

## 激光沉积修复某型飞机垂尾梁研究

杨 光, 刘欢欢, 周佳平, 钦兰云, 王 维, 任宇航

(沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 针对某型飞机垂尾梁误加工损伤进行了激光沉积修复研究, 根据其服役时受力特点设计了力学性能试样, 对不同沉积修复试样及同批锻件基材进行室温静载拉伸对比实验, 同时对修复试样显微组织、硬度进行分析及测试。结果表明: 沉积修复区组织为细小  $\alpha/\beta$  片层组织, 无明显缺陷, 修复区与修复基体形成致密的冶金结合; 修复区至修复基体显微硬度分布呈逐步降低的趋势, 修复区显微硬度相对修复基体提高约 12%; 无论修复试样标距中心是否预制孔, 修复试样室温静载抗拉强度均高于锻件基材, 但塑性比锻件基材略低; 同时, 在优化垂尾梁修复工艺参数的基础上, 对沉积修复试样侧边塌边缺陷产生的原因进行分析并给出解决措施, 以期消除塌边缺陷提高修复质量。

**关键词:** 垂尾梁; 激光沉积修复; 显微组织; 显微硬度; 力学性能

**中图分类号:** TG174.44 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0206004

## Research on laser deposition repair aircraft vertical tail beam

Yang Guang, Liu Huanhuan, Zhou Jiaping, Qin Lanyun, Wang Wei, Ren Yuhang

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process,  
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** Researches on the laser deposition repair of aircraft vertical tail beam with mis-machined damage were investigated. According to the mechanical characteristics while its serving, the samples of mechanical properties were designed and the tensile properties at room temperature of laser deposition repaired sample and substrate sample were analyzed. Besides, microstructure characteristic, microhardness distribution were also analyzed. The results showed that there was a dense metallurgical bond between repaired zone and substrate. And the laser repaired zone experienced a continuous microstructural transition from duplex microstructure with equiaxial  $\alpha$  and lamellar  $\alpha/\beta$  in substrate to the epitaxial coarser columnar  $\beta$  with basket weave  $\alpha/\beta$  through heat-affected zone. And the repaired zone was characterized by a fine  $\alpha/\beta$  lamella microstructure without defects. Distribution of microhardness from substrate to repaired zone showed an increasing trend, and the average microhardness of repaired zone increased by 12%. Whether the tensile specimens with holes or not, laser repaired samples tensile strength

收稿日期: 2016-06-17; 修订日期: 2016-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51375316, 51305280, 51505301); 航空基金项目(2014ZE54020); 辽宁省教育厅优秀人才项目(LJQ2014020)

作者简介: 杨光(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光沉积制造/修复方面的研究。Email: yangguang@sau.edu.cn

were slightly higher than substrates, but the ductility were lower than substrate. Based on the optimized process parameters, the causes of edge collapse defect on the repaired sample were analyzed at the same time and the ideas to reduce defects were given to enhance the deposition quality.

**Key words:** vertical tail beam; laser deposition repair; microstructure; microhardness; mechanical properties

## 0 引言

随着航空制造技术的不断发展,飞机垂尾梁的结构设计逐步向整体化、复杂化发展;同时,为满足飞机承受载荷力及结构设计的要求,垂尾梁的生产制造广泛使用高强度钢、钛合金等低成本、难加工的航空合金材料<sup>[1]</sup>,因此,生产制造垂尾梁的材料成本昂贵,加工工艺复杂,生产周期较长;另外,为保证飞机飞行过程中方向上的稳定性和可操纵性,垂尾梁在服役过程中承受着巨大交变载荷的作用,材料内部容易出现裂纹等服役损伤。因此,针对垂尾梁在机加工过程中产生的误加工损伤以及因服役而产生的服役损伤进行快速修复,实现垂尾梁高质量、高效率、低成本的再制造具有重要的经济价值。

激光沉积修复(Laser Deposition Repair, LDR)技术是一种兴起于 20 世纪 80 年代的激光再制造技术<sup>[2-4]</sup>,该技术以激光熔覆和快速原形技术为基础,以金属粉末为原料,依据待修复零件缺损部位几何形状,利用高能激光热源在待修复部位直接逐层叠加成形缺损部位几何形貌,从而达到恢复待修复零件几何尺寸、优化组织和力学性能的目的<sup>[5]</sup>。与传统的修复技术相比,激光沉积修复技术具有修复层与基体冶金结合,界面结合强度高<sup>[6]</sup>,稀释率低且可控制,热影响区小,基体不易变形<sup>[7]</sup>,综合力学性能优异,后续加工处理少,便于实现柔性化制造<sup>[8-10]</sup>等优点。因此,近年来许多学者针对激光沉积修复技术进行了广泛深入的研究<sup>[11-16]</sup>,提高和改善了待修复零件的修复质量。其中,Boris Rottwinkel<sup>[17]</sup>等采用多层激光熔覆技术对航空发动机单晶涡轮叶片上的裂痕损伤进行修复研究,并在修复区施加感应预热减小温度梯度的方法引导晶粒生长取向;J. Michael Wilson<sup>[18]</sup>等采用激光直接沉积的方法对损伤涡轮叶片进行修复研究,提出了一种重建待修复零件修复区域的方法并对其生命周期进行评估;王

小艳等<sup>[19]</sup>对 7050 铝合金预拉伸板进行激光沉积修复实验研究,优化了激光沉积修复工艺参数,并对修复区组织形成与分布规律、冶金缺陷产生原因及消除措施进行了深入的分析。宫新勇等<sup>[20]</sup>对 TC11 钛合金激光沉积修复工艺及界面的组织与力学性能进行了研究,并通过逐点熔化沉积的方法对叶轮受损叶片进行了修复;任会芳等<sup>[21]</sup>对因裂纹而导致失效的曲轴进行了激光沉积修复,并对修复后零件的温度场、应力场、熔覆层的残余应力进行了仿真分析,进一步确定了基体的最佳熔覆材料。

文中采用激光沉积修复的方法对某型飞机垂尾梁误加工损伤进行了修复研究。通过与修复基体性能比较,对修复试样的显微组织及硬度、室温静载拉伸性能及断口形貌进行了考察;同时,针对垂尾梁结构特点对修复工艺参数进行优化,并对沉积修复试样侧边塌边缺陷产生的原因给出了优化措施,以期减少或者消除缺陷,以提高修复件综合性能。

## 1 实验

### 1.1 实验材料与设备

垂尾梁激光沉积修复实验是在沈阳航空航天大学国防重点学科实验室 LDM-3000 型多功能激光加工系统上完成的,该系统主要由 LDF 6 kW 半导体激光器及光路传输系统,运动控制系统,转盘式高精度粉料输送系统,净化除尘与惰性气体循环系统组成。修复垂尾梁基体及用于组织与性能对比的试样基体均为锻造退火态 BT20 钛合金;熔覆粉末采用 BT20 钛合金球形粉末,粒度分布为 44~149  $\mu\text{m}$  (-100~+325 目),粉末质量分数见表 1,粉未经 120℃真空烘干处理干燥备用。实验选用的沉积修复工艺参数为:激光功率  $P=1\ 300\sim 1\ 800\ \text{W}$ ,焦距  $f=300\ \text{mm}$ ,扫描速度  $V=5\sim 7\ \text{mm/s}$ ,送粉速度 5~12 g/min,搭接率 35%~50%,扫描间距为 2 mm,Z 向单向行程为 1 mm,工艺参数经多次实验进行优化。为检验垂尾梁沉积修复部位内部修复质量、组织、力学等

各项综合性能,在相同工艺参数下,对沉积修复试样进行性能检测;采用 PVA SAM300 型超声扫描显微镜对修复试样内部修复质量进行检测;采用 OLYMPUS-DP71 型光学显微镜和 JSM-7001 F 型场发射扫描电镜对试样进行组织分析;采用 MVK-300

型显微硬度计对试样进行硬度测量,载荷设定为 100 g,加载时间 20 s;采用 DDL300 型电子万能试验机分别对修复试样和基体进行室温静载拉伸测试,并对断口形貌进行分析。

表 1 BT20 钛合金粉末的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of BT20 titanium alloy powder

Al	Mo	V	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.53%	1.53%	1.47%	1.78%	0.13%	0.033%	0.012%	0.014%	0.005%	0.11%	Balance

### 1.2 实验方案与方法

垂尾梁总长约 3 500 mm,待修复区宽度约 140 mm,待修复部位损伤形貌如图 1 所示。为检测待修复区域潜在缺陷的分布范围,修复前需对修复区域进行 X 射线无损探伤检测;根据损伤区潜在缺陷的分布特点对待修复部位进行规则化处理,即采用机械的方法去除垂尾梁表面裂纹及潜在损伤区,预制梯形修复槽的几何形状如图 2 所示;其次,根据预制梯形修复槽的尺寸与形状,利用计算机构建待修复部位三维几何模型并进行分层切片及扫描路径规划,如图 3 所示。

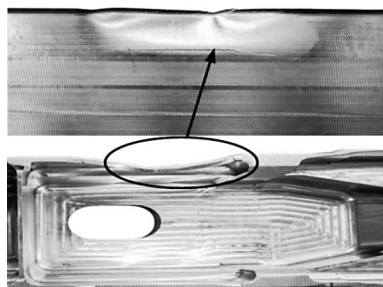


图 1 垂尾梁损伤部位

Fig.1 Damaged position of the vertical tail beam



图 2 损伤部位规则化处理

Fig.2 Regularization processing of damaged position

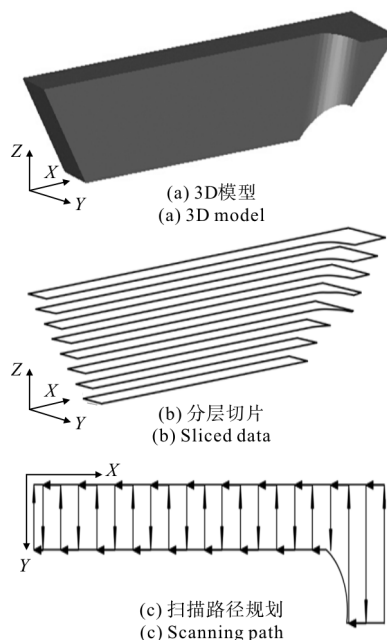


图 3 损伤部分 3D 模型、分层切片及扫描路径规划

Fig.3 3D model and sliced data of damaged part and scanning path

## 2 结果与讨论

### 2.1 激光沉积修复边侧塌边缺陷及修复工艺的优化

飞机垂尾梁属于一种高附加值大型薄壁类结构零件,在对其进行激光沉积修复时应避免修复区域产生气孔、熔合不良及裂纹等质量缺陷<sup>[2]</sup>,同时应保证沉积修复区域宏观尺寸精度以满足后续加工要求。通过大量的实验发现,当工艺参数选择合理,沉积修复件内部质量缺陷是可以减少甚至避免,但是由于激光沉积修复技术本身的工艺特点,在对修复件宏观尺寸精度的控制上存在一定难度,如随着修复层数的增加,修复层两侧边缘逐渐出现塌边、变形

现象,进而导致沉积修复无法继续,如图 4 所示。

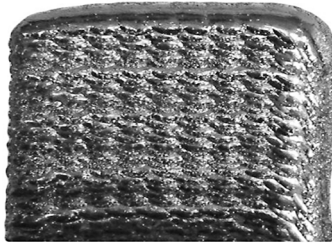


图 4 激光沉积修复试样侧塌边缺陷

Fig.4 Edge collapse defect of LDR sample

分析上述塌边现象产生的原因主要是因为沉积修复时高能激光束、粉末、基材相互作用形成的熔池受到如图 5 所示四个力的作用,即熔池的重力( $G$ ),载气送粉的气固两相流的影响力( $M$ ),表面张力( $N$ )和支撑力( $Z$ )。其中,表面张力阻止熔池熔体在其它外力影响下的流动,其大小取决于材料本身性质及熔池温度。熔池在这四个力相互作用下与水平面形成一定的倾斜角  $\theta$ <sup>[23]</sup>。当激光束完成第  $M$  层的最后一道扫描时,第  $M+1$  层第一道也随之在同一侧进行扫描,导致每一层第一道处的热量累积比其它区域温度要高,使熔池的表面张力减小,熔体的流动性增加,凝固层变薄造成塌边现象。与此同时,当塌边出现时,在  $Z$  向分层厚度不变的情况下,塌边区域实际沉积高度与理论沉积高度会产生一定的高度差  $\Delta h$ ,如图 6 所示。当激光束扫描至塌边区域时,激光束离焦量变大,光斑直径变大,激光束能量密度降低,进而导致激光束捕获粉末的能力下降,使熔覆层高逐渐降低,如果不进行适当的调整,侧边塌边现象会进一步加剧。因此对垂尾梁待修复区域沉积修复时,沉积路径采用短边往复并逐层更换激光起光点位置方式进行修复;同时对修复层红热区域吹冷却气体以降低修复层热量累积效应,减小塌边现象的发生。在优化垂尾梁修复工艺参数的基础上,对待修复垂尾梁进行激光沉积修复,沉积修复后垂尾梁形貌如图 7 所示,从图中可以看出修复表面平整,道间间距相当且分界不明显;通过超声扫描显微镜检测沉积修复试样显示,内部无明显气孔、熔合不良等缺陷。由于垂尾梁表面存在一定尺寸配合要求,因此需要对修复后的垂尾梁进一步机械加工处理,经机械加工后的修复区域如图 8 箭头所示;最后,为减小沉积修复时修复件内产生的应力,对垂尾梁做进

一步的去应力退火处理,热处理制度选择为:不完全退火,625 °C保温 2 h,炉冷至室温。

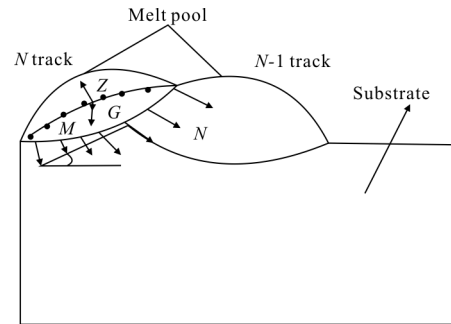


图 5 试样边侧熔池倾斜示意图

Fig.5 Sketch of tilting melt pool on the edge of sample

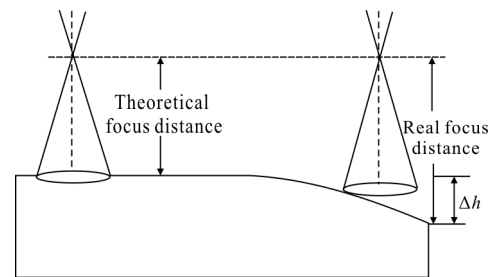


图 6 离焦量对成形高度的影响

Fig.6 Effect of defocus distance on height difference

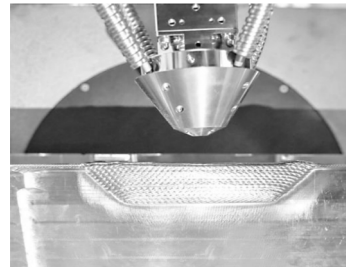


图 7 激光沉积修复垂尾梁形貌

Fig.7 Photo of LDR vertical tail beam

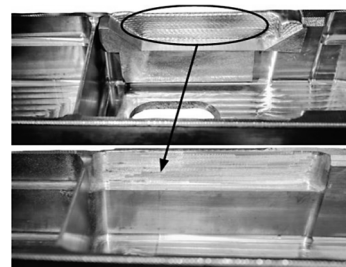


图 8 机械加工后修复件照片

Fig.8 Photo of machined LDR part

## 2.2 显微组织分析

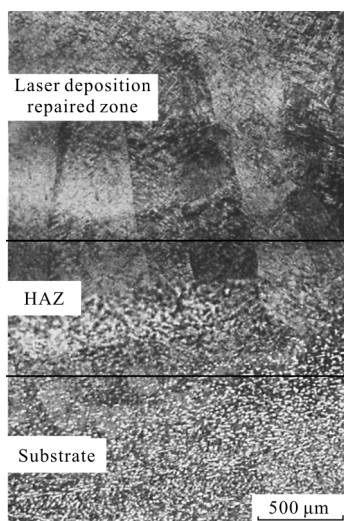
图 9 为激光沉积修复后垂尾梁试样显微组织形态。从图 9(a)可以看出,激光沉积修复试样组织形貌

呈由基材区经热影响区再向修复区连续变化的特点,各区域间形成致密的冶金结合,保证了沉积修复区与基材的结合强度。修复区组织形态呈现为粗大的沿着沉积方向外延生长的原始  $\beta$  柱状晶,柱状晶间呈现较为明显的明暗分界现象,晶内分布着片层取向随机生长编织细密的  $\alpha/\beta$  网篮组织,如图 9(b)所示;基材区组织形态呈现为典型的片层状  $\alpha/\beta$  相等轴状初生  $\alpha$  相组成的双态组织,如图 9(c)所示;热影响区位于基材区与修复区之间,随着热影响区

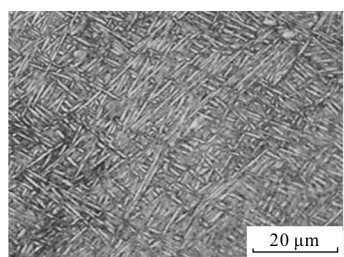
组织逐渐远离基材区,等轴状初生  $\alpha$  相体积分数逐渐减小,靠近修复区,等轴  $\alpha$  相呈现部分溶解状态,其外围边界具有羽毛状(或梳齿状)特征,这是因为在短时高温状态下,等轴  $\alpha$  相从自身边界开始向球心内部发生相变,转变成  $\beta$  相,但因高温状态持续时间短,合金元素原子来不及有效扩散,迅速冷却后,刚刚转变成  $\beta$  相的部分又转变成  $\alpha$  相,但  $\alpha$  相与  $\beta$  相存在严格的布拉格点阵对应关系,再次形成的  $\alpha$  相不再是等轴状析出,而是呈片层状析出,因此瞬时高温中未全部转变的等轴  $\alpha$  相在再次冷却后,其边缘呈现出羽毛状,直至沉积修复区等轴状初生  $\alpha$  相逐渐完全消失。

### 2.3 显微硬度分析

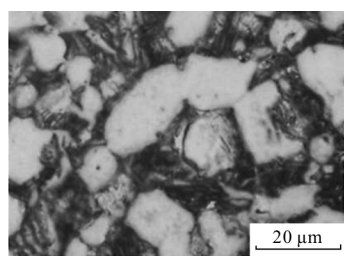
图 10 为垂尾梁沉积修复试样显微硬度测试曲线,测试方向沿着修复区→热影响区→基材区方向进行取点。从图中可知,修复区显微硬度值最大,平均硬度分布在 363 HV<sub>0.1</sub> 左右,这与修复区  $\beta$  柱状晶晶内较为发达板条状  $\alpha/\beta$  网篮组织有关;基材区显微平均硬度分布在 320 HV<sub>0.1</sub> 左右,较修复区硬度降低约 12%。修复区与基材区之间较为狭窄的区域为热影响区,其硬度逐渐下降,平均硬度约为 340 HV<sub>0.1</sub>,较基材区硬度有所提高,但幅度较小。



(a) 宏观形貌  
(a) Macro-structure



(b) 修复区  
(b) Repaired zone



(c) 基材  
(c) Substrate

图 9 激光沉积修复试样的显微组织  
Fig.9 Microstructure of LDR sample

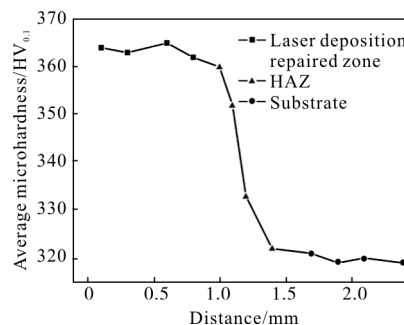


图 10 修复试样显微硬度曲线

Fig.10 Microhardness curve of LDR sample

### 2.4 拉伸性能分析

由于垂尾梁装配常见以铆接的方式进行连接,在综合考虑垂尾梁服役过程受力特点及铆钉孔对力学性能影响的前提下,对不同沉积修复试样及同批锻件基材进行室温静载拉伸实验,拉伸试样尺寸形貌如图 11 所示。其中,锻件基材拉伸试样如图 11(a)、(b)所示;修复试样拉伸试样如图 11(c)、(d)所示,面修复区占厚度方向的 50%;同时,为模拟铆钉孔对拉伸性能的影响,在拉伸试样标距中心位置预制直径

为 6 mm 的通孔,如图 11(b)、(d)所示,以检测修复试样的综合室温静载拉伸性能。试样的拉伸方向与柱状晶生长方向保持垂直,即柱状晶在宽度方向上受力,图 11 所示各拉伸试样对应断后形貌如图 12 所示,箭头所示之处为试样断口位置。

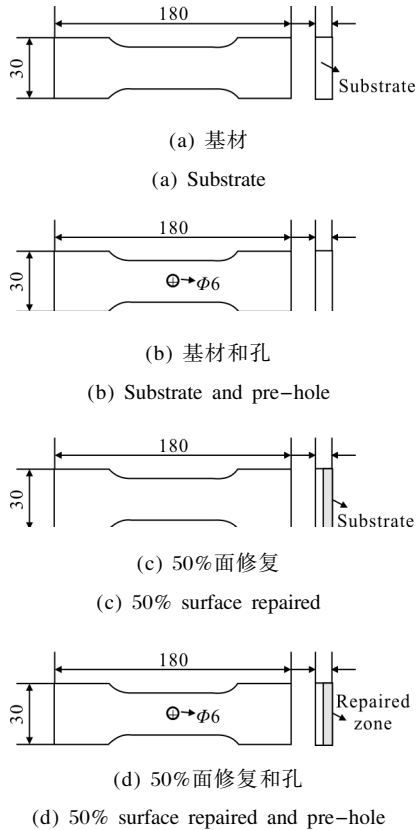
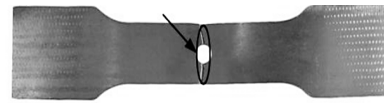
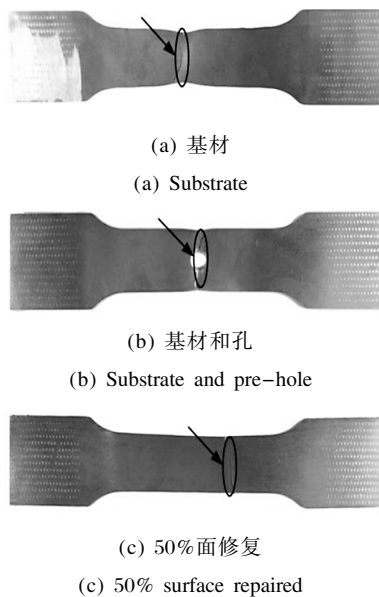


图 11 拉伸试样尺寸及形式(单位: mm)

Fig.11 Shape and size of tensile sample(Unit: mm)



(d) 50%面修复和孔

(d) 50% surface repaired and pre-hole

图 12 拉伸试样断后照片

Fig.12 Photos of the tensile sample after fracture

表 2 为激光沉积修复试样与锻件基材试样室温静载拉伸性能对比。从表 2 中可知,无论拉伸试样标距中心是否预制孔,修复试样的平均综合室温静载拉伸强度均高于工业锻件国家标准下限值;室温下拉伸试样标距中心无预制孔修复试样平均抗拉强度约为 1 048.1 MPa,较基材无预制孔拉伸试样平均抗拉强度高约 6%左右,但是其塑性略低于基材;同时,在修复试样中心预制孔的情况下,修复试样平均室温静载抗拉强度高于基材约 3%左右。这说明无论修复试样是否预制孔,其综合抗拉强度均高于修复件基材,可以满足垂尾梁服役要求。分析原因主要是与修复试样的组织分布特点有着密切的联系,因为修复层组织具有明显晶界特征的初生  $\beta$  柱状晶组成,当拉伸试样在柱状晶宽度方向承受载荷时,由于

表 2 激光沉积修复试样与基材室温静载拉伸性能对比

Tab.2 Comparison of tensile properties between LDR samples and substrate at room temperature

Type	No.	Tensile strength $\sigma_b$ /MPa	Maximum load/kN	Elongation $\delta$	Pre-hole size/mm
Substrate (No.1-6)	1	983.6	80.574	16.7%	0
	2	987.9	80.057	15.2%	0
	3	995.1	80.327	15.3%	0
	4	1 067.4	60.672	-	6
	5	1 059.5	60.727	-	6
	6	1 066.0	60.804	-	6
LDR sample (No.7-12)	7	1 078.8	87.080	9.2%	0
	8	1 018.3	81.465	7.6%	0
	9	1 047.1	85.863	9.1%	0
	10	1 071.6	63.128	-	6
	11	1 118.1	63.995	-	6
	12	1 085.6	61.052	-	6
TB/T 3621-2007	930-1130	-	-	8%-10%	-

晶界两侧的晶粒取向不同, 滑移要从一个晶粒直接延续到下一个晶粒是很困难的, 即室温下晶界对滑移有阻碍作用<sup>[20]</sup>, 使得修复试样的综合强度高于锻件基材, 而塑性低于锻件基材。同时, 也证明了修复区与基材之间形成了良好的冶金结合, 能够恢复修复件的整体力学性能并满足实际使用要求。

图 13 为室温静载拉伸实验面修复试样断口 SEM 照片。从图中 13(a) 可见, 基材断口密集分布着典型的等轴状韧窝特征, 韧窝小且浅, 表现为韧性断裂, 这主要是因为基材组织形态由片层状  $\alpha/\beta$  相和均匀分布在片层间的等轴状初生  $\alpha$  相组成; 在拉伸过程中, 等轴状初生  $\alpha$  相对拉伸件塑性变形起到了一定的变形协调的作用, 使基材韧性较好。图 13(b) 为修复区断口形貌, 其断口呈现撕裂棱特征, 韧性稍差, 该区域断口形貌呈现的特点与其内部大尺寸的片层组织密切相关; 在断口形貌上, 修复区不但具有大的  $\alpha$  片层的形貌轮廓, 而且在大的断面内部还可以看到相对细小的  $\alpha$  片层的撕裂形貌。综合上述因素修复件综合力学性能呈现强度高于锻件基材而塑性略微降低的特征, 这与表 2 室温静载拉伸性能测试结果相符合。

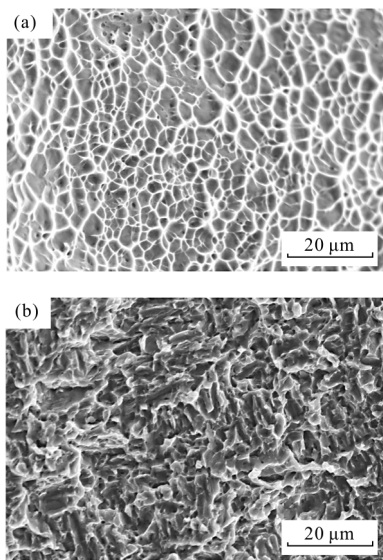


图 13 面修复拉伸试样断口形貌

Fig.13 Fractography of surface repaired tensile sample

### 3 结论

通过垂尾梁激光沉积修复实验以及对修复试样

尺寸缺陷优化、显微组织、硬度及力学性能的分析, 可以得到以下结论:

(1) 由于垂尾梁沉积修复时熔池综合受力及离焦量动态变化的影响, 使得沉积修复出现侧边塌边现象; 通过更换层间起光点位置、降低修复层热量累积等措施可减小或避免缺陷的发生。

(2) 垂尾梁修复区组织为粗大的原始  $\beta$  柱状晶, 晶内分布着片层取向随机生长的细密  $\alpha/\beta$  网篮组织; 经检测修复层没有明显的气孔、裂纹、熔合不良等缺陷, 修复层与修复基体形成致密的冶金结合。

(3) 垂尾梁沉积修复区域显微硬度从修复区至基材区呈现逐渐降低的趋势; 沉积修复区平均硬度分布在 360HV<sub>0.1</sub> 左右之间, 相对修复基材区提高约 12%。

(4) 无论修复试样标距中心是否预制孔, 其综合抗拉强度均高于锻件基材, 满足垂尾梁服役要求; 而修复试样基材侧断口形貌密集分布着等轴状韧窝特征, 韧窝小且浅, 韧性较好; 修复区断口呈现撕裂棱特征, 韧性稍差。

### 参考文献:

- [1] Wang Xiangming, Liu Wenting. Design and Application of Aircraft Structure of Titanium Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 14. (in Chinese)  
王向明, 刘文廷. 飞机钛合金结构设计与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 14.
- [2] Qin Lanyun, Wang Wei, Yang Guang, et al. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0103001. (in Chinese)  
钦兰云, 王维, 杨光, 等. 超声辅助钛合金激光沉积成形实验研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103001.
- [3] Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. *Mechanical Building and Automation*, 2013, 42(4): 1-4. (in Chinese)  
卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
- [4] Qian Yuanhong, Tan Hua, Li Jing, et al. Microstructure characterization of laser solid forming Ti-6Al-4V alloy by high power [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(9): 2162-2166. (in Chinese)  
钱远宏, 谭华, 李静, 等. 高功率激光立体成形 Ti-6Al-4V 合金组织研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(9):

- 2162–2166.
- [5] Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, et al. Laser forming repair of titanium alloy parts [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 35(8): 55–58. (in Chinese)  
林鑫, 薛雷, 陈静, 等. 钛合金零件的激光成形修复[J]. 航空制造技术, 2010, 35(8): 55–58.
- [6] Gao Xuesong, Huang Yinhui, Tian Zongjun, et al. Erosive wear resistance behavior of laser cladding  $\text{Al}_2\text{O}_3+13\% \text{TiO}_2$  coating prepared by plasma spraying on titanium alloy surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 858–862. (in Chinese)  
高雪松, 黄因慧, 田宗军, 等. 钛合金表面激光熔覆等离子体喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3+13\% \text{TiO}_2$  涂层冲蚀磨损性能[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 858–862.
- [7] Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming, et al. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0203002. (in Chinese)  
冯淑容, 张述泉, 王华明, 等. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性 [J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203002.
- [8] Li Huaixue, Gong Shuili, Sun Fan, et al. Development and application of laser additive manufacturing for metal component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 37(2): 25–31. (in Chinese)  
李怀学, 巩水利, 孙凡, 等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. 航空制造技术, 2012, 37(2): 25–31.
- [9] Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming, et al. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3204–3209. (in Chinese)  
王华明, 张述泉, 王向明, 等. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. 中国激光, 2010, 36(12): 3204–3209.
- [10] Wang Huaming. Materials fundamental Issues of laser additive manufacturing for high –performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*, 2014, 35(10): 2690–2698. (in Chinese)  
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.
- [11] Zhang Wei, Yao Jianhua, Dong Chenhui, et al. Repairing and strengthening of eroded turbine blades by laser technology[J]. *Journal of Power Engineering*, 2008, 28(6): 967–971. (in Chinese)  
张伟, 姚建华, 董辰辉, 等. 汽轮机叶片冲蚀区的激光修复与强化[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 967–971.
- [12] Dong Shiyun, Zhang Xiaodong, Xu Binshi, et al. Laser cladding remanufacturing of 45 steel cam shaft worn cam[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2011, 25(2): 85–88. (in Chinese)  
董世运, 张晓东, 徐滨士, 等. 45 钢凸轮轴磨损凸轮的激光熔覆再制造[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(2): 85–88.
- [13] Xu Songhua, Xiao Yang, Li Jian, et al. Organization property researches of the laser repair technology in the helicopter engine turbine oriented implement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2311–2316. (in Chinese)  
徐松华, 肖阳, 李健, 等. 直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2311–2316.
- [14] Söm Ocylok, Eugen Alexeev, Stefan Mann, et al. Correlation of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 228–238.
- [15] Suárez A, Amado J M, Tobar M C, et al. Study of residual stresses generated inside laser clad plates using FEM and diffraction of synchrotron radiation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204: 1983–1988.
- [16] Arisa Farahmand, Radovan Kovacevic. An experimental – numerical investigation of heat distribution and stress field in single – and multi –track laser cladding by a high –power direct diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 154–168.
- [17] Boris Rottwinkel, Christian Nölke, Stefan Kaierle, et al. Crack repair of single crystal turbine blades using laser cladding technology[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 22: 263–267.
- [18] J Michael Wilson, Cecil Piya, Yung C Shin, et al. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environment impact analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 80: 170–178.
- [19] Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin, et al. Microstructure of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AISi12 powder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1585–1590. (in Chinese)  
王小艳, 陈静, 林鑫, 等. AISi12 粉激光成形修复 7050 铝合金组织[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1585–1590.
- [20] Gong Xinyong, Liu Mingkun, Li Yan, et al. Research on repair of TC11 titanium alloy components by laser melting deposition process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0203005. (in Chinese)  
宫新勇, 刘铭坤, 李岩, 等. TC11 钛合金零件的激光熔化沉积修复研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203005.



- [21] Ren Huifang, Ren Jialong, Wang Qingxian. Simulation analysis on the laser cladding repair material selection of diesel engine crankshaft crack[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology*, 2013, 28(3): 69–72. (in Chinese)  
任会芳, 任家隆, 王青仙. 柴油机曲轴裂纹激光熔覆修复材料选择的仿真研究[J]. 徐州工程学院学报, 2013, 28(3): 69–72.
- [22] Nickel A H, Barnett D M, Prinz F B. Thermal stress and deposition patterns in layered manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 317: 59–64.
- [23] He Bin, Li Dichen, Zhang Anfeng, et al. Influence of scanning pattern on the edge collapse of solid parts in laser metal direct forming [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 171–177.