

激光增材制造 TC4/TC11 钛合金梯度材料残余应力的有限元分析

樊鹏, 潘家腾, 葛一铭, 战宇*

东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 激光增材制造(LAM)技术具有可设计性、短流程、高柔性制造等优点,特别适合高性能梯度材料的直接近净成形。然而成形过程中温度梯度作用和材料组分非均匀性,导致成形构件不可避免地存在残余应力,直接影响到构件的成形精度和使用性能。以在航空航天领域具有广阔应用前景的钛合金梯度材料为研究对象,基于 ABAQUS 有限元软件建立增材制造 TC4/TC11 功能梯度材料(FGM)温度和残余应力场的热力耦合力学模型。实验结果表明:激光增材制造过程中,沉积区域的残余应力主要表现为拉应力,且沿扫描方向的残余应力较大。不同材料组分交界面处的残余应力分布具有不连续性,靠近 TC11 含量高的一侧应力要高于另外一侧,残余拉应力随着 TC11 含量的增加逐渐增大。该研究对于梯度材料增材制造的结构设计和残余应力的调控具有重要意义。

关键词 激光技术; 激光增材制造; 有限元; 梯度材料; 残余应力

中图分类号 O341

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1802012

1 引言

激光增材制造作为引领未来制造业发展方向的核心技术,近年来受到世界范围的广泛关注和重视^[1-3]。该技术可以通过调控输送粉末的比例和激光成形时的工艺来实现构件成分、组织和性能的梯度变化,成为集材料设计、制备于一体的短流程、数字化、高柔性制造系统,特别适合用于梯度材料的制备。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。然而增材制造过程中材料经历周期性、非稳态、长期热循环载荷作用以及移动熔池的约束快速凝固,导致成形构件内存在很大的残余应力,加之梯度结构材料组分的非均匀性,这一问题变得更为复杂。因此,对增材制造过程中温度场和应力场的研究显得尤其重要。

西安交通大学解航等^[4]利用激光增材制造技术制备了 Ti6Al4V/CoCrMo 梯度材料,指出开裂原因主要是随着 CoCrMo 含量的增加,析出的 CoCrMo

呈网状包络 Ti6Al4V-CoCrMo 固溶体,出现应力集中现象,进而形成裂纹源。北京航空航天大学孙成等^[5]使用激光增材制造技术制备了 TC4/TC11 梯度材料,建立了温度场计算有限元模型并验证了其有效性。大连理工大学郝云波等^[6]采用激光快速成形技术制备了不同成分比的 SS316/Ni20 梯度材料单壁墙,发现 SS316 质量比在 30%~90% 时成形件发生开裂现象,研究表明裂纹的形成与残余应力的作用密切相关。东北大学刘帅等^[7]综述了激光熔化沉积技术在制备梯度功能材料中的应用,指出了航空发动机整体叶盘梯度结构激光熔化沉积所面临的专用粉末制备、变形开裂和残余应力调控等关键问题。Zhan 等^[8]采用激光超声方法测量了 TC4 钛合金激光增材制造的残余应力,并基于实验数据建立了残余应力的预测模型,结果表明工艺参数对残余应力分布具有重要影响,通过优化工艺参数可以达到合理减小残余应力的目的。华中科技大学姚化山等^[9]综合考虑了材料的热物性参数和相变非线性行为,建立了激光选区熔化(SLM)成形过程温度场模

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-03-25; 录用日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51771051)、大学生创新训练计划项目(N210018)

通信作者: *zhanyu@mail.neu.edu.cn

拟的有限元模型,结果表明熔池呈现不规则的椭圆形,随着扫描速度的减小,热量累积效应显著。美国 Texas 大学的 Labudovic 等^[10]采用数值模拟和实验相结合的方法,研究了激光增材制造的温度场和应力场分布情况,结果表明温度场分布不均匀会导致热应力的产生,模型中部存在拉应力,而两端为压应力。解瑞东等^[11]综述了国内外增材制造温度场的有限元分析方法和实验测试技术,并比较了现有的增材制造温度场检测、分析与控制技术的优缺点。以上研究表明,采用有限元方法对梯度材料增材制造过程中的应力场进行模拟分析,可明确残余应力的分布规律和演变,这对于提高增材制造梯度结构件的质量尤为重要。

本文对激光增材制造 TC4/TC11 功能梯度材料残余应力场进行有限元分析。采用生死单元技术模拟增材制造过程,采用 Fortran 语言编写半球形热源函数和强迫对流模型,通过 DFLUX 和 FILM 子程序将其加载到模型中,实现激光沉积制造 TC4/TC11 功能梯度材料过程的热力耦合有限元分析。本文的研究对于梯度材料增材制造残余应力的测量、调控及合理抑制具有重要参考意义。

2 理论基础

2.1 热传导方程

激光增材制造过程中温度变化迅速而剧烈,其温度场分析问题是非线性瞬态热传导问题,控制方程为

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \left[k_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + k_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q(x, y, z), \quad (1)$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向的导热系数; c 和 ρ 分别为材料的比热容和密度; $q(x, y, z)$ 为求解域的内热源; T 为温度; t 为传热时间。由于材料物理性质随时间变化,将(1)式推广至各向异性的梯度结构材料,热传导微分方程为

$$\nabla^\lambda [K] \nabla T + q(x, y, z) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho c T), \quad (2)$$

式中: ∇ 为空间坐标的梯度算子;上标 λ 表示转置; $[K]$ 表示热传导系数矩阵。

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right). \quad (3)$$

初始条件和边界条件分别为^[12]

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (4)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - q + h_c (T - T_0) + \sigma_b \epsilon_b (T^4 - T_0^4) = 0, \quad (x, y, z) \in S_n, \quad (5)$$

式中: T_0 为环境温度; n 是模型表面法矢量大小; h_c 为自然对流换热系数; σ_b 是斯忒藩-玻尔兹曼常数; ϵ_b 是材料的发射率; S_n 为模型表面。

将温度场分布结果作为应力分析的载荷导入力学分析模型,实现温度场与应力场的耦合计算。应力应变关系为^[13]

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\varepsilon}^{th}, \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是总应变向量; \mathbf{D} 是弹性矩阵; $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力向量; $\boldsymbol{\varepsilon}^{th}$ 是热应变向量。

热应变大小根据温度场分布和材料的热膨胀系数计算得到:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \int_{T_{ref}}^T \boldsymbol{\alpha}(T) dT, \quad (7)$$

式中: T_{ref} 为参考温度; $\boldsymbol{\alpha}$ 为热膨胀系数。

根据增材制造残余应力特点和塑性力学基础理论,采用 Mises 屈服准则,可得等效应力的计算公式为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (8)$$

式中: σ_1, σ_2 和 σ_3 分别为主应力; σ_i 为等效应力。

2.2 热源模型

热源模型的建立对于激光增材制造过程的热力耦合数值模拟至关重要。常用的热源模型有集中热源模型、平面热源模型和体积分布热源模型。当研究区域远离热源时,可以采用集中热源模型。平面分布热源适用于激光能量较低、熔池深度较小的情况,主要包括平面高斯热源和双椭圆热源模型。为了解决平面热源的穿透问题,有学者提出了均匀分布体热源模型,其中应用广泛的是 Goldak 等^[14]提出的半球热源模型,分布函数为

$$q(x, y, z) = \frac{6Q}{\pi r^3 \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2} + \frac{-3y^2}{r^2} + \frac{-3z^2}{r^2}\right), \quad (9)$$

式中: $q(x, y, z)$ 为热流密度; r 为球体半径; Q 为热输入率。综合考虑实际工况、计算精度及计算成本,选用半球形体热源模型进行数值模拟。

2.3 过渡层材料物性参数表征

每个过渡层是由 TC4 和 TC11 钛合金两种材料以不同比例混合而成的异质材料,依据经验和文献报道,设计材料组分比例为 5 : 5, 7 : 3, 3 : 7。基

于前人的研究成果,在已知两种组物质各物理参数和混合比例的情况下,可以推导出过渡层异质材料的物理性质。

已知各组分密度及体积分数,混合后材料的密度为

$$\rho = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2, \quad (10)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 为各组分密度; φ_1 、 φ_2 为各组分体积分数。

采用 Halpain-Tsai 模型^[15],计算异质材料弹性模量,计算公式为

$$E = \frac{\varphi_1 E_1 (G + E_2) + \varphi_2 E_2 (G + E_1)}{\varphi_1 (G + E_2) + \varphi_2 (G + E_1)}, \quad (11)$$

式中: E_1 、 E_2 为各分组的弹性模量; G 为材料的界面切变模量,可采用 Voight 公式得到:

$$G = \mu_1 \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)} + \mu_2 \frac{E_2}{2(1 + \mu_2)}, \quad (12)$$

式中: μ_1 、 μ_2 为两种材料的泊松比。不同组分的过

表 1 不同过渡方式下梯度层弹性模量

Table 1 Elastic modulus of gradient layer under different transition modes

| Component ratio of TC4 to TC11 | Temperature / °C | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| | 20 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 | 1200 | 1500 |
| 5 : 5 | 116 | 114 | 110 | 103 | 98 | 85 | 73 | 56 | 44 | 23 |
| 7 : 3 | 113 | 111 | 106 | 100 | 94 | 79 | 68 | 51 | 38 | 17 |
| 3 : 7 | 119 | 117 | 113 | 108 | 103 | 90 | 77 | 63 | 51 | 32 |

表 2 不同过渡方式下梯度层比热容

Table 2 Specific heat capacity of gradient layer under different transition modes

| Component ratio of TC4 to TC11 | Temperature / °C | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| | 20 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 | 1200 | 1500 |
| 5 : 5 | 552 | 559 | 573 | 607 | 639 | 708 | 788 | 845 | 900 | 981 |
| 7 : 3 | 575 | 581 | 593 | 625 | 653 | 706 | 767 | 809 | 848 | 906 |
| 3 : 7 | 528 | 537 | 553 | 588 | 626 | 709 | 809 | 881 | 951 | 1056 |

3 有限元模型

3.1 模型建立

有限元模型使用商业有限元软件 ABAQUS 建立而成,其灵活的子程序接口可以有效地实现热源的加载和 LAM 过程模拟。实验使用激光熔化沉积系统(MetLas3.0,辽宁裕通激光应用技术工程有限公司),工艺参数为:光斑直径为 3 mm,激光功率为 500 W,扫描速率为 10 mm/s,搭接率为 60%,沉积所用粉末材料为中航迈特粉冶科技(北京)有限公司生产的 TC4、TC11 合金粉,粉体为球形,粒度为 140~200 μm ,实验中通过调节不同喷嘴的送粉率

渡层材料弹性模量计算结果如表 1 所示。

采用复合材料力学混合律公式计算混合后材料的屈服强度 σ_s ,可表示为

$$\sigma_s = \varphi_1 \sigma_{s1} + \varphi_2 \sigma_{s2}, \quad (13)$$

式中: σ_{s1} 、 σ_{s2} 为两种材料的屈服强度。采用 Lichtenecker 经验公式计算混合后材料的热导率 λ :

$$\lg \lambda = \varphi_1 \lg \lambda_1 + \varphi_2 \lg \lambda_2, \quad (14)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为两种材料的热导率。Turner 给出复合材料热膨胀系数的经验方程^[16],表达式为

$$\alpha = \frac{\alpha_1 K_1 \varphi_1 + \alpha_2 K_2 \varphi_2}{K_1 \varphi_1 + K_2 \varphi_2}, \quad (15)$$

式中: α_1 、 α_2 为各组分的热膨胀系数; K_1 、 K_2 为各组分体积模量。

比热容的计算采用 Neumann-Kopp 公式^[17]:

$$c = W_1 c_1 + W_2 c_2, \quad (16)$$

式中: c_1 、 c_2 为各分组的比热容; W_1 、 W_2 为各组分的质量分数,计算结果如表 2 所示。

实现材料组分的调控。基材为尺寸为 30 mm × 30 mm × 5 mm 的 TC4 钛合金平板,在基材顶端距离左边界 2.5 mm 处开始进行激光沉积,选用单道多层的沉积方式,熔覆层共计 6 道,每 3 层为一个过渡区,自下而上为过渡区 1 和过渡区 2。在实际建模分析中,为节约计算成本,取模型的一半进行建模,并在对称面设置对称约束。将 TC4 和 TC11 钛合金以不同比例混合而成的金属粉末作为梯度结构区材料,讨论不同混合方式下过渡区材料设计对激光沉积制造残余应力场的影响,粉末混合及过渡方式如表 3 所示。

有限元网格尺寸对数值模拟结果的精度和稳定

表 3 过渡方式和对应过渡区材料组分

Table 3 Transition modes and material composition of corresponding transition zone

| Transition mode | I | II | III |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| Transition zone 1 | 70% TC4, 30% TC11 | 50% TC4, 50% TC11 | 100% TC4 |
| Transition zone 2 | 30% TC4, 70% TC11 | 50% TC4, 50% TC11 | 100% TC11 |

性具有很大影响。在 LAM 过程有限元分析中, 保证网格的尺寸小于光束半径, 可以取得较好的模拟结果。结合研究内容, 同时考虑模型大小、计算效率等因素, 选取双精度的网格划分形式, 在沉积区域及其附近选取等大的、较细密的网格, 而在基材远离沉积区域处网格较为稀疏。单元类型为三维八节点温度-位移耦合单元 C3D8T, 模型共产生 18336 个单元, 模型网格划分结果如图 1(a) 所示, 其中箭头表示激光扫描路径。为方便后续的温度场和应力场分析, 在模型上选取特征点, 如图 1(b) 所示, 其中 M_1 、 M_2 、 O_1 、 M_3 、 M_4 为第 1 层表面中线处的四等分点, N_1 、 N_2 、 O_2 、 N_3 、 N_4 为第 3、4 层交界处即两个过渡区交界面上的四等分点, O_1 、 P_1 、 O_2 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为每一层中线处的特征点。

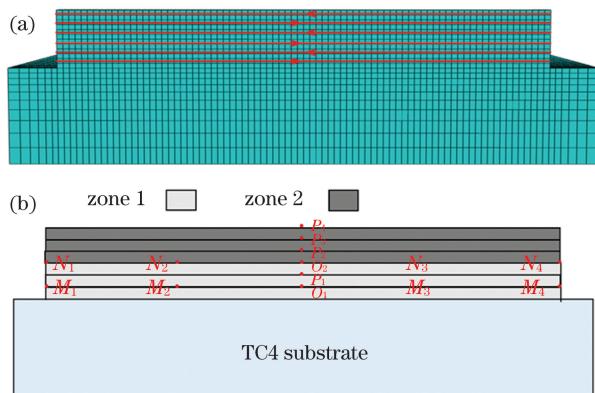


图 1 有限元模型示意图和特征点布置。(a) 模型网格划分; (b) 特征点分布

Fig. 1 Schematic diagrams of finite element model and arrangement of feature points. (a) Model meshing; (b) arrangement of feature points

3.2 生死单元技术

在 ABAQUS 软件中生死单元技术可通过修改刚度矩阵来实现仿真分析过程中任意时刻单元的杀死和激活, 该方法广泛地应用于焊接、增材制造等过程的有限元分析中。采用生死单元技术, 在初始状态下, 沉积部分单元处于未激活状态, 在移动热源扫描至某位置时, 自动激活该位置的单元, 该单元的温度为热源温度, 在该工艺过程热源移动就是单元恢复的命令, 这样就可以模拟激光增材制造的过程了。

共设置 60 组生死单元, 单层设置 10 组生死单元, 每组中包含的单元数目为 48 个。采用标准分析步骤进行热力耦合分析, 初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在激光沉积过程中增量步长的设置应适宜, 增量步长过大会导致求解的非线性方程组出现奇异和结果的不收敛, 而增量步长过小会延长运算时间。结合材料尺寸、生死单元划分格式及工艺参数, 设置热源加载分析步长为 2.5 s , 设定热源加载的增量步长为 $0.01\sim 0.1\text{ s}$, 这样可以满足模拟精度和计算效率的要求。对于冷却阶段, 本文认为材料的散热方式主要为热对流, 并且考虑了辐射散热, 将材料冷却至室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 结果与讨论

4.1 温度场

图 2 为每一层不同时刻温度的分布, 激光作用中心温度约为 $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在作用区域附近温度梯度较大, 温度分布可近似地描述熔池的情况。可以看出随着激光源的移动, 单元依次被激活, 整个增材制造过程被重现。熔池中心温度较高且其周围温度梯度较大, 在远离激光源作用区域, 温度较小且分布平缓。选取 3 种过渡方式: 第 I 种过渡方式为 70% TC4, 30% TC11 过渡到 30% TC4, 70% TC11; 第 II 种过渡方式为 50% TC4, 50% TC11 过渡到 50% TC4, 50% TC11; 第 III 种过渡方式为 100% TC4 过渡到 100% TC11。每一种情况下温度场的变化规律近似, 以第 III 种过渡方式为例进行温度场分析。取模型中心的 6 个特征点 O_1 、 P_1 、 O_2 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 绘制各点温度随时间变化的曲线, 如图 3 所示。第一层中心节点 O_1 处率先达到温度峰值, 热源在加

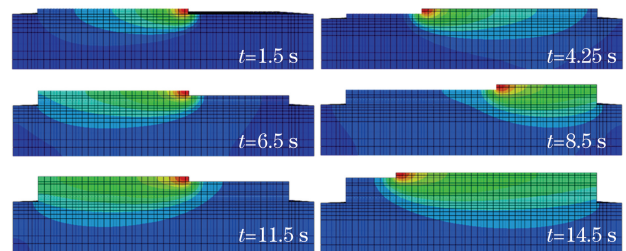


图 2 不同时刻的温度分布

Fig. 2 Temperature distributions at different time

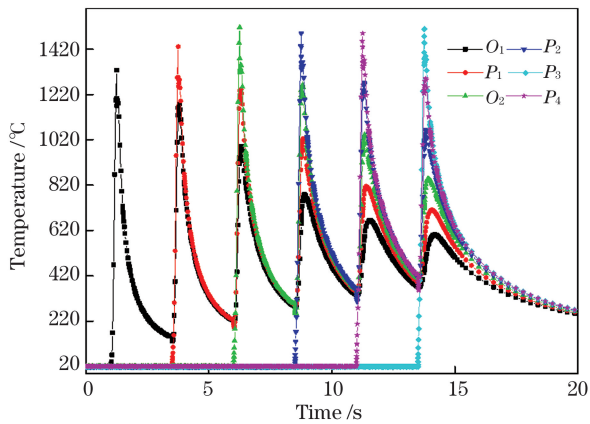


图 3 过渡方式为 100%TC4 过渡到 100%TC11 时节点温度随时间变化的曲线

Fig. 3 Node temperature varying with time when transition mode is from 100%TC4 to 100%TC11

载过程中共有 6 次在水平位置经过该点,由于热源中心的远离,热影响逐次减小,因此在整个过程中出现 6 次峰值,且每次峰值呈降低趋势,符合热源移动的规律。第二层中心节点 P_1 处在整个过程中应出现 5 次峰值,且每次峰值呈降低趋势,从竖直方向看,选取的特征节点在同一条直线上,因此每次出现峰值的时刻相同。

进一步分析不同过渡方式下温度场的差异,取过渡区交界面上四等分点 N_1 、 N_2 、 O_2 、 N_3 、 N_4 的温度峰值,结果如表 4 所示。在第 II 种过渡方式下,即由 50%TC4,50%TC11 过渡到 50%TC4,50%TC11 时各节点温度峰值相对较小,而过渡层材料组分由为 100%TC4 过渡到 100%TC11 时各节点温度峰值相对较大。

表 4 不同过渡方式下各节点峰值温度

Table 4 Peak temperatures of nodes for different transition modes $^{\circ}\text{C}$

| Transition mode | N_1 | N_2 | O_2 | N_3 | N_4 | Mean temperature |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| I | 1422 | 1399 | 1485 | 1327 | 1556 | ~1438 |
| II | 1411 | 1386 | 1452 | 1316 | 1533 | ~1420 |
| III | 1445 | 1425 | 1516 | 1332 | 1584 | ~1460 |

4.2 残余应力分析

将温度场计算结果作为初始载荷,计算残余应力。图 4 为第 II 种过渡方式,即过渡方式为 50%TC4,50%TC11 过渡到 50%TC4 50%TC11 的情况下,材料被冷却至室温时的残余应力云图,可以看出钛合金激光沉积制造过程中残余应力主要出现在沉积区域,中间区域应力分布较均匀,Mises 应力大小

约为 500~600 MPa,基板上应力较小,在基板和试样交界处存在应力集中效应。比较图 4(b)~(d)可以看出,沿激光热源扫描方向的残余应力值较大,远大于其他 2 个方向的应力,因此实际的残余应力测量和调控过程中大都只研究沿扫描方向的应力。由图 4(b)可知,材料沉积区域和沉积区域附近主要表现为拉应力,远离沉积区域的下方基材处为压应力,压应力的值相对较小且分布范围较大。从图 4(c)可以看出,在试样上表面垂直于激光热源扫描方向,沉积区域和沉积区域附近主要表现为拉应力,在远离沉积区域的下方基材处多为压应力,且压应力的绝对值大于拉应力。沿堆叠方向的应力分布如图 4(d)所示,残余应力大部分为压应力,在试样和基底周边存在一定的拉应力,且分布范围较小。由于沿水平扫描方向的残余应力远大于其他 2 个方向,着重分析该方向的残余应力变化。

取各层中心的 6 个特征点 O_1 、 P_1 、 O_2 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ,各点应力随时间的变化曲线如图 5 所示。可以看出各点应力的时域特征相似,以第一层中心点 O_1 为例加以分析。激光扫过的 0.25 s 内界面处应力先表现为压应力,其后转变为拉应力,随着冷却时间的增加,残余应力将趋于一个稳定不变的值。这是因为当高能量的热源移动到某一位置时,由于热胀冷缩效应,该位置材料在短时间内高速膨胀,但由于热源的高度集中性,周围材料并未受到影响,保持原有形态,膨胀区域和周边约束区域之间产生挤压,进而出现压应力。在极短的时间内,热源继续向前运动,此时膨胀区迅速冷却、凝固,周围的约束再次对其产生制约进而形成拉应力。整个沉积过程中热源 6 次经过 O_1 点,因而该处应力产生了 6 次波动,但由于热影响区域逐次减小,残余应力产生波动的阈值也逐渐变小,热源扫描完成时,该点将只经历降温过程,产生逐渐增大最终趋于稳定的残余拉应力。

对于梯度结构的激光沉积制造过程,过渡区域界面处易出现极不稳定的力学性能,这和材料属性差异所导致的应力集中和不连续密切相关。因此对不同过渡方式下残余应力场的分析主要关注界面处节点应力。3 组模型特征点 N_1 、 N_2 、 O_2 、 N_3 、 N_4 为上下区域界面上的点,在计算结果中分别取出上下区域,得到特征点沿扫描方向的残余应力大小如图 6 所示。可以看出 3 种过渡方式下界面处残余应力的分布规律基本相似,呈倒碗状分布,中间为较大拉应力,两端拉应力急剧减小且出现较小的压应力,所得残余应力分布规律和文献[8]中结果相同。最

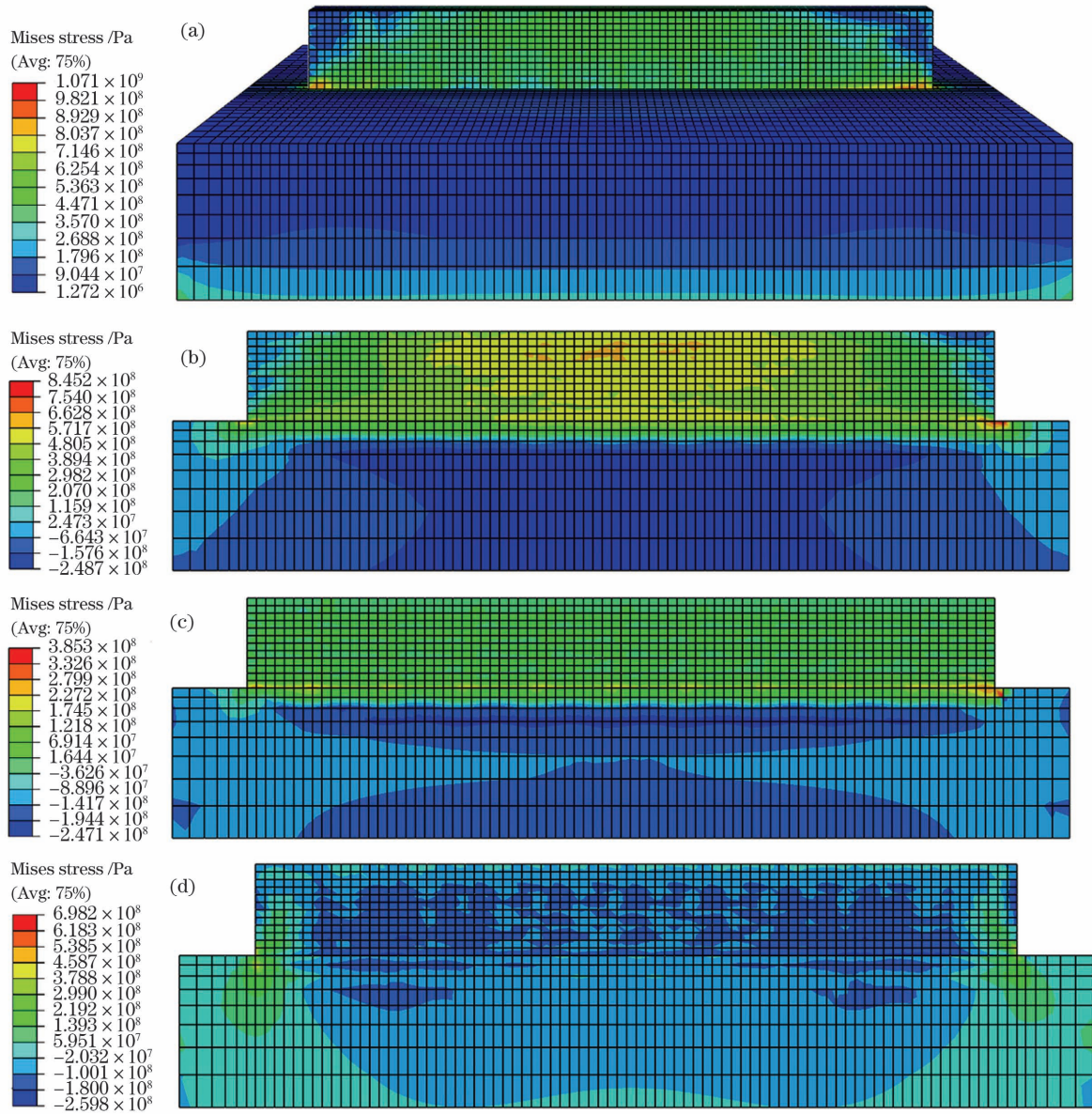


图 4 冷却至室温时 Mises 应力及各方向残余应力分布云图。(a) Mises 应力云图；(b) 沿扫描方向应力云图；(c) 沿搭接方向应力云图；(d) 沿沉积方向应力云图

Fig. 4 Distributions of Mises stress after cooling to room temperature and residual stress of each direction. (a) Mises stress; (b) stress along scanning direction; (c) stress along overlapping direction; (d) stress along deposition direction

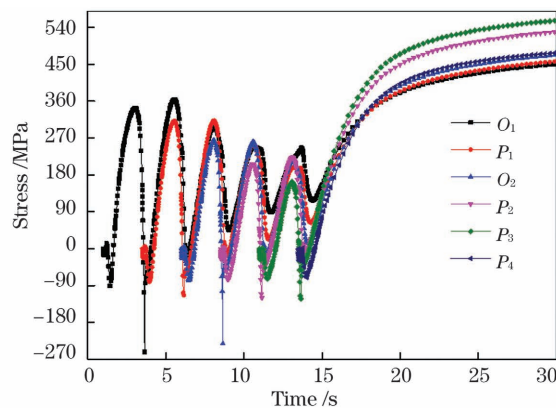


图 5 特征点沿扫描方向的应力随时间的变化曲线

Fig. 5 Stress varying with time of feature points along scanning direction

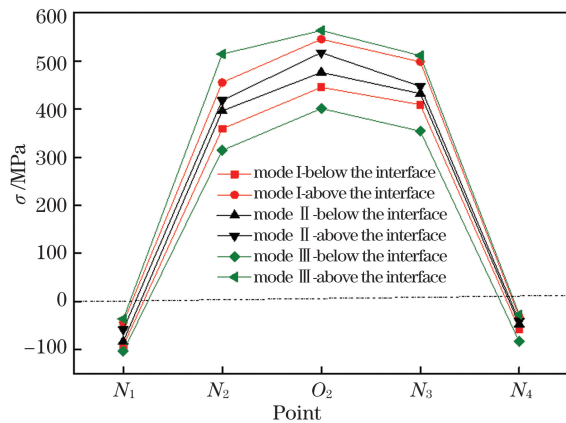


图 6 不同过渡方式下界面处特征点的残余应力分布曲线
Fig. 6 Residual stress distribution curves of feature points at interface under different transition modes

大拉应力和压应力分别为 563 MPa 和 -103 MPa, 分别出现在过渡方式为 100% TC4 过渡到 100% TC11 的界面上方 O_2 点和界面下方 N_1 点。比较 3 种过渡方式可以看出, 过渡方式为 100% TC4 过渡到 100% TC11 的界面处应力的不连续性最明显, 200 MPa 应力最大跳跃值发生在 N_2 点, 第 I 种过渡方式和第 II 种过渡方式下应力分布趋于稳定且应力跳跃值较小。分析第 II 种过渡方式下界面处上下区域残余应力的不同, 主要是由上下区域经历了不同的激光热扫描所致, 而不是由材料的属性差异产生的, 因此差别较小。

取不同过渡方式下界面中间区域 N_2 、 O_2 、 N_3 3 个点的平均拉应力 σ_m , 进一步研究残余应力和梯度材料中 TC11 含量的关系, 结果如图 7 所示。可以看出界面处的平均拉应力和梯度材料中 TC11 含

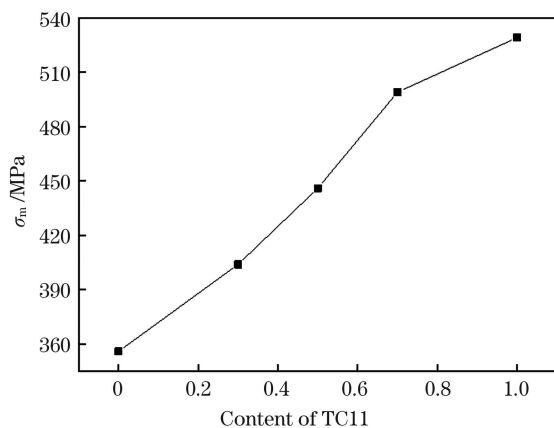


图 7 不同过渡方式下界面处平均残余应力和 TC11 含量的关系

Fig. 7 Relationship between average residual stress and TC11 content at interface under different transition modes

量相关, 随着梯度材料中 TC11 含量的增加, 残余拉应力逐渐增大。这主要是由于 TC11 相对 TC4 具有较大的弹性模量和热膨胀系数, 在材料组分不同的两区域界面处位移和应变是连续的, 因此界面两侧的残余应力不连续分布且在靠近 TC11 含量大的一侧应力较大。

5 结 论

基于半球体热源模型、生死单元技术和复合材料等相关理论, 建立了激光增材制造梯度材料残余应力分析的热力耦合有限元模型。温度场计算结果表明: 激光作用区域温度梯度较大, 远离激光源作用的区域温度较低且分布平缓。不同过渡方式下温度场的变化规律近似, 第 II 种过渡方式下交界面上节点温度峰值相对较小, 而第 III 种过渡方式下交界面上节点温度峰值相对较大。

激光增材制造过程中残余应力主要表现为拉应力, 且激光扫描方向的残余应力远大于其他 2 个方向的应力。3 种过渡方式的界面处残余应力的分布规律基本相似, 呈倒碗状分布, 中间为较大拉应力, 而两端拉应力急剧减小且分别出现较小的压应力。不同材料组分交界面处的残余应力分布具有不连续性, 靠近 TC11 含量高的一侧的残余应力要大于另外一侧, 残余拉应力随着 TC11 含量的增加逐渐增大。

参 考 文 献

- [1] Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
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.
- [2] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
- [3] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2015, 45(9): 1111-1126.
林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造 [J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [4] Xie H, Zhang A F, Li D C, et al. Research on the

- cracking of $Ti_6Al_4V-CoCrMo$ gradient material fabricated by laser metal direct forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1103003.
- 解航, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 $Ti_6Al_4V-CoCrMo$ 梯度材料开裂研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103003.
- [5] Sun C, Sun Y Z, Liu J, et al. Temperature field prediction and microstructure analysis of gradient TC4/TC11 titanium alloy deposited by laser additive manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(4): 96-101.
- 孙成, 孙亦璋, 刘金, 等. 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[J]. 航空制造技术, 2018, 61(4): 96-101.
- [6] Hao Y B, Zhang G H, Ma G Y, et al. Cracking mechanism of SS316/Ni20 composite fabricated by laser engineered net shaping[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(12): 2501-2510.
- 郝云波, 张国会, 马广义, 等. 激光近净成形 SS316/Ni20 复合材料的开裂机理[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2501-2510.
- [7] Liu S, Wang Y, Liu C S. Application of laser melting deposition technique in preparation of functionally gradient materials [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 47-56.
- 刘帅, 王阳, 刘常升. 激光熔化沉积技术在制备梯度功能材料中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 47-56.
- [8] Zhan Y, Liu C, Zhang J J, et al. Measurement of residual stress in laser additive manufacturing TC4 titanium alloy with the laser ultrasonic technique[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 762: 138093.
- [9] Yao H S, Shi Y S, Zhang W X, et al. Numerical simulation of the temperature field in selective laser melting[J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 456-460.
- 姚化山, 史玉升, 章文献, 等. 金属粉末选区激光熔化成形过程温度场模拟[J]. 应用激光, 2007, 27(6): 456-460.
- [10] Labudovic M, Hu D, Kovacevic R. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(1): 35-49.
- [11] Xie R D, Zhu J W, Zhang H, et al. Review of detection, analysis and control of temperature field in laser additive manufacturing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050003.
- 解瑞东, 朱尽伟, 张航, 等. 激光增材制造温度场检测分析与控制综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050003.
- [12] Dai K, Shaw L. Finite element analysis of the effect of volume shrinkage during laser densification [J]. Acta Materialia, 2005, 53(18): 4743-4754.
- [13] Yilbas B S, Arif A F M. Material response to thermal loading due to short pulse laser heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(20): 3787-3798.
- [14] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [15] Liu P, Wan Z Q. Modified method for the prediction of effective elastic modulus of composite materials [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2007, 10(1): 21-23.
- 刘平, 万泽青. 复合材料等效弹性模量预测方法的改进[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2007, 10(1): 21-23.
- [16] Fahmy A A, Ragai A N. Thermal-expansion behavior of two-phase solids[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(13): 5108-5111.
- [17] Campbell I E, Sherwood E M. High-temperature materials and technology [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1968, 115(4): 115C.

Finite Element Analysis of Residual Stress in TC4/TC11 Titanium Alloy Gradient Material Produced by Laser Additive Manufacturing

Fan Peng, Pan Jiateng, Ge Yiming, Zhan Yu*

College of Sciences, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract

Objective As the core technology which leads the future development direction of the manufacturing industry, laser additive manufacturing (LAM) of functionally gradient materials (FGMs) has attracted significant attention recently. This technology can achieve the gradient change of component composition, microstructure, and properties by

adjusting the proportion of powder conveying and laser-forming process. TC4/TC11 gradient titanium alloy has broad application prospects in the manufacture of large and complex key titanium alloy components such as aircraft frame beams and engine blisks. However, because of the periodic, unsteady thermal cycling and the constrained rapid solidification of the moving molten pool in the additive manufacturing process, there is a high residual stress in the formed component. The nonuniformity of the composition of the gradient structure material further complicates the problem. Therefore, studying the temperature and stress fields in the LAM process is particularly important. In this study, the residual stress field of TC4/TC11 FGM fabricated via LAM was analyzed using the finite element method (FEM). The hemispherical heat source function and forced convection model were written in FORTRAN language and loaded into the model using DFLUX and FILM subroutines to achieve the thermal-mechanical coupling finite element analysis of the LAM process. This research has important reference significance for the measurement, control, and reasonable suppression of the residual stress in the additive manufacturing of FGM.

Methods The residual stress of TC4/TC11 FGM fabricated via LAM was investigated using FEM. First, the hemispherical heat source model was used as the loading function of the laser heat source. The basic theory and method of composite materials were used to calculate the density, elastic modulus, Poisson's ratio, yield strength, coefficient of thermal expansion, and specific heat capacity of gradient materials. Second, in the actual modeling analysis, to save the computational cost, half of the model was taken for modeling and symmetry constraints were set on the symmetry plane. Considering the size of the model and computational efficiency, a double-precision grid was selected. The fine grid was set in and near the sedimentary area, while the grid was sparse and far away from the sedimentary area. Finally, the birth-death element technology was used to simulate the additive manufacturing process. The synchronous loading of the moving heat source was achieved by killing and activating the element. The standard thermal-mechanical coupling analysis method was used to calculate the final residual stress.

Results and Discussions Temperature and stress fields of the LAM process are calculated using FEM. The temperature distribution of each layer at different time is presented. The temperature of the laser action center is about 1600 °C. The temperature distribution can approximately describe the situation of the molten pool. The temperature in the center of the molten pool is higher, and the temperature gradient is larger. In the region far away from the laser source, the temperature is lower and the distribution is flat (Fig. 2). The residual stress calculation results show that the residual stress mainly appears in the deposition area, the stress distribution in the middle area is uniform, the stress on the substrate is small, and there is a stress concentration effect at the junction of the substrate and sample. The residual stress along the laser scanning direction is larger than that in the other two directions. Most of the residual stress along the stacking direction is compressive stress; there is a small tensile stress around the specimen and substrate (Fig. 4). The maximum tensile and compressive stresses are 563 and -103 MPa, respectively, which appear in the transition mode III. Results show that the stress discontinuity at the interface of the transition mode III is obvious; the maximum stress jump value is 200 MPa. The stress distribution tends to be stable, and the stress jump value is smaller under the other two transition modes (Fig. 6).

Conclusions In this study, the thermal-mechanical coupling finite element model for residual stress analysis of LAM is established based on the hemispherical heat source model, birth-death element technology, and composite theory. The temperature field calculation results show that the temperature gradient in the laser region is large and the temperature distribution is small and flat in the region far away from the laser source. The results show that the variation in the temperature field under different transition modes is similar. The temperature peak value at the interface of the transition mode II is relatively small, whereas that at the interface of the transition mode III is relatively large. The residual stress in the LAM process is mainly tensile stress. The residual stress along the laser scanning direction is larger than that in the other two directions. The results show that the distribution of residual stress at the interface of the three transition modes is similar, and the distribution is with the inverted bowl shape. The tensile stress is larger in the middle and then decreases sharply toward both ends; the compressive stress is smaller at both ends. The distribution of residual stress at the interface of different material components is discontinuous. The stress near the side with high TC11 content is larger than that on the other side. The residual tensile stress increases with the increase in TC11 content.

Key words laser technique; laser additive manufacturing; finite element; gradient material; residual stress

OCIS codes 140.3590; 140.3390; 160.3380