

激光增材制造毛坯与传统锻件铸件差异性分析

郝晓宁

(中航通飞研究院有限公司, 珠海 519040)

[摘要] 通过收集和整理国内外技术标准,对比分析了激光增材制造毛坯与传统锻造和铸造毛坯在成形工艺、显微组织、缺陷及其形成原因、内部质量以及力学性能等方面的差异。结果表明,激光增材制造较传统工艺整体制造周期短、材料利用率高;激光增材制造毛坯气孔能达到 A1 级别,稍低于锻造的 AA 级别,气孔级别能达到铸件的 B 级;激光增材制造钛合金纵横向屈服强度和拉伸强度分别比锻造和铸造低 3.4% 和 0.78%。

关键词: 激光增材制造; 锻造; 铸造; 缺陷; 差异性

Difference Analysis Between Laser Additive Manufacturing and Conventional Forging and Casting

HAO Xiaoning

(China Aviation Industry General Aircraft Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

[ABSTRACT] After collecting and sorting the domestic and foreign standards, we analyzed the differences between laser additive manufacturing (LAM) and the conventional forging and casting in forming technology, microstructure, defects and the causes, internal quality and mechanical properties. It revealed that compared with conventional forming and casting, the manufacturing cycle of LAM is shorter and the material utilization is higher; the porosity in the blank fabricated by LAM can reach class A1, which is lower than forging class AA, and can reach casting class B. Yield strength of titanium alloy by LAM in transverse and horizontal is lower than forging and casting by 3.4%, and tensile strength of titanium alloy by LAM is lower than that of forging and casting by 0.78% respectively.

Keywords: Alaser additive manufacturing; Forging; Casting; Defects; Differences

DOI:10.16080/j.issn 1671-833x.2017.05.082

激光增材制造或称 3D 打印技术,是基于微积分的思想,采用激光分层扫描、叠加成形的方式逐层增加材料将数字模型转换成三维实体零件。相对于传统的材料去除技术,是一种“自下而上”材料累加的制造方法。作为一门新兴技术,激光增材制造在材料、工艺以及加工制造等方面有别于传统制造。传统锻造是一种利用锻压机械对金属坯料施加压力,使其产生塑性变形以获得具有一定机械性能、一定形状和尺寸锻件的加工方法。铸造是指将固态金属熔化为液态倒入特定形状的铸型,待其凝固成形的加工方法。

激光增材制造涉及激光、机械、数控、材料等多方面的多学科交叉新技术,且发展时间很短,相对于铸、锻、焊、粉末冶金以及机械加工等传统的制造技术而言,其技术成熟度还有显著差异;高性能金属材料增材制造技术仅在为数不多的军机型号上应用,“鹞鹰”战机“眼镜式”钛合金主承力构件加强框通过了装机评审,使我国成为目前世界上唯一掌握飞机钛合金大型主承力结构

件激光快速成形技术并实现装机应用的国家。此外, F/A-18 飞机也用到了激光直接沉积 Ti6Al4V 钛合金次承力构件。对于民机而言,高性能金属材料增材制造主要用于非承力结构件,如罗-罗公司用 3D 打印制造的钛合金翼型用在最新超强力空客发动机——遛达宽体飞机 -97 (Trent XWB-97),总的来说,高性能金属材料增材制造的结构零件数量少,使用经验欠丰富,需要系统、深入地开展材料、工艺的基础研究与工程化应用研究。

本文分析了应用比较广泛的 Ti6Al4V 钛合金采用激光增材制造毛坯与传统锻造、铸造毛坯差异在成形工艺、显微组织、缺陷及其形成原因、内部质量和力学性能等方面的差异性,以确定激光增材制造毛坯与传统锻件、铸件的差异性。

1 成形工艺

1.1 激光增材制造

激光增材制造的形成过程: 高功率激光束在基体

上聚焦形成熔池,金属粉末同时被同轴送粉器送入熔池中。金属粉末在熔池中与基体熔液融合,并随着激光束的移动,在液体表面张力的作用下熔池开始向着激光束移动方向运动,前面的熔液固化形成沉积层,激光束移动的轨迹便是沉积层的形成轨迹。

与锻造等传统制造技术相比,激光增材制造具有以下突出优点:

(1)不需要铸锭熔铸、零件毛坯制备和锻压模具加工,也不需要大型或超大型锻铸工业基础设施及其相关配套设施;

(2)零件的机械加工余量很小、数控机械加工时间短、材料利用率高;

(3)零件的生产制造成本低、周期短;工艺简单、工序少、柔性高、相应快;

(4)可制造出传统工艺方法难以加工,甚至无法加工的结构。

1.2 锻造

钛及钛合金冷变形困难,因此,通常需要经过热加工方法变形成各种坯料和锻件。锻造不仅可以达到尺寸及形状与产品接近,还能改善钛合金组织,从而提高其性能。钛合金的锻造原则上分为 $\alpha + \beta$ 锻造和 β 锻造。

1.3 铸造

作为近净成形技术之一,铸造技术可以一次性成形形状复杂的产品,且能提高材料利用率并降低成本。另外铸件不需要进行后续加工。由于钛及钛合金化学性能非常活泼,在高温下极易被氧化,因此,对钛合金进行铸造需要采用特种熔炼技术和设备,以防被污染。

2 显微组织

材料的显微组织在很大程度上决定了其性能。Ti6Al4V钛合金最常见的4种显微组织为片层组织(或称魏氏组织)、网篮组织、双态组织以及等轴组织。

激光增材成形的Ti6Al4V钛合金具有网篮结构,显微组织是片状 α 相加晶间 β 相,晶粒沿平行于熔覆层高度方向生长,形成轴向为平行于熔覆层高度方向的柱状晶粒,板条状 α 和 β 随着激光功率的增加和扫描速度的降低而增多。激光增材属于快速凝固过程,其组织要较锻造、铸造更为细小。

表1中列出了3种成形工艺Ti6Al4V钛合金的组织。结合表2分析可得,激光增材制造Ti6Al4V钛合金与锻造相比,拉伸强度较高而塑性较低。

3 缺陷及其形成原因

3.1 激光增材制造缺陷

表1 激光增材制造与锻造、铸造Ti6Al4V钛合金的显微组织

成形工艺	显微组织
激光增材	网篮组织
β 锻造	片层组织
铸造	晶粒粗大的 β 转变组织

表2 钛合金典型组织性能比较

组织	拉伸强度	拉伸塑性	冲击韧性	断裂韧性	疲劳强度	持久强度	蠕变抗力
片层	较高	低	低	高	低	高	高
网篮	高	较低	中	较高	较高	较高	较高
等轴	较低	高	高	低	较高	低	低
双态	较低	较高	中	较低	较高	较低	较低

AMS4999A激光增材制造规范中规定成形件内部存在的缺陷有气孔、熔合不良和开裂^[1]。气孔形貌呈规则球形或类球形,分布具有随机性;熔合不良缺陷形貌不规则,多分布在熔覆层间或道间。

3.2 锻造钛合金缺陷

钛合金中常见的锻造缺陷主要有组织过热及不均、裂纹、夹杂物等。

3.3 铸造钛合金的缺陷

AMS4991铸造规范中规定的铸造钛合金内部缺陷主要有气孔、缩松以及外来夹杂^[2]。3种成形工艺缺陷产生的原因见表3。

3.4 缺陷等级要求

激光增材制造是一种新的成形技术,其成形毛坯缺陷较复杂,对该成形工艺也提出了更高的要求,需采用超声波和射线两种检测方法;锻造缺陷检测的方法是超声波;铸造缺陷检测的方法是射线。本文分别对比了AMS4999A激光增材制造规范、AMS4928R^[3]锻造规范、AMS4991铸造规范、AMS2631^[4]钛合金超声波检验以及国外起落架专用规范MTL-3103^[5]中激光增材与锻造和铸造内部质量允许级别,见表4和表5。对比发现,激光增材制造气孔能达到的最高级别是A1,稍低于锻造的最高级别AA级;与铸造相比,激光增材制造气孔的质量级别能达到铸造的B级^[4-5]。

通过分析几种航空常用锻件的超声波检测和设计的要求,如表6所示,可以看出钛合金锻件能达到AA级别,其他几种航空常用锻件规范对其超声检测质量级别没有相关规定。AMS4999A中规定的增材制造Ti-6Al-4V超声检测最高级别是A1,稍低于锻件的AA级。由此可知,锻造的最高级别是AA级,优于增材制造的A1级别。

表3 激光增材与传统成形工艺缺陷成因对比

缺陷类型	激光增材	锻造	铸造
气孔	气体来源于粉末本身的气体元素和粉末吸附或随粉末卷入熔池内的气体	—	在浇注合金熔体时,卷入到型腔中的气体未来得及排出而产生的
熔合不良	成形特征参量控制不当	—	—
开裂	内部热应力、组织应力和机械约束应力及其强烈非稳态交互作用和应力集中,导致零件严重变形与开裂	内部变形不均匀及内外温差大	—
组织不均	—	微区成分偏析	—
组织过热	—	锻造时大量机械能短时间内转化为内部热量,导致初生 α 等轴急剧减少,严重时组织转变为魏氏组织	—
缩松	—	—	凝固过程中降温较大
夹杂	—	1) 合金成分中高熔点、高密度元素未充分熔化留在基体; 2) 冶炼原材料中的硬质合金刀具崩屑或不适当的电极焊接工艺留下的高密度夹杂物	原材料带入熔体或在熔铸过程中形成

表4 激光增材制造与锻造Ti6Al4V合金超声波检验内部质量允许级别

成形工艺	毛坯尺寸,锻件指产品厚度、直径或两表面之间的长度/mm	质量级别	单个不连续性气孔直径/mm	
			1级(2次熔炼)	2级(3次熔炼)
激光增材	6.25~102(Z向)	A1	1.2	1.2
	102~152(Z向)	A	2.0	1.6
锻造	MTL-3103 ^{2,3}	10~50	AA	—
		50~255	A1	—
		255~355	A	—
		>355	注1	—
	AMS 4928R	注:“注1”为采购商和供应商之间达成一致;“3103 ² ”为 MTL-3103 规定,厚产品的结构必须是从坯段上任何部分截取的 50mm 厚的一段都能够满足超声波 AA 类要求;“3103 ³ ”为 MTL-3103 国外起落架用钛合金专用规范,属于安全寿命设计的结构零件使用。 锻造规范中规定超声检测要求:模锻件的晶体流线,除在含有毛边线端部晶粒的部位外,模锻件的晶粒流线应该沿着锻件的总轮廓,没有显示出再插入的流线;按照疲劳损伤容限设计,结构零件对锻件毛坯的超声检测要求为 A 级		

4 力学性能

4.1 激光增材制造钛合金的力学性能

激光增材制造钛合金沉积态性能呈现各向异性,沿沉积方向强度低而延伸性好,垂直于沉积方向正好相反,其制成品经过退火及固溶、时效强化等热处理后,性能差异基本消失。与锻件相比,激光增材制造毛坯力学性能及疲劳寿命等接近或超过锻件性能。其组织与铸造组织相似,但其晶粒要细小,特别是 α 相晶粒细小。因此,其力学性能要高于铸造钛合金的力学性能。

4.2 锻造钛合金的力学性能

国内研究表明, Ti6Al4V 合金锻造温度为 955~1024℃,压缩量为 50% 时,其延伸率至少可保证 13%,断面收缩率至少可保证 25%。

4.3 铸造钛合金的力学性能

钛铸件的典型组织是晶粒粗大的 β 转变组织,由于晶粒粗大,铸件的塑性和抗拉强度较差。铸造合金和锻造合金相比,具有断裂韧性好、持久强度高、蠕变性能好等优点。铸造条件下的性能和 β 退火的锻造合金相似。

基于 AMS 4999A 增材制造规范、AMS 4928R 锻造规范和 AMS 4991 铸造规范,分别对比了 3 种成形工艺毛坯的力学性能,如表 7 所示。对比可以发现增材制造

表5 增材制造与铸造Ti-6Al-4V射线检验内部缺陷允许级别

mm

成形工艺	质量级别	标准板厚/mm	缩孔			外来夹杂			气孔				未焊合	裂纹																
			25mm×25mm的受检面积上缺陷的最大数量	缺陷最小间距	缺陷最大长度	25mm×25mm的受检面积上缺陷的最大数量	缺陷最小间距	缺陷最大长度	25mm×25mm的受检面积上缺陷的最大数量	缺陷最小间距	缺陷最大长度	在任何76.2mm长沉积层上累积气孔长度																		
增材制造	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—															
																A	≤ 6.35	12.7	1.27	3	6.35	1/8 截面厚度	3	6.35	0.33 倍零件厚度或 1.52, 取两者中的较小值	—	—	—	—	—
																	(6.35, 12.70]	12.7	1.78											
	(12.7, 19.05]	5.08	3.05																											
	>19.05	5.08	3.81																											
	B	≤ 6.35	5.08	3.05	3	6.35	1/4 截面厚度	6	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 4 倍	1.33 倍零件厚度或 6.10, 取两者中的较小值	—	—	—	—	—														
		(6.35, 12.70]	5.08	4.06																										
		(12.7, 19.05]	3.05	5.08																										
		>19.05	3.05	5.59																										
		壁厚小于 1.52mm, 为 1/4 截面厚度; 壁厚超过 1.52mm, 为 3/8 截面厚度	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍													较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	较大缺陷最长轴的 3 倍	
	C	≤ 6.35	4.83	5	9	较大缺陷最长轴的 2 倍	1/2 截面厚度	9	较大缺陷最长轴的 2 倍	较大缺陷最长轴的 2 倍	—	—	—	—	—	—														
		(6.35, 12.70]	5.08																											
(12.7, 19.05]		2.54	5.56																											
>19.05		6.35																												
D	≤ 6.35	2.54	6.35	7	较大缺陷最长轴的 2 倍	1/2 截面厚度	12	较大缺陷最长轴的 2 倍	较大缺陷最长轴的 2 倍	—	—	—	—	—	—															
	>19.05	2.54	6.35	12	较大缺陷最长轴的 2 倍	1/2 截面厚度	12	较大缺陷最长轴的 2 倍	较大缺陷最长轴的 2 倍	—	—	—	—	—	—															
			铸造																											

表6 几种航空常用锻件材料的超声检测要求与设计要求对比

材料牌号	材料的最高级别	材料规范	检测规范 1	一般设计要求
Ti-6Al-4V	AA	GJB2744A-2007 ^[6]	GB/T 5193 ^[7]	A ²
TC18	AA	GJB2744A-2007	GB/T 5193	A ²
Ti-5553	AA	MTL-3103	AMS 2631	A ²
15-5PH	规范 AMS 5659 对内部质量级别没做相应要求	AMS 5659 ^[8]	—	A ²
4340	规范 AMS 6414 对内部质量级别没做相应要求	AMS 6414 ^[9]	—	A ²
PH13-8Mo	规范 AMS 5629 对内部质量级别没做相应要求	AMS 5629 ^[10]	—	A ²
A-100 钢	规范 AMS 6532E 对内部质量级别没做相应要求	AMS 6532E ^[11]	—	—
300M 钢	规范 AMS 6419F 和 AMS 6417F 对内部质量级别没做相应要求	AMS 6419F ^[12] AMS 6417F ^[13]	—	—

注：“检测规范”一般来说，按照疲劳损伤容限设计的结构零件，设计是 A 级；GB/T 5193 与 AMS 2631 规定的缺陷等级尺寸一致。

表7 激光增材与传统制造Ti6Al4V合金力学性能对比

成型方法	拉伸强度 /MPa			屈服强度 /MPa			延伸率 /%		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
激光增材	889	841	841	799	765	765	6	5	5
锻造	896			827			10	8	8
铸造	896			827			6		

毛坯性能具有方向性，纵横向屈服强度和拉伸强度分别比锻造和铸造低 3.4% 和 0.78%。由此可见，增材制造毛坯力学性能虽低于锻造和铸造，但差异较小。

5 结论

本文分析了应用比较广泛的 Ti6Al4V 钛合金采用激光增材制造毛坯与传统锻件、铸件在成形工艺、显微组织、缺陷及其形成原因、内部质量和力学性能等方面的差异性。得到以下结论：

(1) 激光增材制造生产准备周期较传统工艺大幅缩短，整体制造周期短，材料利用率大幅度提高，尤其适合高性能、低成本、难加工、大型复杂金属构件的短周期快速制造。

(2) 激光增材制造毛坯既有传统锻件的缺陷也有铸件的缺陷，需采用超声波和射线两种检测方法。国外起落架专用规范规定的钛合金锻件的最高级别是 AA 级，优于激光增材制造的 A1 级别，激光增材制造气孔的级别能达到铸件的 B 级。

(3) 激光增材制造钛合金毛坯纵横向屈服强度和拉伸强度分别比锻造和铸造低 3.4% 和 0.78%，差异较小。

参考文献

[1] AMS 4999A-2011 Titanium alloy direct deposited products

6Al-4V annealed[S].

[2] Anneal Optional AMS4991E-2014 Titanium alloy castings, investment 6Al - 4V hot isostatic pressed[S].

[3] AMS4928R-2007 Titanium alloy bars, wire, forgings, rings, and drawn shapes 6Al-4V annealed[S].

[4] AMS2631C-2009 Ultrasonic inspection titanium and titanium alloy bar and billet[S].

[5] MTL-3103 5Al-5V-5Mo-3Cr titanium alloy[S].

[6] GJB 2744A-2007 航空用钛及钛合金锻件规范 [S].

GJB 2744A-2007 Specification for titanium and titanium alloy forging and die forging for aerospace[S].

[7] GB/T 5193 钛和钛合金加工产品超声波探伤方法 [S].

GB/T 5193 Method of ultrasonic inspection for wrought titanium and titanium alloy products[S].

[8] AMS 5659 Steel Corrosion-resistant, bars, wire, forgings, rings, and extrusions 15Cr-4.5Ni-0.30Cb (Nb)-3.5Cu consumable remelted, precipitation hardenable[S].

[9] AMS 6414 Steel Bars, forgings, and tubing 0.80Cr-1.8Ni-0.25Mo (0.38-0.43C)(SAE 4340) Vacuum consumable elec-trode remelted[S].

[10] AMS 5629 Steel Corrosion-resistant, bars, wire, forgings, rings, and extrusions 13Cr-8.0Ni-2.2Mo-1.1Al vacuum in-duction plus consumable electrode melted solution heat treated, precipitation hardenable[S].

[11] AMS 6532E-2011 Steel Bars and forgings 3.1Cr -11.5Ni-13.5Co-1.2Mo (0.21-0.25C) vacuum melted, normalized and over-aged precipitation hardenable[S].

[12] AMS 6419F-2006 Steel, bars, forgings, and tubing 1.6Si-0.82Cr-1.8Ni-0.40Mo-0.08V (0.40-0.45C) consumable elec-trode vacuum remelted[S].

[13] AMS 6417F-2006 Steel Bars, forgings, and tubing 1.6Si-0.82Cr-1.8Ni-0.40Mo-0.08V (0.38-0.43C) consumable electrode vacuum remelted[S].

通讯作者：郝晓宁，研究生，主要研究方向为飞机结构设计，E-mail: haoxiaoning921@163.com。

(责编 大漠)