

引文格式: 谷美邦. 热处理制度对激光增材制造 TA15 钛合金力学性能的影响 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 97-102.

GU Meibang. Influence of heat treatment on mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 97-102.

# 热处理制度对激光增材制造TA15钛合金力学性能的影响

谷美邦

(海装沈阳局驻沈阳地区第一军事代表室, 沈阳 110031)

[摘要] 进行了普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金显微组织观察和力学性能试验。试验结果表明: 普通退火态为细片层  $\alpha+\beta$  超细网篮组织, 双重退火态为端部带根须状形貌的初生  $\alpha$  相 + 超细  $\beta$  转变组织构成的特种双态组织; 普通退火态激光增材制造 TA15 钛合金极限强度、屈服强度和疲劳极限均优于双重退火态; 双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金具有较好的塑性和优异的断裂韧性。

关键词: 激光增材制造; 热处理; 静强度; 疲劳; 断裂韧性

## Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy Fabricated by Laser Additive Manufacturing

GU Meibang

(The First Military Representative Office of Shenyang Marine Equipment Bureau, Shenyang 110031, China)

[ABSTRACT] This paper focused on studying the microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing after normal annealing treatment and double annealing treatment. The results indicate that TA15 alloy has a super fine basketweave microstructure after normal annealing treatment, and which will change to a bi-modal microstructure with a crab-like primary  $\alpha$  phase with super fine transformed  $\beta$  phase after double annealing treatment. The ultimate strength, yield strength and fatigue limit of the alloy after normal annealing heat treatment are better than the alloy's after double annealing treatment. But the plasticity and fracture toughness of the alloy after double annealing treatment are superior to those of the alloy after normal annealing heat treatment

**Keywords:** Laser additive manufacturing; Heat treatment; Static strength; Fatigue; Fracture toughness

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.097

钛合金具有高比强、耐高温、抗疲劳等优异性能, 大型复杂钛合金整体构件用量的高低, 是衡量航空装备技术先进性的重要指标<sup>[1]</sup>。采用整体锻造等传统方法制造大型钛合金构件工艺复杂, 材料利用率低, 周期长, 成本高。增材制造技术成形大型复杂钛合金构件具有数字化、精确化、设计-材料-制造一体化等明显的技术和经济优势<sup>[2]</sup>。大型金属构件的激光逐层熔化沉积增材制造过程, 实际上是激光冶金高温熔池在固体金属基底快速导热、温度梯度超高、冷却速度超快条件下的快速凝固及逐层堆积的过程。构件的冶金组织、力学性能呈现对工艺参数和工艺过程状态变化的高度敏感性及其复杂多变性, 给构件内部冶金组织一致性和力学性能稳定性控制带来巨大困难, 国际公认构件的内部质量控制是增材

制造技术在飞机主承力结构上应用的最大挑战之一<sup>[3]</sup>。

钛合金的力学性能强烈受控于其宏观组织结构特征。典型沉积态宏观组织由贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大  $\beta$  柱状胞晶组成, 晶内微观组织是由极少量针状  $\alpha$  板条、大量的魏氏  $\alpha$  板条及一定体积分数的板条间  $\beta$  相组成<sup>[4]</sup>。虽然沉积态增材制造钛合金强度优于 / 相当于锻件, 但受粗大晶粒组织影响, 其变形协调能力较差, 表现为塑性较低(低于 / 稍高于锻件的最低值)<sup>[5-7]</sup>。通过控制热处理动力学过程优化显微组织是提高钛合金力学性能的有效方法之一<sup>[8]</sup>。席明哲等<sup>[9]</sup>指出将激光快速成形 TA15 钛合金在  $\alpha+\beta$  两相区温度退火, 初生  $\alpha$  相显著长大而体积分数减少, 同时在初生  $\alpha$  相板条间的  $\beta$  转变组织体积分数增加, 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,这种显微组织表现出优异的综合力学性能。张霜银<sup>[10-11]</sup>、Dinda<sup>[12]</sup> 和 Brandl<sup>[13]</sup> 等亦发现经热处理后沉积态 TC4 内  $\alpha$  片层厚度增加,材料拉伸强度降低而塑性提高。

扩大激光增材制造钛合金关键主承力构件的应用范围已成为航空装备减轻结构重量,提升性能指标的重要手段<sup>[14]</sup>。北京航空航天大学研究团队<sup>[15-17]</sup> 通过热处理主动控制激光增材制造 TA15 钛合金的固态相变形核和长大动力学过程,获得优异的综合力学性能,率先实现激光增材制造飞机钛合金大型整体主承力构件。本文基于增材制造钛合金结构工程应用积累的性能数据,分析热处理制度对激光增材制造 TA15 钛合金综合力学性能的影响,为进一步优化热处理制度,降低构件研发成本,扩大增材制造结构工程应用提供技术支撑。

### 1 试验及方法

本试验所研究的热处理 TA15 钛合金板材来自北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室。沉积工艺为:采用 LMD-V 型激光成形系统,保护气体为氩气,激光功率 4~6kW,光斑直径 6~8mm,扫描速度 15~20mm/s,单层厚度 1~1.5mm,送粉速度 600~1000g/h。激光增材制造沉积过程如图 1 所示,沉积增高方向为 Z 轴所示方向,激光束扫描方向

为 X 向,垂直于沉积方向和激光扫描方向的为 Y 向,相应的各个截面分别为 XOZ、YOZ 和 XOY 截面。试样成形后,采用金相法测试得到激光增材制造 TA15 钛合金的  $\beta$  相变点为 1010℃。热处理工艺:普通退火热处理制度为 700~800℃ /1~4h,空冷;双重退火热处理制度为 950~1000℃ /0.5~1.5h,空冷或风冷 +700℃ ~800℃ /1~4h,空冷,其中普通退火热处理工艺目的是去除构件内部应力,热处理温度低于 800℃,对 TA15 合金组织不造成影响<sup>[18-19]</sup>。

为全面表征普通退火和双重退火两种热处理状态的影响,进行了两种热处理状态下显微组织表征和力学性能测试,具体试验项目和测试标准如表 1 所示。显微组织观察采用的是纵截面 YOZ 试样,腐蚀液为体积比为 1:6:43 的 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O 混合溶液,腐蚀时间约 5~8s。显微组织分析中  $\alpha$  相体积含量和尺寸采用 Image J 软件进行测量,体积含量测量来自 3 张扫描照片的平均值,而  $\alpha$  片层宽度测量来自 3 张扫描照片共约 30 个  $\alpha$  片层的平均值。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 显微组织

普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金宏观组织如图 2 所示,两种热处理制度宏观组织没

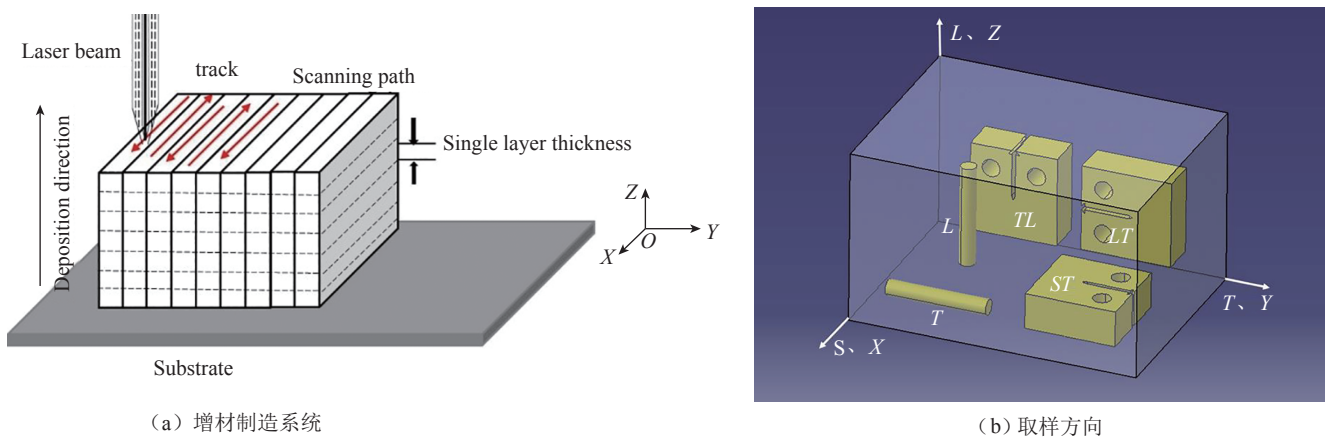


图1 激光增材制造TA15钛合金增材制造系统与取样方向示意图

Fig.1 Schematic of laser additive manufacturing process of TA15 alloy and layout of C(T) specimen in sample

表1 普通退火和双重退火态激光增材制造TA15钛合金性能测试试验内容

Table 1 Performance test of laser additive manufactured TA15 titanium alloy under ordinary annealing and double annealing

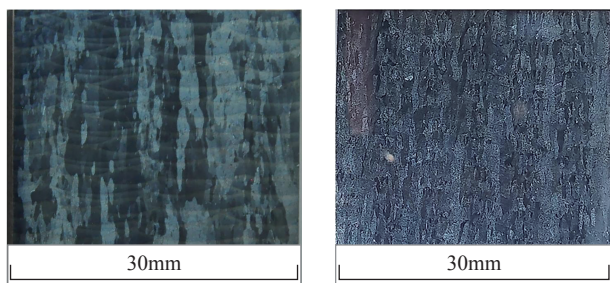
测试项目	性能指标	取样方向	试样形式	测试标准
室温拉伸	极限强度,屈服强度,延伸率	L 向, T 向	棒材	GB/T 228.1—2010 <sup>[20]</sup>
拉伸疲劳	S-N 曲线,疲劳极限	L 向	棒材,包括光滑和缺口试样	GB/T 3075—2008 <sup>[21]</sup>
损伤容限	平面应变断裂韧性	L-T, L-T	紧凑拉伸	GB/T 4161—2007 <sup>[22]</sup>

有明显差异,均为沿着沉积方向外延生长的粗大原始 $\beta$ 柱状晶组织,柱状晶的宽度在几百 $\mu\text{m}$ 到 $\text{mm}$ 级,柱状晶的长度贯穿多个沉积层达几 $\text{cm}$ 。

普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金显微组织如图3所示,两种热处理制度显微组织显著不同。普通退火态激光增材制造TA15钛合金为细片层 $\alpha+\beta$ 超细网篮组织, $\alpha$ 相体积含量约为 $78.1\%\pm 2.1\%$ ,平均 $\alpha$ 片层厚度约为 $(1.05\pm 0.11)\mu\text{m}$ 。双重退火态激光增材制造TA15钛合金为端部带根须状形貌的初生 $\alpha$ 相+超细 $\beta$ 转变组织构成的特种双态组织,初生 $\alpha$ 相体积含量约为 $40.5\%\pm 7.4\%$ ,初生 $\alpha$ 相片层宽度平均值为 $(2.45\pm 0.23)\mu\text{m}$ 。

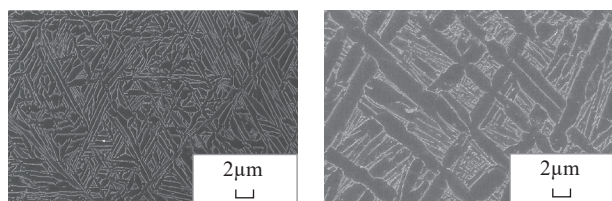
## 2.2 静力性能

按照国家标准GB/T 228.1—2010要求,采用棒状试样对普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金室温拉伸性能进行测试,试验结果统计分析见表2,可知,普通退火态纵向、横向的抗拉强度 $R_m$ 为992MPa、1022MPa;纵向、横向的屈服强度 $R_{p0.2}$ 为904MPa、945MPa;纵向、横向的断后伸长率为13.3%、9.5%;双重退火态纵向、横向抗拉强度平均值为973MPa、984MPa;纵向、横向的屈服强度为910MPa、882MPa;纵向、横向的断后伸长率平均值为14.7%、10.4%;两种热处理状态下室温拉伸均呈现一定各向异性,横向较纵向强度略高,塑性低;与双重退火态相比,普通退火态激光增材制造TA15钛合金强度略高,但塑性略低。这是因为通常



(a) 普通退火态 (b) 双重退火态

图2 普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金宏观组织  
Fig.2 Macro-morphology of TA15 titanium alloy produced by laser AM under ordinary annealing and double annealing process



(a) 普通退火超细网篮组织 (b) 双重退火特种双态组织

图3 激光增材制造TA15钛合金显微组织

Fig.3 Microstructure of TA15 titanium alloy manufactured by laser AM

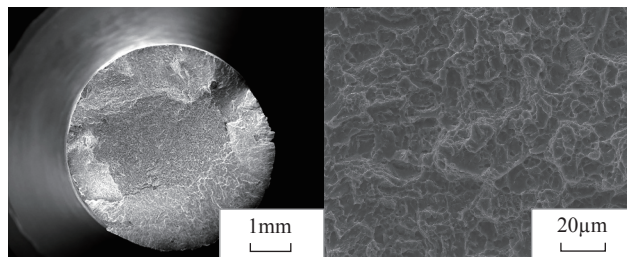
情况下,合金不同方向上的力学性能差异主要是由晶粒形貌、织构、 $\alpha$ 相含量及其板条宽度造成,比较退火态和双重处理态组织可以看出,其晶粒形貌、织构等均相同,但 $\alpha$ 相含量及其板条宽度存在较大差异,Zhang<sup>[23]</sup>及Ren<sup>[24]</sup>等的研究表明,随着 $\alpha$ 相片层尺寸的增加及含量降低,均能导致合金的强度下降,塑性提升。本试验中双重退火态的 $\alpha$ 相板条宽度明显厚于退火态,且导致其强度低于退火态,但塑性提升。

本文分析了激光增材制造TA15钛合金普通退火态与双重退火态 $L$ 向室温拉伸断口形貌,如图4所示。两种热处理态试样均为杯锥状断口,具有中心纤维区和

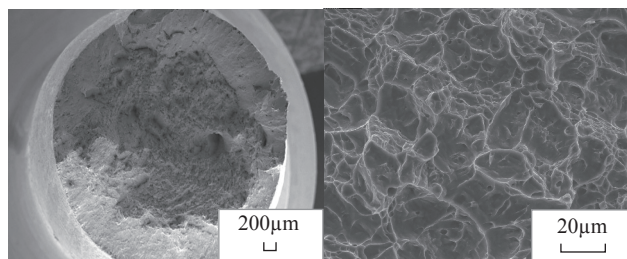
表2 普通退火和双重退火态激光增材制造TA15钛合金室温拉伸性能

Table 2 Tensile properties of laser additive manufactured TA15 titanium alloy under ordinary annealing and double annealing

性能指标	取样方向	普通退火态		双重退火态	
		均值	标准差	均值	标准差
极限强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	$T$	1022	32.27	984	33.64
	$L$	992	27.04	973	29.61
屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$T$	945	37.17	910	29.37
	$L$	904	26.15	882	27.16
延伸率 $A/\%$	$T$	9.5	2.38	10.4	2.53
	$L$	13.3	2.78	14.7	3.08



(a) 普通退火态



(b) 双重退火态

图4 普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金 $L$ 向室温拉伸断口形貌

Fig.4 Fractography of laser additive manufactured TA15 titanium alloy under ordinary annealing and double annealing

四周剪切唇区,双重退火态试样的剪切唇区比例大。高倍下能看到明显的韧窝形状,普通退火态与双重退火态的横纵向断裂机制均为韧性断裂,但双重退火态试样的韧窝形貌更深更大,说明其塑性更好。

### 2.3 疲劳性能

按照国家标准 GB/T 3075—2008 要求,采用棒状试样对普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金应力集中系数  $K_t=1$  光滑试样和  $K_t=3$  缺口试样室温高周疲劳性能进行测试。测试条件为,应力比  $R=0.1$ ,频率  $f=120\text{Hz}$ ,正弦波加载,测试结果如图 5 所示。可见,激光增材制造 TA15 钛合金普通退火态的疲劳性能显著优于双重退火态。普通退火态纵向光滑试样 ( $K_t=1$ ) 条件疲劳极限 ( $N=10^7$ ) 为 605MPa,较双重退火态的 537.5MPa 高 67.5MPa (约 13%);纵向缺口试样 ( $K_t=3$ ) 条件疲劳极限 ( $N=10^7$ ) 为 400MPa,较双重退火态的 322.5MPa 高 77.5MPa (约 24%)。合金的疲劳性能主要受初生  $\alpha$  片层的宽度影响,片层宽度越小,其疲劳性能越好<sup>[23]</sup>,普通退火态合金的片层宽度明显窄于双重退火态,因此其疲劳性能更优。

### 2.4 断裂韧性

按照国家标准 GB/T 4161—2007 要求,采用紧凑拉伸 C(T) 试样对普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金平面应变断裂韧性  $K_{IC}$ ,取样方向包括  $T-L$  和  $L-T$  方向,试验件厚度 35mm。试验结果如表 3 所示,可见,普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  均表现出一定的各向异性, $L-T$  方向的平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  稍高于  $T-L$  方向。双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金表现出优异的断裂韧性,其平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  显著高于普通退火态。Shi 等<sup>[25]</sup> 的研究发现裂纹扩展与网篮结构中  $\alpha$  片层的宽度相关,片层宽度的增加会增加裂纹扩展的阻力,提高其断裂韧性,Guo 等<sup>[26]</sup> 也发现  $\alpha$  片层宽度以及集束尺寸的增加会加大裂纹扩展的阻力从而提高断裂韧性。本试验中双重退火态的  $\alpha$  片层宽度明显宽于普通退火态,使得其断裂韧性更优。

## 3 结论

本文对普通退火态和双重退火态激光增材制造

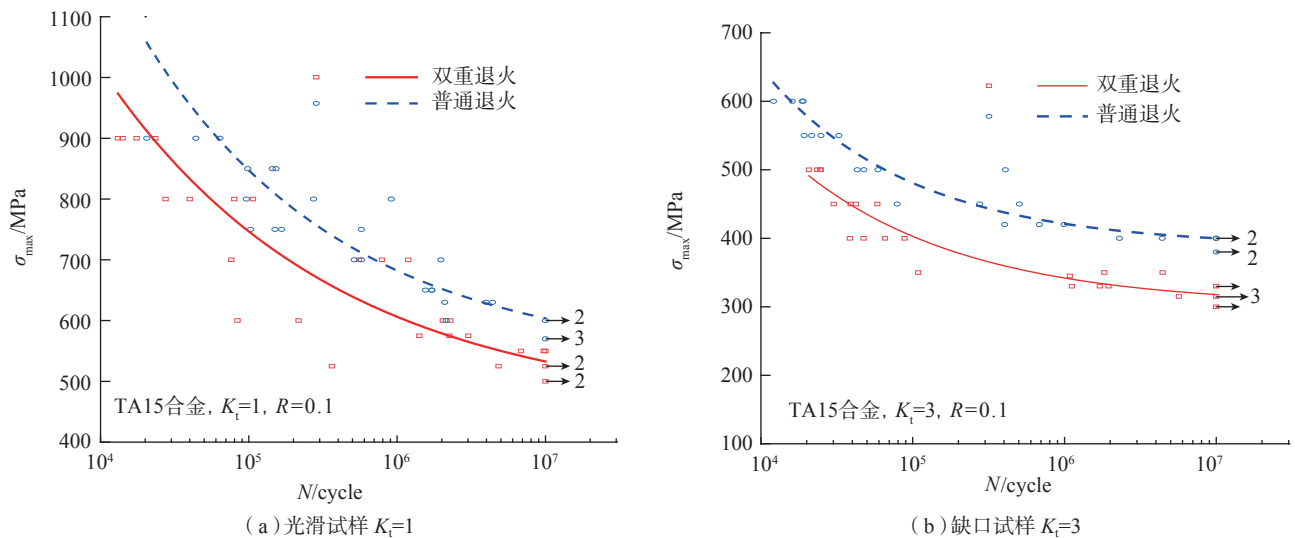


图5 激光增材制造TA15钛合金不同试样的疲劳S-N曲线

Fig.5 S-N curves of different samples for TA15 titanium alloy by laser additive manufacturing

表3 普通退火和双重退火态激光增材制造TA15钛合金平面应变断裂韧性

Table 3 Plane strain fracture toughness of ordinary annealed and double annealed TA15 titanium alloy produced by AM

性能指标	取样方向	普通退火态	双重退火态
平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ / (MPa · m <sup>1/2</sup> )	$T-L$	70.2	97.2
	$L-T$	73.5	103.2

TA15 钛合金显微组织和力学性能进行了对比分析,得出以下结论。

(1) 两种热处理状态下激光增材制造 TA15 钛合金显微组织明显不同。普通退火态为细片层  $\alpha+\beta$  超细网篮组织,双重退火态为端部带根须状形貌的初生  $\alpha$  相 + 超细  $\beta$  转变组织构成的特种双态组织。

(2) 普通退火态激光增材制造 TA15 钛合金极限强度、屈服强度和疲劳极限均优于双重退火态。

(3) 双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金具有较好的塑性和优异的断裂韧性。

## 致谢

感谢北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室为本文提供试验件和试验数据。

## 参考文献

- [1] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战 (邀请论文) [J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.  
WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [2] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题 [J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.  
WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [3] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [4] 李静, 林鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103010.  
LI JING, LIN XIN, QIAN YUANHONG, et al. Study on microstructure and property of laser solid forming TC4 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103010.
- [5] ZHANG Q, CHEN J, ZHAO Z, et al. Microstructure and anisotropic tensile behavior of laser additive manufactured TC21 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 673: 204-212.
- [6] BRANDL E, BAUFELD B, LEYENS C, et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 595-606.
- [7] BAUFELD B, BRANDL E, VAN DER BIEST O. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1146-1158.
- [8] DE FORMANOIR C, MICHOTTE S, RIGO O, et al. Electron beam melted Ti-6Al-4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 652: 105-119.
- [9] 席明哲, 高士友, 刘博, 等. 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 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(2): 445-449.  
XI Mingzhe, GAO Shiyu, LIU Bo, et al. Effect of scanning pattern and annealing heat treatment on microstructures and mechanical properties [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(2): 445-449.
- [10] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光成形 TC4 合金组织及性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1263-1266.  
ZHANG Shuangyin, LIN Xin, CHEN Jing, et al. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(7): 1263-1266.
- [11] ZHANG S Y, LIN X, CHEN J, et al. Heat-treated microstructure and mechanical properties of laser solid forming Ti-6Al-4V alloy [J]. Rare Metals, 2009, 28(6): 537-544.
- [12] DINDA G P, SONG L, MAZUMDER J. Fabrication of Ti-6Al-4V scaffolds by direct metal deposition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(12): 2914-2922.
- [13] BRANDL E, LEYENS C, PALM F. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011, 26: 012004.
- [14] 王向明, 苏亚东, 吴斌. 增材技术在飞机结构研制中的应用 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 16-20.  
WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin. Application of additive manufacturing technology on aircraft structure application of additive manufacturing technology on aircraft structure development [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 16-20.
- [15] 谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织和性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1510-1515.  
XIE Xuxia, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1510-1515.
- [16] 贺瑞军, 王华明. 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金高周疲劳性能 [J]. 航空学报, 2010, 31(7): 1488-1493.  
HE Ruijun, WANG Huaming. HCF properties of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(7): 1488-1493.
- [17] 王华明, 李安, 张凌云, 等. 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的力学性能 [J]. 航空制造技术, 2008, 51(7): 26-29.  
WANG Huaming, LI An, ZHANG Lingyun, et al. Mechanical properties of titanium alloy TA15 fabricated by laser melting deposition manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(7): 26-29.
- [18] 袁红, 方艳丽, 王华明. 热处理对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织及压缩性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 746-750.  
YUAN Hong, FANG Yanli, WANG Huaming. Influence of heat treatment on microstructure and compressive property of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010,

39(4): 746-750.

[19] 谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积TA15钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008(9): 1510-1515.

XIE Xuxia, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008(9): 1510-1515.

[20] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

National Standardization Administration of China. Metallic materials-tensile testing—Part 1: Methods of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.

[21] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3075—2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Standardization Administration of China. GB / T 3075—2008 Metallic materials-fatigue test-Axial force control method[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4161—2007 金属材料平面应变断裂韧性 KIC 试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Standardization Administration of China. GB / T 4161—2007 Metal materials-determination of plane-strain fracture toughness[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[23] ZHANG B, SONG Z, LEI L, et al. Geometrical scale-sensitive fatigue properties of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloys with  $\alpha/\beta$  lamellar microstructures[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(12): 1284-1288.

[24] REN H S, TIAN X J, WANG H M. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of a graded structural material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 614: 207-213.

[25] SHI X H, ZENG W D, SHI C L, et al. Study on the fatigue crack growth rates of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy with basket-weave microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 621: 143-148.

[26] GUO P, ZHAO Y Q, ZENG W D. Fatigue crack growth behavior in TC4-DT titanium alloy with different lamellar microstructures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(2): 277-281.

通讯作者: 谷美邦, 工程师, 硕士, 主要研究方向为舰载机制造, E-mail: 18640812356@163.com.

(责编 阳光)

(上接第 86 页)

(3) 受在制品的影响, 飞机大部件装配能力测算时需考虑时序关系, 以各部段数据表为基础, 调用实时数据通过匹配装配能力最终获得大部件实际装配能力。

## 参考文献

[1] 薛红前. 飞机装配工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.

XUE Hongqian. Aircraft assembly technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015.

[2] 刘强. 离散型生产线生产能力评估系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

LIU Qiang. Research on production capacity evaluation system of discrete production line[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[3] 王青, 温李庆, 李江雄, 等. 基于 Petri 网的飞机总装配生产线建模及优化方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015(7): 1224-1231.

WANG Qing, WEN Liqing, LI Jiangxiong, et al. Modeling and optimization for aircraft final assembly line based on Petri net[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015(7): 1224-1231.

[4] 屈琦, 贾晓亮, 郑植元, 等. 飞机部件装配生产线仿真研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 54-59.

QU Qi, JIA Xiaoliang, ZHENG Zhiyuan, et al. Simulation of aircraft components assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 54-59.

[5] 孙星. 基于 Petri 网和 eM-Plant 的飞机装配线建模与仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

SUN Xing. Modeling and simulation of aircraft assembly production line based on Petri net and eM-Plant software[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[6] 闫振国. 复杂产品装配系统的离散动态作业过程分析与优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.

YAN Zhenguo. Discrete dynamic job process analysis and optimization of complex product assembly system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.

[7] WRIGHT T P. Factors affecting the cost of airplanes[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1936, 3(4): 122-128.

[8] WANG T, HUANG H, YU C J, et al. Understanding cost reduction of China's biomass direct combustion power generation—A study based on learning curve model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 546-555.

[9] 程雪梅. 基于标准作业时间的 XX 航空转包项目装配产能优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

CHENG Xuemei. The xx aviation subcontract projects assembly capacity optimization based on standard operation time[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[10] U. S. Government Accountability Office. F-35 joint strike fighter: Development is nearly complete, but deficiencies found in testing need to be resolved [EB/OL]. [2018-06-05]. [https://www.gao.gov/mobile/products/GAO-18-321?utm\\_campaign=usgao\\_email&utm\\_content=daybook&utm\\_medium=email&utm\\_source=govdelivery](https://www.gao.gov/mobile/products/GAO-18-321?utm_campaign=usgao_email&utm_content=daybook&utm_medium=email&utm_source=govdelivery).

通讯作者: 龙安林, 工程师, 博士, 研究方向为飞机部件装配与结构弹塑性变形分析, E-mail: anlinlong@126.com.

(责编 阳光)