

# 激光成形工艺对 TB18 钛合金微观组织的影响

张颖<sup>1</sup> 李明祥<sup>1</sup> 胡生双<sup>1</sup> 赵虎<sup>1</sup> 胡广<sup>2</sup> 欧阳德来<sup>3</sup>

(1.中航西安飞机工业集团股份有限公司; 2.西安铂力特增材技术股份有限公司;  
3.南昌航空大学材料科学与工程学院)

**摘要** 采用 BLT-C1000 型 SLM 增材制造设备进行了 TB18 钛合金激光立体成形,通过 3 因素 3 水平正交试验法研究了激光功率、扫描速度、送粉率对单道沉积层和块体微观组织、形貌特征的影响,并优化了成形工艺参数。结果表明,单道沉积层柱状晶组织特征,随扫描速度和激光功率增大、送粉率降低,单道沉积层宽高比增大,对宽高比影响程度依次为扫描速度>激光功率>送粉率。块体微观组织均为双态组织,提高扫描速度,合金组织由  $\alpha+\beta$  相分明的双态组织向次生  $\alpha$  相均匀分布在  $\beta$  基体的组织特征转变。从获得良好组织考虑,成形工艺参数应采取扫描速度为 800~1 000 mm/min、激光功率为 3.0~3.5 kW、送粉率为 25~30 g/min 适宜。

**关键词** 激光立体成形;TB18 钛合金;显微组织;工艺参数

中图分类号 TG146.23;TG115.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Laser Forming on Microstructure of TB18 Titanium Alloy

Zhang Ying<sup>1</sup>, Li Mingxiang<sup>1</sup>, Hu Shengshuang<sup>1</sup>, Zhao Hu<sup>1</sup>, Hu Guang<sup>2</sup>, Ouyang Delai<sup>3</sup>

(1.Avic Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd.; 2.Xi'an Blite Additive Technology Co., Ltd.;  
3.School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University)

**Abstract:** Laser solid forming of TB18 titanium alloy was carried out by BLT-C1000 SLM additive manufacturing equipment. The effects of laser power, scanning speed and powder feeding amounts on the microstructure and morphology characteristics of single channel deposition layer and block were investigated by three-factor and three-level orthogonal test method, and the forming parameters were optimized. The results indicate that the single channel deposition layer is characterized by columnar grain, and the width to height ratio is increased with the increase of scanning speed and laser power and the decrease of powder feeding amount, of which the influence degree is in the sequence of scanning speed>laser power>powder feeding amounts. The microstructure of the block is characterized by two-state. With the increase of scanning speed, the microstructure of the alloy is transformed from the two-state microstructure with distinct  $\alpha+\beta$  phase to that with uniform distribution of secondary  $\alpha$  phase in the  $\beta$  matrix. In order to obtain desirable microstructure, the optimal parameters of forming process is scanning speed of 800~1 000 mm/min, laser power of 3.0~3.5 kW and powder feeding rate of 25~30 g/min.

**Key Words:** Laser Solid Forming, TB18 Titanium Alloy, Microstructure, Process Parameters

收稿日期:2021-10-20;修改稿收到日期:2022-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51761029,51864035)

第一作者简介:张颖,女,1974 年出生,高级工程师,西安(710089),E-mail:3124405664@qq.com

通信作者:胡生双,男,1989 年出生,工程师,西安(710089),E-mail:hushengshuang2000@163.com

引用格式:张颖,李明祥,胡生双,等.激光成形工艺对 TB18 钛合金微观组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):436-440.

ZHANG Y, LI M X, HU S S, et al. Effects of laser forming on microstructure of TB18 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):436-440.

[3] 钟丽萍. 稀土镁合金导热性能及高导热镁合金研究[D].重庆:重庆大学,2016.

[4] PAN H, PAN F, YANG R, et al. Thermal and electrical conductivity of binary magnesium alloys[J]. J. Mater. Sci., 2014, 49(8): 3 107-3 124.

[5] 习张津,张宗和.镁合金及应用[M].北京:化学工业出版社,2004.

[6] OTARAWANNA S, LAUKLI H I, GOURLAY C M, et al. Feeding mechanisms in high-pressure die castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, A41(7): 1 836-1 846.

[7] VINARCIK E J. Understanding Defects in High Integrity Die Cast-

ings[R]. SAE Technical Paper, 2003.

[8] 赖华清.压铸工艺及模具[M].北京:机械工业出版社,2004.

[9] 厄普顿.压力铸造[M].北京:机械工业出版社,1988.

[10] 骆相生,许琳.金属压铸工艺与模具设计[M].北京:清华大学出版社,2006.

[11] 黄勇,黄尧.压铸模具设计[M].北京:化学工业出版社,2011.

[12] 董丽娇.镁合金压铸工艺数值模拟及缺陷带形成探讨[D].长春:吉林大学,2015.

(编辑:张正贺)

航空领域是各国争相发展的重点方向之一,是国家高端装备的典型代表行业。面向该领域的高性能构件大多在极端条件下服役,此类环境往往要求零部件具备超强承载、超轻量化等特性<sup>[1~3]</sup>。TB18 钛合金是近年研制出的一种兼具高强、高韧特性的航空用钛合金,经合适的热处理后强度高达 1 400 MPa<sup>[4]</sup>,远高于目前服役的 TC18、TC21 等钛合金<sup>[5,6]</sup>。该合金的成功研制填补了我国在 1 400 MPa 级高强、高韧钛合金的空白,未来可替代相应强度级别的合金钢,并应用于制造航空结构件。

目前航空结构件通常采用整体锻造等传统方法制造,工艺复杂,制造周期较长,且对制造技术和制造装备的要求很高。同时从原材料加工成锻件,又有加工余量大、周期长、材料利用率低、制造成本高等缺点。金属 3D 打印技术的出现<sup>[7,8]</sup>为航空产品设计、零件生产等带来了新的思想和技术途径,有望大幅缩短其研发和生产周期,缩减产品“设计-试验-改进”周期,从而进一步提升航空市场竞争实力。其中,激光立体成形技术(Laser Solid Forming,LSF)作为金属 3D 打印技术的主要分支之一,是 20 世纪 90 年代发展起来的一项数字化增材制造技术<sup>[9~11]</sup>。与传统的“锻造+机械加工”方法相比,该技术无需模具,就可实现金属零部件的近净成形<sup>[12]</sup>。采用激光立体成形技术制备的部分钛合金零部件已成功实现装机验证<sup>[13]</sup>。然而目前针对激光立体成形工艺参数对 TB18 钛合金组织影响的相关研究报道非常少。

基于此,采用激光立体成形技术制备 TB18 钛合金,研究激光立体成形过程中激光功率、送粉率、扫描速度等关键工艺参数对单道沉积层形貌特征和块体微观组织的影响,并优化激光立体成形工艺参数,为进一步研究激光立体成形 TB18 钛合金的组织 and 性能调控提供参考。

1 试验材料及方法

激光成形原材料为 TB18 钛合金球形粉末,其化学成分见表 1。在真空干燥箱内将粉末烘干,温度为 150℃,保温 2 h,真空干燥箱气压为 0.02 MPa。基材为同材质 TB18 钛合金锻件,用砂纸对基材进行打磨,去除表面的油污和氧化层,并用酒精清洗。

表 1 TB18 钛合金的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of TB18 titanium alloy % |      |      |      |      |       |       |       |          |    |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|----------|----|
| w <sub>B</sub>                                      |      |      |      |      |       |       |       |          |    |
| Al                                                  | Mo   | Nb   | Cr   | V    | O     | C     | N     | H        | Ti |
| 4.04                                                | 4.91 | 1.01 | 5.96 | 4.86 | 0.073 | <0.01 | 0.006 | <0.001 5 | 余量 |

采用 BLT-C1000 型 SLM 增材制造设备在 TB18

钛合金表面进行激光成形。试验分为两部分:①首先通过 3 因素 3 水平正交试验法进行不同激光功率、扫描速度及送粉率的单道单层沉积试验(见表 2),研究 3 因素对单道单层沉积层形貌特征及宽高比的影响;②再进行不同激光功率、扫描速度及送粉率下激光立体成形块体试验,研究成形工艺参数对 TB18 钛合金成形块体微观组织的影响,以优化成形工艺参数。成形过程中,粉末颗粒经由送粉器、同轴送粉喷嘴输送进入激光熔池内,熔池内的粉末颗粒晶粒熔化,与熔化的基体合金化,并快速凝固形成熔覆层。成形保护气为氩气,O 含量低于 0.005%。单道熔覆层试样的长度为 30 mm,光斑直径为 5 mm,层间搭接率为 50%,设备抬升量为 0.5~0.6 mm。

表 2 激光成形单道熔覆层的工艺参数

Tab.2 Process parameters of laser forming single-pass cladding layer

| 编号 | 扫描速度(A)/(mm·min <sup>-1</sup> ) | 激光功率(B)/kW | 送粉率(C)/(g·min <sup>-1</sup> ) | 单道长度/mm |
|----|---------------------------------|------------|-------------------------------|---------|
| 1  | 800                             | 3.0        | 25                            | 30      |
| 2  | 800                             | 3.5        | 30                            | 30      |
| 3  | 800                             | 3.8        | 35                            | 30      |
| 4  | 1 000                           | 3.0        | 30                            | 30      |
| 5  | 1 000                           | 3.5        | 35                            | 30      |
| 6  | 1 000                           | 3.8        | 25                            | 30      |
| 7  | 1 200                           | 3.0        | 35                            | 30      |
| 8  | 1 200                           | 3.5        | 25                            | 30      |
| 9  | 1 200                           | 3.8        | 30                            | 30      |

将激光立体成形试样从中间部分(排除试样首尾两端的形状过渡段)随机沿横截面切割,经过镶嵌、打磨、抛光后,采用 Kroll 试剂腐蚀液腐蚀制成金相试样;采用 OLYMPUS 型金相显微镜和 Image-Pro Plus 软件对单道沉积层高度、热影响区深度及熔池宽度等进行观察与分析。

2 试验结果与讨论

2.1 单道单层沉积层微观组织

为研究 3D 激光成形参数对沉积层高度、热影响区深度及熔池宽度形状特征的影响,在 TB18 钛合金基体上对 TB18 球形粉末进行了单道单层激光熔覆沉积,其微观组织形貌及其沉积层宽度、高度标注方法见图 1。可以看出,单道沉积层具有快速凝固组织特征,沉积层为从熔池底部开始产生外沿生长的柱状晶组织。这是由于在激光立体成形过程中,高能激光束作用在基材表面上形成熔池,熔池底部的温度较高,与温度较低的基材之间存在较大的温度梯度,因而初生的柱状β晶粒将沿着沉积方向外延生长。

图2为不同3D激光成形参数下的单道单层沉积

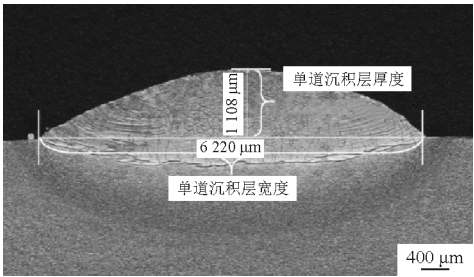


图 1 激光成形单道单层沉积层截面微观组织及其宽度、高度标注方法

Fig.1 The cross section microstructure of single pass single-layer sedimentary layer by laser forming as well as labeling method for width and height

层截面微观组织。可以看出,不同工艺参数下的沉积层均具有激光立体成形快速凝固的特征,只是沉积层宽度和高度存在明显差别。分别测量各参数下的单道沉积

层宽度和高度,并计算出宽高比,结果见表 3。从表 3 可以看出,单道沉积层宽高比均大于 3。一般说来,宽高比大于 3 的单道沉积层有利于通过多道搭接获得平整的表面。这说明试验参数均有利于沉积层通过多道搭接获得平整的表面。值得注意的是,当宽高比过大时,单道沉积层的高度过小,趋近于无法沉积,故考虑到沉积效率,单道沉积层的宽高比亦不可过大。对 1、4、7 号试样,固定激光功率、送粉率,增大扫描速度时,单道沉积层的宽度、高度降低,且沉积层宽度降低幅度大于沉积层高度,故随扫描速度增大,宽高比增大。这是由于当激光功率、送粉率一定时,在基材上形成的熔池尺寸基本稳定,此时扫描速度对单道沉积层高度起决定性因素。增大扫描速度,一方面单位时间内停留在熔池内的粉末数量减少,导致单道沉积层高度降低;另一方面,单位面积内的激光作用时间减少,进而导致单道

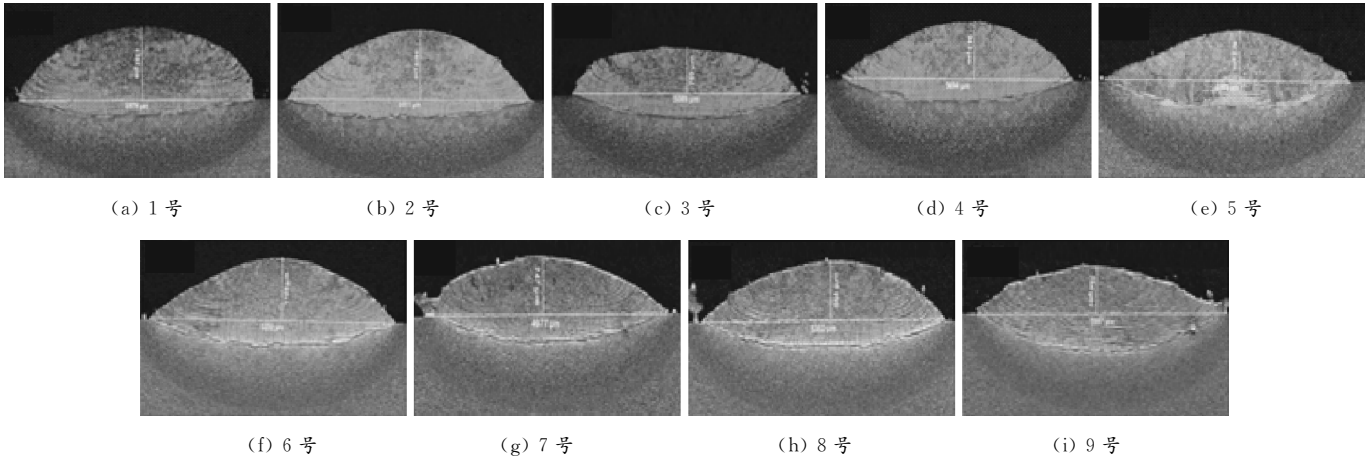


图 2 激光成形 TB18 钛合金单道沉积层截面显微组织

Fig.2 Microstructure of single-pass sedimentary layer of TB18 titanium alloy by laser block forming

表 3 激光成形 TB18 钛合金单道单层沉积层尺寸数值

Tab.3 Dimension data of single pass single-layer sedimentary layer of laser formed TB18 titanium alloy

| 编号 | 扫描速度/<br>(mm · min <sup>-1</sup> ) | 激光功率/kW | 送粉率/<br>(g · min <sup>-1</sup> ) | 单道宽度/μm | 单道层厚/μm | 宽高比  |
|----|------------------------------------|---------|----------------------------------|---------|---------|------|
| 1  | 800                                | 3.0     | 25                               | 5 979   | 1 387   | 4.31 |
| 2  | 800                                | 3.5     | 30                               | 6 611   | 1 419   | 4.66 |
| 3  | 800                                | 3.8     | 35                               | 5 089   | 769     | 6.62 |
| 4  | 1 000                              | 3.0     | 25                               | 5 694   | 943     | 6.04 |
| 5  | 1 000                              | 3.5     | 30                               | 5 903   | 822     | 7.18 |
| 6  | 1 000                              | 3.8     | 35                               | 6 220   | 1 108   | 5.61 |
| 7  | 1 200                              | 3.0     | 25                               | 4 977   | 747     | 6.66 |
| 8  | 1 200                              | 3.5     | 30                               | 5 360   | 844     | 6.35 |
| 9  | 1 200                              | 3.8     | 35                               | 5 867   | 754     | 7.78 |

沉积层宽度降低,最终使单道沉积层宽高比升高。

而当扫描速度、送粉率恒定时,随激光功率增大,单道沉积层宽高比整体呈现上升趋势。这是由于当激光功率增大时,在基材上形成的单道熔池宽度增大,故单道沉积层宽高比将随激光功率而增大。同理当激光功率一定时,熔池宽度基本一致,此时若增大送粉率,单位

时间内进入熔池的粉末增加,导致单道沉积层高度增加,从而降低宽高比。值得注意的是,送粉量过大会使单道沉积层高度过大,内部易产生未熔合等缺陷。

为确定各参数对单道沉积层宽高比的影响,对单道沉积层宽高比进一步进行极差分析,分析结果见表 4。可以看出,对单道沉积层宽高比影响依次为扫描速度>激光功率>送粉率。

表 4 单道沉积极差分析

Tab.4 Range analysis of single pass sedimentary

| 指标             | 扫描速度/<br>(mm · min <sup>-1</sup> ) | 送粉率/<br>(g · min <sup>-1</sup> ) | 激光功率/<br>kW |
|----------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------|
| K <sub>1</sub> | 13.59                              | 17.01                            | 16.27       |
| K <sub>2</sub> | 18.83                              | 18.19                            | 18.48       |
| K <sub>3</sub> | 20.79                              | 20.01                            | 20.46       |
| R              | 7.2                                | 3                                | 4.19        |

2.2 工艺参数对块体微观组织的影响

采用表 2 工艺参数激光成形 TB18 钛合金的组织见图 3。可以看出,各参数下冶金结合良好,无显著裂

纹、气孔、未熔合等冶金缺陷。这是因为单道沉积层宽高比均大于 3,易获得冶金结合良好组织结构。高倍微观组织见图 4。可以看出,激光块体成形 TB18 钛合金微观组织均为双态组织( $\alpha$  相呈层片状分布在  $\beta$  等轴晶

间, $\beta$  等轴晶粒尺寸为  $30 \sim 50 \mu\text{m}$ , $\beta$  相含量超过 50%),但扫描速度会明显改变双态组织特征。对比图 4b 和图 4h 可见,当激光功率、送粉率保持恒定,扫描速度由  $800 \text{ mm/min}$  提升至  $1\,200 \text{ mm/min}$  时,合金组织

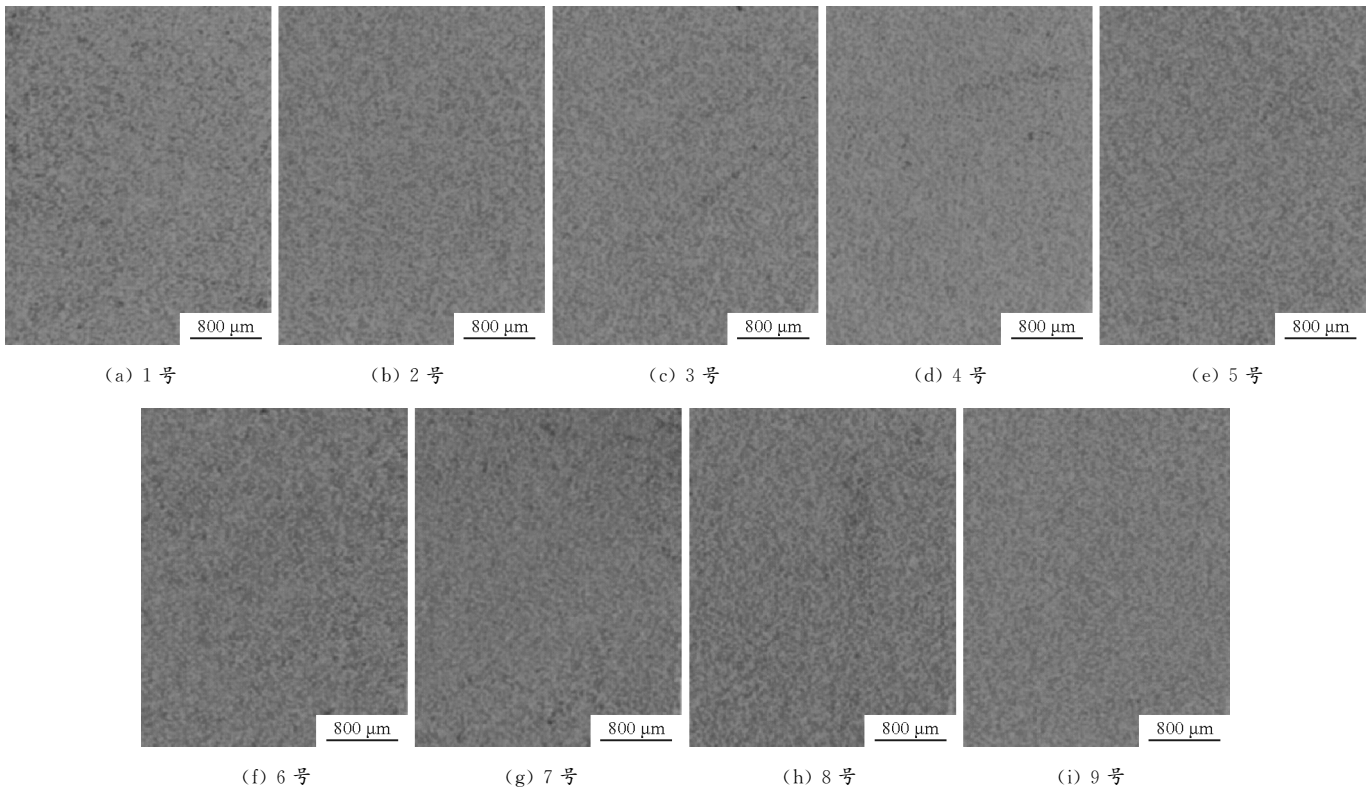


图 3 各工艺参数下激光成形 TB18 钛合金的宏观形貌

Fig.3 Macro morphologies of TB18 titanium alloy by laser block forming under various technological parameters

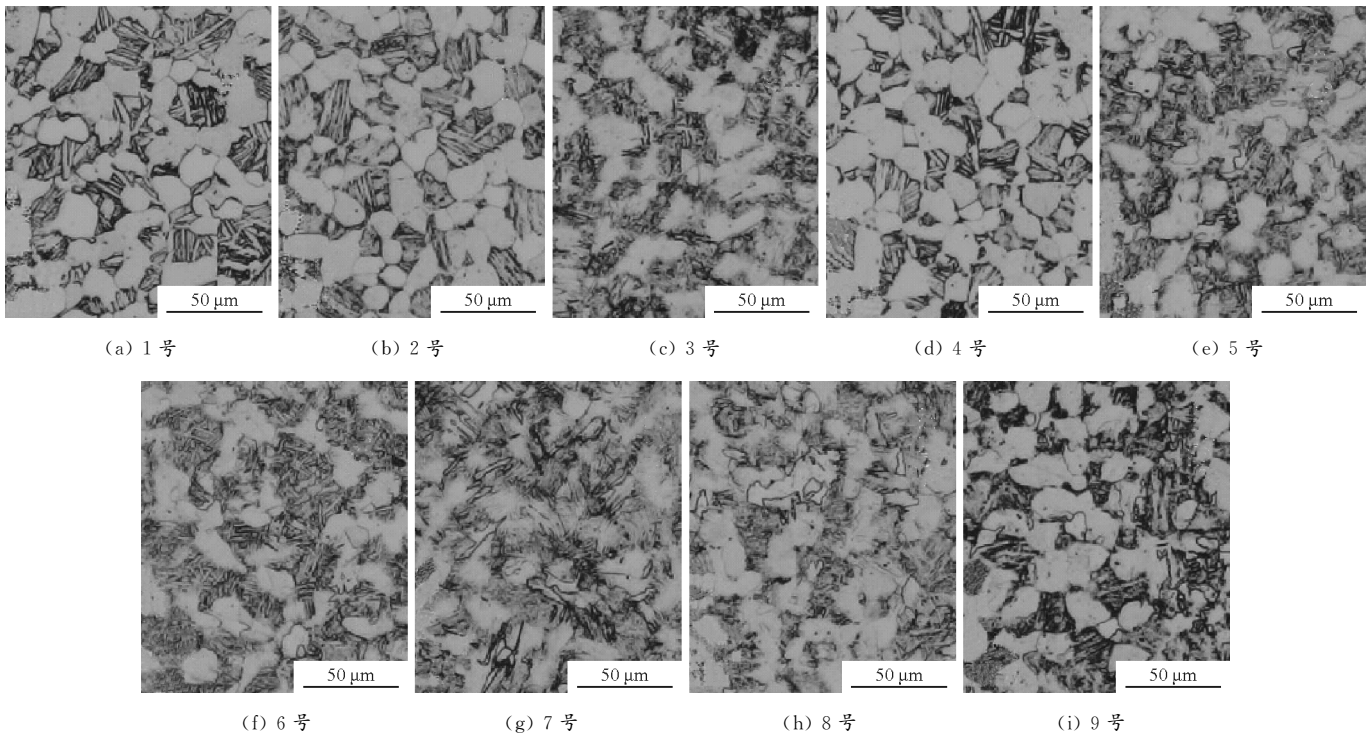


图 4 各工艺参数下激光成形 TB18 钛合金微观组织

Fig.4 Microstructure of TB18 titanium alloy by laser block forming under various technological parameters

由 $\alpha+\beta$ 相分明的双态组织,向 $\beta$ 相含量更高的亚稳 $\beta$ 相逼近, $\alpha$ 相不再呈显著的网篮组织交叉在 $\beta$ 等轴晶内部,而是在较快的冷速条件下转变为次生 $\alpha$ 相均匀分布在 $\beta$ 基体内。产生这种现象的原因是当激光功率和送粉率恒定时,提高扫描速度将使作用在单位面积的时间减小,在逐层沉积时温度梯度升高,单层凝固速度加快, $\beta$ 基体中析出未完全转变的次生 $\alpha$ 相。因此,为避免析出数量较多的次生 $\alpha$ 相,应在保证沉积效率的基础上选择适当的扫描速度。综合考虑冶金品质及沉积效率,成形工艺参数采用扫描速度为800~1 000 mm/min、激光功率为3.0~3.5 W、送粉率为25~30 g/min为宜。

### 3 结 论

(1)单道沉积层具有熔池底部向外沿生长的柱状晶组织特征,单道沉积层宽度随激光功率增加、扫描速度和送粉率的减小而增加。

(2)随扫描速度和激光功率增大、送粉量降低,单道沉积层宽高比增大,宽高比影响程度依次为扫描速度>激光功率>送粉率。

(3)激光成形 TB18 钛合金微观组织均为双态组织,增加扫描速度,合金组织由 $\alpha+\beta$ 相分明的双态组织向次生 $\alpha$ 相均匀分布在 $\beta$ 基体的组织特征转变。

(4)综合冶金质量及沉积效率,成形工艺参数应采用扫描速度为800~1 000 mm/min、激光功率为3.0~3.5 kW、送粉率为25~30 g/min为宜。

### 参 考 文 献

- [1] 杨冬雨,付艳艳,惠松晓,等. 高强高韧钛合金研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2011, 35(4): 575-580.
- [2] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [3] 赵永庆,葛鹏,辛社伟. 近五年钛合金材料研发进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(7): 527-534.
- [4] 李少强,弓站朋,李辉,等. TB18 钛合金热变形行为及动态再结晶机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(9): 3 045-3 051.
- [5] 凤伟中,冯红超,谢林均,等. 热处理工艺对 TC18 钛合金型材组织性能的影响[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(27): 110-114.
- [6] 史小云,张晓园,毛友川,等. 锻造温度对 TC21 钛合金锻板组织和力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2015, 40(1): 142-146.
- [7] 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(1): 38-47.
- [8] 张莹. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室在激光立体成形技术方面取得重要研究进展——金属 3D 打印技术[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8): 508-511.
- [9] 赵学平,侯小虎,刘飞. 激光立体成形 Ti-6Al-4V 时效态合金显微组织结构研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 170-178.
- [10] 陈星,葛亚琼. 激光立体成形技术的发展及应用[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 23-26.
- [11] 杨胶溪,吴文亮,王长亮,等. 激光选区熔化技术在航空航天领域的发展现状及典型应用[J]. 航空材料学报, 2021, 41(2): 1-15.
- [12] 中国材料进展. 高性能致密金属零件的激光立体成形技术[J]. 中国材料进展, 2012, 31(3): 14-16.
- [13] 周平,郭伟国,李鹏辉,等. 激光立体成形 TC4 钛合金的力学特性与破坏机理[J]. 材料科学与工程学报, 2019(1): 37-39.

(编辑:刘卫)

## 镁锂合金超便携轻薄笔记本或将成为市场主流

近几年,受益于各大厂商对轻薄化的极致追求和材料界的努力推动,镁锂合金也渐渐地被应用到轻薄笔记本中,并在轻量化和便携性方面取得重大进展,得到了市场的认可。

从1982年Compaq推出第一台IBM兼容手提计算机开始,笔记本电脑已经陪伴人类40年,成为人们工作、学习、生活中的必需品。随着硬件和软件各类技术的发展,其功能、结构、应用也一直在变化,市场需求也不断变化。针对消费者对产品外观和便携性的追求,轻薄笔记本已成为各大笔记本电脑厂商纷纷布局的对象,轻薄、超便携成为笔记本电脑的发展趋势。

笔记本电脑产品由各类结构件和组件构成,要实现轻薄化,除了控制内部元器件的厚度和部件体积外,外壳材质的选择也是减重的主要途径。目前,笔电轻薄本常用外壳材料主要为铝合金、镁铝合金及碳纤维复合材料。

镁锂合金是世界上最轻的金属结构材料,它之所以受各大厂商和消费者的青睐,是因为其兼具了铝合金、镁铝合金及碳纤维复合材料的优异性能,综合优势突出。镁自身密度并不高,仅为1.74 g/cm<sup>3</sup>,锂的加入,使其密度下降到1.3~1.6 g/cm<sup>3</sup>,是目前密度最低的结构金属材料。比铝合金轻1/2,比镁合金轻1/3,可以更好地实现减重效果,满足消费者对轻薄化的极致追求。镁锂合金热导率为塑料的300~400倍,是碳纤维复合材料的30~50倍;导电性约为塑料的1 016倍,是碳纤维复合材料的104倍,可以实现更好的散热效果,避免了轻薄本散热不佳的缺陷。减震性能好,具有较大的内耗系数,能够将能量消耗于金属内部,可有效提高产品的稳定性。电磁屏蔽性能高,镁锂合金对不同波段的电磁波均有较好的屏蔽作用,提高设备的安全性、准确性。优异的机械加工性能及冷成型能力,机加工性能优异,加工表面质量好,切削力小,能耗低。冷加工性能优异,能够进行室温冲压成型,提高生产效率。

镁锂合金除了具备以上优势,其成本还低于碳纤维复合材料,有助于成本控制。因此,镁锂合金在国内外轻薄笔记本外壳上成功应用并受到笔记本电脑材料厂商的青睐。镁锂合金以其优异的性能,赢得了市场的认可,镁锂合金超便携轻薄本正逐步成为市场的主流。

(摘自中国有色网)