

金属增材制造零件变形研究现状

谢瑞山^{a,b}, 陈高强^{a,b}, 史清宇^{a,b}

(清华大学 a. 机械工程系; b. 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 金属增材制造 (也称为 3D 打印) 被认为是制造业最有前景的技术之一, 主要应用在航空航天领域, 用于加工传统方法难以制备的大型复杂零件。该技术面临的一个关键瓶颈是零件的变形, 这将严重影响零件的尺寸精度, 甚至导致零件开裂而无法使用。首先介绍了研究增材零件变形的试验方法, 明确了激光位移传感器及数字图像相关技术是研究瞬态变形的有效实验手段。然后介绍了变形预测的数值模拟方法, 明确了热源模型、热边界条件及材料的力学性能本构是影响变形预测准确性的主要因素。最后总结了当前国内外变形快速计算方法的研究进展及发展动向。

关键词: 增材制造; 温度场; 变形; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.003

中图分类号: TG669 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0015-06

Review on the Thermal Distortion in Metal Additive Manufacturing

XIE Rui-shan^{a,b}, CHEN Gao-qiang^{a,b}, SHI Qing-yu^{a,b}

(a. Department of Mechanical Engineering; b. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Metal additive manufacturing (also known as 3D printing) is thought as one of the most promising technologies in manufacturing at the current state of the art, which has been applied in manufacturing large and complex metal components in aerospace and automotive industries, which cannot be manufactured by conventional methods. However, one of the critical bottlenecks faced by this technology is thermal distortion, which would influence the dimensional precision and even lead to cracking and unavailability of parts. This paper first introduced the main experimental methods for studying thermal distortion behaviors. Laser displacement sensor and digital image correlation method were thought as effective methods for studying transient distortion. Then the numerical simulation method for distortion prediction was introduced. It is clarified that the heat source model, thermal boundary conditions and mechanical properties of the material were the main factors affecting the prediction accuracy. Finally, the research progress and development trend of the high efficient distortion prediction methods were summarized and reviewed.

KEY WORDS: additive manufacturing; temperature field; distortion; numerical simulation

金属增材制造 (Additive manufacturing, AM), 也称 3D 打印, 作为战略性新兴产业, 受到世界各国高度重视及积极推广。该方法依据分层制造、逐层叠

加的原理, 通过高能束热源 (激光、电子束) 熔敷金属粉末, 直接从三维 CAD 模型制备零件的一种方法^[1]。其最初主要应用在航空、航天领域, 用于加工

收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1100100)

作者简介: 谢瑞山 (1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为增材制造过程模拟及焊接力学。

通讯作者: 史清宇 (1971—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为搅拌摩擦焊接与加工、焊接力学及模拟仿真。

传统方法难以制备的大型复杂零件^[2]。在增材制造过程中,由于不均匀的温度场、熔池的凝固收缩、组织转变等会造成构件变形并产生残余应力。当变形和应力累积到一定程度,甚至会导致零件层间分离、产生裂纹等缺陷^[3]。热应力和变形直接影响增材零件的形状和性能,比如大的变形将导致打印中断,甚至有可能引发变形开裂,影响加工和装配精度。此外打印后残余应力会降低零件的疲劳寿命,因此,王华明指出“内应力控制及变形开裂成为长期制约大型金属构件激光增材制造技术发展的瓶颈难题”^[4]。当前增材零件的热变形研究尚处于起步阶段,其主要研究热点是实验研究、数值模拟及快速计算方法,并在近年来有了一定的进展。为此,文中重点总结了以上3个方向的研究进展,旨在为增材制造零件热变形问题的深入研究提供借鉴。

1 实验研究现状

增材制造“从无到有”的工艺特点,使得当前采用实验的方法研究增材零件变形具有很大的挑战。一方面,一些学者通过测量增材结束后零件的最终变形以验证数值模型。如 Q. Yang^[5]在激光增材制造加工钛合金零件时采用激光三维扫描仪测量基板的最终变形,并与数值仿真计算预测的结果进行了对比研究。S. Afazov^[6]通过三维扫描仪获得增材制造叶片零件的形貌,并与参考模型进行了对比,从而评估了增材零件的残余变形偏差。以上这些方法只能在加工结束后进行,并不能揭示增材制造过程中加工零件的实时变形情况。另一方面,为了获得在增材制造过程中瞬态变形信息,一些学者开始尝试开发同步测量装置。E. R. Denlinger^[7]和 J. C. Heigel^[8]基于激光位移传感器开发了增材过程中的瞬态变形实时测量装置,如图1所示,其采用激光位移传感器实时测量了增材过程中悬臂基板由于翘曲导致的面外位移,并成功获得了 Ti6Al4V 和 Inconel®625 在增材过程中基板的翘曲变形随时间的演变历史。X. Lu 等也开发了与其类似的同步位移测量装置以验证其有限元模型^[9-10]。需要指出的是,由于熔池成形对打印零件形状有影响,通过基板实时测量位移是验证有限元模型非常有效的手段。然而,该方法仅通过基板有限几个点的位移历史来反映增材制造过程中的变形,而无法直接明确地获得增材零件的变形演变规律。

数字图像相关(Digital Image Correlation, 简称 DIC)由于非接触、高精度及可测量一个区域应变分布的特点,已经广泛用于动态应变场的实验测量。目前有研究人员将 DIC 技术应用到焊接过程中测量焊缝附近的应变场^[11-14]。M. D. Strycker^[11]通过对比 DIC 方法和应变仪法在焊接过程中的应变测量结果,其结果表明如果 DIC 方法能够捕捉到足够多的图片,

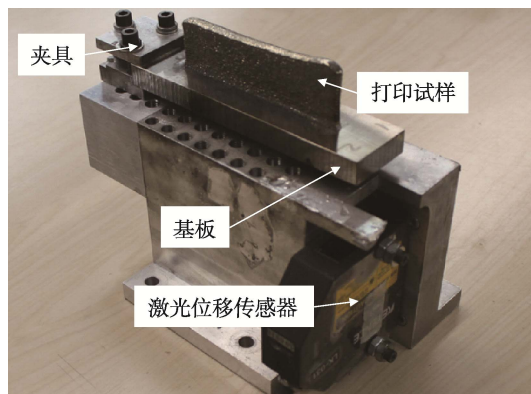


图1 增材制造过程中基板变形原位测量装置^[7]
Fig.1 Set-up of in situ measurement of substrate distortion during additive manufacturing

两种方法测量的应变演变规律具有很好的一致性。V. Ocelik^[12]设计了特殊的光学系统,通过 3D-DIC 实时观察了大功率激光表面熔敷过程中试样背面的应变场。N. Guo^[13]采用薄板进行 Tungsten inert gas (TIG) 焊接,通过 DIC 方法实时观察了薄板试样焊接区背面在焊接及冷却过程中变形的演变规律。J. Chen^[14]通过设计光过滤系统并在试样表面制备了特殊的高温散斑,避免了强烈弧光的影响,并实现了直接正面观测电弧焊接过程中熔池附近的应变场。此外,他们还建立了热力耦合有限元模型,结果表明,模拟预测的应变场和 DIC 方法测量的应变场具有很好的一致性,使得数值模拟和 DIC 方法得到互相验证。

虽然在焊接过程中 DIC 方法成功获得了近焊缝区材料的连续全场应变演变,然而增材制造“从无到有”的工艺特点,无法按照传统制造散斑的方法在工件表面制备随机散斑,使得 DIC 方法用于增材过程的应变场测量具有较大挑战。最近 M. Biegler^[15]和 R. Xie^[16]均尝试将 DIC 技术应用到增材过程中薄壁墙零件的应变测量。M. Biegler^[15]通过在已成形零件的表面制备以白色氮化硼为基体及黑色氧化铁粉末的耐高温散斑图样,其装置示意图如图2所示。M. Biegler 成功获得了薄壁零件在各方向的全场应变,并且表明薄壁墙打印时,垂直打印平面方向的面外应变较小,相对于其他方向的应变而言可以忽略。R. Xie^[16]设计了特殊的照明及光过滤系统,同时采用薄壁墙在打印过程中形成的表面纹理作为 2D-DIC 测量的“自然散斑”,也获得已成形薄壁零件在后续打印过程中的瞬态应变场。以上两个研究初步尝试了直接测量增材零件的变形,表明了 DIC 方法可用于研究增材零件在打印过程中的瞬态变形的可行性,并且是验证热力耦合有限元模型及研究增材过程瞬态热/力学行为有效的手段^[17]。

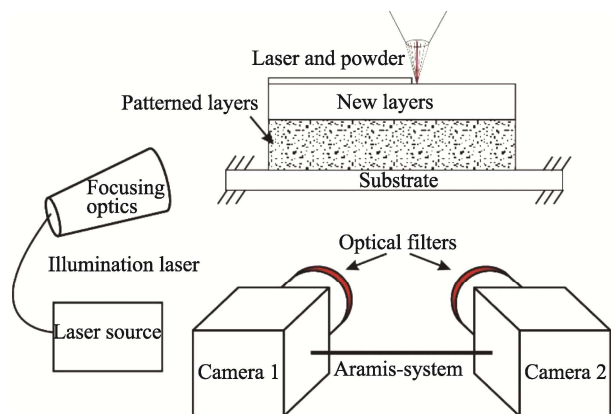


图 2 M. Biegler 设计的增材过程 3D-DIC 装置示意图^[15]
Fig.2 Diagram of 3D-DIC device during additive manufacturing in M. Biegler's paper

2 数值模拟研究现状

鉴于当前增材制造原位测量的局限性,数值模拟成为理解和揭示零件在增材制造过程中瞬态热/力学

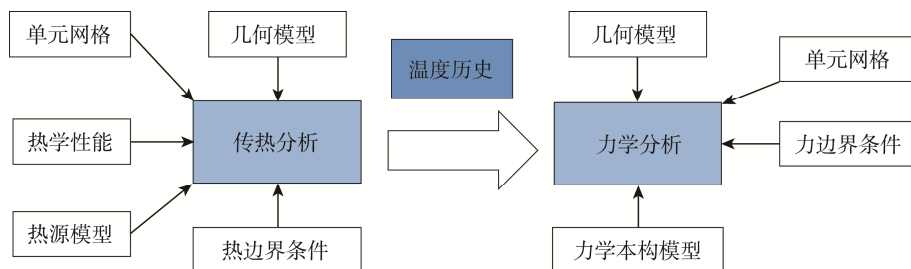


图 4 热力顺序耦合有限元模拟框架
Fig.4 Framework of thermal sequential coupled finite element modeling

2.1 传热分析

增材制造的热源模型决定了热量的输入密度和分布方式,目前大多采用焊接和激光熔敷模拟常见的高斯热源模型^[18—19]和 Goldak 双椭圆热源^[20—21]。此外,也有学者采用非高斯分布的能量分布。N. Contuzzi^[22]和 M. Matsumoto^[23]仅在表面激光作用的 5 个单元内施加固定能量输入,而 L. Ma^[24]将激光热输入看成固定温度载荷并随着沉积方向移动。以上通过经验确定的简化热源模型,在有限元传热分析时可以快速的求解。然而由于熔池内的热流密度分布按经验公式给出,忽略了较多熔池内的物理过程。T. Mukherjee^[25]提出采用综合考虑传热-流动-力学的计算模型,其首先通过 CFD 计算出温度场,然后将此温度场数据用于力学分析。通过该方法,可以获得相对准确的熔池内的温度场分布,然而其计算时间将明显增加。

此外,边界条件的设置对温度场分布影响较大。当前大部分的增材制造模拟要么忽略对流的影响,要么设置一个固定的均匀换热系数。另外有学者在增材

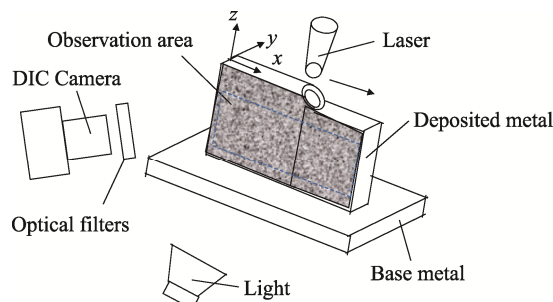


图 3 R. Xie 设计的增材过程 2D-DIC 装置示意图^[16]
Fig.3 Diagram of 2D-DIC device during additive manufacturing in R. Xie's paper

行为的有力手段^[10—13]。增材制造的热变形计算问题属于温度场和力场耦合求解的范畴。大量文献表明,顺序求解在减少计算量的同时并没有损失掉太多的计算精度,因此目前均以顺序耦合的方式求解增材的热力耦合问题。顺序耦合先先在热学网格模型上进行热传导、对流、辐射等的求解,求解结束后将节点温度施加在力学单元模型上进行力学分析求解,最后得到热应力和变形,如图 4 所示。

过程中设定一个固定的换热系数,然后在关闭保护气体冷却时设定另一个较小的换热系数^[5]。J. C. Heigel^[26]指出,在增材过程中工件表面的散热受到保护气体的影响,即零件不同位置处的散热系数与该位置到保护气体喷嘴的距离有关,其研究表明采用实验测量的对流模型可以获得更准确的温度场结果。

2.2 力学分析

在增材制造的过程中,不仅有金属的熔化与凝固,而且涉及到凝固金属的收缩、固态相变、塑性变形、加工硬化、变形后材料的回复与再结晶等物理现象。数值模拟时通常将以上现象进行简化,其中,热弹塑性模型得到了广泛的采用。力学分析中,材料的力学性能通常采用一系列在不同温度下测量得到的材料应力应变曲线^[5,25,27—29]。当前研究人员主要采用上述热弹塑性模型研究增材的工艺参数对应力变形的影响规律。

另外,一些研究人员发现材料的力学性能本构对应力及变形的结果影响较大。Z. Zhang^[30]建立了材料

性能依赖于温度及温度过程的材料模型,发现对于初始供货状态为固溶+时效处理的 6013-T6 铝合金而言,采用依据温度历史的材料模型可更准确地预测焊后残余应力和应变的分布。D. Qiao^[31]针对具有显著加工硬化的 304L 不锈钢与镍基合金 Alloy 600,在现有 Isotropic 加工硬化模型的基础上,考虑高温时应变硬化的回复,建立了动态应变硬化及软化模型。其研究表明采用该模型计算得到的焊接残余应力相比传统模型,更接近第三方机构的测量结果。E. R. Denlinger^[7,21]通过实验和原位变形测量结合的方式研究了 Ti6Al4V 电子束增材制造过程中的变形历史。通过对比模拟和实验结果,E. R. Denlinger 等发现增材制造的热力耦合模拟需要考虑退火温度,以避免应力变形过高估计,因此,采用了瞬时软化模型,并通过人为“试错”,发现将材料软化温度设置在 690 °C 时,模拟结果可以和实验结果更接近。后续学者^[9]针对 Ti6Al4V 材料也进行了类似的处理,但是需要设置不同的软化温度,才能跟实验结果更接近。目前材料在高温的变形机理及相关参数方面的研究还很匮乏,给数值模拟准确性带来了问题。

3 变形快速计算方法研究现状

当前常规的模拟方法仅适用数十厘米尺度,难以满足更大结构的变形预测的需求。模拟计算时间长的主要原因在于:单元网格数目多、局部温度不均匀、材料性能非线性以及力学本构非线性。

固有应变法是焊接中常用的变形快速计算方法,其最初由日本大阪大学教授上田幸雄在焊接模拟中提出^[32],其大致可分为以下 4 个步骤:① 在小试样上进行瞬态热力有限元分析;② 当模型冷却至室温后计算塑性应变分量及等效塑性应变;③ 将计算的塑性应变施加在实际需要模拟的大结构模型上;④ 在大结构模型上进行弹性计算预测最终的变形。最近 X. Lian^[33]将该方法应用在增材零件的变形预测,其研究表明固有应变法和传热移动热源方法预测的变形分布云图及数值均相差不大(如图 5 所示),而计算时间减小了约 20 倍。由于计算时间大大缩短,L. Chen^[34]将该方法应用在拓扑优化计算,进行设计支撑结构的形式以减小零件的变形开裂问题。

变形预测的另一种高效计算方法是温度函数法(或者称为等效温度法),最初提出来源于焊接变形预测^[35],主要包括以下步骤:采用移动热源法计算得到呈准稳态分布的焊接温度场;提取焊接准稳态温度场的温度分布信息,整理成 $T(x,y,z,t)=f(x)f(y,z)f(t)$ 的温度函数;以温度边界的形式,将温度函数逐节点读入力学分析模型中,进行焊接应力和变形的计算。温度函数法已经被应用于多种大型结构的焊接变形预测,其计算效率和准确性已经得到验证^[35—37]。最近,R. Xie^[38]将该方法发展应用到增材制造的薄壁墙零件的

变形预测。研究表明采用传统移动热源和温度函数法预测的变形分布云图及曲线趋势均一致,如图 6 所示。温度函数法在保证一定精度的同时计算时间减小 90% 以上,初步验证了等效温度法用于预测增材制造零件变形的可行性。

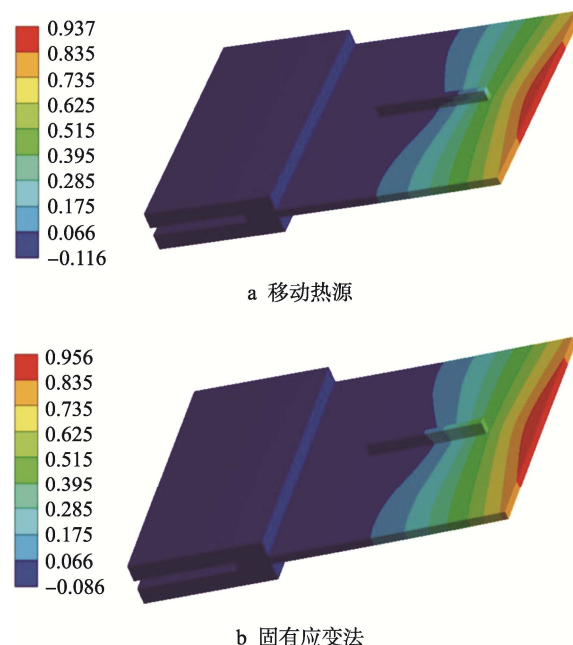


图 5 面外变形的对比^[33]

Fig.5 Comparison of out-of-plane distortion

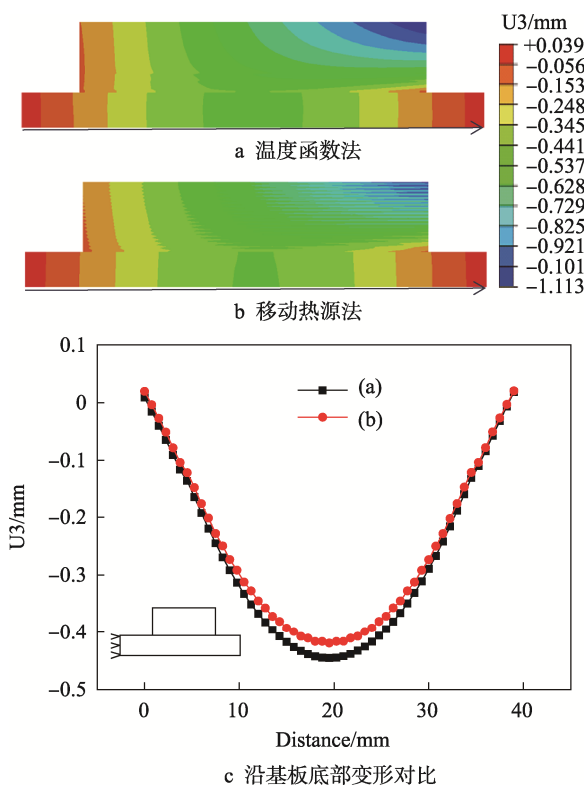


图 6 面外变形对比^[38]

Fig.6 Comparison of out-of-plane distortion

其他的高效计算方法还包括自适应网格技术以及子区域模拟方法。E. R. Denlinger^[39]将网格自适应技术应用在电子束沉积增材制造过程。在模拟增材过程中, 当前激活层的下方两层网格将进行合并, 由于网格数目减小, 从而减小了计算时间。王福雨^[40]提出子区域模拟方法, 该方法将整体的模型按照成形区域进行分解, 每个部分都可以进行单独的计算, 当每个子区域完成计算后, 将所需要的模拟结果进行叠加得到整体的模拟结果。研究表明用子区域模拟可以节省大量时间和对硬件的需求, 应力曲线叠加后与采用整体模拟的方法基本重合。

4 结语

1) 试验方面, 增材制造“从无到有”的工艺特点, 使得增材零件的变形研究具有很大的挑战。激光位移传感器及数字图像相关技术可获得增材过程中的瞬态信息, 是验证热力耦合有限元模型及研究瞬态热/力行为的有效手段。

2) 鉴于实验方法的局限性, 数值模拟成为理解和揭示零件在增材制造过程中瞬态热/力学行为的主要手段, 其中热源模型、热边界条件及材料的力学性能本构对热变形的准确预测具有较大影响。

3) 固有应变、温度函数等快速计算方法使得大结构的变形预测成为可能, 然而目前模拟的构件一般为典型薄壁墙和较小部件, 对于更大、更复杂结构的模拟还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 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 Bing-heng, LI Di-chen. Development of the Additive Manufacturing (3D Printing) Technology[J]. Machine Building and Automation, 2013, 42(4): 1—4.
- [2] 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.
LIN Xin, HUANG Wei-dong. Laser Additive Manufacturing of High-performance Metal Components[J]. Scientia Sinica Informationis, 2015, 45(9): 1111—1126.
- [3] SAMES W J, LIST F A, PANNALA S, et al. The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 315—360.
- [4] 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 Hua-ming. Material's Fundamental Issues of Laser Additive Manufacturing for High-performance Large Metallic Components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690—2698.
- [5] YANG Q, ZHANG P, CHENG L, et al. Finite Element Modeling and Validation of Thermomechanical Behavior of Ti-6Al-4V in Directed Energy Deposition Additive Manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 169—177.
- [6] AFAZOV S, DENMARK W, TORALLES B L, et al. Distortion Prediction and Compensation in Selective Laser Melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 17: 15—22.
- [7] DENLINGER E R, HEIGEL J C, MICHALERIS P, et al. Effect of Inter-layer Dwell Time on Distortion and Residual Stress in Additive Manufacturing of Titanium and Nickel Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 123—131.
- [8] HEIGEL J C, MICHALERIS P, PALMER T A. In Situ Monitoring and Characterization of Distortion during Laser Cladding of Inconel 625[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 135—145.
- [9] LU X, LIN X, CHIUMENTI M, et al. In Situ Measurements and Thermo-mechanical Simulation of Ti-6Al-4V Laser Solid Forming Processes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 153/154: 119—130.
- [10] LU X, LIN X, CHIUMENTI M, et al. Finite Element Analysis and Experimental Validation of the Thermomechanical Behavior in Laser Solid Forming of Ti-6Al-4V[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 30—40.
- [11] STRYCKER M D, LAVA P, PAEPEGEM W V, et al. Measuring Welding Deformations with the Digital Image Correlation Technique[J]. Welding Journal, 2011, 90(6): 107—112.
- [12] OCELÍK V, BOSGRA J, HOSSON J D. In-situ Strain Observation in High Power Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(20/21): 3189—3196.
- [13] GUO N, YIN X, LIANG J, et al. Weld Bead Distortion of Thin-plate Using Weak Digital Image Correlation Method[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(11): 4952—4958.
- [14] CHEN J, YU X, MILLER R G, et al. In Situ Strain and Temperature Measurement and Modelling during Arc Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 20(3): 181—188.
- [15] BIEGLER M, GRAF B, RETHMEIER M. In-situ Distortions in LMD Additive Manufacturing Walls Can be Measured with Digital Image Correlation and Predicted Using Numerical Simulations[J]. Additive Manufacturing, 2018, 20: 101—110.
- [16] XIE R, ZHAO Y, CHEN G, et al. The Full-field Strain Distribution and the Evolution Behavior during Additive Manufacturing Through In-situ Observation[J]. Materials & Design, 2018, 150: 49—54.
- [17] XIE R, CHENG G, ZHAO Y, et al. In-situ Observation and Numerical Simulation on the Transient Strain and Distortion Prediction during Additive Manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 494—501.
- [18] 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.
- [19] NEELA V, DE A. Three-dimensional Heat Transfer Analysis of LENSTM Process Using Finite Element Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9/10): 935—943.
- [20] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BLBBY M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299—305.
- [21] DENLINGER E R, MICHALERIS P. Effect of Stress Relaxation on Distortion in Additive Manufacturing Process Modeling[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 51—59.
- [22] CONTUZZI N, CAMPANELLI S L, LUDOVICO A D. 3D Finite Element Analysis in the Selective Laser Melting Process[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2011, 10(3): 113—121.
- [23] MATSUMOTO M, SHIOMI M, OSAKADA K, et al. Finite Element Analysis of Single Layer Forming on Metallic Powder Bed in Rapid Prototyping by Selective Laser Processing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 61—67.
- [24] MA L, BIN H. Temperature and Stress Analysis and Simulation in Fractal Scanning-based Laser Sintering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 34(9/10): 898—903.
- [25] MUKHERJEE T, ZHANG W, DEBROY T. An Improved Prediction of Residual Stresses and Distortion in Additive Manufacturing[J]. Computational Materials Science, 2017, 126: 360—372.
- [26] HEIGEL J C, MICHALERIS P, REUTZEL E W. Thermo-mechanical Model Development and Validation of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V[J]. Additive Manufacturing, 2015, 5: 9—19.
- [27] MUKHERJEE T, MANVATKAR V, DE A, et al. Mitigation of Thermal Distortion during Additive Manufacturing[J]. Scripta Materialia, 2017, 127: 79—83.
- [28] DENLINGER E R, HEIGEL J C, MICHALERIS P. Residual Stress and Distortion Modeling of Electron Beam Direct Manufacturing Ti-6Al-4V[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2014, 229(10): 1803—1813.
- [29] CAO J, GHARGHOURI M A, NASH P. Finite-element Analysis and Experimental Validation of Thermal Residual Stress and Distortion in Electron Beam Additive Manufactured Ti-6Al-4V Build Plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 409—419.
- [30] ZHANG Z, SILVANUS J, LI H, et al. Sensitivity Analysis of History Dependent Material Mechanical Models for Numerical Simulation of Welding Process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(5): 422—429.
- [31] QIAO D, FENG Z, ZHANG W, et al. Modeling of Weld Residual Plastic Strain and Stress in Dissimilar Metal Butt Weld in Nuclear Reactors[C]// ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, 2013: V06BTA091—V06BT06A.
- [32] UEDA Y, FUKUDA K. New Measuring Method of Three Dimensional Welding Residual Stresses Based on Newly Proposed Principle of Inherent Strain[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 1980, 18: 146—163.
- [33] LIANG X, CHENG L, CHEN Q, et al. A Modified Method for Estimating Inherent Strains from Detailed Process Simulation for Fast Residual Distortion Prediction of Single-walled Structures Fabricated by Directed Energy Deposition[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 471—486.
- [34] CHENG L, LIANG X, BAI J, et al. On Utilizing Topology Optimization to Design Support Structure to Prevent Residual Stress Induced Build Failure in Laser Powder Bed Metal Additive Manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 290—304.
- [35] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 焊接数值模拟中以温度为控制变量的高效算法[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 77—80.
- YAN Dong-yang, SHI Qing-yu, WU Ai-ping, et al. A High Efficiency Welding Simulation Method Based on Welding Temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 77—80.
- [36] 孙延军, 李德成, 张增磊, 等. MTFM的建立及在铝合金筒体结构焊接变形预测中的应用[J]. 金属学报, 2011, 47: 1403—1407.
- SUN Yan-jun, LI De-cheng, ZHANG Zeng-lei, et al. Establishment of Traveling Temperature Function Method and Its Application on Welding Distortion Prediction of Cylindrical and Conical Aluminum Alloy Structures[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47: 1403—1407.
- [37] YAN D, WU A, SILVANUS J, et al. Predicting Residual Distortion of Aluminum Alloy Stiffened Sheet after Friction Stir Welding by Numerical Simulation[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2284—2291.
- [38] XIE R, ZHAO Y, CHEN G, et al. Development of Efficient Distortion Prediction Numerical Method for Laser Additive Manufactured Parts[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022314.
- [39] DENLINGER E R, IRWIN J, MICHALERIS P. Thermo-mechanical Modeling of Additive Manufacturing Large Parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(6): 061007.
- [40] 王福雨. 钛合金复杂零件增材制造工艺的数值模拟[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- WANG Fu-yu. The Process's Numerical Simulation of Titanium Alloy Complex parts Additive Manufacturing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2015.