

# 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

席明哲, 高士友, 刘 博, 李小榕

(燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 分别采用单向扫描和编织扫描方式, 激光快速成形了两个 TA15 钛合金厚壁零件, 研究了扫描方式、退火热处理对 TA15 钛合金组织和拉伸力学性能的影响。结果表明, 激光快速成形 TA15 钛合金具有良好的金相组织热稳定性。编织扫描方式可显著细化 TA15 钛合金的金相组织, 与单向扫描方式制备的 TA15 钛合金相比, 编织扫描方式制备的 TA15 钛合金具有更高的力学性能。两种扫描方式制备的 TA15 钛合金, 其沉积态和热处理态的拉伸性能具有各向异性, 经 940 °C/1 h/AC 热处理后, 两种扫描方式制备的 TA15 钛合金沿水平方向和垂直方向的拉伸力学性能均超过 TA15 钛合金退火锻件的力学性能标准。

**关键词:** 激光快速成形; TA15 钛合金; 扫描方式; 组织; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2\*3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2014)02-0445-05

TA15 钛合金以  $\alpha$  稳定元素 Al 的固溶强化为主要强化机制, 同时加入一定中性元素 Zr 和  $\beta$  稳定元素 Mo 和 V 进行补充强化和改善工艺性能, 该钛合金具有强度高、焊接性能和工艺性能好等突出优点, 被广泛用来制造各种机身加强框、梁、接头等飞机大型复杂主承力结构件<sup>[1]</sup>。由于钛合金变形温度高、变形抗力大, 因此, 采用传统的“锻造+机械加工”方法制造大型复杂钛合金结构件, 不仅工序长、工艺复杂, 而且零件机械加工去除量大、制造成本高、生产周期很长。金属零件激光快速成形技术是 20 世纪 90 年代中期迅速发展起来的一项新的先进制造技术<sup>[2-3]</sup>, 能够实现高性能复杂结构致密金属零件的近净成形。由于金属零件激光快速成形技术具有无模制造、研制周期短、加工速度快、制造成本低等突出技术特点, 为大型复杂钛合金结构件的低成本、短周期、近净成形制造提供了一条新的技术途径。

由于激光扫描方式可以通过影响金属零件激光快速成形过程中激光熔池热量输入和热量散失条件来影响成形零件内部组织的形成<sup>[4]</sup>, 所以, 激光扫描方式是金属零件激光快速成形技术的一个重要工艺参数。D. P. Dinda<sup>[5]</sup>在激光快速成形 Inconel 625 合金薄壁件的研究中发现, 沉积层中定向生长柱状晶的生长方向随着激光扫描方向的改变而发生改变; I. Taberero<sup>[6]</sup>

研究表明, 不同激光扫描方式可以显著影响激光快速成形 Inconel 718 合金的拉伸力学性能; Fencheng Liu<sup>[7]</sup>研究指出, 激光扫描方式对激光快速成形 Inconel 718 合金组织和力学性能具有明显影响。目前, 激光快速成形 TA15 钛合金的研究主要集中在成形 TA15 钛合金零件组织及其力学性能以及退火热处理工艺优化上<sup>[8-10]</sup>, 关于激光扫描方式对激光快速成形 TA15 钛合金组织和力学性能影响的研究还未见报道。

本实验分别采用单向扫描方式和编织扫描方式, 分别激光快速成形出 2 个 TA15 钛合金厚壁件, 重点研究激光扫描方式、退火热处理对激光快速成形 TA15 钛合金组织和 2 个相互垂直方向上拉伸力学性能的影响, 以期优化 TA15 钛合金激光快速成形工艺提供参考。

## 1 实 验

TA15 钛合金激光快速成形实验在激光快速成形系统上完成, 系统组成主要包括: 5000 W CO<sub>2</sub> 激光器、四轴激光数控加工平台、双路同轴送粉头、送粉器、惰性气氛保护箱、进口在线氧分析仪。激光快速成形 TA15 钛合金厚壁件的工艺参数为: 激光功率 1600 W; 扫描速度 3 mm/s; 光斑直径 3 mm; 高度方向增量 0.3 mm; 搭接率 35%; 送粉速率 5 g/min。基

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金 (50871022)

作者简介: 席明哲, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004, 电话: 0335-8052253, E-mail: ximingzhe@ysu.edu.cn

材采用 TA15 热轧板 (130 mm×40 mm×6 mm), 所用粉末为等离子旋转电极法制备的 TA15 球形粉末, 其化学成分(质量分数, %)为: 6.5Al, 1.92Zr, 1.78Mo, 2.28V, 0.065Fe, 0.047Si, 0.008C, 0.015N, 0.006H, 0.13O, 其余为 Ti。为防止钛合金在激光快速成形过程中氧化, 控制惰性气氛箱内的氧体积分数含量小于  $5 \times 10^{-5}$ 。采用单向扫描方式(图 1a)和编织扫描方式(图 1b), 分别激光快速成形出两个 TA15 合金厚壁件(70 mm×16 mm×50 mm)。热处理工艺为: 940 °C/1 h/AC。金相试样采用标准金相试样制备方法, 腐蚀剂为 Kroll 试剂, 即体积比为 1:6:7 HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液。采用 SMZ-B2 型体式显微镜拍摄光学组织照片, 用 Hitachi S-3400N 型扫描电镜进行显微组织、试样拉伸断口形貌分析。在 Insekt100 Table 型微机控制试验机上测试力学性能, 拉伸时采用位移控制, 加载速率 1 mm/min。

## 2 结果与分析

### 2.1 组织分析

图 2 为激光快速成形 TA15 合金光学组织照片。如图 2a 所示, 采用单向扫描方式, 激光快速成形的 TA15 钛合金厚壁件, 其 X-Z 截面(参见图 1 中坐标系)沉积态光学组织由贯穿多个沉积层的粗大  $\beta$  初生柱状晶所组成, 其形成原因为, 在激光熔池冷却过程中, 熔池中的绝大部分热量通过基板和先沉积金属材料向下散失, 晶体逆着热流向上定向生长并形成柱状晶。在连续激光沉积过程中, 前一沉积层中的柱状晶

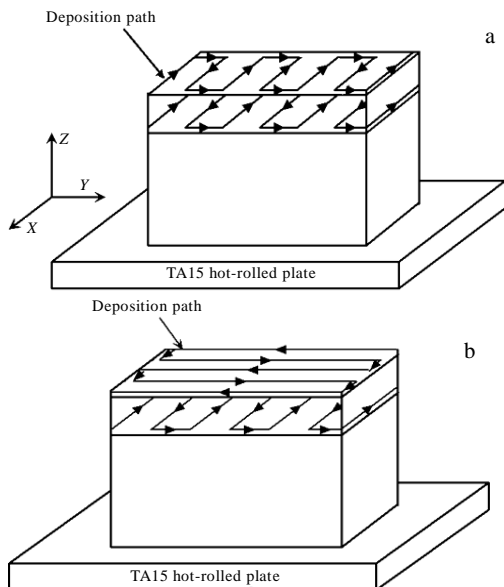


图 1 扫描方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of scanning pattern: (a) unidirectional scanning and (b) weaving scanning

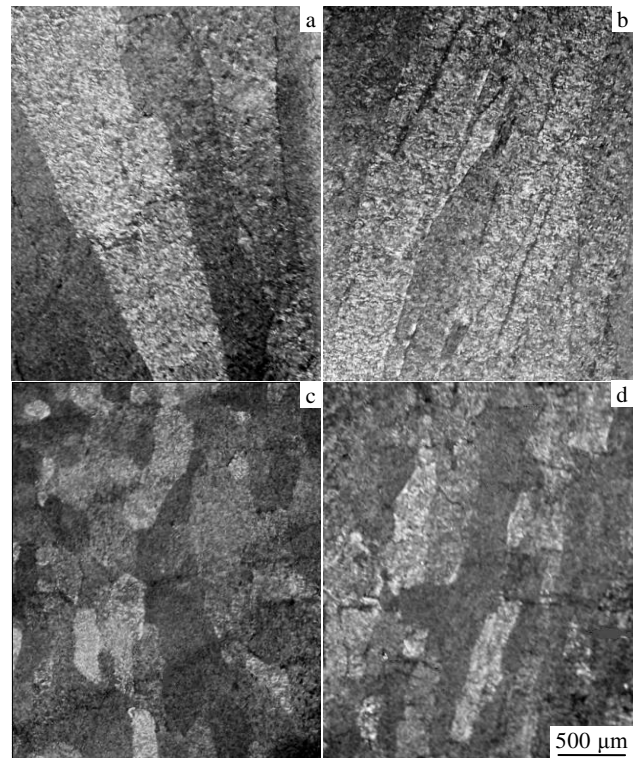


图 2 激光快速成形 TA15 合金光学组织照片

Fig.2 OM metallographs of LR Fed TA15 titanium alloy. unidirectional scanning: (a) as-deposited, (b) after the heat-treatment; weaving scanning: (c) as-deposited, (d) after the heat-treatment

顶部被部分熔化, 熔池中的熔体在前一沉积层中柱状晶的基础上外延凝固生长, 由于单向扫描的各沉积层扫描路径一致, 相邻沉积层激光熔池中熔体的凝固条件趋于相同, 层层激光熔化沉积, 最终形成如图 2a 所示的贯穿多个沉积层的粗大  $\beta$  初生柱状晶组织。D. P. Dinda<sup>[5]</sup>研究表明, 激光沉积层中的定向生长柱状晶的晶轴向激光扫描前进的方向以一定角度倾斜, 随着扫描方向的改变, 沉积层中柱状晶的晶轴倾斜方向随之改变, 因此, 当采用往复扫描方式(两相邻沉积层的激光扫描方向相反)时, 两相邻沉积层中柱状晶的晶轴互成一定夹角。如图 2c 所示, 当采用编织扫描方式时, 激光快速成形的 TA15 合金厚壁件, 其 X-Z 截面的沉积态光学组织, 与图 2a 相比, 该金相组织发生明显变化, 金相组织得到明显细化。这是因为, 采用编织扫描方式, 由于相邻沉积层激光扫描路径相互垂直, 随扫描方向的改变, 沉积层中  $\beta$  柱状晶生长方向也相应改变, 从而相邻沉积层中  $\beta$  柱状晶的晶轴间具有一定夹角, 改变了单向扫描方式相邻沉积层  $\beta$  柱状晶定向外延生长模式。如图 2b 和图 2d 所示, 经过 940 °C/1 h/AC 热处理后, 可以看出, 与图 2a 和图 2c

相比，两种扫描方式制备的 TA15 合金材料均表现出良好的金相组织热稳定性，其原因可能是由于激光快速成形 TA15 合金  $\beta$  初生柱状晶晶粒粗大，因此，比界面能较低，在热处理过程中，晶粒长大的驱动力较小<sup>[11]</sup>。

图 3 为两种扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件的 SEM 照片。如图 3a 和图 3c 所示，两种扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件的沉积态显微组织非常相似，均为由片状初生  $\alpha$  相和片状  $\alpha$  相间薄片  $\beta$  相所组成的网篮组织，但是可以明显看出，编织扫描方式制备的 TA15 合金，其网篮组织中的片状  $\alpha$  和  $\beta$  相的长宽比相对较大，Fencheng Liu<sup>[7]</sup>指出，激光熔池中热量散失方向随着激光扫描方向的改变而改变，因此，当扫描方式发生改变，已沉积 TA15 钛合金材料中温度累积效应和激光熔池中的最大温度梯度方向也将随之改变，这将对激光熔池的凝固冷却过程产生影响，从而导致所制备 TA15 钛合金材料内部组织产生变化。如图 3b 和图 3d 所示，经 940 °C/1 h/AC 退火热处理后，两种扫描方式制备的 TA15 合金材料的显微组织基本一致，均为由明显粗化的初生  $\alpha$  相板条+ $\beta$  转变组织（二次析出的  $\alpha$  相薄片和残余  $\beta$  相薄片组成）所组成的双相组织，该双相组织与锻造退火态 TA15 合金的双态组织（等轴初生  $\alpha$  相+ $\beta$  转变组织）的区别在于初生  $\alpha$  相的形状。尽管激光快速成形过程中，在由不均匀温度场引起的热应力场作用下，TA15 钛合金试样会发生变形，但由于变形量较小，试样中存储的变形能较少，因此，在热处理过程中，所制备 TA15 钛合金材料的再结晶驱动力很小，所以，热处理不会引起激光快速成形 TA15 合金发生再结晶，这一点可以从图 3b 及图 3d 中没有出现等轴的初生  $\alpha$  相得到证实。从图 2 和图 3 可知，扫描方式对所制备 TA15 钛合金的光学组织的影响较大，而对其显微组织影响不大。

2.2 力学性能

如表 1 所示，两种扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件，其沉积态和热处理后，沿沉积高度方向和水平方向上的拉伸力学性能均存在着各向异性，总

体来说，与沿水平方向的拉伸力学性能相比，沿沉积高度方向的拉伸强度较低，而延伸率较高。从表 1 可以看出，单向扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件，在沉积态条件下，沿沉积高度方向的延伸率远大于沿水平方向的延伸率。其原因在于，如图 2a 所示，单向扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件，其 X-Z 截面金相组织由贯穿多个沉积层的定向生长粗大初生  $\beta$  柱状晶所组成，因此，沿沉积高度方向的水平晶界数量明显少于沿水平方向的垂直晶界数量，所以，2 个拉伸方向上晶界数量的不同应是导致 2 个方向上延伸率差别较大的重要原因。如表 1 所示，编织扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件，在沉积态条件下，2 个相互垂直方向上的拉伸力学性能均优于单向扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件，特别是沿水平方向的延伸率有较大幅度提高，分析认为，与图 2a 相比，从图 2c 可以看出，编织扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件，在沉积态条件下，其 X-Z 截面金

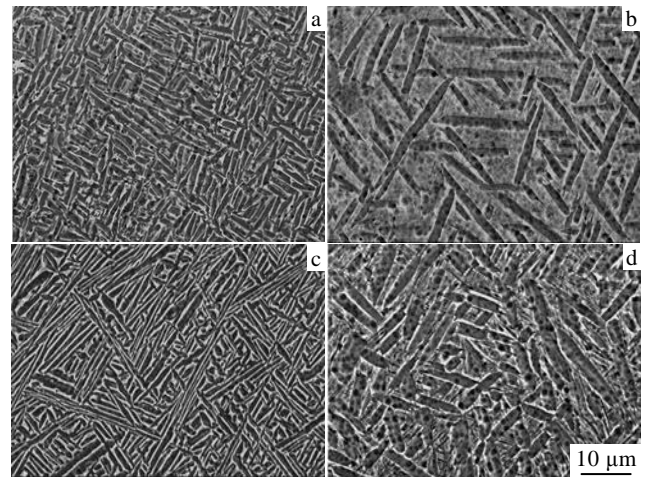


图 3 激光快速成形 TA15 钛合金 SEM 照片

Fig.3 SEM images of LRFed TA15 titanium alloy. unidirectional scanning: (a) as-deposited, (b) after the heat-treatment; weaving scanning: (c) as-deposited, (d) after the heat-treatment

表 1 激光快速成形 TA15 钛合金拉伸力学性能  
Table 1 Tensile properties of LRFed TA15 titanium alloy

Heat treatment condition	Scanning pattern	Tensile direction					
		Horizontal direction			Vertical direction		
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%
As-deposited	Unidirectional	912.9	970.8	4.6	843.5	960.7	8.5
	Weaving	1044.6	1136.7	9.1	980.3	1098.4	11.6
Annealed at 940 °C for 1 h, AC	Unidirectional	1101.4	1235.1	11.6	1065.6	1185.7	13.5
	Weaving	1297.4	1415.4	14.8	1178.4	1335.3	16.5
Horizontal tensile properties	Wrought+annealed (11-CL-059B-2001)			$\geq 855$	930~1130	$\geq 8$	
Vertical tensile properties	Wrought+annealed (11-CL-059B-2001)			$\geq 855$	930~1130	$\geq 10$	

相组织中的初生  $\beta$  晶组织得到明显细化, 同时, 从图 3a 和图 3c 可以看出, 两种扫描方式沉积成形的 TA15 合金厚壁件, 在沉积态条件下, 其显微组织中的组织结构、相尺寸基本一致, 因此, 金相组织的细化应是编织扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件拉伸力学性能高于单向扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件拉伸力学性能的主要原因。经过 940 °C/1 h/AC 热处理后, 两种扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件的拉伸力学性能均得到了明显提高, 均达到并优于锻造退火 TA15 钛合金的拉伸力学性能标准, 其中, 编织扫描方式制备的 TA15 钛合金的拉伸力学性能更高。由图 2b 和图 2d 可知, 两种扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件, 经 940 °C/1 h/AC 热处理后, 均表现出良好的金相组织热稳定性, 金相组织中初生  $\beta$  晶粒形状、尺寸变化不大, 同时, 又从图 3b 和图 3d 可知, 热处理后, 两种扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件的显微组织相似, 因此, 热处理后, 编织扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件拉伸力学性能高于单向扫描方式沉积成形 TA15 钛合金厚壁件, 拉伸力学性能仍然与其金相组织细化相关。

关于退火热处理提高激光快速成形 TA15 钛合金拉伸力学性能的可能原因, 分析如下, 如图 3a 和图 3c 所示, 由于沉积态 TA15 钛合金显微组织中初生片状  $\alpha$  相和  $\alpha$  相间薄片  $\beta$  相的长宽比较大, 因此初生片状  $\alpha$  相和  $\alpha$  相间薄片  $\beta$  相的变形协调性较差, 在拉伸变形时, 容易出现不均匀变形而引起局部应力集中并导致在  $\alpha/\beta$  相界面处微裂纹产生, 所以沉积态 TA15 钛合金的拉伸力学性能相对较低, 尤其是塑性明显低于锻造退火 TA15 钛合金。热处理后, 从图 3b 和图 3d 可以看出, 与沉积态的网篮组织相比, 两种扫描方式制备的 TA15 钛合金的显微组织均表现出初生  $\alpha$  相显著长大, 且初生  $\alpha$  相体积分数大幅度减少, 同时在初生  $\alpha$  相板条间的  $\beta$  转变组织体积分数大幅度增加, 该  $\beta$  转变组织由二次析出的  $\alpha$  相薄片和残余  $\beta$  相薄片组成。由于  $\beta$  转变组织中的二次  $\alpha$  相及残余  $\beta$  相片层厚度大幅减薄, 使得在拉伸变形过程中, 位错在二次  $\alpha$  相及残余  $\beta$  相中滑移距离缩短, 从而使 TA15 钛合金的拉伸强度得到提高; 同时, 又由于  $\beta$  转变组织中的  $\alpha+\beta$  片层结构尺寸较小又使得  $\alpha+\beta$  片层结构排列方向增多, 使局部发生大量塑性变形而引起应力集中的可能性减少, 从而又使 TA15 钛合金的塑性得到提高。

### 2.3 拉伸断口

单向扫描和编织扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件, 沉积态及热处理后, 沿沉积高度方向的拉伸试样的断口形貌如图 4 所示, 可以看出, 两种扫描

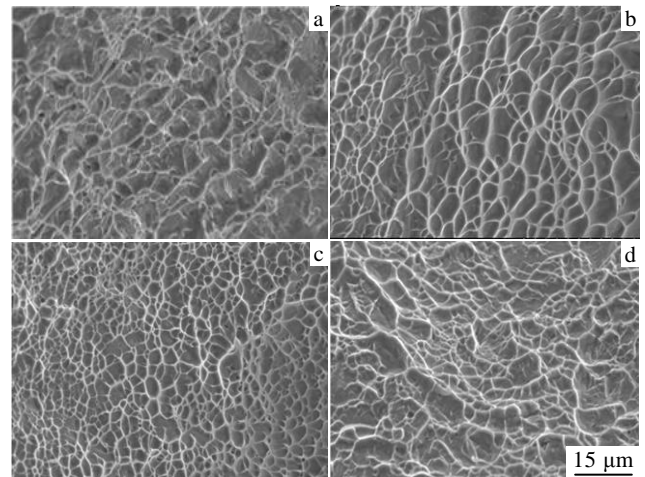


图 4 激光快速成形 TA15 钛合金沿垂直方向的拉伸断口

Fig.4 Fractographs of LRFed TA15 titanium alloy along vertical direction. unidirectional scanning: (a) as-deposited, (b) after the heat-treatment; weaving scanning: (c) as-deposited, (d) after the heat-treatment

方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件, 沉积态及热处理后, 沿沉积高度方向的拉伸断口的微观形貌相似, 断口上均布满韧窝, 拉伸断裂均为韧性断裂, 同时还可以看出, 热处理后, 拉伸断口上的韧窝更加细密, 表明热处理后, 所成形 TA15 钛合金厚壁件沿沉积高度方向的塑性要高于沉积态 TA15 钛合金厚壁件, 这与表 1 中力学性能测试结果相同。

## 3 结 论

1) 扫描方式对激光快速成形 TA15 钛合金金相组织和拉伸力学性能有明显影响, 编织扫描方式制备的 TA15 钛合金金相组织明显细化, 且拉伸力学性能优于单向扫描方式制备的 TA15 钛合金。

2) 两种扫描方式沉积成形的 TA15 钛合金厚壁件, 其沉积态和热处理后的拉伸力学性能均具有各向异性, 表现为, 与沿水平方向的拉伸力学性能相比, 沿沉积高度方向的拉伸强度稍低, 而延伸率较高。

3) 退火热处理对两种扫描方式制备的沉积态 TA15 钛合金金相组织影响不大, 但可以显著改变其显微组织。热处理后, 两种扫描方式沉积成形的 TA15 合金厚壁件, 其在 2 个方向上的拉伸力学性能均达到并优于锻造退火 TA15 钛合金力学性能标准。

### 参考文献 References

[1] Editing Committee of Practical Handbook of Engineering

- Materials. *Practical Handbook of Engineering Materials (Second Edition) Volume 4, Titanium Alloy and Copper Alloy* (工程材料使用手册(第二版), 第4卷, 钛合金铜合金)[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2002: 74
- [2] Amano R S, Rohatgi P K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 6680
- [3] Vamsi Krishna B, Bandyopadhyay Amit. *Materials and Design* [J], 2009, 30: 1490
- [4] Ma Liang(马良), Huang Weidong(黄卫东), Xu Xiaojing(许小静). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(10): 1731
- [5] Dinda G P, Dasgupta A K, Mazumder J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 509(1-2): 98
- [6] Taberero I, Lamikiz A, Martinez S *et al. International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2011, 51(6): 465
- [7] Liu Fencheng, Lin Xin, Huang Chunping *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 51: 4505
- [8] Zhang Xiaohong(张小红), 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], 2011, 40(1): 142
- [9] Xie Xuxia(谢旭霞), Zhang Shuquan(张述泉), Tang Haibo(汤海波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(9): 1510
- [10] Xi Mingzhe(席明哲), Gao Shiyu(高士友). *Chinese Journal of Laser*(中国激光)[J], 2012, 39(1): 0 103 007
- [11] Xu Zhou(徐洲), Zhao Liancheng(赵连城). *Principles of Metal Solid-State Phase Changes*(金属固态相变原理)[M]. Beijing: Science Press, 2004: 53

## Effect of Scanning Pattern and Annealing Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy Formed by Laser Rapid Forming Process

Xi Mingzhe, Gao Shiyu, Liu Bo, Li Xiaorong

(Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Two thick-wall parts of TA15 alloy were formed by laser rapid forming (LRF) process using unidirectional scanning pattern and weaving scanning pattern, respectively. The investigation on the effect of scanning pattern and heat treatment on the microstructures and the tensile properties of the LRFed TA15 alloy was carried out. Results show that the LRFed TA15 alloy has a good thermal stability of metallographic microstructures. The tensile properties of TA15 alloy formed by the weaving scanning pattern are superior to that of TA15 alloy fabricated by the unidirectional scanning pattern due to finer metallographic microstructures of TA15 alloy obtained by the weaving scanning pattern. The tensile properties of as-deposited and heat-treated TA15 alloy prepared by the both scanning patterns are anisotropic, after the heat treatment of 940 °C/1 h/AC, the tensile properties of the formed TA15 alloy are better than that of the wrought annealed TA15 alloy.

**Key words:** laser rapid forming; TA15 titanium alloy; scanning pattern; microstructures; mechanical properties

---

Corresponding author: Xi Mingzhe, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P. R. China, Tel: 0086-0335-8052253, E-mail: ximingzhe@ysu.edu.cn