

过渡层数对激光沉积制造 TC4/TC11 连接界面的组织及性能的影响

何 波¹, 刘 杰¹, 杨 光²

(1. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 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: 通过激光沉积制造技术制备了不同过渡层数的 TC4/TC11 双合金试样, 研究不同过渡层数和不同热处理制度对 TC4/TC11 双合金连接界面的显微组织、拉伸性能和显微硬度的影响。结果表明, 过渡层数对组织的形貌影响较大, 过渡层数的增加, 减少了 TC4/TC11 双合金试样连接界面的差异, 使显微硬度分布均匀; 沉积态 TC4/TC11 双合金过渡处网篮组织差异大, 去应力退火后的组织均匀, 经固溶时效处理后组织粗大且差异明显; 对去应力退火后的试样进行了室温拉伸, 随着过渡层数的增多, TC4/TC11 双合金试样抗拉强度升高, 塑性增强, 断口均断在 TC4 钛合金一侧, 证明了 TC4/TC11 双合金过渡界面性能良好。

关键词: 激光沉积制造; 钛合金; 显微组织; 性能; 梯度材料

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)03-0910-06

激光沉积制造 (Laser Deposition Manufacturing, LDM) 技术是近年来新兴的先进制造技术^[1]。该技术采用高能激光对金属粉末进行烧结, 具有加工精度高、制造速度快、利用率高等一系列优点, 成为许多加工和应用领域众所瞩目的重要技术。目前, 该技术在航空航天大型构件的制造和研究中广泛应用^[2]。

钛合金具有比强度高、热强性好、耐腐蚀、密度低、热导率低、可焊接性好、生物相容性好等特点, 是一种轻质高强度耐蚀结构材料, 在武器装备中具有广泛的应用前景, 并已广泛应用到航空航天、航海、汽车、医疗器械和运动器材等新兴领域^[3]。Ti-6Al-4V (TC4) 钛合金的使用温度范围较宽 (-196 ~ 400 °C), 合金组织和性能比较稳定, 合金化简单。Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.25Si (中国牌号: TC11, 俄罗斯牌号: BT9)^[4] 钛合金是我国开发的可在 500 °C 以下长期使用的高温型钛合金。

随着航空发动机压气机叶盘全钛化及飞机结构整体化的应用与发展, 对双性能钛合金梯度复合结构提出了明确的需求^[5]。梯度复合结构是根据零件不同部位的不同使用环境和性能需要而设计的由 2 种或 2 种以上材料组成的一种新型整体性结构^[6,7], 可以充分发挥不同材料的性能优势, 减少零件数量及零件间的装配连接, 提高结构效率, 并起到有效减重的作用, 具

有重要的发展前景。而 LDM 技术在梯度复合结构的成形方面具有显著技术优势^[8,9], Lin 等^[10,11] 利用该技术制备了 SS316L-Rene88DT、Ti6Al4V-Rene88DT 等梯度材料, 并研究了梯度材料中组织的变化规律。Qian 等^[12] 利用 LDM 技术制备了 TA2/TA15 双钛合金。研究发现, 随着距离 TA2 部分距离的增加, 显微组织从魏氏 α 片层向网篮 α 片层逐渐变化。刘莹莹等^[13] 利用 LDM 技术制造了 Ti3Al/TC11 双合金, 研究了不同过渡区层数即不同成分梯度时 Ti3Al/TC11 连接界面的显微组织、拉伸性能及显微硬度。

针对飞机整体结构不同部位的不同性能要求, 本研究将用激光沉积制造技术制备 TC4/TC11 双合金梯度复合结构, 并对过渡界面进行了不同的热处理, 观察过渡界面的显微组织和力学性能, 为进一步完善激光沉积制造技术制备 TC4/TC11 双合金梯度复合结构奠定理论基础。

1 实 验

TC4 和 TC11 钛合金粉末粒度均为 60~160 μm 。TC4 和 TC11 钛合金材料的化学成分列于表 1。实验前, 将所有粉末进行真空烘干, 温度 100 °C, 时间 2 h, 以除去可能吸附在粉末表面的水分, 成形基材为 100 mm×60 mm×30 mm 的锻造 TC4 厚板件, 成形前基材表面用砂

收稿日期: 2018-03-10

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (201302411)

作者简介: 何 波, 女, 1978 年生, 博士, 副教授, 沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-89728683, E-mail: hebo1978@163.com

纸打磨后并用丙酮清洗干净,减少表面杂质对沉积过程造成影响。TC4/TC11 双合金激光沉积制造实验由激光沉积制造系统完成,该系统包括:半导体激光器、载气式送粉器、四路同轴送粉头、冷水机、惰性气氛保护箱、氧分析仪等。激光沉积工艺参数为:功率 1.8~2 kW,扫描速度为 10 mm/s,光斑直径 3 mm,搭接率 50%,整个实验过程在氩惰性气体氛围下进行。

本实验采用单道多层的激光沉积制造技术,实验时沿高度方向先沉积 TC4 钛合金粉末,接着分别沉积 0、1、3 层的过渡区(每层 3 mm 厚),最后再接着沉积 TC11 钛合金粉末。其中过渡区每层组分(质量分数,%)均由 TC4:TC11=100:0 连续变化至 0:100,1 层和 3 层过渡区成分组成如表 2、表 3 所示。为了研究过渡层数对试样拉伸性能的影响,对每种过渡层制备 3 个试样,尺寸为 40 mm×20 mm×71 mm。3 组 9 个试样的 TC4 侧、过渡区和 TC11 侧的高度分别为 35.5 mm/34 mm/31 mm、0 mm/3 mm/9 mm、35.5 mm/34 mm/31 mm。对成形后 TC4/TC11 双合金进行不同热处理,利用人工智能箱式电阻炉,型号为 SGMVB10/12G,热处理制度如表 4 所示。采用 GX51 OLYMPUS 光学显微镜对不同热处理下的成形件的显微组织进行观察,其中腐蚀剂的体积为: $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:100$ 。利用 INSTRON5982 电子万能试验机对去应力处理的试件进行室温拉伸,拉伸试件取样位置如图

1 所示。随后采用 ZEISS-SIGMA 扫描电子显微镜对拉伸断口形貌进行观察。使用 HVS-1000A 型显微硬度计对不同试样的显微硬度进行测试,加载载荷为 200 g,持续时间为 10 s,硬度值取 3 次的平均值。测试点从 TC4 一侧穿过过渡区到 TC11 一侧,测试点间隔为 100 μm ,其中每个试样的 TC4 一侧开始位置记为 0,以便比较不同位置试样的显微硬度。

2 结果与分析

2.1 组织分析

图 2~图 4 是不同热处理的过渡区分别为 0、1 和 3 层的 TC4/TC11 双合金连接界面的显微组织。可以发现,过渡区均为网篮组织,而且随着层数的增加,过渡界面差异逐渐减弱。

图 2a、2b、2c 分别为过渡层数是 0、1 和 3 时试样过渡界面的沉积态显微组织。其中在图 2a 和图 2b 中可以看出 TC4 侧组织形貌差异大,虽然 TC4 侧组织也为网篮组织,但是 α 相粗大,与过渡区连接的界面处组织变化比较明显;过渡区组织形貌比较相似,主要是短小的 α 相;而在 TC11 侧与过渡区界面,组织形貌差异不大,均由细小的 α 相组成,这与 2 种材料的化学成分含量有关。由于 TC4 钛合金中 Al 含量高于 TC11 钛合金,Al 是 α 相的稳定元素。因此,激光沉积制造 TC4 钛合金中 α 相的尺寸大于 TC11 钛合金。

表 1 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 and TC11 alloys (wt%)										
Alloy	Al	V	Mo	Zr	Si	C	O	N	H	Ti
TC4	5.65	4.02	-	-	-	0.062	0.15	0.015	0.012	Bal.
TC11	5.48	-	3.54	1.57	0.32	0.024	0.02	0.012	0.010	Bal.

表 2 具有 1 层过渡层试样各过渡层的成分组成

Table 2 Percentage composition of each layer (1 layer) (wt%)		
Layer number	TC4	TC11
1	50	50

表 3 具有 3 层过渡层试样各过渡层的成分组成

Table 3 Percentage composition of each layer (3 layers) (wt%)		
Layer number	TC4	TC11
1	75	25
2	50	50
3	25	75

表 4 热处理制度

Table 4 Heat treatment process		
No	Forming technique and status	Heat treatment parameters
1#	Laser deposition manufacturing	AC
2#	Stress relief annealing	550 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$, AC
3#	Solution-aging treatment	930 $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$, AC+550 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$, AC

综合以上分析可以发现,过渡区层数对连接界面显微组织影响较大,3 层过渡区的显微组织更为均匀,连接界面完整性较好;经过不同热处理后的显微组织中,去应力退火后的组织比另外 2 种热处理后的组织更加均匀,所以仅对去应力退火后的组织进行了室温拉伸试验。

图 3a、3b、3c 分别为过渡层数是 0、1 和 3 时

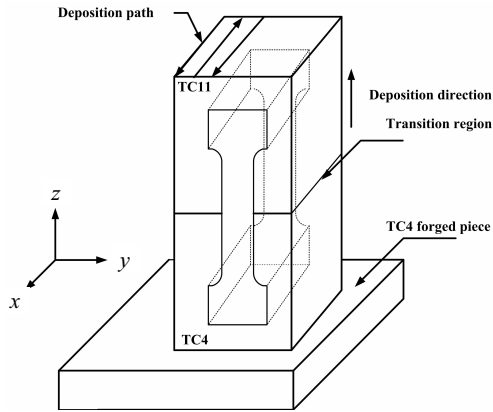


图 1 拉伸试样取样图

Fig.1 Schematic diagram of tensile sample sampling

试样过渡界面去应力退火后的显微组织。经过去应力退火后，图 3 的组织比图 2 组织略有增大，长宽比增大，组织分布均匀，过渡界面较沉积态组织界面区别明显减弱。通过观察比较图 3a、3b 和 3c 可以发现，经去应力退火后的图 3c 组织最为均匀且分辨不出分界面。

图 4a、4b、4c 分别为过渡层数是 0、1 和 3 时试样过渡界面固溶时效后的显微组织。固溶时效温度高，空冷时间较长，组织长大粗化明显。比较图 4 与图 3

发现，经去应力退火后的组织比固溶时效后的组织均匀，且过渡区分界不明显。通过图 4a 可明显看出 TC4/TC11 双合金过渡处分界明显，尤其是 TC4 钛合金一侧组织粗大。TC11 钛合金一侧 α 相明显比 TC4 一侧组织细长，并且可以发现 TC4 钛合金一侧的组织与过渡面呈平行，TC11 钛合金一侧的组织与过渡界面呈垂直，这种现象是由于 2 种合金化学元素的不同，元素之间相互影响造成的。

2.2 拉伸性能分析

表 5 是激光沉积制造 TC4/TC11 双合金试样去应力退火处理后的室温拉伸性能。在室温拉伸时，过渡区为 3 层的试样其断面收缩率为 33.17%，与 0 层的 15.37% 相比增大明显，TC4/TC11 双合金过渡处的塑性随着过渡层数的增加而增加；抗拉强度的增加值和增加幅度分别为 51.417 MPa 和 5.6%。不同过渡层试样的抗拉强度值都大

表 5 去应力退火后试样的室温拉伸性能

Table 5 Tensile properties of samples by stress relief annealing at room temperature

Number of layers	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	ψ /%
0	913.900	867.496	15.37
1	938.630	895.62	27.13
3	965.317	846.33	33.17

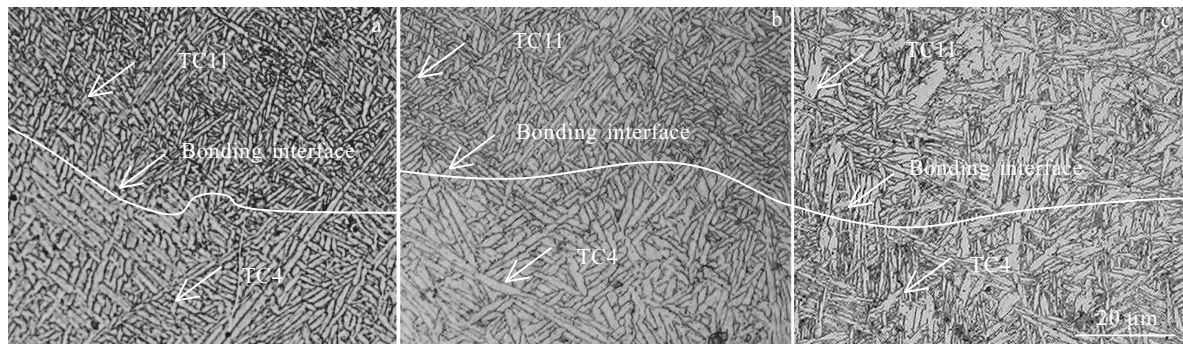


图 2 激光沉积制造沉积态 TC4/TC11 双合金试样显微组织

Fig.2 Laser deposited microstructures of TC4/TC11 samples: (a) 0 layer, (b) 1 layer, and (c) 3 layers

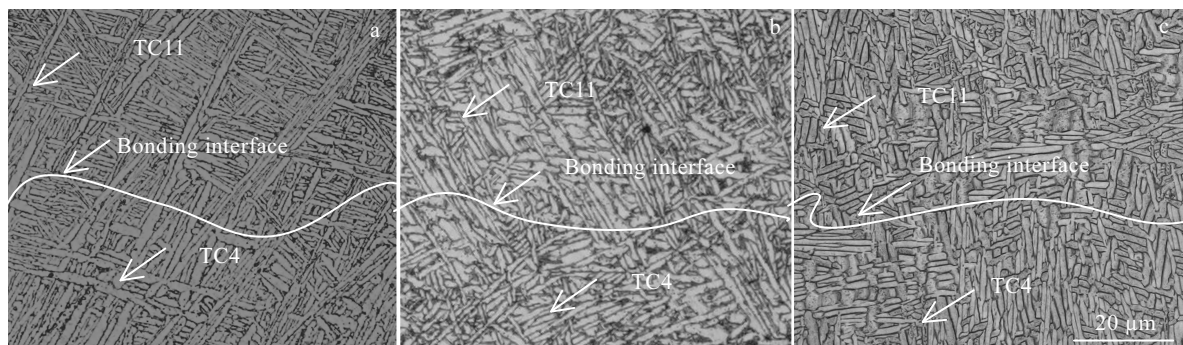


图 3 激光沉积制造去应力退火后 TC4/TC11 双合金试样的显微组织

Fig.3 Laser deposited microstructures of TC4/TC11 samples by stress relief annealing: (a) 0 layer, (b) 1 layers, and (c) 3 layers

于或接近 TC4 钛合金抗拉强度, 这与 TC4/TC11 双合金过渡处拉伸断口断在 TC4 一侧现象基本符合。

图 5 是钛合金去应力退火后的室温拉伸断口形貌。从图 5 可以看出, 不同过渡层的试样断口均由纤维区和剪切唇区组成, 断口附近均出现明显的颈缩, 而且明显看出有很大很深的韧窝, 为典型的韧性断裂。TC4/TC11 双合金试样断在 TC4 钛合金一侧, TC4/TC11 双合金过渡处试件在室温拉伸时的性能与 TC4 钛合金性能接近, 说明过渡处不是试样薄弱部位。

由图 5a₂、5b₂、5c₂ 可以看出, 过渡层越多的试样断口韧窝大且深。去应力退火处理后的过渡区为 3 层的试样断口明显看出韧窝较大较深, 大韧窝壁上分布有小韧窝, 而过渡区为 0 层和过渡区为 1 层的双合金韧窝相对小而浅, 但是过渡区为 1 层较过渡区为 0 层

双合金的韧窝大而深, 这也说明了塑性按照 0 层、1 层、3 层依次升高, 这与所得力学性能测试结果相符。图 6 为不同过渡层试样去应力退火的应力-应变曲线。

2.3 硬度分析

图 7 是不同热处理状态下的具有不同过渡层数的 TC4/TC11 双合金连接界面的显微硬度曲线。为了方便比较不同热处理和不同过渡层的硬度, 把曲线分为 3 部分: 左侧区域为沉积态、中间为去应力、右侧为固溶时效。可以看出, 不同过渡层的硬度从沉积态到去应力最后到固溶时效状态依次增大, 这是因为组织越粗大, 硬度值越大, 其中固溶时效处理后的显微硬度增大明显; 不同热处理状态下的硬度值, 随着过渡层数的增加, 变化趋于稳定, 分布趋于均匀, 其中过渡层数为 3 层的显微硬度的波动最小, 分布最为均匀。

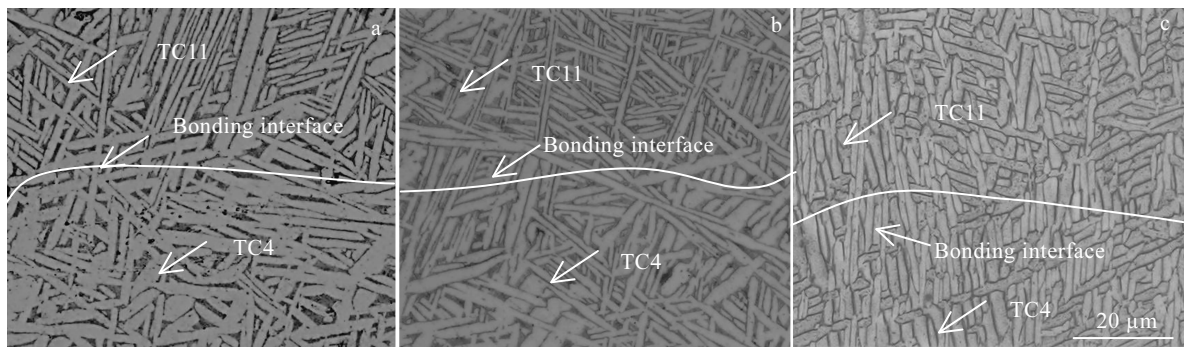


图 4 激光沉积制造固溶时效热处理后 TC4/TC11 双合金试样的显微组织

Fig.4 Laser deposited microstructures of TC4/TC11 samples by aging treatment: (a) 0 layer, (b) 1 layer, and (c) 3 layer

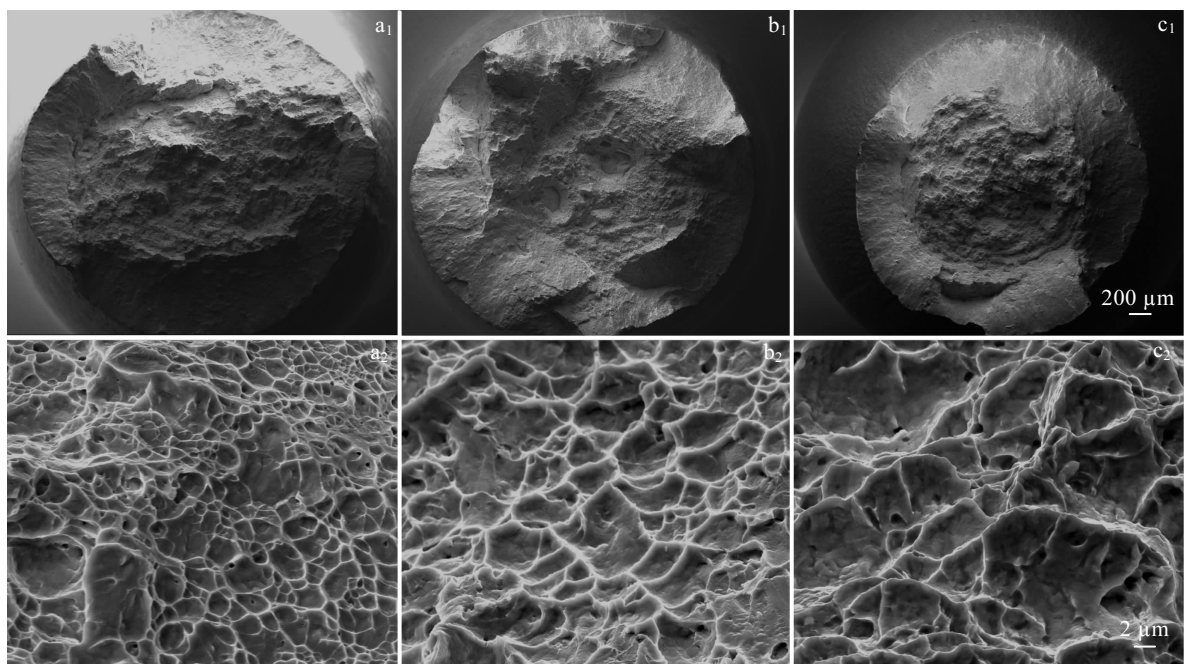


图 5 不同热处理后 TC4/TC11 钛合金的拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphologies of TC4/TC11 samples after different heat treatments: (a₁, a₂) 0 layer; (b₁, b₂) 1 layer; (c₁, c₂) 3 layers

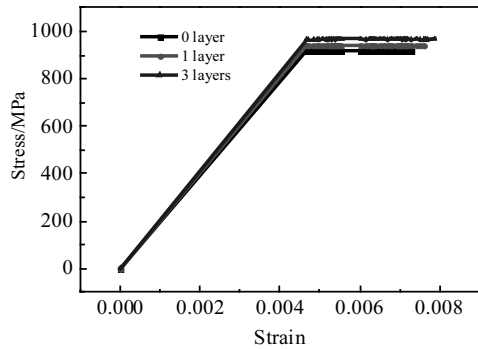


图 6 去应力退火后不同过渡层试样的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of samples with different layers by stress relief annealing

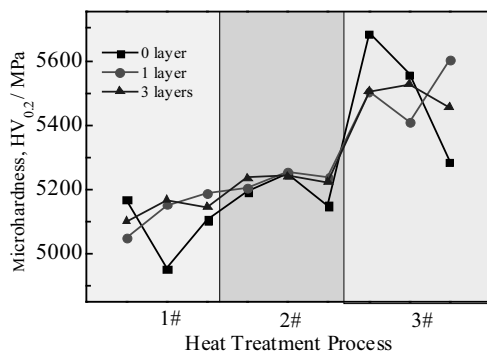


图 7 不同热处理制度 TC4/TC11 双合金连接界面的显微硬度分布

Fig.7 Micro-hardness distribution of TC4/TC11 interface fabricated with different heat treatments

因为过渡层数的增加,使得由 TC4 钛合金一侧经过过渡区到 TC11 钛合金一侧界面之间的成分梯度逐渐减小,过渡更加平缓。不同热处理后试样的平均显微硬度如表 6 所示,TC4/TC11 双合金沉积态和固溶时效的显微硬度变化明显,这与梯度材料的沉积态和固溶时效后组织差异明显有关,而去应力退火后的显微组织分布均匀,因此去应力退火后的显微硬度变化差异小。

表 6 不同热处理试样的平均显微硬度

Table 6 Average micro-hardness of samples with different heat treatments (MPa)

No.	0 layer	1 layer	3 layer
1#	5076.33	5272.50	5176.33
2#	5187.00	5402.70	5387.00
3#	5508.33	5563.50	5508.33

3 结 论

1) 在相同的热处理状态下,过渡层数对 TC4/TC11 双合金连接界面的组织影响较大,随着层数的增加即成分梯度的减小,TC4/TC11 双合金连接界面组织分布差异逐渐减弱,组织趋于均匀。

2) TC4/TC11 双合金试样的去应力室温拉伸断口均为韧性断裂,随着过渡层数的增多,TC4/TC11 双合金断口的韧窝增大加深,抗拉强度升高,塑性变好。

3) 在相同的热处理状态下,过渡层数对 TC4/TC11 双合金连接界面的显微硬度的均匀性影响较大,过渡层数越多,显微硬度分布越均匀。

参考文献 References

- [1] Nobuki M, Hashimoto K, Tsujimoto K *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 1986, 50(9): 840
- [2] Huang Yu(黄 瑜), Chen Jing (陈 静), Zhang Fengying(张凤英) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2009, 38(12): 2146
- [3] Huang Xu(黄 旭), Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Honghong(王红红). *Advanced Aeronautical Titanium Alloys and Application*(先进航空钛合金材料与应用)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 47
- [4] Zhu Yanyan, Li Jia, Tian Xiangjun *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 607: 427
- [5] Liu Jiantao (刘建涛), Lin Xin (林 鑫), Lv Xiaowei (吕晓卫) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2008, 44(8): 1006
- [6] Liu Yingying(刘莹莹), Yao Nuan(姚 暖), He Lei(何 磊) *et al.* *Chinese Scientific Papers* (中国科技论文)[J], 2014, 9(2): 234
- [7] Schramm B, Richard H A, Kullmer G. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 2016, 167: 188
- [8] Yang Mocong (杨模聪), Lin Xin (林 鑫), Xu Xiaojing (许小静) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2009, 45(6): 730
- [9] Zhang Shuangyin(张霜银), Lin Xin(林 鑫), Chen Jing(陈 静) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(5): 774
- [10] Lin X, Yue T M, Yang H O *et al.* *Acta Materialia*[J], 2006, 54: 1901
- [11] Lin X, Yue T M, Yang H O *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, A391: 325
- [12] Qian Tingting, Liu Dong, Tian Xianjun *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(9): 2729
- [13] Liu Yingying (刘莹莹), Lin Xin(林 鑫), Yang Haiou (杨海鸥) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(9): 2197

Effect of Transition Layers on Microstructure and Properties of TC4/TC11 Interface Fabricated by Laser Deposition

He Bo¹, Liu Jie¹, Yang Guang²

(1. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

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

Abstract: TC4/TC11 dual alloy specimens with different component gradients in the transition zone were prepared by laser deposition. The effects of transition layer number and different heat treatment on the microstructure, tensile properties and micro-hardness of TC4/TC11 dual alloy interface were investigated. The results show that the transition layer number has a great influence on the morphology of the microstructure, and the increase of the transition layer in number reduces the interface difference between TC4 and TC11 alloys, causing more uniform micro-hardness distribution. The transition basket-weave microstructure of the deposited TC4/TC11 varies greatly; the microstructure after stress relief annealing is much more uniform; microstructure after solution-aging treatment is much coarser and the difference is more obvious. From the room temperature tensile test results on specimens after stress relief annealing, it can be concluded that the increase of transition layer in number improves the tensile strength and plasticity of TC4/TC11 dual alloy, and that fractures occur on the side of TC4 titanium alloy, which shows that the transition interface performance of TC4/TC11 dual alloy is good.

Key words: laser deposition manufacturing; titanium alloy; microstructure; properties; gradient materials

Corresponding author: He Bo, Ph. D., Associate Professor, School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-89728683, E-mail: hebo1978@163.com