

数值模拟在激光选区熔化中的应用及研究现状*

梁祖磊, 孙中刚, 张少驰, 常 辉

(南京工业大学先进材料研究院, 南京 210009)

[摘要] 激光选区熔化(SLM)是采用高能激光将金属粉末逐层熔化堆积形成零件的增材制造技术,因 SLM 过程中熔池的加热冷却速度快,缺陷、应力和微观组织形成机理分析困难,数值模拟可展现 SLM 过程的细节,对于理解激光选区熔化现象和指导生产实践有重要意义。目前激光选区熔化数值模拟存在多种方法,本文将致力于系统综述激光选区熔化的基本特点,介绍几种常用的建模方法和研究现状并讨论 SLM 数值模拟的发展趋势。

关键词: 增材制造;激光选区熔化(SLM);数值模拟;熔池;热源模型

Application and Research Status of Numerical Simulation in Laser Selective Melting

LIANG Zulei, SUN Zhonggang, ZHANG Shaochi, CHANG Hui

(Institute of Advanced Materials, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

[ABSTRACT] Selective laser melting (SLM) is a new manufacturing technology which can build parts by using high energy laser beam to melt the deposited metal powder on platforms layer by layer. Since the melting and cooling speed of the melting pool is fast, it is difficult to analyze formation mechanism of stress, defects and microstructure. Numerical simulation can help show details of the SLM processes. So, it is of great significance for understanding the phenomena during the building and creating a guidance for the real works. There are many methods of SLM simulation and this article will focus on a systematic review of the basic characteristics of SLM, introduce some popular methods and research status and discuss development trends of the numerical simulation on SLM.

Keywords: Additive manufacturing; Selective laser melting (SLM); Numerical simulation; Melting pool; Heat source model

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.087

近年来,增材制造技术迅速发展,金属增材制造技术已经成为航空航天、汽车及生物医疗等领域的高效制造方法,为工业产品的研发和制造提供了新的思路^[1]。增材制造是依据三维模型数据将材料层层堆积建造零件实体的技术,相对于传统的模具制造、切削加工等“减材制造”,可以自由的制造复杂零件以及利用难加工金属^[2]。

激光选区熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)过程如图 1^[3]所示,激光能量在平面上服从高斯分布,金属粉末在激光的短暂辐照下吸收能量并快速熔化形成熔池,熔融金属在激光离开后快速凝固^[3]。激光和粉末的相互作用发生在微观尺度且作用时间极短,目前的仪器水平难以对 SLM 过程进行监测,且现有试验以成本高、效率低的试错法为主。SLM 数值模拟具有成本低、效率高和数据量大等优点,能够清晰直观地展现 SLM 过程的关键细节,可预测试验的效果,缩减试验变量范

围和减少试验成本,是研究 SLM 现象和机理的主要方法之一。

近几年,SLM 数值模拟技术高速发展,涌现了大量模拟方法和模型,取得了丰硕的成果;然而,对不同模拟方法及模型的认识还存在分歧之处,尚未发展出建立模型的标准或规则。基于此,本文将介绍常用的建模方法,综述数值模拟在 SLM 研究中取得的最新成果,如熔池

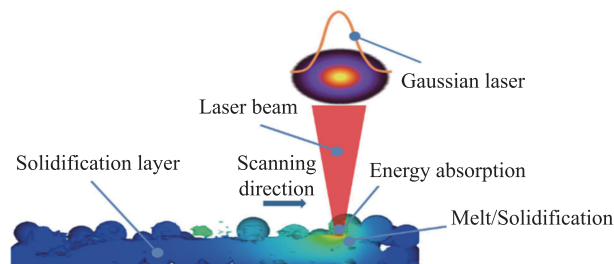


图1 SLM过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of SLM process

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875274)。

行为和应力演变等,最后阐述激光选区熔化数值模拟的发展趋势。

1 SLM 建模过程

SLM 建模过程主要包括建模方式和建模软件选择、激光热源模型的选择以及材料特性的设置等。

1.1 建模方法与建模软件

SLM 流场模拟一般由耦合式有限体积法或有限差分法实现,常用软件包括 Flow-3D^[3]、Fluent^[4-7] 和 OpenFOAM^[8] 等,部分流场模型使用有限元法,常用软件为 COMSOL Multiphysics^[9-12]; SLM 零件的翘曲变形对温度场的影响小, SLM 应力模拟一般由非耦合式有限元法实现,多用 ABAQUS^[13-15]、ANSYS^[16-19] 等实现。

1.2 热源模型的选择

热源模型模拟激光对粉床的作用方式,为模型提供热量的输入,不合适的热源模型直接影响模拟结果的精确性。热源模型主要有体热源模型和面热源模型两类。

体热源模型认为一部分激光会通过粉末间的空隙进入粉床内部对内部粉末进行加热,这与事实相符,多用于连续介质粉床。连续介质粉床把离散颗粒组成的粉床简化为由连续介质组成,以便于单元划分,可有效提高计算效率。体热源模型主要有两种形式:依据激光在粉床内的能量分布建立体热源模型以及依据熔池能量的分布建立的体热源模型。对于热传导系数较小的材料,忽略熔池流动将严重影响温度场模拟的精度^[7];第2种体热源模型考虑了熔池对热传导的影响,较前一种体热源模型精度更高。第1种体热源模型认为激光在粉床表面呈高斯分布,在粉床深度方向呈指数衰减,第1种体热源模型可用公式表示^[20-21]:

$$Q(x, y, z) = \alpha \frac{2AP}{\pi r^2} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{r^2}} e^{-\alpha z} \quad (1)$$

其中, α 为粉床的消光系数, A 、 P 、 r 分别为粉末对激光的吸收系数、激光功率以及激光斑点的半径, x 、 y 、 z 是以激光斑点中心为原点的坐标轴,其中 z 轴指向粉床下方。第2类体热源模型把熔池看作热源,熔池内部的能量分布影响零件整体的能量分布,双椭圆热源模型是第2类热源模型的典型代表,在焊接的数值模拟中使用频繁,用两个公式分别表示熔池前后两个部分的能量分布,熔池形貌如图2^[22]所示,双椭球热源模型公式如下^[22]:

$$Q(x_{hs}, y_{hs}, z_{hs}, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f AP}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x_{hs}^2}{a^2} - \frac{3y_{hs}^2}{b^2} - \frac{3z_{hs}^2}{c_f^2}\right), \quad z_{hs} \geq 0 \quad (2)$$

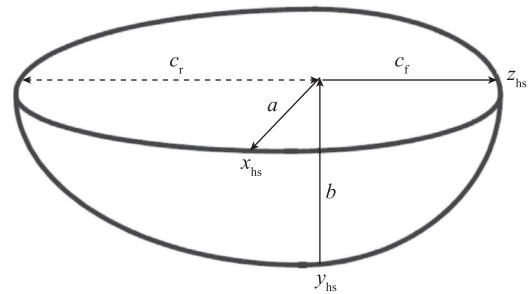


图2 双椭球热源模型
Fig.2 Double ellipsoid heat source model

$$Q(x_{hs}, y_{hs}, z_{hs}, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f AP}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x_{hs}^2}{a^2} - \frac{3y_{hs}^2}{b^2} - \frac{3z_{hs}^2}{c_f^2}\right), \quad z_{hs} \geq 0 \quad (3)$$

其中, x_{hs} 、 y_{hs} 、 z_{hs} 为以激光在粉床投射的斑点中心为原点的局部坐标轴, a 、 b 、 c_f 、 c_r 是前后两个椭球的尺寸, A 、 P 分别是粉末对激光能量的吸收系数和激光功率。 f_f 、 f_c 分别是前后两部分熔池的能量分布系数,可表示为:

$$f_f = \frac{2}{1+c_f/c_r} \quad (4)$$

$$f_r = \frac{2}{1+c_r/c_f} \quad (5)$$

表面热源模型认为激光光源作用于粉末颗粒的表面,热量通过材料热传导向粉末内部和基板传递,用于离散颗粒粉床的模型以模拟熔池流场,模型考虑了激光穿过粉末间隙对粉床内部进行加热的情况,这同样与实际相符^[23],典型表面热源公式如下^[13]:

$$Q = \frac{AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2+y^2)}{r^2}\right) \quad (6)$$

1.3 材料特性设置

一些模型对粉末材料特性的精确度要求不高,可直接把粉末的导热率折算为块状金属导热率的1%^[24],粉床的有效导热率 k 也可根据块状材料的导热率估算,估算方程为^[6, 12, 25]:

$$\frac{k}{k_f} = (1 - \sqrt{1 - \alpha}) \left(1 + \frac{\alpha k_r}{k_f}\right) + \sqrt{1 - \alpha} \left(\frac{2}{1 - \frac{k_f}{k_s}} \left(\frac{1}{1 - \frac{k_f}{k_s}} \ln \frac{k_s}{k_f} - 1 \right) + \frac{k_r}{k_f} \right) \quad (7)$$

$$k_r = 4B\sigma_e T_p^3 D_p \quad (8)$$

其中, α 为粉床的孔隙率, k_f 、 k_s 分别为周围气体的导热率和块状材料的导热率, k_r 为粉末颗粒之间由于热辐射而产生的导热率, B 为表观系数,通常取 1/3, σ_e 为 Stefan-Boltzmann 常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, D_p 为粉末材料的平均粒径, T_p 为粉末颗粒的温度。

粉床的松装密度 ρ_m 和热容 c_m 估算公式如下^[26]:

$$\rho_m = (1-\alpha)\rho_s + \alpha\rho_f \quad (9)$$

$$\rho_m c_m = (1-\alpha)\rho_s c_s + \alpha\rho_f c_f \quad (10)$$

其中, ρ_s 、 c_s 、 ρ_f 和 c_f 分别为块状材料的密度、热容以及周围气相的密度和热容。

2 SLM 过程的数值模拟

SLM 是一个热驱动过程,温度演变行为是 SLM 研究的基础,然而随着研究的深入,单一温度场模拟越来越难以满足研究需求。在 SLM 温度场的基础上进行熔池流场模拟可以再现加工过程中熔池内部的关键细节,有利于研究熔池热分布、缺陷演化、熔液飞溅以及球化等熔池行为。SLM 应力场模拟可预测零件的残余应力和变形,可用于优化扫描策略和设计支撑进而提高零件力学性能和尺寸精度。

2.1 SLM 熔池行为

SLM 过程中,快速移动的高能激光对粉末进行加热,使粉末完全熔化形成熔池。由于激光对粉末加热的不均匀以及热传导条件的不同,熔池温度呈中心高、四周低、表面高、底部低的分布趋势。熔池中心温度远高于熔池边缘温度(熔化温度),达到熔池沸腾温度,导致金属熔液的大量汽化,产生汽化反冲压^[6, 8, 27],公式为:

$$p_v(T) = p_0 \exp\left\{\frac{\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T}\right)\right\} \quad (11)$$

其中, p_v 、 p_0 、 H_v 、 R 和 T_v 分别为汽化反冲压、环境气压、摩尔汽化焓、气体常数和材料沸腾温度。熔池表面张力随温度的升高而减小,呈中心低、四周高的分布趋势,导致 Marangoni 效应,金属溶液在表面张力梯度的作用下从熔池中心流向熔池边缘^[28],其公式如下:

$$-\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12)$$

$$-\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (13)$$

其中, μ 、 u 、 v 和 $\partial \gamma / \partial T$ 分别为流体动力黏度、熔池在 x 轴方向的流速、熔池在 y 轴方向的流速和 Marangoni 常数。如图 3^[23] 所示,激光中心处粉末优先熔化,逐渐形成熔池;当温度升高至汽化温度,金属大量汽化形成汽化反冲压;汽化反冲压压迫熔池中心位置的金属熔液,迫使其向四周流动产生低洼区;当汽化反冲压大于表面张力产生的压力时,熔融金属溢出熔池形成飞溅;激光离开后,熔池温度迅速下降,汽化反冲压迅速降低,四周金属熔液对低压区填充,易捕获气体形成孔缺陷;同时熔池在 Marangoni 效应的作用下产生涡流,一定程度的涡流有利于气泡逃逸出熔池^[23]。熔池的稳

定性决定了 SLM 零件的表面粗糙度,熔池越不稳定表面越粗糙,较好的表面粗糙度可以减少对零件的二次加工,缩短制造时间和制造成本。能量密度越高,汽化反冲压和 Marangoni 效应越明显,熔池越不稳定,且易形成大量飞溅和气孔等缺陷,导致零件表面粗糙度变大;较小的能量输入也可能导致熔道间的冶金结合不牢固。

2.2 SLM 应力演变

由于激光对材料进行局部加热,热影响区的材料受其他区域材料约束无法自由热膨胀,表现为压应力;当激光离开后,熔池区域的材料凝固,无法自由冷缩,表现拉应力,热影响区仍为压应力^[29]; SLM 过程中,新沉积层温度高于已有的沉积层,导致样品顶部的冷却收缩量大于底部,样品受到向上和向内的热应力,从而产生翘曲变形,如图 4^[30] 所示。激光的往返运动引起反复的热应力加载,导致零件产生持续的翘曲变形,零件的尺寸精度和力学性能下降^[18, 31],退火处理可有效消除零件内部的残余应力,但无法消除零件在 SLM 过程中因热应力产生的翘曲变形和开裂^[32]。温度梯度是影响 SLM 过程热应力的主要因素,可通过调节扫描策略以及设置支撑来缓解热应力的影响,合理的扫描策略应能够降低温度梯度,避免热应力集中,热残余会随着熔道长度的增加而增加,热应力随热残余的增加而增加,合理的扫描策略应避免过长的熔道^[30],水平扫描策略引起显著的热应力各向异性,螺旋扫描策略会引起较大的应力和变形,层间交叉扫描策略和分区扫描策略能够有效降低 SLM 零件的应力和变形量;不同的扫描策略引起应力集中的位置不同,但所有的扫描策略都会在零件的边棱和零件与基板的结合面处造成应力集中^[14, 33]。支撑结构可以减少材料的使用,有效缓解 SLM 过程热残余的聚集,提高冷却速率,降低最高温度,还可以固定 SLM 零件以抑制其翘曲变形、微裂纹甚至避免开裂,提高制造过程的稳定性和零件的力学性能,其中抗疲劳性能较无支撑悬垂结构高出一倍以上^[18, 34]。

3 结论

(1) 随着数值模拟在 SLM 中的广泛应用,涌现出众多不同的模型处理方法;然而,不同模型对其处理方法的选择仍缺乏统一的认识,尤其是在热源模型的选择上分歧很大。

(2) SLM 模拟通常只考虑一层或几层,然而一个实际金属零件往往需要数百层甚至数千层,现存方法难以真实地再现零件的成形过程。因此,准确预测零件整体的温度和应力分布以及翘曲变形将是 SLM 模拟的重要方向。

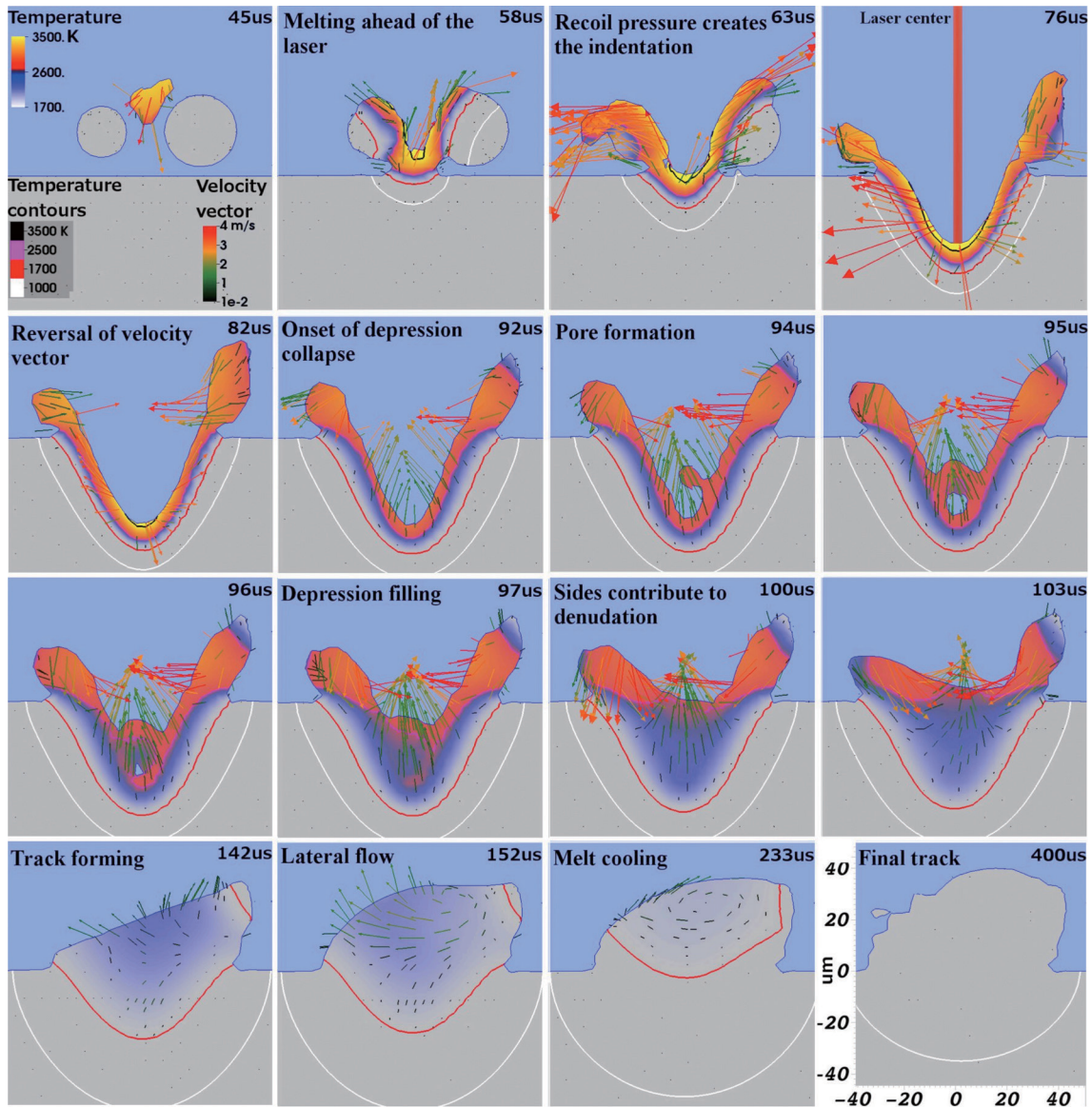


图3 SLM过程中熔池的演化过程
Fig.3 Evolutionary process of melting pool during SLM

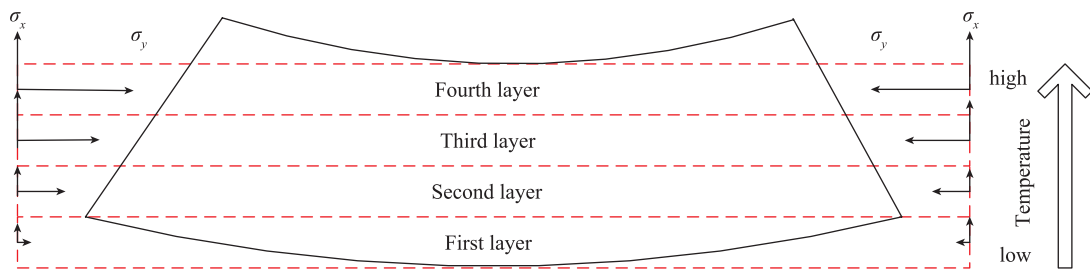


图4 翘曲原理图
Fig.4 Schematic diagram of warping

(3) 模拟技术的高速发展可以有力地推动增材制造技术的研究和发展。通过模拟技术,可以避免大量的高成本、低效率的试错试验,可以更清晰、直观地再现增

材制造过程中的关键细节;随着研究的深入,越来越接近实际情况的复杂模型才能满足需要,这也对增材技术的研究人员提出了挑战。

参考文献

- [1] 杨泽, 李建永, 高兴华, 等. 浅析增材制造技术在制造业中的特点与应用[J]. 机床与液压, 2017(3): 189–192.
- YANG Ze, LI Jianyong, GAO Xinghua, et al. Simple descriptions of the characteristics and applications of additive manufacturing technology in manufacture[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017(3): 189–192.
- [2] 杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 26–31.
- YANG Qiang, LU Zhongliang, HUANG Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 26–31.
- [3] WEI P, WEI Z, CHEN Z, et al. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder[J]. Applied Physics A—Materials Science & Processing, 2017, 123(8): 540.
- [4] DAI D, GU D, ZHANG H, et al. Influence of scan strategy and molten pool configuration on microstructures and tensile properties of selective laser melting additive manufactured aluminum based parts[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 91–100.
- [5] CHEN H, GU D, XIONG J, et al. Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 99–108.
- [6] DAI D H, GU D D. Effect of metal vaporization behavior on keyhole-mode surface morphology of selective laser melted composites using different protective atmospheres[J]. Applied Surface Science, 2015, 355(15): 310–319.
- [7] YUAN P P, GU D D. Molten pool behaviour and its physical mechanism during selective laser melting of TiC/AlSi10Mg nanocomposites: simulation and experiments[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(3): 0353033.
- [8] PANWISAWAS C, QIU C, ANDERSON M J, et al. Mesoscale modelling of selective laser melting: Thermal fluid dynamics and microstructural evolution[J]. Computational Materials Science, 2017, 126: 479–490.
- [9] CHEN Q, GUILLEMOT G, GANDIN C, et al. Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16: 124–137.
- [10] ANDREOTTA R, LADANI L, BRINDLEY W. Finite element simulation of laser additive melting and solidification of Inconel 718 with experimentally tested thermal properties[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2017, 135: 36–43.
- [11] LIU Y J, LIU Z, JIANG Y, et al. Gradient in microstructure and mechanical property of selective laser melted AlSi10Mg[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 1414–1421.
- [12] 刘臻, 张冬云, 冯喆, 等. 数值模拟选区激光熔化加工 Inconel 718 合金时搭接率对成型质量的影响[J]. 应用激光, 2017(2): 187–193.
- LIU Zhen, ZHANG Dongyun, FENG Zhe, et al. Effect of overlapping ratio on forming quality during numerical simulation selective laser melting of Inconel 718 alloy[J]. Applied Laser, 2017(2): 187–193.
- [13] LI C, LIU J F, FANG X Y, et al. Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 17: 157–168.
- [14] HAIDER ALI H G K M. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 712: 175–187.
- [15] WU J, WANG L, AN X. Numerical analysis of residual stress evolution of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 137: 65–78.
- [16] TIAN X, PENG G, YAN M, et al. Process prediction of selective laser sintering based on heat transfer analysis for polyamide composite powders[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 379–386.
- [17] ZENG K, PAL D, TENG C, et al. Evaluations of effective thermal conductivity of support structures in selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2015, 6: 67–73.
- [18] KAJIMA Y, TAKAICHI A, NAKAMOTO T, et al. Effect of adding support structures for overhanging part on fatigue strength in selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 78: 1–9.
- [19] 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: 638–647.
- [20] XU G X, WU C S, QIN G L, et al. Adaptive volumetric heat source models for laser beam and laser + pulsed GMAW hybrid welding processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(1–4): 245–255.
- [21] PARRY L, ASHCROFT I A, WILDMAN R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 1–15.
- [22] ZINOVIEVA O, ZINOVIEV A, PLOSHIKHIN V. Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing[J]. Computational Materials Science, 2018, 141: 207–220.
- [23] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36–45.
- [24] CRAEGHS T, CLIJSTERS S, YASA E, et al. Determination of geometrical factors in layerwise laser melting using optical process monitoring[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(12): 1440–1446.
- [25] DAI D, GU D. Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi10Mg powder[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88: 95–107.
- [26] FOROOZMEHR A, BADROSSAMAY M, FOROOZMEHR E, et al. Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed[J]. Materials & Design, 2016, 89: 255–263.

(下转第97页)

bolt[J]. Failure Analysis and Prevention, 2011, 6(3): 182–185.

[15] 李有堂, 于立群. 扭转条件下过渡圆角半径及径比对圆轴疲劳寿命的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(5): 32–35.

LI Youtang, YU Liqun. Influence of radius of rounded corner of stepped shafts and radius ratio on fatigue life of shafts subjected to torsion[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(5): 32–35.

[16] 罗学昆, 王欣, 胡仁高, 等. 孔挤压强化对 Inconel718 高温合金疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 327–329.

LUO Xuekun, WANG Xin, HU Rengao, et al. Effects of hole cold expansion on fatigue property of Inconel 718 superalloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 327–329.

[17] 裴旭明, 陈五一, 任炳义, 等. 加工工艺对 7075 铝合金紧固孔表面形貌和组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 655–660.

PEI Xuming, CHEN Wuyi, REN Bingyi, et al. Influence of machining processes on surface microphotograph and microstructure of fastening holes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 655–660.

[18] 姚倡锋, 武导侠, 靳淇超, 等. TB6 钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(21): 90–93.

YAO Changfeng, WU Daoxia, JIN Qichao, et al. Research on surface roughness and surface topography of high-speed milling TB6 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(21): 90–93.

[19] 周子同, 陈志同, 熊曦耀, 等. 钛合金 TB6 侧铣表面完整性实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 849–854.

ZHOU Zitong, CHEN Zhitong, XIONG Xiyao, et al. Experiment on surface integrity of side milling titanium TB6[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(6): 849–854.

[20] YAO C F, WU D X, JIN Q C, et al. Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 650–660.

[21] YANG D, LIU Z. Surface topography analysis and cutting parameters optimization for peripheral milling titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2015, 51: 192–200.

[22] 史恺宁, 靳淇超, 武导侠, 等. 钛合金 TB6 铣削参数对表面完整性的影响研究[J]. 航空制造技术, 2013, 56(7): 83–87.

SHI Kaining, JIN Qichao, WU Daoxia, et al. Effect of milling parameter on surface integrity of TB6 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(7): 83–87.

[23] BERRUTI T, UBERTALLI G. Influence of cutting parameters on residual stresses induced by milling in pressure die-cast aluminum alloy components[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2001, 123(4): 547–551.

[24] 胡奈赛, 张定铨. 残余力对疲劳寿命的影响[J]. 汽车工艺与材料, 1992(5): 16–18.

HU Naisai, ZHANG Dingquan. Effect of residual forces on fatigue life[J]. Automobile Technology & Material, 1992(5): 16–18.

[25] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015(6): 120–126.

HE Shaojie, YANG Wenyu, GUO Bupeng, et al. Research progress

on evaluation of surface residual stress and fatigue life of machined products[J]. Surface Technology, 2015(6): 120–126.

[26] 陈雷, 吕泉, 马艳玲, 等. 表面完整性对航空发动机零件疲劳寿命的影响分析[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(5): 47–50.

CHEN Lei, LÜ Quan, MA Yanling, et al. Analysis of effect of surface integrality on aero engine parts fatigue life failure[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(5): 47–50.

[27] 杜东兴. 表面改性对钛合金疲劳行为的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

DU Dongxing. Effects of surface modification and integrity on fatigue behaviors of titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

通讯作者: 李勋, 博士、副教授, 研究方向为高性能材料切削磨削技术及表面完整性, E-mail: lixun@buaa.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第91页)

[27] CHO J, NA S. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(24): 5372–5378.

[28] DAI D H, GU D D. Influence of thermodynamics within molten pool on migration and distribution state of reinforcement during selective laser melting of AlN/AlSi10Mg composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 100: 14–24.

[29] KRUTH J P, FROYEN L, VAN VAERENBERGH J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1): 616–622.

[30] LIU Y, YANG Y, WANG D. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1/4): 647–656.

[31] LEUDERS S, THÖNE M, RIEMER A, et al. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 300–307.

[32] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009(5): 774–778.

ZHANG Shuangyin, LIN Xin, CHEN Jing, et al. Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009(5): 774–778.

[33] CHENG B, SHRESTHA S, CHOU K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 240–251.

[34] WANG D, YANG Y, YI Z, et al. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(9/12): 1471–1484.

通讯作者: 孙中刚, 副教授, 研究方向为增材制造技术, E-mail: sunzgg@njtech.edu.cn.

(责编 铃兰)