

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0163-04

# Ti-6Al-4V 合金的激光净成形制造及其显微组织

刘 勇, 李延民, 黄小平, 彭志学

(通用电气(中国)研究开发中心有限公司, 上海 201203)

**摘要** 对 Ti-6Al-4V 合金的激光净成形制造进行了研究。实验过程在大气开放环境下进行, 仅通过喷嘴吹氩气保护。结果表明, 功率质量比对钛合金激光净成形件表面质量以及微观结构有着重要的影响。当功率质量比足够高时可以得到表面光洁度较好的成形件, 微观分析显示, 激光净成形钛合金的显微组织由细小的针状马氏体  $\alpha$  和原始  $\beta$  组成, 各层之间为致密的冶金结合。在功率质量比较高的情况下, 可以得到柱状晶, 反之则生成等轴晶。通过优化工艺参数得到表面质量较好的成形件, 而且所制得的样品引入氮氧杂质元素含量较低, 可见利用激光净成形技术可以在大气环境下制造出质量满意的钛合金零件。

**关键词** 激光技术; 激光净成形; 钛合金; 显微组织; 柱状晶

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## Microstructure of Laser Net Shape Manufactured Ti-6Al-4V

LIU Yong, LI Yan-min, HUANG Xiao-ping, PENG Zhi-xue

(GE (China) Research and Development Center Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract** Laser Net Shape Manufacturing (LNSM) of Ti-6Al-4V was investigated. The experiments were carried out in open air with shielding argon gas to prevent the materials from oxidation during laser deposition. It was discovered that power mass ratio (PV/Dm) was a key factor, which influenced both surface finish and microstructure of laser deposited parts. High value of power mass ratio will lead to a deposit with good surface quality and large columnar grain growth. The microstructure analysis showed that it consisted of very fine acicular  $\alpha$  and  $\beta$  phases, and very dense metallurgical bonding was obtained. The Ti-6Al-4V components with good surface quality were fabricated through processing parameters optimized, in additional, the content of N and O elements introduced during deposition was very low, which indicated LNSM could fabricate the Ti-6Al-4V components with satisfactory quality in open air.

**Key words** laser technique; laser net shape manufacturing; Ti alloy; microstructure; columnar grain

## 1 引 言

钛合金是一种优良的结构材料, 具有重量轻、强度高、高低温性能好、耐腐蚀性好等突出特点, 其在航空、航天、舰艇、医疗等领域中获得越来越多的应用。为了节约时间和成本, 对结构复杂的零件, 发展近净形工艺技术是近年钛合金制造技术发展的总趋势。

激光净成形技术(LNSM)是近年来国内外发展非常迅速的一项先进的激光加工技术<sup>[1]</sup>。该技术以“离散+堆积”的成形思想为基础, 通过对零件的三维 CAD 模型按照一定的厚度进行分层“切片”处理而将零件的三维形状数据离散成一系列二维数据, 再按照每一层的形状信息逐层堆积材料, 最终得到净形或近净形的零件。由于省去了设计、加工模具

的时间和费用, 并且不需要专用工具和夹具, 从而极大地提高了制造的柔性和加工速度, 缩短了产品的开发周期, 降低了生产成本, 因此, 该技术一问世就引起了世人的高度重视。很多研究机构结合自身的条件和特点相继开发出运用该技术制造金属零件的方法, 如激光近形制造技术(LENS)<sup>[2,3]</sup>、直接光制造技术(DLF)<sup>[4]</sup>、激光固结技术(LC)<sup>[5]</sup>、材料直接沉积技术(DMD)<sup>[6]</sup>等。近年来, 这些技术都已发展到相当高的水平, 大多数技术都已经可以直接制造出近净成形的金属零件, 有些技术(如 LC)已经达到可以制造净成形零件的水平。

针对镍基高温合金, 我们已经系统研究了激光净成形工艺参数对几何尺寸的影响, 并建立了传递

**作者简介:** 刘 勇(1978—), 男, 湖北人, 工程师, 硕士, 主要从事激光加工以及功能梯度材料的研究。

E-mail: yong.liu@ge.com

函数来预测成形件的几何尺寸,同时利用闭环控制系统,可以制造出质量较好的零件<sup>[7~9]</sup>。本文主要研究了 Ti-6Al-4V 合金的激光净成形制造及工艺参数对显微组织的影响。

## 2 实 验

激光净成形系统由 2 kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器、五轴数控系统、多路送粉器和自行设计的喷嘴组成,如图 1 所示。

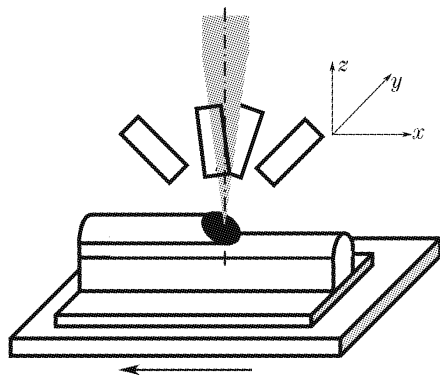


图 1 激光净成形系统

Fig. 1 Schematic drawing of LNSM system

基材为钛合金,所用粉末为气体雾化的球形 Ti-6Al-4V 合金粉末,如图 2 所示,粒径范围 45~75 μm,在实验前进行烘干处理,以去除粉末中吸附的水分,同时增加粉末的流动性。所有实验均在空气中进行,仅通过喷嘴吹氩气保护,气体流速控制在一定的范围,以减小气流对粉末的扰动,从而保证粉末流动的连续和均匀性。

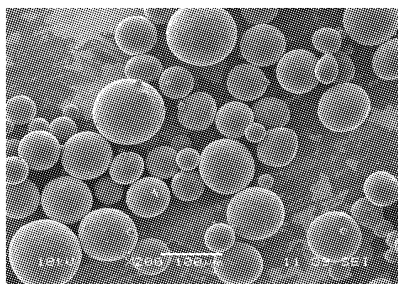


图 2 Ti-6Al-4V 合金粉末扫描电镜照片

Fig. 2 Scanning electron microscope micrograph of Ti-6Al-4V powder

利用光学显微来观察和分析成形样品的微观组织,氮氧杂质含量的分析测试通过 LECO 公司的 TCH600 氮氧分析仪来完成。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 Ti-6Al-4V 成形工艺

通过一系列工艺实验研究了工艺参数对

Ti-6Al-4V 成形表面质量的影响,为了简化工艺实验,减少实验次数,用了一个复合参数功率质量比  $PV/Dm$  来进行实验设计,其中  $P$  为激光功率,  $V$  为扫描速度,  $D$  为光斑直径,  $m$  为送粉速率。研究发现, Ti-6Al-4V 成形件表面质量与此参数有密切的关系,如图 3 所示的单道激光熔覆,当  $PV/Dm$  较高时,可以获得表面光洁度好的成形件,反之较低  $PV/Dm$  会导致粗糙表面的形成,这是由于粉末未完全熔化,部分松散的粉末附着在表面,形成类似烧结的结构,而且很容易在熔覆层顶端形成 V 形表面,因此必须选择合适的参数,增加功率质量比,以获得质量较好的成形件。通过工艺参数的优化,制造出如图 4 所示的样品,具有较好的表面质量,而且氧化较少。

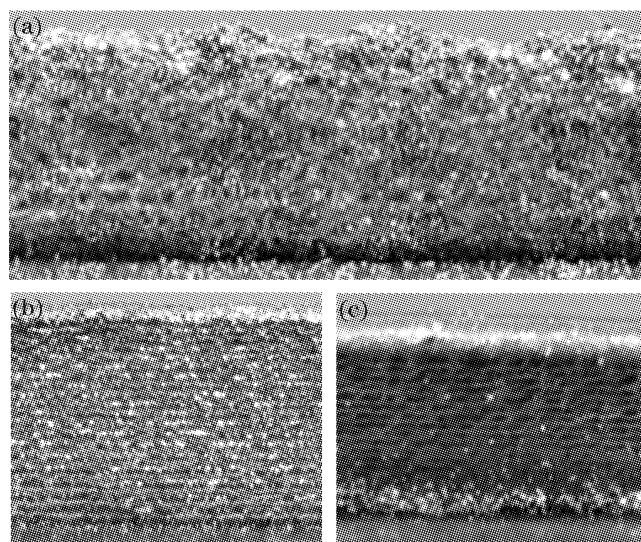


图 3 Ti-6Al-4V 单道熔覆。(a)低  $PV/Dm$ ; (b)中  $PV/Dm$ ; (c)高  $PV/Dm$

Fig. 3 Single wall deposition of Ti-6Al-4V. (a) low  $PV/Dm$ ; (b) medium  $PV/Dm$ ; (c) high  $PV/Dm$

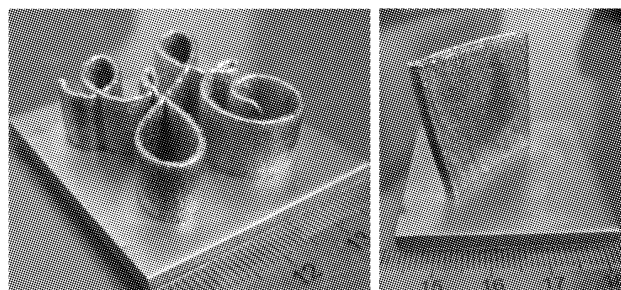


图 4 激光净成形 Ti-6Al-4V 样品

Fig. 4 LNSM Ti-6Al-4V sample

### 3.2 激光净成形 Ti-6Al-4V 微观组织

从工艺实验可以知道,功率质量比  $PV/Dm$  对成形件的表面质量有着重要的影响,同时也影响熔覆层微观组织的形成。显微分析发现,较高的  $PV/Dm$  会生成大的柱状晶,而较低的则生成等轴晶,如图 5 所

示,而且成形样品顶端都会形成等轴晶,这是由于表面凝固速度快、温度梯度小所造成的。因此,可以通过工艺参数来控制微观组织,从而获得需要的性能。图 5(c) 为高倍下的显微组织,从中可以观察到细小的针状马氏体  $\alpha$  相和原始  $\beta$  相,原始  $\beta$  晶界清晰可见。

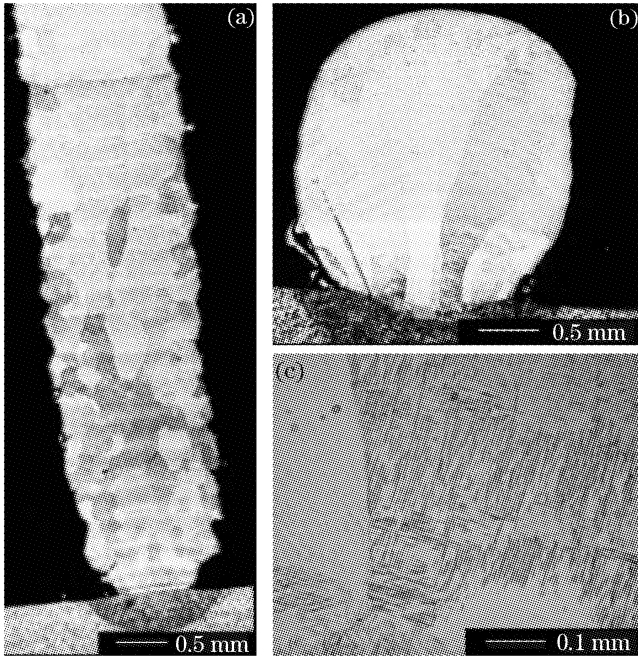


图 5 激光净成形 Ti-6Al-4V 显微组织。(a)低  $PV/Dm$ ;  
(b) 高  $PV/Dm$ ; (c) 马氏体微结构

Fig. 5 Optical micrograph of LNSM Ti-6Al-4V. (a) low  $PV/Dm$ ; (b) high  $PV/Dm$ ; (c) martensitic microstructure

利用 X 射线衍射对 Ti-6Al-4V 激光净成形试样的相组成进行了定性分析,如图 6 所示。物相分析结果表明,激光净成形 Ti-6Al-4V 组织的主相为密排六方  $\alpha$ -Ti 固溶体,这和微观组织观察到的结果一致,与 Ti-6Al-4V 合金粉末相比,两者具有相同的 X 射线衍射谱,这表明激光成形样品物相未发生变化。

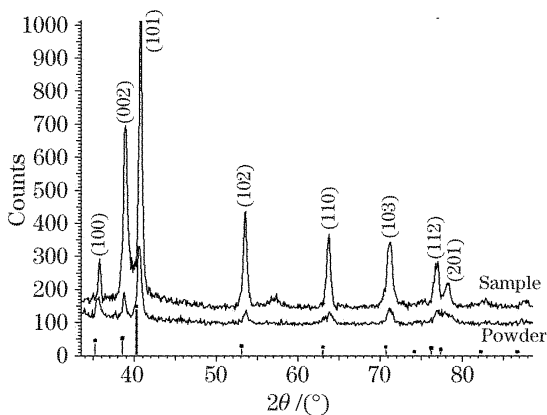


图 6 Ti-6Al-4V 合金 X 射线衍射结果

Fig. 6 XRD of Ti-6Al-4V

### 3.3 氮氧杂质含量分析

钛合金非常活泼,在固态下就能强烈吸收空气中的氮、氧等气体。氧和氮间隙固溶于钛中,使钛晶

格畸变,强度和硬度增加,而塑性和韧性降低<sup>[10]</sup>。因此必须严格控制成形过程中杂质元素的含量,通常 Ti-6Al-4V 氧的质量分数要求低于 0.2%。表 1 为激光净成形样品的氮氧含量分析,可以看出,激光净成形过程中所引入的氮氧杂质含量比较低,其中氧的质量分数都小于 0.2%,这显示了激光净成形喷嘴有很好的保护效果。

表 1 激光净成形 Ti-6Al-4V 氮氧质量分数

Table 1 N and O content of laser deposited Ti-6Al-4V

Sample	[O] / %	[N] / %
#1	0.15	0.038
#2	0.16	0.038

## 4 结 论

1) 功率质量比( $PV/Dm$ )对钛合金激光净成形件表面质量以及微观结构有着重要的影响。当  $PV/Dm$  足够高时可以得到表面光洁度较好的成形件,微观分析显示,激光净成形钛合金的显微组织由细小的针状马氏体  $\alpha$  和原始  $\beta$  组成,各层之间为致密的冶金结合。在功率质量比较高的情况下,可以得到柱状晶,反之则生成等轴晶。

2) 通过优化工艺参数得到表面质量较好的成形件,而且所制得的样品引入氮氧杂质元素含量较低,可见利用激光净成形技术可以在大气环境下制造出质量满意的钛合金零件。

## 参 考 文 献

- Li Yanmin, Peng Zhixue, Liu Yong. Laser Net Shape Manufacturing of Metallic components [C]. 7th China National Conference on Laser Material Processing, Laser Processing Committee of China Optical Society, 2004
- 李延民,彭志学,刘 勇. 激光净成形制造金属零件 [C]. 第七届全国激光加工学术会议论文集,中国光学学会激光加工专业委员会,2004
- Keicher D. M., Miller W. D., Smugeresky J. E. *et al.*. Laser engineering net shaping (LENS): beyond rapid prototyping to direct fabrication [C]. *Proceedings of the 1998 TMS Annual Meeting*, San Antonio, USA, 1998. 369~377
- Schlienger E., Dimos D., Griffith M. *et al.*. Near net shape production of metal components using LENS [C]. *Proceedings of the Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing*, Hawaii, USA, 1998. 1581~1586
- Lewis G K, Nemeck R B, Milewski J O *et al.*. Directed light fabrication [C]. *Proceedings of the ICALEO '94*, Laser Institute of America, Orlando, Florida, 1994. 17~21
- Lijue Xue, Andre Theriault, Mahmud-Ul Islam *et al.*. Laser consolidation of TI-6AL-4V alloy to build functional net-shape airfoils with embedded cooling channels [C]. *Proceedings of the ICALEO '04*, Laser Institute of America, San Francisco, 2004. 1706~1712
- Mazumder J., Dutta D, Kikuchi N. *et al.*. Closed loop direct

- metal deposition; art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**(4~6): 397~414
- 7 Li Y., Huang X., Liu Y. *et al.*. Laser net shape manufacturing of metallic materials with CO<sub>2</sub> and fiber laser [C]. *Proceedings of the ICALEO '05*, Laser Institute of America, Miami, USA, 2005. 320~325
- 8 Huang X., Li Y., Liu Y. *et al.*. Laser near net shape manufacturing for nickel alloy parts with complex structure [C]. *Proceedings of the ICALEO '06*, Laser Institute of America, Melbourne, Australia, 2006. 196~200
- 9 H. Qi, M. Azer, J. Deaton. Development of transfer functions for controlling fabrication of components by laser net shape manufacturing (LNSM) [C]. *Proceedings of ICALEO '05*, Miami, USA. 2005. 869~877
- 10 Chen Jing, Yang Haiou, Yang Jian *et al.*. Characteristic and solidification structure of laser rapid forming of TC4 titanium alloy [J]. *Rare Metals Letter*, 2004, **23**(4): 33~37  
陈 静, 杨海鸥, 杨 健 等. TC4 钛合金的激光快速成形特性 [J]. *稀有金属快报*, 2004, **23**(4): 33~37