

# 激光熔化沉积快速成形 TA15钛合金的力学性能\*

## Mechanical Properties of Titanium Alloy TA15 Fabricated by Laser Melting Deposition Manufacturing

北京航空航天大学激光材料加工与制造技术实验室 王华明 李安 张凌云  
沈阳飞机设计研究所结构设计研究部 王向明 景绿路 韩涛



王华明

北京航空航天大学材料加工工程学科责任教授,2005年受聘教育部“长江学者”特聘教授。建成先进的“激光材料加工制造技术实验室”,从事“先进材料快速凝固激光制备与成形”研究,突破飞机钛合金次承力构件激光快速成形工艺、成套工艺装备及装机应用关键技术,多项成果在航空发动机及飞机上得到应用。

钛合金具有密度低、比强度高、屈强比高、耐蚀性及高温力学性能优

激光熔化沉积(LMD)快速成形技术,利用快速原型制造(RPM)技术在无需任何模具和工装条件下快速制造任意复杂形状零件的全数字化快速制造基本原理,以新材料快速凝固激光冶金制备技术为手段,通过金属材料的激光逐层熔化沉积,直接由零件CAD模型一步完成高性能“近终形”复杂金属零件的快速成形制造。

异等突出特点,在航空、航天、石化、船舶等工业装备中用量越来越大,以航空应用为例,如波音公司和空客公司研制的新一代民用客机(B787、A380)中钛合金用量已由第三代(B747、A300)的不到4%上升到10%以上,第三代歼击机中钛合金结构件用量由F16的约3%增加到了F/A18-E/F、苏-27的15%以上,而第四代歼击机F22中钛合金结构件用量已占机身结构总重量的41%<sup>[1-7]</sup>。但是,由于受钛合金本性的影响,采用“锻造+机械加工”等传统技术制造这些复杂钛合金结构件,

存在制造工艺复杂、工序多、生产制造成本高、材料利用率低、生产周期很长等突出缺点,制约了钛合金结构件在先进工业及国防装备中的广泛应用,并严重影响国防装备的快速研制、快速生产与快速装备使用。

激光熔化沉积(LMD)快速成形技术,利用快速原型制造(RPM)技术在无需任何模具和工装条件下快速制造任意复杂形状零件的全数字化快速制造基本原理,以新材料快速凝固激光冶金制备技术为手段,通过金属材料的激光逐层熔化沉积,直接由零件CAD模型一步完成高性能“近终形”复杂金属零件的快速成形制造,是一种代表着先进制造技术

\* 国家自然科学基金重点项目(50331010)及国家杰出青年基金(50625413)资助项目。

发展方向、将高性能结构材料制备与“近终形”复杂零件直接成形有机融为一体、非接触、数字化成形制造新技术,对上述工业装备中钛合金等高性能关键金属结构件的短周

钛合金的拉伸、高温持久及疲劳等力学性能。

### 试验方法

采用真空非接触等离子熔炼/

氩气雾化 TA15 钛合金粉末(粒度-140+300 目)为原料,通过同轴气送粉激光熔化沉积快速成形技术,在北京航空航天大学激光材料加工与制造技术实验室自行研制、具有自主知识产权的“平面接触-动态密封-惰性气氛保护”钛合金结构件激光熔化沉积快速成形成套装备上进行<sup>[10-12]</sup>。该系统包括 8kW 横流连续 CO<sub>2</sub> 激光器、三轴联动四坐标数控激光加工机床、专用送粉器、集粉末输送与汇聚-激光束聚焦-惰性气体输送-气氛保护与密封-系统冷却-高度控制等多种功能于一体的“激光快速成形多功能集成光头”及“自由平面接触/动态密封/惰性气氛保护激光熔化沉积腔”等核心单元<sup>[10-12]</sup>。分别在 750℃、770℃、800℃ 及 830℃ 等 4 个温度下对激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金进行了退火热处理,以系统研究激光熔化沉积成形后退火热处理温度及退火热处理时间对激光熔化沉积成形 TA15 钛合金显微组织及力学性能的影响。采用标准试样分别测试

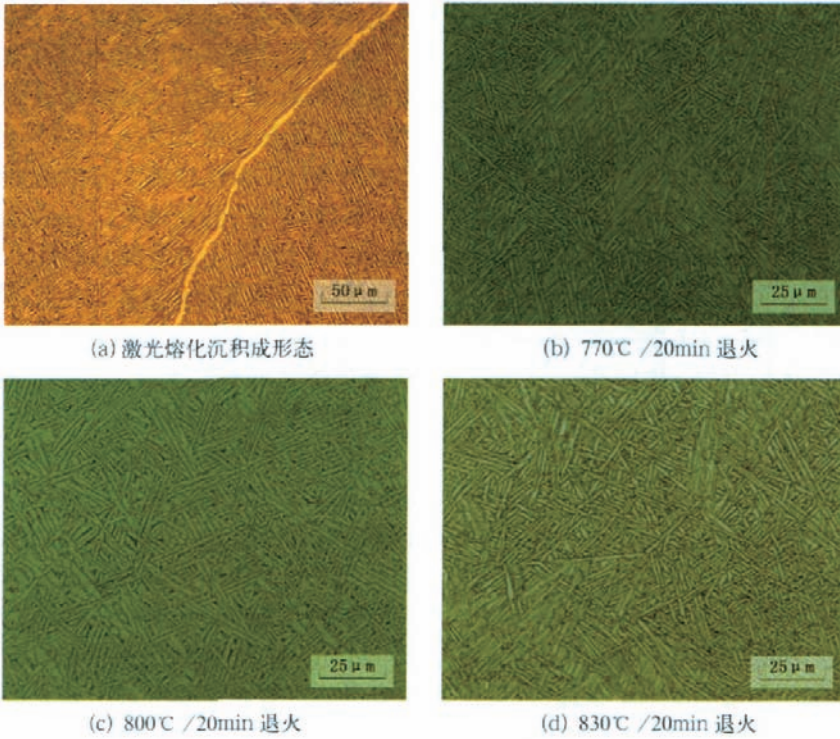


图1 激光熔化沉积快速成形TA15钛合金板材显微组织光学金相照片

期、低成本成形制造具有十分重要的意义<sup>[5-7]</sup>。美国 AeroMet 公司同波音、洛克希德·马丁等飞机制造商紧密合作,采用激光熔化沉积快速成形技术生产的 Ti-6Al-4V 等钛合金关键结构件,已在 F-18E/F、F-22 等飞机及导弹等武器装备中得到应用考核<sup>[5-9]</sup>。

迄今,国内外尚未见有关激光熔化沉积快速成形钛合金力学性能的系统研究报道。本项目组“产学研”紧密结合,不到 4 年时间就突破了钛合金结构件激光熔化沉积快速成形工艺及应用关键技术,成功实现了激光熔化沉积制造 TA15 钛合金结构件在飞机上的应用,使我国成为继美国之后世界上第二个掌握激光熔化沉积快速成形飞机钛合金次承力结构件装机应用技术的国家<sup>[5-7,10-12]</sup>。本文简要报道激光熔化沉积 TA15

表1 激光熔化沉积成形TA15钛合金板材试样室温拉伸性能

试样材料状态	纵向或横向	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%
激光成形态	纵向	990	19.5
		985	17.0
	横向	1020	15.5
		1040	13.5
770℃ /20min, 空冷	纵向	980	19.5
		1040	17.0
		980	14.5
800℃ /20min, 空冷	纵向	1020	15.0
		1020	18.5
		970	23.5
	横向	1030	13.5
		930	14.5
		980	13.5
830℃ /20min, 空冷	纵向	1010	14.5
		985	14.5
		965	21.0

了激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金零件的室温拉伸、500℃ 高温拉伸及 500℃ /471MPa 高温持久性能以及光滑试样 (Kt=1) 与缺口试样 (Kt=3) 的轴向拉-拉疲劳性能。室温拉伸、高温拉伸、高温持久、光滑及缺口疲劳等力学性能标准测试试样

金板材室温拉伸力学性能没有明显影响; 在 6 ~ 16mm 范围内, 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金板材厚度变化对其室温拉伸力学性能没有显著影响, 其力学性能对壁厚敏感性小。

分别测试了激光熔化沉积快速

TA15 钛合金板材的室温拉伸力学性能表现出一定的各向异性, 其纵向(沉积增高方向) 塑性高于横向, 横向强度略高于纵向。

### 3 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的高温拉伸力学性能

激光熔化沉积态及经 800℃ 退火热处理后, 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金与热轧退火 TA15 钛合金的 500℃ 高温拉伸试验结果如表 3 所示, 可见, 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金具有优良的高温拉伸性能, 其高温拉伸性能与热轧退火 TA15 钛合金相当。

### 4 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的高温持久性能

从表 4 中可见, 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金具有特别优异的高温持久性能, 在 500℃ /471MPa 条件下, 激光熔化沉积快速成形 TA15 棒状试样的平均持久寿命达到 113h 以上, 而热轧退火 TA15 钛合金的持久寿命只有约 47h, 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金高温

表2 激光熔化沉积快速成形TA15钛合金纵向(沉积增高方向)及横向力学性能

材料状态	纵向或横向	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%
激光成形态	纵向	990	19.5
		985	17.0
		1020	15.5
	横向	1070	10.5
		1040	13.5
热处理 (800℃ /20min)	纵向	1020	15.0
		1020	18.5
		970	23.5
	横向	1030	13.5
		930	14.5
		980	13.5

分别取自厚度为 6mm 和 16mm 的激光熔化沉积 TA15 钛合金板材及直径为 15mm 的棒材。

成形 TA15 钛合金板材纵向(沉积增高方向) 及横向的力学性能, 结果表明(见表 2), 激光熔化沉积快速成形

## 试验结果

### 1 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的显微组织

激光熔化沉积成形态(沉积态) TA15 钛合金具有典型的编织状  $\beta$  转变近  $\alpha$  钛合金组织, 在 750 ~ 830℃ 范围内对进行 20 ~ 120min 退火热处理后, 其显微组织没有明显变化, 如图 1 所示。

### 2 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金室温拉伸力学性能

由表 1 可见, 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金板材具有优异的室温拉伸力学性能, 其抗拉强度平均达到 1004MPa、延伸率平均达到 16.2%, 相当于热轧退火 TA15 钛合金板材室温拉伸性能实测值(抗拉强度 1000MPa、延伸率 13%); 在 770 ~ 830℃ 范围内进行退火热处理, 对激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合

表3 激光熔化沉积快速成形TA15钛合金500℃高温拉伸性能

热处理状态	纵向或横向	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%
激光熔化沉积 TA15 钛合金 (800℃ /20min)	纵向	695	8.5
		680	12
		690	18
	横向	690	22
		650	13
		715	13
热轧退火 TA15	轧制方向	700	20
		695	23

表4 激光熔化沉积快速成形及热轧退火TA15钛合金高温拉伸持久寿命

试验材料	试验温度及应力	持久寿命	延伸率 $\delta$ /%	断面收缩率 $\psi$ /%
热轧退火 TA15 钛合金	500℃ /471MPa	44h45min	30	67
		44h29min	46	75
		51h52min	32	73
激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金	500℃ /471MPa	121h01min	30	81
		124h52min	34	78
		123h30min	39	72
		104h05min	36	74

持久寿命是热轧退火 TA15 钛合金的 2.4 倍,持久寿命提高 140% 以上。

### 5 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的疲劳性能

疲劳性能尤其是缺口疲劳性能是飞机钛合金结构件最重要的力学

### 6 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的断裂韧性

采用厚度为 25mm 的标准紧凑拉伸试样,测试了激光熔化沉积快速成形态及特种热处理态 TA15 钛合金的断裂韧性,测试的结果表明(如

性,横向强度略大于纵向,纵向塑性略高于横向;

(3) 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金具有十分优异的高温持久性能,在 500℃ /471MPa 条件下的高温持久寿命达热轧退火 TA15 钛合金的 2 倍以上;

(4) 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金具有优异的疲劳性能,其光滑试样疲劳性能与锻造及热轧钛合金厚板相当,而缺口试验疲劳性能显著优于钛合金锻件。

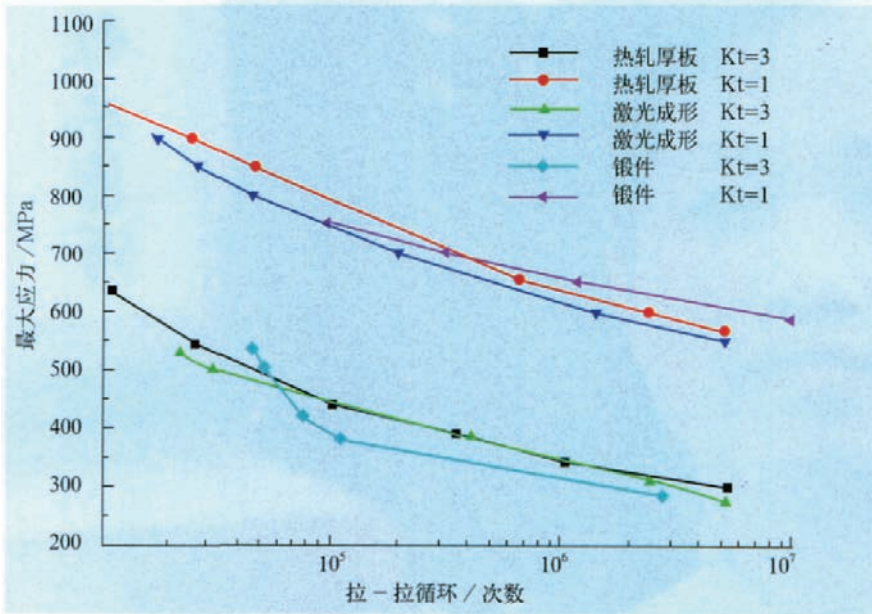


图2 激光熔化沉积快速成形、热轧厚板及锻造TA15钛合金疲劳性能

性能,激光快速成形钛合金零件疲劳性能的优劣(很重要是与钛合金锻件相比),对激光快速成形钛合金结构件在飞机上的应用前景至关重要。本课题进行了激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金与锻造 TA15 钛合金及热轧厚板 TA15 钛合金的光滑试样(Kt=1)及缺口试样(Kt=3)疲劳性能对比考核试验,在等幅应力条件下采用轴向拉-拉循环加载测试 S-N 曲线,应力比 R=0.06,试验结果如图 2 所示,从图 2 可以看出,激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金具有优异的疲劳性能,其光滑试样疲劳性能与锻造及热轧钛合金的水平相当,而缺口试验疲劳性能显著超过钛合金锻件。

表 5 所示):激光熔化沉积快速成形态 TA15 钛合金的断裂韧性没有方向性,其纵向与横向的断裂韧性值均约 50MPa·m<sup>1/2</sup>,而经特种热处理获得双态组织后,激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金断裂韧性平均值达到 78MPa·m<sup>1/2</sup>,较激光熔化沉积态 TA15 钛合金的断裂韧性值大幅度提高。

### 结论

(1) 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金具有优异的室温及高温拉伸力学性能,其室温拉伸力学性能优于热轧退火 TA15 钛合金,500℃ 高温拉伸性能与热轧退火 TA15 钛合金相当;

(2) 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的室温拉伸力学性能表现出一定的各向异

表5 激光熔化沉积态及热处理态TA15钛合金的断裂韧性

材料状态	K <sub>IC</sub> / (MPa·m <sup>1/2</sup> )
激光熔化沉积态	49.4; 51.8; 49.3; 47.0; 56.1
特种热处理态	89.2; 70.5; 73.2

### 参考文献

- [1] 赵振业,赵英涛,何鲁林,等. 先进飞机结构材料的发展. 材料工程,1995,1:4-8,11.
- [2] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况. 航空科学技术,2005,4: 3-6.
- [3] 彭艳萍,曾凡昌,王俊杰,等. 国外航空钛合金的发展应用及其特点分析. 材料工程,1997,10: 3-6.
- [4] 赵永庆,魏建峰,高占军,等. 钛合金的应用和低成本制造技术. 材料导报,2003,17(4):5-7.
- [5] 王华明,张凌云,李安,等. 金属材料快速凝固激光加工与成形. 北京航空航天大学学报,2004,30(10):962-967.
- [6] 王华明,张凌云,李安,等. 先进材料与高性能零件快速凝固激光加工研究进展. 世界科技研究与发展,2004,26(3):27-31.
- [7] 王华明. 航空高性能金属结构件激光熔化沉积快速成形研究进展. 航空制造技术,2005,12: 26-28.
- [8] Flinn ED. Laser forming yields large titanium parts. Aerospace America, 1999,37(11):22-23.
- [9] Arcella FG, Abbott DH, House MA. Rapid laser forming of titanium structures. PM98:1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Granada, Spain, 1998.
- [10] 王华明,先进航空金属结构材料制备与成形制造技术研究进展,先进制造与材料应用技术,2005 (1):10-14.
- [11] 李安,张凌云,张立强,等. 高性能钛合金零件激光快速成型的研究,先进制造与材料应用技术,2004 (2):7-14.
- [12] 王华明,张凌云,李安,等. 飞机钛合金结构件激光熔化沉积快速成形技术的应用研究进展,先进制造与材料应用技术,2006 (1):9-16.

(责编 依然)