沉积态增材制造过程中的沉积路径影响研究

闫五柱*,赵万嘉,岳珠峰

西北工业大学力学与土木建筑学院,陕西西安710129

摘 要:为了揭示沉积态增材制造(AM)过程中沉积路径的影响,采用有限元(FEM)法研究了6种典型的沉积路径下的瞬态温度、瞬态应力、残余应力和残余变形。研究结果表明,在成形过程中,沉积路径对热传导和瞬态温度分布有显著影响, 从而在冷却至室温后引起不同的残余应力和残余变形。之字形沉积产生的残余应力和残余变形最大,隔行沉积产生的残余 应力和残余变形最小,可认为是最优方案。本文结论可为沉积态增材制造工艺沉积路径方案的制订提供重要参考依据。

关键词:增材制造,沉积路径,热传导,残余应力,翘曲,有限元

中图分类号: V261 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.03.058

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 是指工程零件 通过逐层添加材料的方式来生产的过程。增材制造过程首 先将零件分解为许多薄层。对于每一层,计算机生成指定的 路径并发送指令到增材制造设备。与传统的制造过程相比, 增材制造具有许多不可比拟的优势^[1-4]。首先,增材制造过 程是通过把零件分解为二维薄层来实现,有利于制造过程的 自动化。其次,增材制造可以有效地降低制造成本并缩短原 型设计阶段的设计周期。另外,增材制造可以利用多种材料 制造零件^[5],尤其是功能梯度材料,能够根据设计需求来调 整材料属性。增材制造技术正在引起来自学术界与制造业 的更多关注,并被称为是一项有可能为产品设计带来革命性 变革的新技术^[6-9]。

目前,增材制造技术大致可分为三类:成形金属沉积^[10-13]、直接激光沉积^[14-16]和电子束沉积^[17,18]。不同的增 材制造技术互为补充,需根据沉积尺寸、速度、表面质量和技 术复杂程度来选用。

金属材料的增材制造技术是为了应对航空航天领域需 求而产生的,被业内专家普遍看作是增材制造技术领域具有 高难度的前沿发展方向^[19]。增材制造技术成形过程如图1 所示,在真空环境中利用高能束(激光、电子束、电弧等)在 基体上形成熔池,同时向熔池中同步送粉(送丝)。目前,该 技术已在镍基高温合金和钛合金领域的研究较为成熟;镁、 铝等高活性低熔点合金也正在探索中^[20]。增材制造技术可 以通过逐层添加的方式生产出复杂零件,尤其适用于铸件和 锻件修复或添加结构细节。





增材制造技术应用的最大障碍是在制造过程中会产生 残余应力和残余变形,最终导致产品的失效。因此,许多学 者对增材制造过程中的残余应力和残余变形进行了研究。 Nickel 等^[18]研究了形状沉积制造技术 (Shape Deposition Manufacturing, SDM) 制造零件的残余应力和残余变形。

收稿日期 : 2017–12–25 ; 退修日期 : 2018–01–13 ; 录用日期 : 2018–02–09 基金项目 : 航空科学基金 (2016ZD53036) ; 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (3102017jghk02006 , 3102015qd0035)

*通信作者.Tel.:029-88431002 E-mail:yanwuzhu@nwpu.edu.cn

引用格式: Yan Wuzhu, Zhao Wanjia, Yue Zhufeng. Study on the role of deposition path in additive manufacturing process[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (03):58-66. 闫五柱,赵万嘉,岳珠峰. 沉积态增材制造过程中的沉积路径影响研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (03):58-66. Dai和 Shaw^[5]研究了由金属和陶瓷粉末固体自由成形板件的热应力和翘曲。Hussein等^[21,22]研究了选择性激光熔化 单层温度和应力场。研究表明,许多工艺参数会影响增材制 造零件的残余应力和残余变形,如基板初始温度、高能束流 功率和扫描速度等。另一个会显著影响增材制造工件残余 应力和残余变形的因素是沉积路径。虽然一些学者开展了 有限元分析和试验验证,但通常局限于某一类沉积路径,如 逐行扫描和环形扫描^[11,15,18]。对于典型沉积路径的全方面 研究和对比尚未见报道。

本文考虑了6种典型沉积路径(隔行、之字形、逐行、由 内向外、由外向内和 Hilbert 分形),对增材制造过程开展了 大量的有限元模拟,获得每一种沉积路径下的瞬态温度场、 残余应力和残余变形,并对沉积路径进行优化。本文结论可 为增材制造沉积路径的选择提供重要的理论依据。

1 有限元模型

有限元分析需要先构建控制方程,然后通过 Galerkin 法将待求问题演化为代数方程组。

1.1 热传导微分方程

各向同性材料的非稳态导热微分方程为[23]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right) = 0$$
(1)

式中:x, y, z为空间坐标,t为时间;T(x, y, z, t)为温度场; $\lambda = \lambda(t)$ 为材料热导率; ρ 为材料密度;c(T)为材料比热容; Q(x, y, z, t)为内部热源(如潜热)密度。该控制方程的定 解边界条件归为三类:

第一类边界 (Γ_1) 条件为给定温度边界条件:

$$T(x, y, z, t) = T(x, y, z, t)$$
⁽²⁾

式中: $\overline{T}(x, y, z, t)$ 为给定的边界温度。

第二类边界 (Γ_2) 条件为给定热流密度型边界条件:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \mathbf{n}_{x} + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \mathbf{n}_{y} + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \mathbf{n}_{y} + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \mathbf{n}_{z} = \frac{q}{\lambda}$$
(3)

式中:q是在边界上给定的热流密度, n_x , n_y , n_z 为边界外法 线单位矢量。

第三类边界条件(Γ₃)为给定对流换热型边界条件:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \mathbf{n}_{x} + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \mathbf{n}_{y} + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \mathbf{n}_{z} = \frac{h}{\lambda} (T_{a} - T)$$
(4)

式中:Ta为外界环境温度;h为对流换热系数。

金属在凝固过程中会释放大量结晶热,称为潜热。潜 热计算中使用等效比热容处理,由于对流换热和辐射换热计 算量较大,所以工程计算中经常将对流换热和辐射换热使用等 效传导率或者等效传导系数代替,本研究也采用了这一近似。

有限元法将微分方程(1)在空间离散为网格,用形函数 N 为基,时域上则离散为常微分方程:

$$C\dot{T} + KT = P \tag{5}$$

式中: C 为热容矩阵, K 为热传导矩阵, P 为温度载荷矢量, T 为节点温度矢量, r 为温度矢量对时间的导数。C, K, P 由 单元热容矩阵 C^e、单元热传导矩阵 K^e 和单元温度矢量荷载 P^e 集成。

$$\boldsymbol{C}_{ij}^{e} = \int_{\Omega} \rho c N_{i} N_{j} d\Omega$$

$$\boldsymbol{K}_{ij}^{e} = \int_{\Omega} \left(\lambda \frac{\partial N_{i}}{\partial x} \frac{\partial N_{j}}{\partial x} + \lambda \frac{\partial N_{i}}{\partial y} \frac{\partial N_{j}}{\partial y} + \lambda \frac{\partial N_{i}}{\partial z} \frac{\partial N_{j}}{\partial z} \right) d\Omega +$$
(6)

$$\int_{\Gamma_{i}} h N_{i} N_{j} \,\mathrm{d}\Gamma \tag{7}$$

$$\boldsymbol{P}_{i}^{\epsilon} = \int_{\Omega} \rho Q N_{i} \, \mathrm{d}\Omega + \int_{r_{2}} q N_{i} N_{j} \, \mathrm{d}\Gamma_{2} + \int_{r_{3}} h T_{a} N_{i} \, \mathrm{d}\Gamma_{3}$$
(8)

式(6)最常用的方法是直接积分法的两点循环公式^[24,25],为了保证解的稳定,避免振荡,有限方法一般采用后 差分的方式。ABAQUS[®]默认积分方案为后差分方式。

1.2 应力场的有限元模拟

小变形条件下应变与位移场的关系为:

$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2 \tag{9}$$

式中: ε_{ij} 为张量指标。

应变 ε 由三部分构成: 弹性应变 ε_{el} 、塑形应变 ε_{pl} 及热 应变 ε_{th} , 即:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{el} + \boldsymbol{\varepsilon}_{pl} + \boldsymbol{\varepsilon}_{th} \tag{10}$$

由温度变化产生的热应变
$$\varepsilon_{th}$$
 的分量为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{th}_{ij}} = \alpha \left(T - T_0 \right) \, \delta_{ij} \tag{11}$$

式中:α为材料的热膨胀系数。

力平衡条件为:

$$\sigma_{ii,i} + f_i = 0 \tag{12}$$

式中:σ为应力张量,f为体力。 在力边界上需要满足的边界条件为:

住力边齐上而安俩正的边齐宋什为:

 $\sigma_{ij,j} n_i = \overline{p_i} \tag{13}$

(14)

式中: pi为给定的边界力。

在位移边界上需要满足的边界条件为:

 $u=\overline{u}$

式中: ū 为给定的边界位移。

应力一应变关系也称为本构方程。弹性应力率与弹性 应变率满足胡克定律:

 $\sigma_{\rm el} = D : \varepsilon_{\rm el}$

式中:D为弹性张量,对于各向同性材料,D只有两个独立 参数:弹性模量 E 和泊松比 v。

1.3 **有限元模型**

本文所用的模型为10mm×10mm×1mm方形薄板。 如图2所示,模型划分为三层,每层划分为10×10个单元, 按照指定路径依次激活相邻单元并注入体热流来模拟金属 丝熔化和凝固过程。模型输入文件通过运行自主开发的前 处理软件来自动生成,其中输入信息包括:(1)包含网格信 息的MSH文件(节点坐标,单元);(2)包含体热流、薄膜系 数、冷源温度、分析步、增量步和沉积路径等参数的配置文 件;(3)包含热学和力学性能的材料参数。



图 2 模型有限元网格 Fig.2 Finite element mesh of the model

采用商用有限元软件 ABAQUS 进行热 – 力解耦分析, 模拟流程图如图 3 所示。模拟过程通过热分析阶段和力学 分析两个阶段实现。在热分析阶段,采用 8 节点线性热传导 六面体单元 (DC3D8)。在热传导分析中,单元按指定的沉 积路径逐个激活。每激活一个单元,设置一个分析步,并注 入体热流 4.5×10° (J/(s・m³),使得单元瞬态温度略高于熔 点。通过程序对模型外表面自动检测更新。通过设置薄膜 系数和冷源温度 (室温 20℃)实现热交换。整个分析过程 由 300 个分析步组成,分析结束后冷却至室温。在力学分析 阶段,采用同样的有限元网格,单元类型为 C3D8R (8 节点 六面体减缩积分单元)。将热分析阶段得到的瞬态温度场导 入力学分析中作为每个分析步的初始条件,最终获得工件的 应力场和变形情况。为了避免薄板发生平动和旋转,对首个 激活的单元施加固定约束,其余单元可自由变形。



图 3 有限元模拟流程 Fig.3 Flow diagram of the FE simulation process

1.4 沉积路径

沉积路径可以通过修改配置文件中的相关参数来设定。本文所考虑的6种典型的沉积路径如图4所示,所采用的材料属性及工艺参数均相同,以研究沉积路径的影响。



1.5 材料

本文所采用的材料为钛合金 Ti-6Al-4V, 包含 90% Ti, 6% Al 和 4% V (wt%)。输入有限元的材料物性参数见表 1^[26]。 表1中,l为热导率,c为比热容,a为热膨胀系数,E为弹性 模量, E_{T} 为切变模量, Y_{s} 为屈服应力, ρ 为密度, T_{m} 为熔点, L_{f} 为相变潜热,v为泊松比。

表 1 钛合金 Ti-6AI-4V 物性参数 Table 1 Material properties of Titanium alloy Ti-6AI-4V

$T/^{\circ}C$	20	100	200	300	400	500	1630	1800	1900 14.13	443K/mn
$c/(J/(kg \cdot C))$	611	624	653	9.80 674	691	703	743	743	743	巨时 六年
$a/(10^{-6} \text{ °C}^{-1})$	9.1	9.2	9.3	9.5	9.7	10.0	12.2	13.8	13.8	四时,王
E/GPa	109	99 42	93	87	77	71		_	—	导致温度
$E_{\rm T}/{\rm GPa}$	860	43 736	613	58 543	532	508	_	_	_	— [—] 厚i
$\rho/(g/cm^3)$	4.44	_	_	_	_	_		_	_	
$T_{\rm m}$ /°C	1630	_	—	_	_	_	_	—	—	小了整个
$L_{\rm f}$ (J/g)	296	_	_	_	_	_	_	_		增加,入
	NT11 +2.39e +1.59e +0.00e +1.59e +0.00e +1.59e +1.59e +1.59e +0.00e +1.59e +1.59e +0.00e NT11 +1.78e +1.18e +5.92e +0.00e	++03 ++03 ++02 × 之≒ ++00 × 之≒ ++00 → × 之≒ ++03 → ++× 逐 ↑ → × ○ +× ○ +× ○ +× ○ 0 ++03 → 0 ++03 → 0 ++03 → 0 ++03 → 2 ++03 → (- - - - - - - - - - - - - - - - - -	字形() 子(第- 可外()	育──层) 育──层)		0		NT11 +2.3 +1.5 +0.0 NT11 +2.3 +1.5 +7.7 +0.0 NT11 +2.3 +1.5 +7.6 +0.0 +1.5 +2.0 +1.5 +0.0	31e+03 54e+03 70e+02 00e+00 ↓↓× 1e+03 9e+02 00e+00 ↓ ↓ 38e+03 38e+03 39e+02 00e+00 ↓ ↓× 面内向	3: (第二层) 3: (第二层) 4: (第二层) 1: (第二层) 1: (第二层)
	+2. +1 +8 +0	.52e+ .68e+ .39e+ .00e+ ,00e+	03 03 02 00 可内(多	第 一层)				+2.23 +1.48 +7.42 +0.00	3e+03 3e+03 2e+02 0e+00 ↓ ↓→ x 由外向	1内 (第二层)
	+1.88 +1.25 +6.27 +0.00	e+03 e+03 e+02 e+02 e+00 →×	行 (第	7				+1.8 +1.2 +6.0 +0.0	2e+03 2le+03 6e+02 0e+00 ↓ ↓ 、 隔	了(第二层)
	+2.55 +1.70 +8.51 +0.00	e+03 e+03 e+02 e+00 → x 希尔们	白特(多	第一层)				NT11 +2. +1. +7. +0.	27e+03 52e+03 57e+02 00e+00 、 、 希尔伯	田特(第二层) 日特(第二层)
								6	5UU B	冲心屈之刎



2 结果与分析

2.1 瞬态分析场

图 5 给出了 6 种不同沉积路径下每层的瞬态温度场。 从图 5 横向对比看出,层内温度梯度随层数的增加而减 小。以之字形沉积路径为例,在沉积第三层时的温度梯度为 443K/mm,远小于第一层的温度梯度。这是由于在沉积首 层时,空气热导率相对较低,已沉积材料周围温度较低,从而 导致温度梯度较大。相反,在沉积第三层时,先前沉积的第 一、二层已经凝固为致密固态,且具有良好的热导率,因而减 小了整个薄板的温度梯度。因此,在沉积过程中随着层数的 增加,入射高能束流功率也应适当增加,以保持工艺温度和



61

熔池尺寸的恒定。从图 5 纵向对比看出,沉积路径对层内瞬态温度梯度影响较为显著。以首层为例,采用隔行沉积路径时温度梯度最低(244.96K/mm),而采用之字形沉积路径时温度梯度最高(679K/mm)。

2.2 热传导分析

从 2.1 节的分析中可知, 沉积路径对瞬态温度梯度有显 著影响, 而这种现象可以通过不同沉积路径下的热传递分析 来解释。为了简便起见, 本部分仅考虑之字形、逐行和隔行 三种不同的沉积路径, 如图 6 所示。由图 6 热流矢量分布可 以看出, 在之字形和逐行沉积时, 热传导在 X 方向和 Y 方向 上均为单向传热。相反, 在隔行扫描时, 热传导在 X 方向和 Y 方向上均为双向传热。这是由于隔行沉积时, 熔池两侧均 存在已凝固的金属条带, 因而可以快速向两侧传热。由于在 Y 方向上传热较快, 使得在 X 方向上也发生双向导热。由上 述分析可知, 采用隔行沉积时热传递方向较多, 使得温度梯 度比之字形沉积和逐行沉积要低。



Fig.6 Heat flux vector distribution for different deposition paths

2.3 瞬态应力分布

考虑 2.2 节中的三种沉积路径,图 7 给出了首层中截面 位置 (垂直于 *X* 轴) 在不同时刻下的瞬态应力分布。在沉积 5 条线和 10 条线时的瞬态应力分布如图 7 所示。需指出的是, 对于这三种沉积路径,沉积线均平行于 *X* 轴 (如图 7 箭头所 示)。由图 7 可以得出:(1) 对于上述三种沉积路径, X 方向(沉积线方向)的应力 σ_x 比 Y 方向应力 σ_y 要大;(2) 采用隔行沉积路径时的瞬态应力明显小于其他两种沉积路径,这是由于采用隔行沉积路径时热传导性能优于其他沉积路径;(3) 比较两个时间点可以看出,高应力区随着沉积线的增加而不断前移。





2.4 残余应力

在增材制造过程中,温度梯度将引起变形失配,导致工件残余应力的产生。因此,减小增材制造过程中的温度梯度 是避免残余应力产生的有效途径。在冷却至室温后,每层的 面内残余应力如图 8 所示。从图 8 横向对比可以看出,最大 残余应力发生在首层。随着层数的增加,面内残余应力逐渐 减小。这是由于随着沉积层数的增加,先前沉积固化部分能 够快速传导熔池的热量,从而有效地降低了面内温度梯度。 另外值得注意的是,在Z方向的应力梯度,即层间面内应力 的差异。由图8可以看出,采用隔行沉积路径时Z向应力梯 度最小,而采用之字形沉积路径时,Z向应力梯度最大。为了 便于比较,6种典型沉积路径下的最大残余应力绘制在图9 中。根据沉积路径的不同,残余应力大小可以作如下排序:

 $\sigma_{2 \in \mathbb{R}} \approx \sigma_{\mathcal{B}_{\mathcal{T}}} > \sigma_{\pi \times \mathrm{hop}} > \sigma_{\pi$



2.5 翘曲变形

在力学分析阶段,将热分析阶段每个分析步得到的温 度场导人,作为力学分析的初始条件。图 10 给出了 6 种沉 积路径下的 Z 向翘曲变形云图。可以看出,最大翘曲发生 在固定端的对角位置。除之字形和逐行沉积路径外,翘曲 变形云图相对于对角线大致呈对称分布。对于之字形和逐 行沉积路径,其翘曲变形云图分别向 X 方向和 Y 方向偏移, 这是由沉积线的取向所引起的 (参照图 10 白色箭头)。为 了便于比较,6 种典型沉积路径下的最大翘曲如图 11 所示。 根据沉积路径的不同,最大翘曲量可以作如下排序:

U_{之字形}>U_{逐行}>U_{希尔伯特}>U_{内外旋转}>U_{外内旋转}>U_{隔行}

图 10 不同沉积路径下 Z 方向残余变形云图 Fig.10 The residual deformation in Z direction for different deposition paths

由图 11 可以看出,采用隔行沉积路径时翘曲量最小。 考虑到残余应力和翘曲变形最小,隔行沉积路径方案可以认 为是6种典型沉积路径中的最优方案。

3 结论

为了研究沉积路径对沉积态增材制造过程的影响规律,本文对6种典型沉积路径下增材制造过程开展了系统的 有限元模拟,主要结论如下:

(1) 瞬态温度和应力梯度随着沉积层数的增加而减小。

(2)沉积路径对残余应力和残余变形有显著影响。原因是热传导与沉积路径有关,从而导致不同的瞬态温度梯度和瞬态应力场。

(3) 采用隔行沉积路径能获得最小的残余应力和翘曲 变形。

参考文献

 Pham D T, Gault R S. A comparison of rapid prototyping technologies[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, 38 (10–11): 1257.

- [2] Jamieson R, Hacker H. Direct slicing of CAD models for rapid prototyping[J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1 (2): 4–12.
- [3] Jacobs P F. Stereolithography and other RP&M technologies-from rapid prototyping to rapid tooling[M]. Cleveland: Society of Manufacturing Engineers, 1996.
- [4] Sachs E M, Cima M J, Williams P, et al. Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model[J]. Journal of Engineering for Industry, 1992, 114 (4): 481– 488.
- [5] Dai K, Shaw L. Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders[J]. Acta Materialia, 2004, 52 (1): 69–80.
- [6] 黄卫东.如何理性看待增材制造(3D 打印)技术[J].新材料 产业,2013(8):9-12.
 Huang Weidong. How to view the technology of additive manufacturing (3D printing) rationally[J].Advanced Meterials

Industry, 2013 (8): 9–12. (in Chinese)

- [7] Sutradhar A, Park J, Carrau D, et al. Experimental validation of 3D printed patient-specific implants using digital image correlation and finite element analysis[J]. Computers in Biology and Medicine, 2014, 52; 8–17.
- [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. (in Chinese)
- [9] 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.
 Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42 (4): 1-4. (in Chinese)
- [10] Katou M, Oh J, Miyamoto Y, et al. Freeform fabrication of titanium metal and intermetallic alloys by three-dimensional micro welding[J]. Materials & Design, 2007, 28 (7): 2093–2098.
- [11] Clark D, Bache M R, Whittaker M T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203 (1–3): 439–448.
- [12] Baufeld B, Van d B O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition[J]. Science

Technology Advance Materialia, 2009, 10 (1): 1536-1542.

- Baufeld B, Biest O V D, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2010, 31 (1): S106-S111.
- [14] Kobryn P A, Semiatin S L. Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti–6Al–4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135 (2–3): 330–339.
- [15] Qian L, Mei J, Liang J, et al. Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti-6Al-4V samples[J]. Metal Science Journal, 2005, 21 (5): 597-605.
- [16] Dinda G P, Song L, Mazumder J. Fabrication of Ti-6Al-4V scaffolds by direct metal deposition[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2008, 39 (12): 2914–2922.
- [17] Murr L E, Gaytan S M, Ramirez D A, et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28 (1): 1–14.
- [18] Nickel A H, Barnett D M, Prinz F B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing[J]. Materials Science & Engineering A, 1999, 317 (1): 59–64.
- [19] 颜永年,李生杰,熊卓,等.基于快速原型的组织工程支架成 形技术 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (5):93-98.
 Yan Yongnian, Li Shengjie, Xiong Zhuo, et al. Fabrication technology of tissue engineering scaffold based on rapid prototyping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (5):93-98. (in Chinese)
- [20] 林鑫,黄卫东.应用于航空领域的金属高性能增材制造技术
 [J].中国材料进展, 2015, 34 (9): 684-688.
 Lin Xin, Huang Weidong. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015, 34 (9): 684-688. (in Chinese)
- [21] Hussein A, Hao L, Yan C, et al. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting[J]. Materials & Design, 2013, 52 (24): 638–647.
- [22] Klingbeil N W, Beuth J L, Chin R K, et al. Residual stressinduced warping in direct metal solid freeform fabrication[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44 (1): 57–77.

- [23] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The finite element method, 3[M]. London: McGraw-hill London, 1977.
- [24] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The element method: solid mechanics [M]. Butterworth-heinemann, 2000.
- [25] 王勖成.有限单元法 [M].北京:清华大学出版社,2003.
 Wang Xucheng.Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [26]《中国航空材料手册》编委会.中国航空材料手册:第4卷[S].北京:中国标准出版社,2001.

The Editorial Board of China Aeronautic Materials Handbook. China aeronautic materials handbook ; Vol. 4[S]. Beijing; Chinese Standards Press, 2001. (in Chinese)

作者简介

闫五柱(1985-)男,博士,讲师。主要研究方向:高温力学 行为研究、增材制造数值模拟及力学性能研究。 Tel:029-88431002 E-mail:yanwuzhu@nwpu.edu.cn

Study on the Role of Deposition Path in Additive Manufacturing Process

Yan Wuzhu*, Zhao Wanjia, Yue Zhufeng

School of Mechanics, Civil Engineering and Aarchitecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

Abstract: The present work aims to reveal the effect of deposition paths on transient temperature, transient stress, residual stress and residual warping in the Additive Manufacturing (AM) process. To this aim, 6 typical deposition paths were involved in the Finite Element Method (FEM) simulations of AM process by implementing a specially written program. The results showed that the deposition path had a remarkable influence on heat transfer and transient temperature distribution in the scanning process, resulting in different residual stress and residual warping after cooling to room temperature. The largest and smallest residual stress and residual warping were resulted from the zigzag and alternate-line paths respectively. The optimum deposition path, namely the alternate-line pattern, was determined with respect to the residual stress and residual warping. The present work provides important guidance on the selection of deposition paths for additive manufacturing.

Key Words: AM; deposition path; heat transfer; residual stress; warping; FM

Received: 2017-12-25; Revised: 2018-01-13; Ac

Accepted: 2018-02-09

Foundation item: Aeronautial Science Foundation of China (2016ZD53036); The Fundamental Research Funds of the Central Universities (3102017jghk02006, 3102015qd0035)

*Corresponding author.Tel.: 029-88431002 E-mail: yanwuzhu@nwpu.edu.cn