

双重退火对激光增材制造 TC18 钛合金组织和性能的影响

张 颖¹ 胡生双¹ 郑 超¹ 岳 珊¹ 胡 广² 高婷婷¹
(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)

摘 要 利用拉伸试验机、扫描电镜和金相显微镜等手段,研究了双重退火工艺(890 ℃×1 h/FC+750 ℃×2 h/AC,570 ℃×4 h/AC)对激光增材沉积和修复两种状态的 TC18 钛合金的组织和力学性能的影响,并与原始锻件 TC18 钛合金进行比较。结果表明,激光增材修复试样微观组织为典型的类铸态组织,主要由层状β晶粒组成。激光增材修复试样经双重退火后为魏氏组织,原始β晶界仍清晰可见,晶内分布着交错的(α+β)集束。经双重退火后,激光增材沉积试样强度低于锻件,塑性高于锻件,激光增材修复试样的性能介于两者之间,其冲击性能比锻件的冲击性能高约 60%。激光增材沉积、激光增材修复两种状态经退火热处理后力学性能都能达到 TC18 锻件规定值。

关键词 双重退火;TC18 钛合金;激光增材;修复;组织与性能

中图分类号 TG156.2;TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.016 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Double Annealing on Microstructure and Properties of TC18 Titanium Alloy by Laser Additive Manufacturing
Zhang Ying¹, Hu Shengshuang¹, Zheng Chao¹, Yue Shan¹, Hu Guang², Gao Tingting¹
(1.AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd.; 2.Xi'an BLT Additive Technology Co., Ltd.)

Abstract: The effects of double annealing processes (890 ℃×1 h/FC+750 ℃×2 h/AC, 570 ℃×4 h/AC) on the microstructure and mechanical properties of TC18 titanium alloy by laser additive deposition and repair were investigated by tensile testing machine, scanning electron microscope and metallographic microscope, and compared with original forging TC18 titanium alloy. The results indicate that the microstructure of the repaired specimen is characterized by as-cast microstructure, which is mainly composed of lamellar β-grains, and presents the Widmannian structure after double annealing, where the original β grain boundary is still clearly visible, and the interlaced (α+β) clusters are distributed within the grains. After double annealing, the strength of the deposited specimen is lower than that of the original forgings, while the plasticity is the higher. The properties of the repaired specimen are between the two. The impact properties of the repaired specimen are about 60% higher than that of the forgings. After annealing, the mechanical properties of both specimens can reach the prescribed value of TC18 forgings.

Key Words: Double Annealing, TC18 Titanium Alloy, Laser Additive, Repair, Microstructure and Property

收稿日期:2021-03-14;**修改稿收到日期:**2021-04-23
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,胡生双,郑超,等. 双重退火对激光增材制造 TC18 钛合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 006-1 009.
ZHANG Y, HU S S, ZHENG C, et al. Effects of double annealing on microstructure and properties of TC18 titanium alloy by laser additive manufacturing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 006-1 009.

[7] 郭小童,郑大为,李龙飞,等. 冷却速率导致的薄壁效应对 K465 合金显微组织和持久性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(12): 1 654-1 666.

[8] 雷四雄,杨伟,郑行,等. 精铸工艺对 K438 合金组织及高温力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 306-309.

[9] RAKOCZY L, GRUDZIEN M, CYGAN R. Influence of melt-pouring temperature and composition of primary coating of shell mold on tensile strength and creep resistance of Ni-based superalloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(7): 3 826-3 834.

[10] 吴凯西,刘宏萱,彭真,等. 浇注工艺对 K403 合金初生碳化物及持久性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 52-56.

[11] 张雷雷,陈晶阳,蹇磊,等. 浇注温度对 K439B 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 57-63.

[12] 胡庚祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2010.

[13] 郑亮. 凝固快速对铸造镍基高温合金 K417G 显微组织的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 7-11.

[14] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册(下卷)[M]. 北京:中国质检出版社, 2012.

[15] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

[16] 都贝宁,杨金侠,崔传勇,等. 晶粒细化对 K417G 高温合金蠕变性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1 384-1 392.

[17] THIBAUT K, LOCQ D, CARON P, et al. Influence of microstructure on local intra- and intergranular deformations during creep of a nickel-based superalloy at 700 ℃[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A588: 14-21.

(编辑:刘卫)

激光增材制造(Laser Additive Manufacturing)技术是通过激光熔化/快速凝固逐层沉积“生长制造”,由零件 CAD 模型一步完成致密、高性能钛合金零件的“近净成形制造”^[1]。相对于传统的“锻造+机械加工”技术,在薄壁、内腔等复杂结构件上,激光增材制造有着巨大优势^[2~4],主要体现在显著提高材料利用率、降低成本、节约生产周期^[5]等方面。但是激光增材制造为非平衡凝固过程,容易产生组织应力及热应力^[6],出现变形和开裂等现象。所以激光增材制造的后处理就显得尤为重要。现在激光增材制造最常见的后处理方式是热处理^[7~10]。通过热处理,能够达到改善激光增材制造金属构件组织、消除缺陷、优化性能的目的^[11]。

随着工业的发展,对激光增材修复工件的需求越来越强烈。李秋歌等^[12]采用激光增材技术修复了损坏的 K465 镍基高温合金航空发动机涡轮叶片,效果良好。刘江红等^[13]采用激光增材修复技术对 Ti5Al2.5Sn ELI 材料进行修复,发现修复区域力学性能不低于粉末冶金制备的材料基体。窦磊等^[14]研发专用合金粉末,采用激光增材技术对轴承座内孔磨损区进行修复,经性能测试表明,激光增材区的力学性能和组织结构都达到与基材相当的水平。但是当前对 TC18 钛合金激光增材沉积、激光增材修复及经热处理后组织和力学性能是否满足使用要求的报道较少^[15,16]。本课题对激光增材沉积、激光增材修复和原始锻件 3 种状态的 TC18 钛合金进行双重退火处理,对比 3 种状态的组织、力学性能、冲击、断裂韧度和裂纹扩展速率,并对拉伸试样和冲击试样进行断口分析,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料和方法

熔覆材料为等离子旋转电极法制备的球形 TC18 钛合金粉末,粉末粒径为 45~185 μm。TC18 粉末的化学成分符合 GJB2744A-2007 标准的要求。激光增材制造在 LSF-V 型设备上,该设备包括 4 000 W 光纤激光器、数控工作台、工作室、水冷冷却系统、净化系统、气氛控制系统等。激光成型工艺参数:激光功率为 1 000 kW,扫描速率为 480 mm/min,光斑直径为 3

mm,层厚为 0.4 mm,送粉量为 12 N/min,氧含量≤0.01%。成形基材为 TC18 钛合金锻件,表 1 为用光谱法测定的 TC18 钛合金锻件化学成分。可以看出,其化学成分符合 GJB2744A-2007 的要求。

激光增材修复试样的力学性能取样是指平行于锻件 L 方向(即 50% 原锻件和 50% 的激光沉积态)。激光增材沉积、激光增材修复和原始锻件 3 种状态的 TC18 钛合金经线切割、车削、磨削等机械加工成标准拉伸试样后,再经 890 ℃×1 h/FC+750 ℃×2 h/AC,570 ℃×4 h/AC 双重退火真空热处理。采用 AG 2501CNE 试验机进行拉伸测试;采用 JNS-300 试验机进行冲击测试;采用 MTS-SANSCMT500 试验机进行断裂韧度测试;利用 INSTRON8801 试验机进行裂纹扩展速率测试,断口微观形貌观察与分析在 Hitachi S4300 扫描电镜上进行;金相微观组织观察与分析在 XJP-6A 金相显微系统上进行。

表 1 TC18 钛合金锻件的化学成分
Tab.1 Chemical composition of TC18 titanium alloy

forgings										%
w _B										
Al	Mo	V	Cr	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
5.38	4.81	4.99	1.10	0.97	0.019	0.008 3	0.008 8	0.002 4	0.11	余量
4.4~	4.0~	4.0~	0.5~	0.5~	≤	≤	≤	≤	≤	余量
5.7	5.5	5.5	1.5	1.5	0.15	0.10	0.05	0.015	0.18	余量

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织

图 1 为 TC18 钛合金原始锻件和激光增材修复进行双重退火处理后的微观组织。可以看出,TC18 钛合金锻件微观组织为双态组织,既有锻造过程产生的等轴 α 组织,又有锻造完成后热处理产生的短棒状 α 组织(见图 1a)。锻件经双重退火处理后,双态组织特征基本消失,锻件组织主要由 β 晶粒+晶内 α 细片层+晶界 α 粗片层组成(见图 1b)。激光增材修复态微观组织呈现典型的铸态特征,合金组织由近似层状 β 晶粒组成。由于激光修复过程中冷却速度较快,β 晶粒内部组织较细,在金相组织图中未能明显分辨。激光增材修复态组

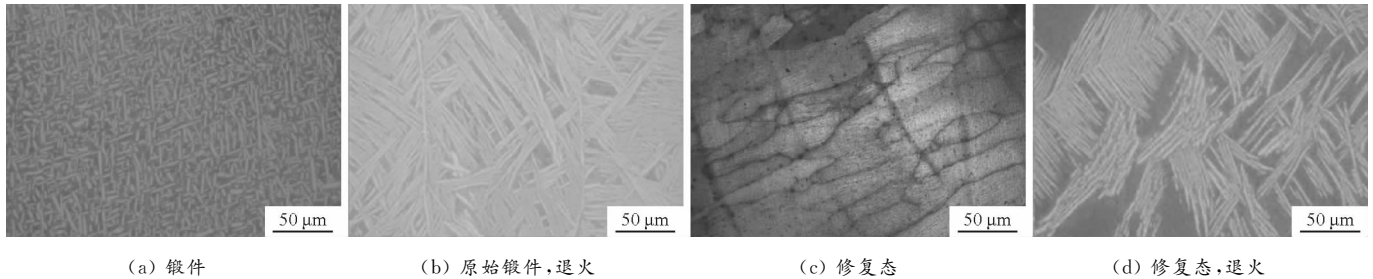


图 1 TC18 钛合金不同状态的微观组织

Fig.1 Microstructure of TC18 titanium alloy under various states

织经双重退火处理后,合金微观组织转变成魏氏组织,原始 β 晶界仍清晰可见,晶内分布着交错的 $(\alpha + \beta)$ 集束(见图 1d)。

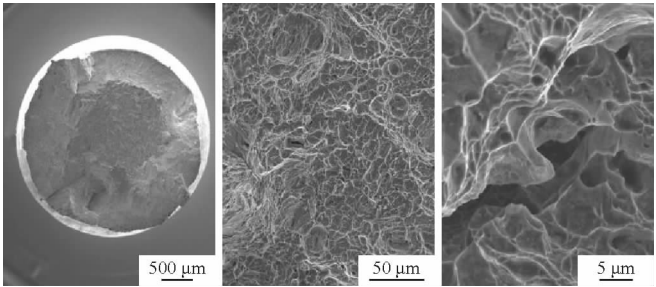
2.2 拉伸性能

对经双重退火热处理的激光增材沉积试样、激光修复试样及原始锻件进行室温拉伸试验,结果见表 1。可以看出,激光增材制造沉积试样的抗拉强度(约为 1 083 MPa)和屈服强度(约为 1 004 MPa)均低于激光增材修复试样(抗拉强度约为 1 095 MPa 和屈服强度约为 1 017 MPa),伸长率相差不大,但是收缩率略高于激光增材修复试样(收缩率分别约为 52% 和 42%)。激光增材修复的综合力学性能较好。从表 1 还可看出,激光增材制造沉积和修复试样的强度和塑性均低于锻件试样,但能满足 GJB2744A-2007 的力学性能指标要求。

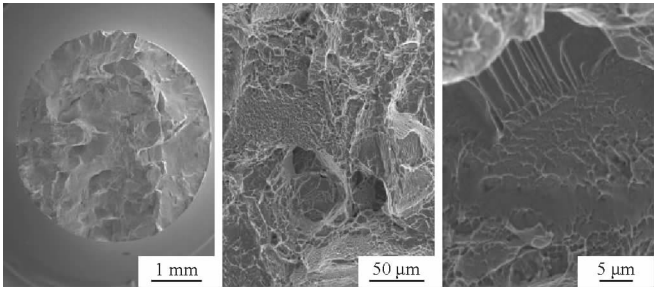
表 2 不同类型试样的力学性能结果

Tab.2 Mechanical properties of different types of specimens						
试样类型	试样编号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%	备注
激光增材沉积	1-1-1	1 074	993	11.5	48	—
	1-1-2	1 083	1 004	11.0	52	—
激光增材修复	1-2-1	1 103	1 028	12.0	36	基材断裂
	1-2-2	1 095	1 017	11.5	42	基材断裂
锻件	1-3-1	1 324	1 220	14.5	35	—
	1-3-2	1 301	1 216	15.0	36	—
原始锻件(未热处理)	1-4-1	1 156	1 091	11.0	27	—
	1-4-2	1 163	1 093	14.5	29	—
指标要求		1 080~1 230	$\geq 1 010$	≥ 8	≥ 20	—

1-2-1 和 1-4-1 号试样断口形貌见图 2。可以看出，



(a) 1-2-1 试样激光修复试样的断口形貌



(b) 1-4-1 试样锻件的断口形貌

图 2 不同类型试样的断口形貌

激光增材修复试样断裂时均发生明显颈缩,锻件试样的断口较为平整,无明显颈缩。增材修复试样断口出现大量韧窝,说明塑性较好。锻件室温拉伸断口低倍形貌出现河流状扇形特征,且高倍下韧窝形貌消失,表明锻件存在解理断裂的特征,塑性较差。

2.3 冲击性能

表 3 为双重退火热处理后不同类型试样的冲击试验结果。可以看出,热处理后激光增材制造、激光修复和锻件母材的冲击性能均达到标准要求,并且都优于未热处理的锻件。激光修复试样的冲击性能比锻件的高约 60%。锻件经热处理后,与未热处理的锻件性能接近。

表 3 不同类型试样的冲击试验结果

Tab.3 Impact results of different types of specimens		
试样类型	试样编号	$\alpha_{KU}/(J \cdot cm^{-2})$
激光增材	2-1-1	40.0
	2-1-2	42.0
激光修复	2-2-1	47.0
	2-2-2	49.5
锻件	2-3-1	30.0
	2-3-2	30.5
原始锻件(未热处理)	2-4-1	27.3
	2-4-2	25.8
指标要求		≥ 25

2.4 断裂韧性

表 4 为双重退火热处理后不同类型试样的断裂韧性。可以看出,经热处理后,激光修复和锻件的断裂韧性都低于原始锻件的。其中,激光修复 K_{IC} 值与锻件的接近。

表 4 不同类型试样的断裂韧性

Tab.4 Fracture toughness of different types of specimens		
试样类型	试样编号	$K_{IC}/(MPa \cdot m^{0.5})$
激光增材沉积	3-1-1	81.6
	3-1-2	89.5
激光修复	3-2-1	63.0
	3-2-2	64.5
锻件	3-3-1	63.5
	3-3-2	62.0
原始锻件	3-4-1	72.1
	3-4-2	75.3
指标要求		≥ 60

2.5 裂纹扩展速率

裂纹扩展速率试验是在常压条件下进行。分别测试双重退火热处理制度下,激光修复件的裂纹扩展速率,同时测试了锻件原始状态的裂纹扩展速率,见图 3。试验在室温下进行, $R = 0.5$, 频率为 15 Hz; 试验参照 GB/T 6398-2000 标准。测试项目为对应试验条件下的 $da/dN-\Delta K$ 曲线。可以看出,4 种试样的 $da/dN-\Delta K$

Fig.2 Fracture morphology of different types of specimens

曲线相似,说明 4 种试样的疲劳裂纹扩展机理相似。此外,4 种试样 $da/dN-\Delta K$ 曲线的疲劳裂纹扩展门槛值具有一定差别。锻件原始态试样和双重退火态疲劳裂纹扩展门槛值分别约为 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 和 $14 \text{ MPa} \cdot$

$\text{m}^{0.5}$ 。与锻件双重退火态相比,激光增材制造、修复双重退火态的疲劳裂纹扩展门槛值略有降低,分别约为 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 和 $11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$,这是由于激光增材制造和修复试样存在冶金缺陷,增加了材料疲劳裂纹的萌

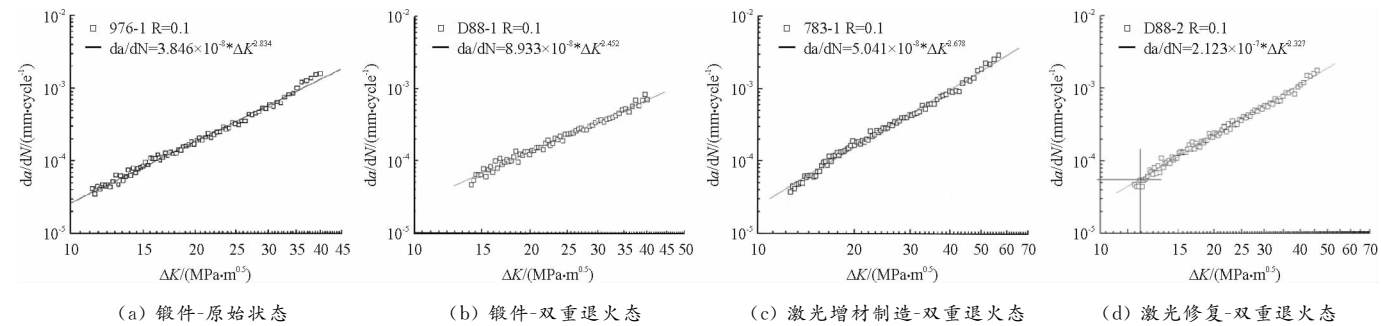


图 3 不同类型试样的裂纹扩展速率

Fig.3 Growth rate of crack in different types of specimens

生和扩展。

3 结 论

(1)激光增材修复试样微观组织为典型的类铸态组织,主要由层状 β 晶粒组成,经双重退火后转变为魏氏组织,原始 β 晶界仍清晰可见,晶内交错分布 $(\alpha + \beta)$ 集束。

(2)经双重退火后,激光增材制造试样强度低于原始锻件,塑性高于锻件,激光修复试样的性能介于两者之间;激光修复的冲击韧度比锻件的高约 60%。

(3)增材成形、增材修复两种状态经退火热处理后力学性能都能达到了 TC18 锻件标准。

参 考 文 献

- [1] 张阿莉,朱洪来,唐飞.双重退火对激光增材制造 Ti60A 合金显微组织和力学性能的影响[J].载人航天,2015,21(4):346-350.
- [2] 巩水利,李怀学,锁红波,等.高能束流加工技术的应用与发展[J].航空制造技术,2009(14):34-39.
- [3] 王华明,李安,张凌云,等.激光熔化沉积增材制造 TA15 钛合金的力学性能[J].航空制造技术,2008(7):26-29.
- [4] CHUA C K, CHOU S M, WONG T S. A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998(14):146-152.
- [5] 赖梦琪,胡宗浩,胡永祥,等.增材制造钛合金激光喷丸强化表面完整性影响实验研究[J].应用激光,2019,39(1):9-16.
- [6] 赵剑峰,谢德巧,梁绘昕,等.金属增材制造变形与残余应力的研究现状[J].南京航空航天大学学报,2019,51(1):1-6.
- [7] 董博伦,柏久阳,林三宝,等.激光/电炉增材制造金属的热处理工艺研究现状与发展[J].焊接,2016(4):17-22.
- [8] 张萍,刘德波,柏久阳,等.电炉增材制造的沉积态 TC4 钛合金薄壁零件组织特征[J].焊接,2015(11):53-56.
- [9] BRANDL E, SCHOBERTH A, LEYENS C. Morphology, micro-structure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM) [J]. Materials

Science and Engineering, 2012, A532: 295-307.

- [10] BRANDL E, GREITEMEIER D. Microstructure of additive layer manufactured Ti-6Al-4V after exceptional post heat treatments [J]. Materials Letters, 2012, 81: 84-87.
- [11] 李福泉,孟祥旭,董志宏,等.激光增材制造钢的后热处理研究现状[J].精密成形工程,2018,10(1):97-108.
- [12] 李秋歌,林鑫,王杏华,等.激光增材修复 K465 高温合金裂纹控制研究[J].稀有金属材料与工程,2017,46(4):955-959.
- [13] 刘江红,孙秀京,李凤全,等.激光增材修复技术在氢氧发动机上的应用[J].应用激光,2016,36(6):670-673.
- [14] 窦磊,郭双全,谢东,等.某型航空发动机涡轮支轴承座激光增材修复研究[J].航空维修与工程,2016(6):53-54.
- [15] 王宏芳,田象军,程宇,等.热变形条件对激光增材制造 TC18 钛合金组织及变形行为的影响[J].中国激光,2018,45(3):81-89.
- [16] 杨平华,史丽军,梁菁,等.18 钛合金增材制造材料超声检测特征的试验研究[J].航空制造技术,2017(5):38-42.

(编辑:刘卫)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- 微官网
- 行业动态
- 联系我们
- 微商城
- 铸造前沿
- 免费推广
- 本刊会议
- 经典案例
- 铸造职场
- 收录动态
- 铸造学堂
- 产品库
- 稿件系统
- 专利与发明
- 企业库