

激光增材制造 TC4/TC11 钛合金梯度结构温度场预测与显微组织分析*

孙成¹, 孙亦璋¹, 刘金², 张纪奎^{1,3}

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191;

3. 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, 北京 100191)

[摘要] 使用激光增材制造技术制备 TC4/TC11 钛合金梯度材料典型沉积试样, 测量沉积过程中 3 个特征位置的温度历程, 并对沉积试样进行显微组织观察。建立了激光增材制造 TC4/TC11 梯度材料结构温度场预测有限元模型。有限元模型的温度场计算结果与试验结果吻合较好, 同时有限元模型所计算的 T_{β} 温度转变线位置与试样显微组织中观察得到的结果一致。显微组织观察结果表明, 试样中无缺陷, 顶部为等轴晶区域, 从增材底部到等轴晶区域之间存在贯穿整个增材区域的柱状晶; 在 T_{β} 温度转变线两侧微观组织有明显不同: 最后一层增材过程中, 温度超过 T_{β} 的组织冷却后为超细 $\alpha+\beta$ 网篮组织, 温度未达到 T_{β} 的组织冷却后为带有大量 α 集束的 $\alpha+\beta$ 网篮组织; 在设计界面(材料组分变化位置)处组织连续、无突变。

关键词: 激光增材制造; 梯度材料; 有限元模型; 温度场; 钛合金; 显微组织

Temperature Field Prediction and Microstructure Analysis of Gradient TC4/TC11 Titanium Alloy Deposited by Laser Additive Manufacturing

SUN Cheng¹, SUN Yizhang¹, LIU Jin², ZHANG Jikui^{1,3}

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] A typical specimen of TC4/TC11 titanium alloy gradient material was deposited by laser additive manufacturing technology. The temperature history of the three characteristic positions during the deposition process was measured and the microstructure of the deposited sample was observed. A finite element model for temperature field prediction of laser additive manufacturing TC4/TC11 gradient material structure was established. The results of the temperature field calculation of the finite element model are in good agreement with the experimental results. And the T_{β} temperature transition line position calculated by the finite element model is in good agreement with the observation results in the microstructure of the sample. The microstructure observation shows that there is no defect in the sample. The top area is equiaxed grain region, and there is a columnar crystal region through the whole material increasing area from the bottom to the equiaxed crystal region. The microstructure on both sides of the T_{β} temperature transition line is significantly different: during the process of finishing the last layer, the area where temperature exceeds T_{β} produces ultrafine $\alpha+\beta$ basket wave microstructure, and will produce $\alpha+\beta$ basket wave microstructure with a mass of α clusters if the temperature is below T_{β} . The microstructure is continuous and no mutation at the design interface (material composition change position).

Keywords: Laser additive manufacturing; Gradient materials; Finite element model; Temperature field; Titanium alloy; Microstructure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.096

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51775018), 航空科学基金项目(2016ZA51008)。

随着飞机结构构型向大型化、整体化和结构功能一体化发展,整体构件不同部位的服役环境(如温度、载荷等)之间的差异越来越大,造成材料内温度、应力分布等不均衡,采用传统均质材料或单一材料难以满足高性能构件在复杂极限环境中的服役要求。梯度材料的材料组分随空间位置连续变化,从而使其性质和功能呈连续梯度变化^[1]。结构设计人员可以根据零件工作条件和服役性能要求对材料进行梯度设计布局,由此设计出的构件可以减轻重量,提高疲劳寿命并且兼顾耐热、抗蚀、耐磨等性能^[2]。

激光增材制造技术利用“离散堆积”原理,创形与创质并行,通过高能激光束对同步输送的金属粉末逐层熔化沉积,实现“高性能材料制备”与“大型复杂构件”一体化近终成形,通过精度控制两种或多种材料粉末的输送和相应的工艺可以实现材料和性能的梯度分布,尤其适用于制备大尺寸、高性能、形状复杂的梯度材料结构^[3]。Liu等^[4]使用激光近净成形(Laser Engineered Net Shaping)技术制备了Ti/TiC功能梯度材料,实现组分由纯Ti到95%TiC的均匀过渡。Qian等^[5]和Liang等^[6]使用激光增材制造制备了具有良好过渡界面的TA15/TA2梯度合金材料,其硬度分析结果表明这种材料实现了性能的均匀过渡,在过渡区域并无微裂纹产生。西安交通大学用激光金属成形技术制备出了较高表面质量的某型双工质复杂空心叶片样钛合金闭式整体涡轮叶盘样件^[7]。上述研究表明,使用激光增材制造技术可以获得材料组分和性能逐渐过渡的梯度材料,试样级力学性能测试结果和小型复杂结构制造表明其工程应用的巨大潜力。

但是由于增材制造过程中材料经过反复加热融化、快速凝固,导致成形构件内部存在很大的残余应力,对构件的尺寸精度和力学性能产生不利影响^[8],梯度材料界面处材料组分和性能连续过渡使得这一问题更为复杂,掌握梯度材料增材制造过程中的温度历程对其残余应力控制和显微组织调控具有重要意义。使用数值模拟的方法可以计算得到增材制造过程中构件的温度场变化情况。Ding等^[9]建立了低碳钢电弧增材制造单道多层沉积构件的有限元模型,计算的温度场与试验吻合较好。Zhao等^[10]建立了单道焊接沉积的不锈钢有限元模型,研究了温度场的变化,分析了沉积方向对于温度场的影响。但在以上有限元模拟计算中,材料都为均质材料。牛犇^[11]建立了激光增材制造Ni-TiC梯度材料有限元模型,使用线性混合率的方法来表征不同组分的梯度材料,讨论了增材制造过程中的温度场变化,但其有限元模型没有相应的验证试验。

钛合金由于其优异的力学性能在飞机结构中应

用广泛。TC4是应用最为普遍的中等强度钛合金,而TC11是飞机结构和发动机用高强度钛合金,在500℃高温下仍具有很好的力学性能,TC4/TC11梯度钛合金在飞机框梁、发动机整体叶盘等大型复杂关键钛合金构件制造中具有广阔的应用前景^[12]。使用激光增材制造技术制备TC4/TC11钛合金梯度材料典型沉积试样,并测量了增材制造过程中3个特征点的温度变化;建立了激光增材制造TC4/TC11梯度材料温度场计算的有限元模型,通过与试验的对比验证了模型的有效性;通过观察沉积试样的显微组织发现其 T_{β} 温度转变线位置与有限元模拟结果符合较好;观察在材料变化界面处,试样微观组织连续、无突变。

1 试验及方法

激光增材制造试验采用课题组自主研发的LMD-V型激光成形系统。激光增材制造使用的激光功率为6000W,扫描速度为16.7mm/s,送粉率为1268g/h,扫描方式为单道多层往复式扫描,每两层之间有30s的冷却。基材为TC11板,一端固定在夹具上,另一端为自由端。增材部分为两种材料过渡,首先以70%TC11-30%TC4(按体积分数混合)混合粉末为添加材料进行增材制造,共26层;中间换粉耗时305s,在已经完成的增材部分上,再以30%TC11-70%TC4混合粉末为添加材料进行增材制造,共25层,试验件尺寸如图1所示。试验中共测量了3个特征位置(分别位于基材上表面边缘、基材底面中心和基材底面边缘,见图2)的温度历程。

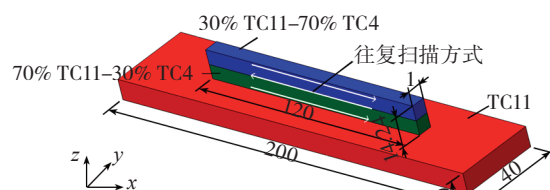


图1 试验件尺寸(单位:mm)

Fig.1 Schematic drawing of specimen dimensions

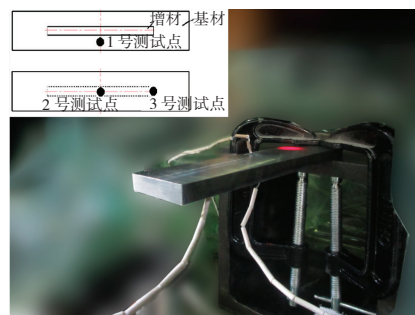


图2 试验装置布置照片

Fig.2 Photograph of experimental setup

温度测量使用的热电偶为 K 型镍铬 - 镍硅型热电偶, 线径 0.5mm, 最大可测温度为 900℃。

沉积结束之后, 从试样上切取 XOZ 方向样品, 如图 3 所示。将样品抛光之后进行腐蚀, 腐蚀液为 $HF:HNO_3:H_2O=1:6:43$ 。通过 DM 4000 光学显微镜 (OM) 和 Apollo 300 扫描电子显微镜 (SEM) 观察显微组织。

2 有限元模型

由于对称性(图 1 中关于 XOZ 面对称), 本文使用有限元软件 ABAQUS 建立的对称实体模型如图 4 所示, 增材部分和距离增材比较近的基材部分单元密集, 距离增材比较远的基材部分单元比较稀疏, 单元类型为 8 节点热分析单元 DC3D8, 单元总数为 73428。

2.1 材料表征

异质材料由多种材料组分混合而成, 其热学性能参数介于几种组分之间。而材料物性参数不仅与组成有关, 还与制造过程有着紧密关联, 因此使用试验方法测定各种混合比例的异质材料物性参数十分困难。本文将直接引用国内外已有的经验计算公式对异质材料的主要热学物性参数进行估算。

导热率的计算公式^[13]为:

$$\lg \lambda = f_A \lg \lambda_A + f_B \lg \lambda_B \quad (1)$$

其中 λ_A 为组分 A 的导热率, λ_B 为组分 B 的导热率; f_A 、 f_B 分别为组分 A、B 的体积分数。

比热容 C 的估算使用 Neumann-Kopp 定律^[14], 公式

如下:

$$C = W_A C_A + W_B C_B \quad (2)$$

其中 C_A 、 C_B 分别为组分 A、B 的比热容, W_A 、 W_B 分别为组分 A、B 的质量分数。TC11 密度为 $4.48g/cm^3$, TC4 密度为 $4.44g/cm^3$, 质量分数可由体积分数和密度计算得出。TC4、TC11 在不同温度下的物性参数参考文献 [15]。经过以上估算公式计算后的材料参数如表 1 所示。

2.2 热源选取

本文采用椭球热源模型对增材制造的热源进行模拟, 热源方程^[16]为:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^{3/2}abc} \exp(-3((\frac{x}{a})^2 + (\frac{y}{b})^2 + (\frac{z}{c})^2)) \quad (3)$$

其中, q 为椭球热源模型的能量密度分布函数; a 、 b 、 c 为椭球热源的半轴长度, 决定了椭球热源的几何形状, 根据熔池形状分别赋值: $a=4mm$, $b=4mm$, $c=2.5mm$; Q 为激光的有效功率, 试验所使用激光效率约为 0.40; x 、 y 、 z 为局部坐标。热源调用在 ABAQUS 中的“DFLUX”子程序里实现, 热源移动速度为 16.7mm/s。

2.3 增材过程实现及散热边界条件

在有限元模型中将增材部分划分为 51 层, 分别对应试验中的 51 次增材过程。模型中的材料添加是通过 ABAQUS 中的 MODEL CHANGE 功能实现的^[17]。在第 1 分析步中通过 MODEL CHANGE 中的 ADD 选项将第 1 层网格添加同时开始计算, 这时后面的网格对计算无影响, 第 1 分析步计算完成后添加第 2 层网格并计算, 依次类推直至完成全部网格添加计算。

本模型为对称模型, 因此将对称面设置为绝热面, 不与外界进行热量交换。增材制造过程中增材部分的散热面是变化的, 例如第一层材料添加上去之后, 增材部分散热面为第一层材料顶面和侧面, 第二层材料添加上去之后, 第一层顶面散热面失效, 新加散热面为第二层顶面及侧面, 依次类推。试样与环境存在热对流和热

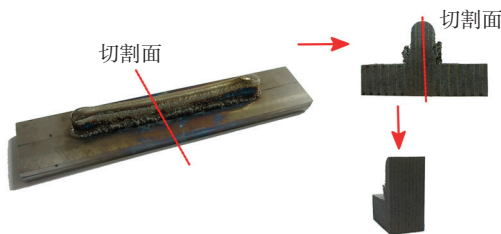


图3 切取样品示意图

Fig.3 Schematic drawing of observation surface processing

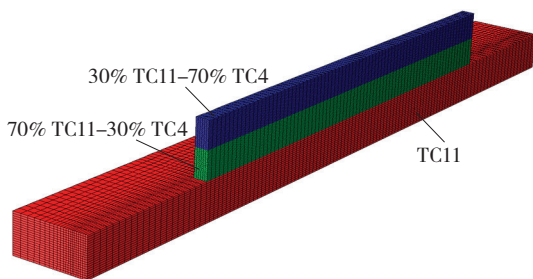


图4 有限元模型单元划分

Fig.4 Element mesh of finite element model

表1 混合后的材料热物性参数

温度 /℃	比热容 $C / (J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$		热导率 $K / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	
	70% TC11-30% TC4	30% TC11-70% TC4	70% TC11-30% TC4	30% TC11-70% TC4
20	518.6	571.4	5.86	6.38
100	548.4	591.6	6.11	7.05
300	625.7	653.3	9.38	9.62
500	709.3	705.7	12.00	11.89
700	780.9	762.1	14.05	13.85
800	818.7	790.2	15.26	14.94
900	861.7	820	16.74	16.14

辐射两种换热机理。在自然环境下热对流一般的取值在 $10 \text{ W/m}^2\text{K}^{[18]}$ 左右,热辐射系数取值一般均在 $0.2^{[19]}$ 左右。为了模拟增材过程中送粉装置吹出的保护气体在基材以及增材顶面所引起的对流效应,基材上表面以及增材每一新添加层上表面赋予较大的对流系数,引用文献[18]中的研究结论,取此对流系数为 $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。边界条件还涉及夹具散热的处理,本文将与夹具接触的部分设置为散热面,在计算中赋予较大热传导系数,取值为 $60 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。计算过程中各散热面的设置如图5所示。

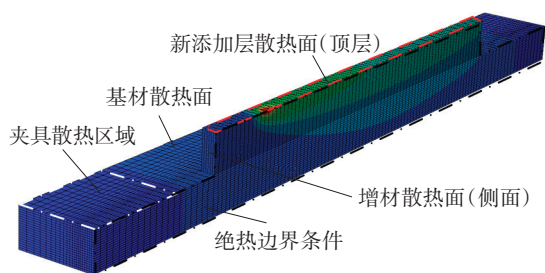


图5 模型散热边界条件

Fig.5 Boundary condition of the finite element model

3 结果与讨论

3.1 温度场计算结果

图6为有限元计算的测试点温度变化结果。由图6(a)可见,增材制造过程中测试点温度呈现明显的周期性变化,曲线的上升段代表增材过程,曲线的下降段代表每层扫描结束后的30s冷却过程,一个温度上升、下降过程表示完成了一层材料的堆积。

在前17层的沉积过程中,沉积层距离测试点较近,热累积效应明显,温度越来越高;从沉积第18层开始,随着沉积层距离测试点越来越远以及整个零件散热面积的增加,各测试点峰值温度保持稳定,不再上升,之后略微降低。

在第26层沉积过后,由于需要手动更换原料粉末,因此增材过程暂停305s,所以在26层后有一段温度迅速下降的过程。换粉完成后,增材过程继续,各测试点温度再次上升,但由于激光热源距离测试点已经较远,且试样散热面比换粉前也逐渐变大,在第二段增材过程中,各测试点的温度比第一段增材过程中温度略低,且温度上升到一定程度时也开始逐渐下降。最后的温度下降段为试验全部完成后自然冷却的过程。

图6(b)为1号和3号测试点温度变化周期的对比。由于测试1号点位于试样中间对称面上(如图2所示),所以其温度变化周期 T 与增材制造每个扫描周期一致,约为37.2s(7.2s增材过程和30s冷却过程),3号点位于非对称位置,而激光扫描方式为往复式扫描,所以其

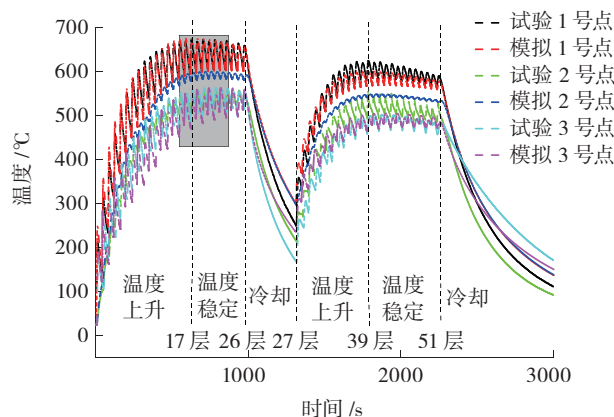
温度变化所呈现的周期性为1号点的两倍,即激光扫过一个来回为一个周期,约为74.4s($2T$),如图6(b)所示。

总体上看,有限元模拟温度场结果与试验结果吻合较好。

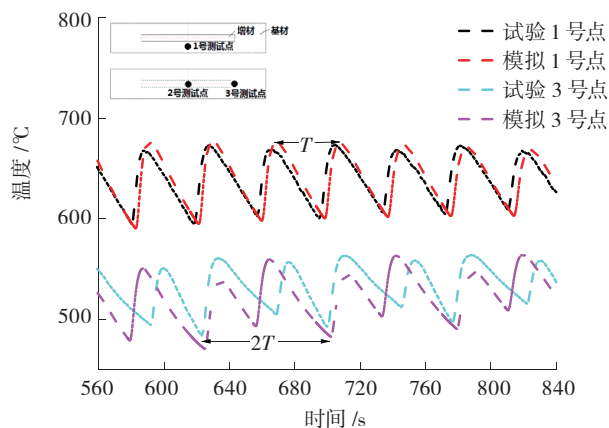
3.2 显微组织分析

图7(a)为钛合金低倍宏观显微组织照片,可以看出试样不存在明显缺陷,顶部为等轴晶区域,往下为贯穿整个增材部分的柱状晶区域。从上到下组织颜色衬度不同,将组织按颜色衬度不同划分为上部暗区和下部亮区,在暗区和亮区间有一条明显的分界线。Zhu等^[20]对TC11的研究表明,暗区与亮区之间的分界线即为 T_{β} 温度转变线,经测量 T_{β} 温度转变线的位置距离增材顶端的距离为6.34mm。

文献[15]中,TC4的 T_{β} 为995℃左右,TC11的 T_{β} 为1000℃左右,本文材料为TC4-TC11混合粉末,取混合后的钛合金的 T_{β} 为995℃。如图8所示为有限元模拟 T_{β} 温度转变线位置计算结果,灰色区域为扫描最后一层时,温度达到 T_{β} 的区域, T_{β} 温度转变线距离顶端5.6mm,有限元与试验吻合较好。



(a)有限元计算结果与试验对比



(b)计算结果局部放大图

图6 有限元计算结果

Fig.6 Calculation results of finite element model

图7(b)为 T_β 温度转变线处的微观组织,可以看到,在 T_β 温度转变线两侧组织有明显的区别,引起这些组织差异的主要原因是:增材制造过程中每一层组织所经历的温度循环各不相同,因此组织形态具有差异,而不同的显微组织对光的衬度不同,表现出亮、暗的区别。暗区底部组织在最后一层增材过程中峰值温度超过了 T_β ,在冷却后产生超细 $\alpha + \beta$ 网篮组织,如图7(b)上部组织;亮区顶部组织在最后一层增材过程中峰值温度未超过 T_β ,冷却后为具有大量 α 集束的 $\alpha + \beta$ 网篮组织,如图7(b)下部组织。

图7(c)为设计界面(材料改变处)的显微组织,可以发现该处组织为 $\alpha + \beta$ 网篮组织,在界面处组织连

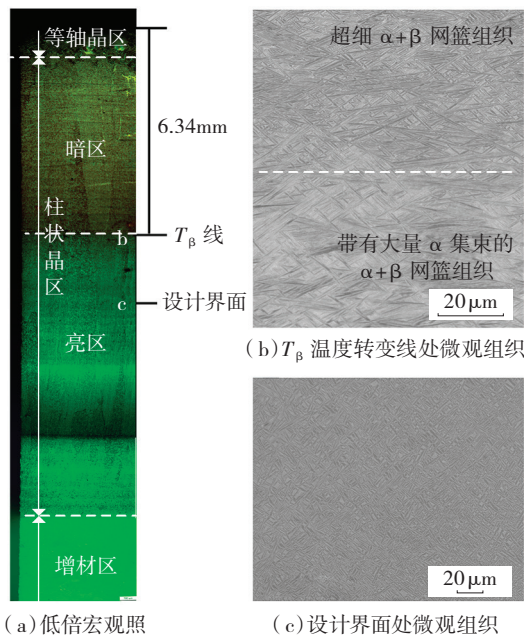


图7 试样低倍宏观图及微观组织图
Fig.7 Microstructure and SEM micrograph of sample

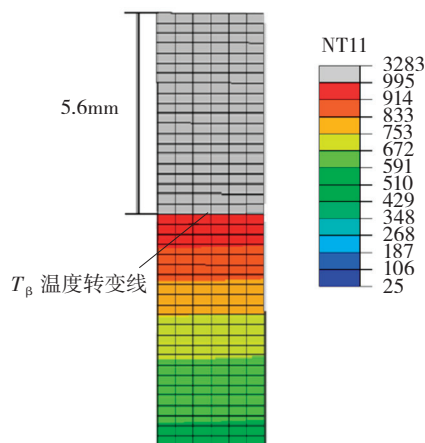


图8 有限元计算 T_β 温度转变线位置
Fig.8 T_β temperature line position calculated by FEM

续、无突变,不存在明显的组织界面以及内部缺陷。

4 结论

(1) 本文对 TC4/TC11 异质材料进行了材料性质表征,使用 ABAQUS 有限元软件建立了激光增材制造 TC4/TC11 异质材料结构温度场计算有限元模型,模型所计算出的温度场变化趋势、周期以及峰值温度与试验吻合较好,验证了模型的有效性。

(2) 通过观察沉积试样的微观组织,发现 T_β 温度转变线位置两侧组织明显不同,在最后一层沉积过程中,峰值温度超过 T_β 的组织冷却后产生超细 $\alpha + \beta$ 网篮组织,该区域组织在宏观照片中衬度较暗,峰值温度未达到 T_β 的组织冷却后产生带有大量 α 集束的 $\alpha + \beta$ 网篮组织,该区域在宏观照片中衬度较亮。试样中 T_β 温度转变线位置与有限元模拟结果吻合较好。观测设计界面处(材料改变位置)的显微组织,发现该处组织为 $\alpha + \beta$ 网篮组织,该区域连续致密、无突变,没有明显的组织界面。

参考文献

- [1] NIINO M, HIRAI T, WATANABE R. Functionally gradient materials in pursuit of super heat resisting materials for spacecraft[J]. Journal of the Japan Society for Composite Materials, 1987, 13(6): 257-264.
- [2] 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 development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 16-20.
- [3] GUPTA A, TALHA M. Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 79: 1-14.
- [4] LIU W, DUPONT J N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(9): 1337-1342.
- [5] QIAN T T, LIU D, TIAN X J, et al. Microstructure of TA2/TA15 graded structural material by laser additive manufacturing process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2729-2736.
- [6] LIANG Y J, LIU D, WANG H M. Microstructure and mechanical behavior of commercial purity Ti/Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V structurally graded material fabricated by laser additive manufacturing[J]. Scripta Materialia, 2014, 74(3): 80-83.
- [7] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.
LI Dichen, He Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-135.

[8] 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.

[9] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315-3322.

[10] ZHAO H, ZHANG G, YIN Z, et al. A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 488-495.

[11] 牛犇. 激光快速成形法制备 Ni/TiC 功能梯度材料的结构设计及优化[D]. 北京:北京理工大学, 2015.

NIU Ben. Structure optimized design of Ni/TiC functional gradient materials by laser rapid forming method[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015

[12] 张凌云, 汤海波, 王向明, 等. 大型复杂梯度材料高性能钛合金构件激光近净基础研究报告[J]. 科技创新导报, 2016(13): 177.

ZHANG Lingyun, TANG Haibo, WANG Xiangming, et al. Basic research on laser nearnet forming of large complex high-performance graded titanium alloy structural components: an interim report[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016(13): 177.

[13] GONCHARENKO A V, LOZOVSKI V Z, VENGER E F. Lichteneker's equation: applicability and limitations[J]. Optics Communications, 2000, 174(1-4): 19-32.

[14] 徐自立, 魏伯康. 浅析梯度功能材料几种物性值的推定[J]. 武汉科技学院学报, 2000(1): 1-5.

XU Zili, WEI Bokang. Brief analysis of inferring physics value for functionally gradient materials[J]. Journal of Wuhan Institute of Science and Technology, 2000(1): 1-5.

[15] 黄伯云, 石力开, 邱冠同, 等. 有色金属材料工程: 上[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 585-606.

HUANG Boyun, SHI Likai, QIU Guanzhou, et al. Nonferrous metal material engineering: First part[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 585-606.

[16] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.

[17] ABAQUS Inc. ABAQUS analysis user's guide[M]. Providence: ABAQUS Inc, 2004.

[18] GOUGE M F, HEIGEL J C, MICHALERIS P, et al. Modeling forced convection in the thermal simulation of laser cladding processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1): 307-320.

[19] MONTEVECCHI F, VENTURINI G, SCIPPA A, et al. Finite element modelling of wire-arc-additive-manufacturing process[J]. Procedia Cirp, 2016, 55: 109-114.

[20] ZHU Y, TIAN X, LI J, et al. Microstructure evolution and

layer bands of laser melting deposition Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 616(2): 468-474.

通讯作者: 张纪奎, 博士、副教授, 研究方向为飞机结构设计、增材制造技术, E-mail: zjk@buaa.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第81页)

on surface integrity and fatigue properties of TC4 titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(8): 1349-1354.

[4] THOMPSON S R, RUSCHAU J J, NICHOLAS T. Influence of residual stresses on high cycle fatigue strength of Ti-6Al-4V subjected to foreign object damage[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(supplement1): 405-412.

[5] DALAEI K, KARLSSON B. Influence of shot peening on fatigue durability of normalized steel subjected to variable amplitude loading[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 38: 75-83.

[6] WILLIAMSON J C, LUTJERING G. Titanium[M]. Berlin: Springer, 2012.

[7] MAAWAD E. Residual stress analysis and fatigue behavior of mechanically surface treated titanium alloys[M]. Berlin: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2013.

[8] MUNDAY E G. The effect of mean stress components in high-cycle, biaxial fatigue[J]. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2003, 31(2): 177-186.

[9] WITHERS P J. Residual stress and its role in failure[J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(12): 2211-2264.

[10] 邓瑛, 韩秀全, 邵杰, 等. 钛合金三层空心结构模拟件设计及高周疲劳实验[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 157-159.

DENG Ying, HAN Xiuquan, SHAO Jie, et al. Titanium alloy three layers hollow component-like specimen design and high cycle fatigue test[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 157-159.

通讯作者: 邓瑛, 高级工程师, 研究方向为强度、振动、可靠性, E-mail: yingdeng@buaa.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第95页)

[10] 程翔, 史雪辉. 基于 Flotherm 的散热器的优化设计[C]// 电子机械与微波结构工艺学术会议论文集. 南京: 电子机械工程, 2008.

CHENG Xiang, SHI Xuehui. The optimum thermal design of heat sink based on flotherm[C]// Proceedings of Symposium on Electronic Machinery and Microwave Structure Technology. Nanjing: Electro-Mechanical Engineering, 2008.

通讯作者: 张逸民, 硕士、高级工程师, 研究方向为精密光学机械设计, E-mail: zhangyimin2028@163.com.

(责编 铃兰)