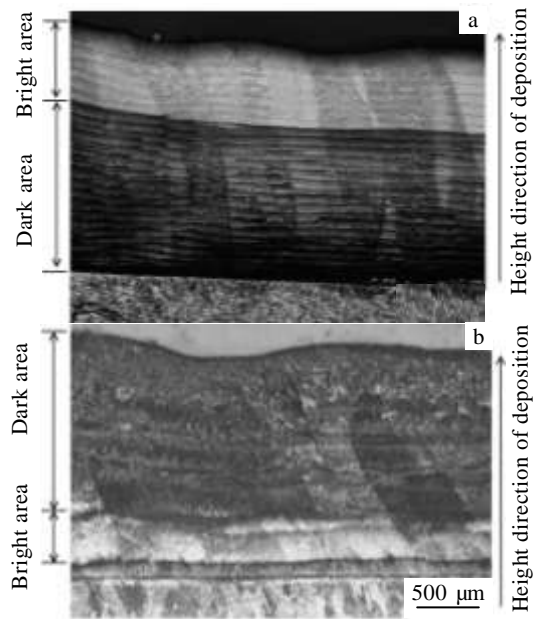


图 3 激光微熔覆沉积 TC4 试样的宏观形貌

Fig.3 Macro-images of laser micro cladding deposited TC4 samples

2.2 激光功率和扫描速度对组织形态的影响

2.2.1 激光功率的影响

为了研究激光功率对试样显微组织的影响，在保持扫描速度、送粉量、Z 轴增量等其他参数不变的情况下，激光功率分别设为 60, 70, 80 和 90 W，扫描速度为 5 mm/s。得到的试样的显微组织如图 4 所示。

可以看到，随着激光功率的增大，位于顶部的明区的宽度增加，由 60 W 的平均尺寸 604 μm，增加到 90 W 的 708 μm。主要是由于随着激光功率的增加，熔池深度增加，熔覆层厚度增加。激光微熔覆沉积得到的明区和暗区的显微组织如图 5 所示。

由图中可以看出，明区和暗区的显微组织都是细长的针状马氏体相。但是明区的马氏体针更加细密，暗区主要是由于在成形过程中要经过多次热循环，在加热的过程中会有更多的 β 相析出，同时使得马氏体针也会有一定的粗化。

2.2.2 扫描速度的影响

扫描速度在激光微熔覆沉积成形过程中主要影响成形过程的加热时间。在激光功率不变和送粉量足够的情况下，扫描速度越快，加热时间就越短。

为了研究扫描速度对显微组织的影响，保持激光功率和其他的成形参数不变，只改变扫描速度。扫描速

度分别为 1, 2, 3, 4 和 5 mm/s, 激光功率为 80 W。图 6 是扫描速度改变对微观组织的影响。

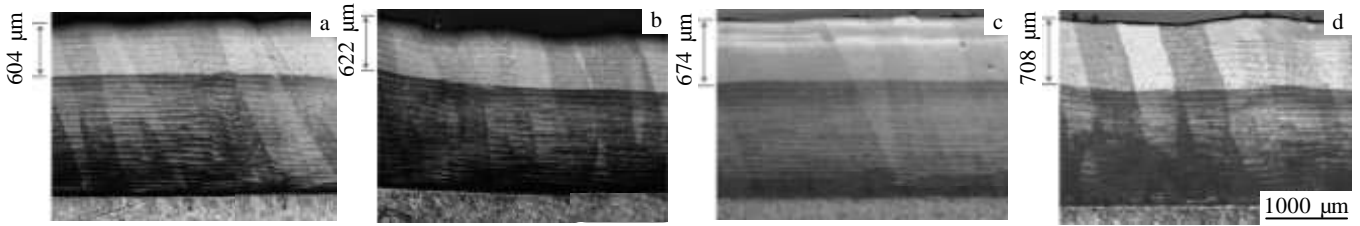


图 4 同一扫描速度、不同激光功率下的 TC4 组织

Fig.4 Microstructures of TC4 for different P with V=5 mm/s: (a) 60 W, (b) 70 W, (c) 80 W, and (d) 90 W

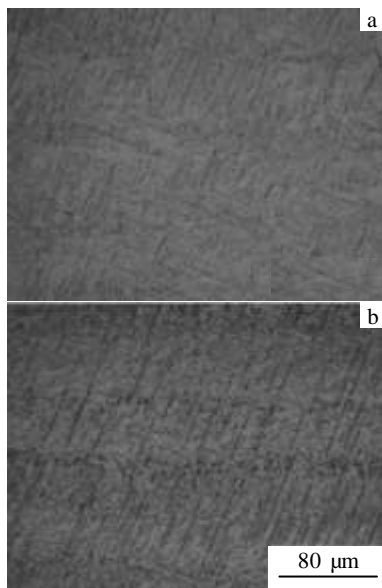


图 5 明区和暗区的显微组织

Fig.5 Microstructures of TC4 in different areas: (a) bright area and (b) dark area

由图 6 可知, 当激光的扫描速度不同时, 成形试样的显微组织仍然分为明区和暗区 2 个不同的区域。当激光的扫描速度不是很低时 (图 6a、6b、6c), 成形试样的显微组织靠近顶部的区域为明区, 并且随着激光扫描速度的增大, 明区的宽度逐渐减小。当激光功率不变时, 由于扫描速度增大, 加热的时间缩短, 实际输入试件的能量就减小, 这一变化趋势与扫描速度不变, 激光功率减小的变化趋势是一致的。其明区和暗区的显微组织如图 5 所示。当扫描速度降低到一定程度时 (图 6d、6e), 成形试样的显微组织变成上部为暗区, 下部为明区。明区的显微组织如图 7b 所示, 暗区的组织包括 7c 和 7d 2 种。

A 区靠近基板, 在成形过程中由于基板的冷却作用, 这一区域的冷却速度很快, 而且在后续的反复加热过程中, 外延生长的柱状晶内细针状的马氏体组织粗化不明显。由于马氏体针很细, 已接近光学显微镜的极限分辨率, 在高倍的光学显微镜下也较难分辨这一区的组织, 因此, 在低倍光学显微镜下呈一片白亮。B 区位于暗区的下部, 由于冷却速度慢, 功率也比较

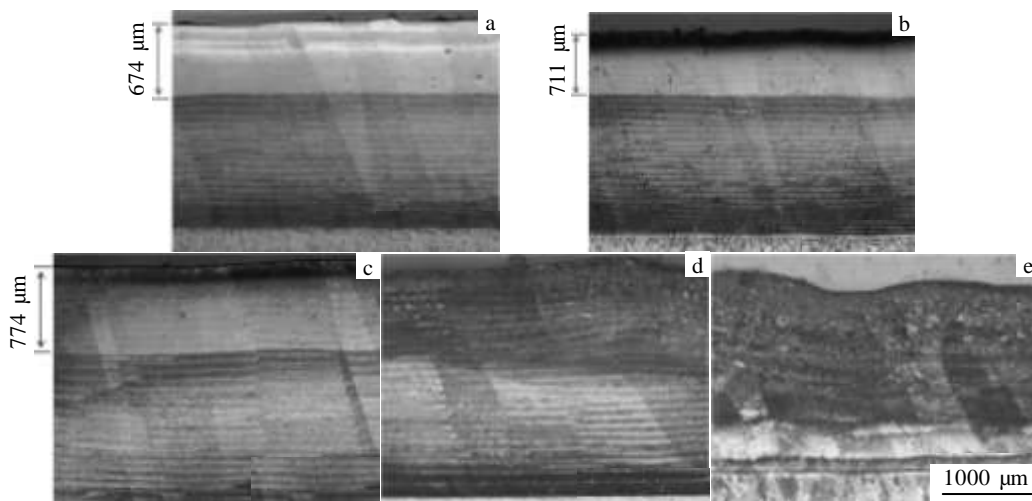


图 6 相同功率、不同速度下的 TC4 组织

Fig.6 Microstructures of TC4 for different V with $P=80$ W: (a) 5 mm/s, (b) 4 mm/s, (c) 3 mm/s, (d) 2 mm/s, and (e) 1 mm/s

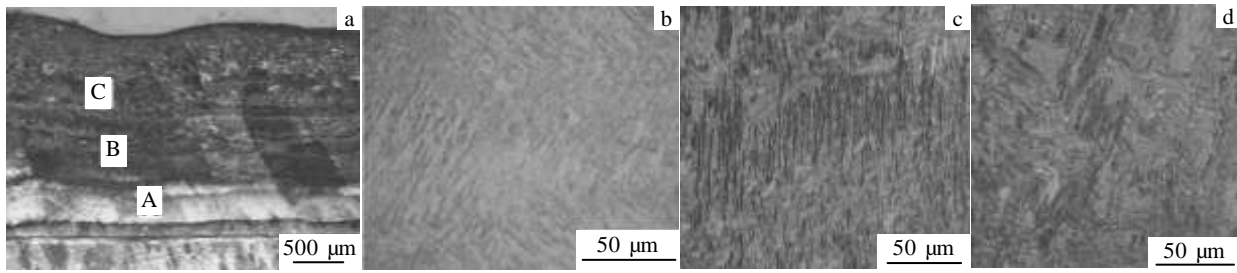


图 7 80 W 低速扫描时 TC4 组织

Fig.7 Microstructures of TC4 for low V with $P=80$ W: (a) the whole, (b) magnification of position A, (c) magnification of position B, and (d) magnification of position C

大，因此热输入多。随着成形过程的进行，要经历不断反复加热，成形过程热量的散失速度减慢，已成形区域经历了足够多次的温度较高的再热循环作用，相当于进行了一定时间的固溶时效处理，进而发生了马氏体组织的粗化，同时有大量的 β 相析出，因此看上去比较暗。C 区位于试样的顶部，这一区域的散热条件较好，冷速较 B 区快，因此 α 会更细，形成 α 片层集束交错排列。

2.2.3 激光功率与扫描速度的综合影响

在激光微熔覆沉积成形过程中，激光功率和扫描速度对组织形态的影响是综合性的。文献[7]引入了激光功率 P 与激光扫描速度 V 之比，即激光束扫描时的线能量密度来考察能量密度对成形组织形态的影响。同样，本研究利用 P/V 的值来考察激光微熔覆沉积成形过程中，激光的线能量密度对沉积组织的影响。表 2 给出了 P/V 值与组织形态的变化关系。

由上表可以看出，当 P/V 值小于 40 W s mm^{-1} 时，熔覆层宏观上顶部为明区，底部为暗区，并且明区的宽度随着 P/V 值的增大而增加，这主要是由于当其他成形条件一定时，线能量密度增加，则熔覆层的厚度增大。当 P/V 值大于 40 W s mm^{-1} 时，熔覆层上部的组织粗化，变为暗区，下部由于底板的强散热作用，针状马氏体组织没有粗化，宏观上看是明区。这主要是由于线能量密度变大，当成形到一定高度后使细针状马氏体在反复加热过程中容易长大粗化，使上部呈现出不同的组织。

2.3 成形高度对组织形态的影响

由于激光微熔覆沉积成形过程是逐层堆积的过程，一方面已经凝固的部分都要经受反复加热和冷却的再热循环过程。另一方面已经凝固的部分将作为后续堆积的基板，也可能对后续成形部分的微观组织产

生影响，因此研究成形高度对试件组织形态的影响具有重要意义。

表 2 P/V 的值与组织分区的关系

Table 2 Relationships between P/V and microstructure characteristic

$(P/V)/$ W s mm^{-1}	P/W	$V/\text{mm s}^{-1}$	Microstructure characteristic
12	60	5	Bright area-up (604 μm) Dark area-down
14	70	5	Bright area-up (622 μm) Dark area-down
16	80	5	Bright area-up (674 μm) Dark area-down
18	90	5	Bright area-up (708 μm) Dark area-down
20	80	4	Bright area-up (711 μm) Dark area-down
26.7	80	3	Bright area-up (774 μm) Dark area-down
37.5	65	2	Bright area-up (885 μm) Dark area-down
40	80	2	Dark area-up Bright area-down
80	80	1	Dark area-up Bright area-down

为了考察成形过程中，随着成形高度的增加，熔覆层组织的演变规律，采用相同的工艺参数（如表 2 中第 2 行所示），进行了 4 层、6 层、8 层、10 层和 16 层的成形。成形试样的微观组织如图 8 所示。

由图 8 可知，当成形层数小于 8 层时，看不到明暗分区现象。当成形高度为 10 层和 16 层时，熔覆层会出现非常明显的明暗分区，上部为明区，下部为暗区，并且上部明区的宽度基本相同。这与前面的分析相一致。说明当 P/V 值小于 $40 \text{ W}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时，明区的宽度随着熔覆层数的增加，基本不变，始终位于熔覆层的顶部不到 10 层的厚度，这一区域在激光微熔覆沉积成形的逐层堆积过程中将动态地保持下来。随着熔覆层数的增加，暗区的高度会增大。其微观组织和成因

如前所述。

2.4 激光功率和扫描速度对试样显微硬度的影响

2.4.1 激光功率的影响

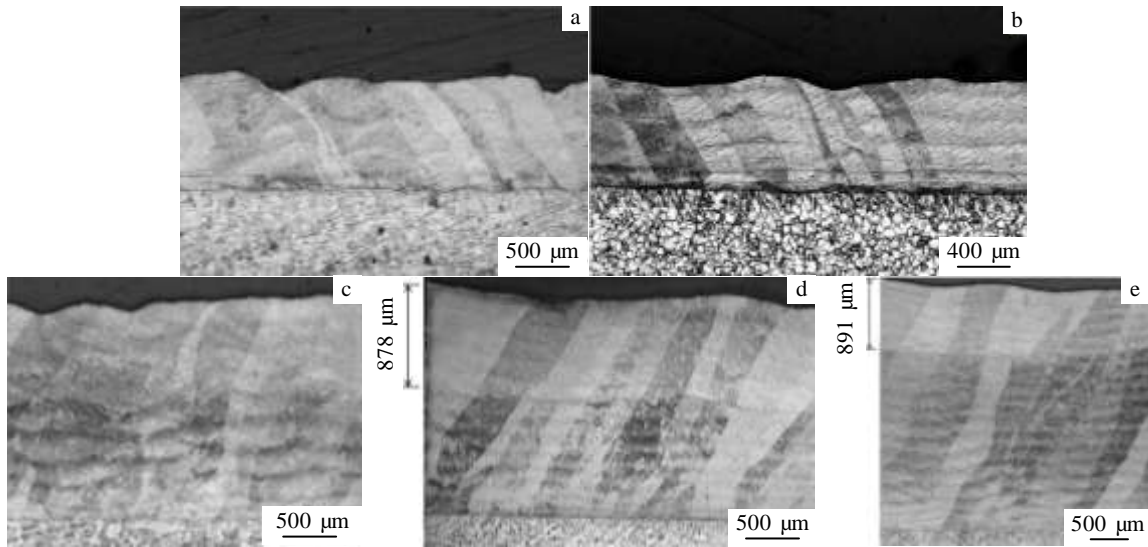


图 8 不同成形高度的 TC4 组织

Fig.8 Microstructure of TC4 for different layers with $P=65$ W, $V=2$ mm/s: (a) 4 layers, (b) 6 layers, (c) 8 layers, (d) 10 layers, and (e) 16 layers

利用显微硬度计分别测量在其他成形参数不变,不同激光功率下成形试样的明区和暗区的显微硬度,结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,明区的硬度要比暗区高 500 MPa 左右;同时随着激光功率的增加,明区和暗区的硬度呈下降趋势,这可能是由于激光功率增加,使试样的明区和暗区都获得了更多的热量,造成了组织的软化。

2.4.2 扫描速度的影响

保持其他工艺参数不变,扫描速度为 3~5 mm/s 时成形试样的显微硬度分析结果如图 10 所示。

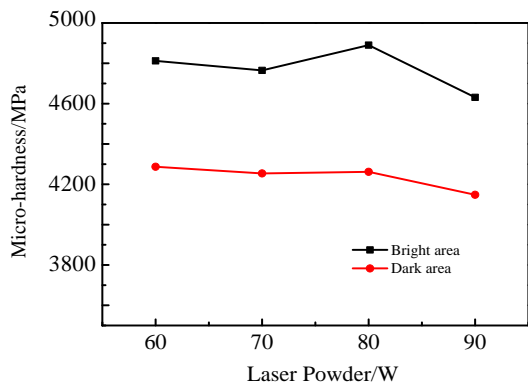


图 9 不同激光功率下 TC4 成形件的显微硬度

Fig.9 Microhardness of TC4 parts with $V=5$ mm/s under different laser powers

由图 10 可以看出,明区的硬度要比暗区高;同时随着扫描速度的增加,明区和暗区的硬度呈上升趋势,这可能是由于随着扫描速度的增加,使试样的明区和暗区获得的热量减少,组织软化的程度降低,这与激光功率增加的结果是一致的。

当扫描速度为 1 和 2 mm/s 时,不同区域组织的硬度变化规律如图 11 所示。

图 11 表明暗区 B 和 C 的显微硬度要高于明区 A 的显微硬度。这可能是由于暗区的组织在成形过程中发生了固溶强化的结果。

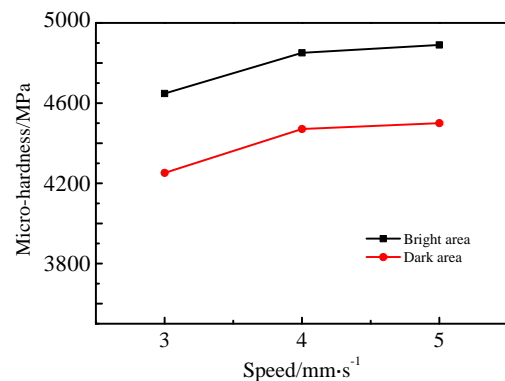


图 10 功率 80 W、扫描速度 3~5 mm/s 时 TC4 成形件的显微硬度

Fig.10 Microhardness of TC4 parts with $P=80$ W under the speed of 3, 4 and 5 mm/s

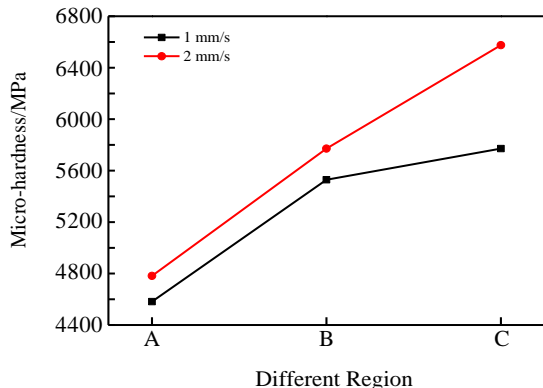


图 11 功率 80 W、扫描速度 1~2 mm/s 时 TC4 成形件的显微硬度

Fig.11 Micro-hardness of TC4 parts with $P=80$ W under the speed of 1 and 2 mm/s in different regions

3 结 论

1) 激光微熔覆沉积成形 TC4 组织主要为外延生长的柱状晶组织。柱状晶可以贯穿整个熔覆层，也可能熔覆层最上部为快速凝固的枝晶薄层。

2) 不同激光功率和扫描速度下制备的 TC4 试样，宏观上可以观察到明暗截然分开的 2 个区域。

3) 当 P/V 值小于 40 W s mm^{-1} 时，成形试样的显微组织顶部区域为明区，下部为暗区。明区和暗区的显微组织都是细长的针状马氏体，明区组织更细密，并且随着激光扫描速度的增大或激光功率的减小，明区

的宽度逐渐减小；当 P/V 值大于 40 W s mm^{-1} 时，成形试样的显微组织变成顶部为暗区，下部为明区。暗区的组织由于发生固溶时效，细针状马氏体粗化。明区的组织是细针状的马氏体组织。

4) 当 P/V 值小于 40 W s mm^{-1} 时，上部明区的显微硬度要高于下部暗区的显微硬度，同时随着激光功率的增加或扫描速度的减小，明区和暗区的硬度都呈下降趋势。当 P/V 值大于 40 W s mm^{-1} 时，上部暗区组织的显微硬度要比下部明区组织的显微硬度更高。

参考文献 References

[1] Peter C Collins. *A Combinatorial Approach to the Development of Composition Microstructure Property Relationships in Titanium Alloys using Directed Laser Deposition*[D]. USA: The Ohio State University, 2004

[2] M Naveed Ahsana, Andrew J Pinkerton, Richard J Moat *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 7648

[3] Bernd Baufeld, Erhard Brandl, Omer van der Biest. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 1146

[4] Akhilesh Kumar Swarnakar, Omer Van der Biest, Bernd Baufeld. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509: 2723

[5] Vollertsen F, H Schulze Niehoff, Hu Z. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2006, 46: 1172

[6] Yao Bo(姚波), Lin Feng(林峰), Ma Xulong(马旭龙) *et al. Electromaching & Mould*(电加工与模具)[J], 2011(4): 57

[7] Zhang Shuangyin(张霜银), Lin Xin(林鑫), Chen Jing(陈静) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(10): 1839

Influence of Processing Parameters on the Microstructure of TC4 Titanium Alloy by Laser Micro Cladding Deposition Manufacturing

Yao Bo^{1,2}, Lin Feng¹, Ma Xulong¹

(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education of China, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Army Aviation Institute of PLA, Beijing 101123, China)

Abstract: In the process of laser micro cladding deposition manufacturing of TC4, the influence of the laser power and scanning speed on the microstructure and micro-hardness were analyzed. The results indicate that the prior β columnar grains dominate the entire cladding layer or the columnar are epitaxial growth with a thin layer of fine dendritic microstructure in the top. There are two regions, bright region and dark region in the macrostructure. When P/V is less than 40 W s mm^{-1} , the bright region is in the top and the dark region is below it. The microstructure of the two regions is acicular martensite and it is finer in bright region than in dark region. The micro-hardness of the bright region is higher than that of the dark region. With the increase of the laser power or the decrease of the scanning speed, the height of the bright region increases and the micro-hardness of the bright and dark regions all decreases. Otherwise, the bright region is under the dark region. In this case, the microstructure of the bright region is still acicular martensite, while the microstructure of the dark region is coarsened from acicular martensite by a solution and aging treatment of the repeated heating; at the same time, the micro-hardness of the

dark region is higher than the bright region.

Key words: laser micro cladding deposition; TC4; processing parameter; microstructures; micro-hardness

Corresponding author: Lin Feng, Ph. D., Professor, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China, Tel: 0086-10-62788675, E-mail: linfeng@tsinghua.edu.cn