

Research Progress on Application of NDT in Additive Manufacturing Technique

Jianwei Chen¹, Yang Zhao^{1*}, Yang Ju², Shuai Liu¹, Jian Ma¹

¹Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan Shandong

²School of Mechanical, Nagoya University, Nagoya, Japan

Email: andyzhao@yeah.net

Received: Jan. 24th, 2018; accepted: Feb. 16th, 2018; published: Feb. 23rd, 2018

Abstract

The types of defects that may exist in the various stages of the additive manufacturing technology (AM) are discussed in this paper, and the requirement of NDT in each stage is put forward. The testing technology and its application status in the AM are summarized, and the importance of stress testing is emphasized. At last, the future of the development of NDT in AM has been prospected, and it is pointed out that the laser ultrasonic technology has great potential in the application of the AM.

Keywords

Nondestructive Testing, Additive Manufacturing, Residual Stress, Laser Ultrasonic

无损检测在增材制造技术中应用的研究进展

陈建伟¹, 赵扬^{1*}, 巨阳², 刘帅¹, 马健¹

¹齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东 济南

²名古屋大学机械学院, 名古屋, 日本

Email: andyzhao@yeah.net

收稿日期: 2018年1月24日; 录用日期: 2018年2月16日; 发布日期: 2018年2月23日

摘要

简要论述了增材制造技术各个工艺阶段可能存在的缺陷类型, 在此基础上阐述了增材制造技术对于无损检测的需求, 并总结了在增材制造过程中使用的检测技术及其应用现状, 强调了应力检测的重要性。最

*通讯作者。

文章引用: 陈建伟, 赵扬, 巨阳, 刘帅, 马健. 无损检测在增材制造技术中应用的研究进展[J]. 应用物理, 2018, 8(2): 91-99. DOI: 10.12677/app.2018.82011

后, 针对增材制造技术的需要对无损检测技术进行了展望, 并指出激光超声技术在增材制造中具有很大的应用潜力。

关键词

无损检测, 增材制造, 残余应力, 激光超声

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在传统的机械制造技术中, 通常采用铸造进行复杂工件的生产, 例如采用精密铸造或压力铸造[1]。同时, 随着锻造和模具成形技术的发展, 其产品已经很难加工或者已经不可能制造出来。因此, 工业发展迫切需要现有技术的重大改进或者新技术的出现, 因而增材制造技术的出现便具有重要的意义。激光增材制造技术是增材制造技术中最具代表性的一类, 按照其成形原理分类, 最具有代表性的是激光选区融化(SLM)和激光金属直接成型(LMDF)技术, 激光选区融化技术的原理如图 1 所示[2]。

当前, 增材制造技术已经成为工业生产中最有活力和前途的技术之一[3]。与传统的机械制造技术采用减材方式相比, 增材制造技术具有周期短、无模具、柔性高、不受材料和零件结构限制等一系列优点, 在汽车、医疗、电子、军工、航天航空等领域得到了广泛应用[4] [5] [6] [7]。通过采用蜂窝、晶格或其它的复杂结构, 还可以优化工件的重量和功能参数及减少壁厚等。对于所有的新技术而言, 质量控制是一个非常关键的问题。目前为止, 对于增材制造技术质量控制问题的研究还不够深入[8] [9], 而无损检测是提高增材制造质量控制水平的关键技术。本文对增材制造过程中的缺陷类型进行了总结, 指出了增材制造过程中的无损检测技术需求, 通过总结各种无损检测技术的优缺点得出了激光超声技术的应用潜力。

2. 增材制造技术的缺陷类型

典型的增材制造工件如图 2 所示[2] [10] [11]。增材制造按工艺过程可以分为原料、制备过程中、制备完成后和服役过程四个阶段, 每个阶段中都可能存在不同类型的缺陷, 需要检测的内容也不尽相同。原料中需要检测的主要内容包括粉末尺寸、颗粒形状和形态、物理化学性质和材料供应等, 制备过程中主要的检测内容为应力状态、熔融状态、材料性能、零件扭曲、孔隙、残余应力(消除外力或不均匀的温度场等作用后仍留在物体内的自相平衡的内应力)、过熔深度和融合质量, 制备完成后主要的检测对象为几何形状偏差、残余应力、产品各向异性、裂纹、气泡、夹杂、表面缺陷、孔簇、嵌入较深的缺陷和孔隙率(指块状材料中孔隙体积与材料在自然状态下总体积的百分比), 服役过程中形成的缺陷主要有表面缺陷、裂纹和变形[12] [13] [14] [15] [16]。激光增材制造中几种典型的缺陷如图 3 所示[17] [18] [19]。

其中, 裂纹、气孔和孔簇等连续缺陷最为危险, 这些缺陷通常存在于大部分工件中。相对于传统的锻造、铸造或模制零部件来说, 增材制造工件的突出特点之一是其孔隙率更高。孔隙率的增加可能会降低零件的强度, 局部的孔簇会导致服役中裂纹的形成, 而微孔的存在通常决定了增材制造工件的动态性能(如疲劳) [20]。同时, 由于部分区域的淬火引起局部金属偏析, 导致在金属结晶过程中出现特定的应力应变状态。较高的残余应力会导致变形、几何尺寸变化和微裂纹的形成, 因此应力状态是增材制造过程中重点检测的内容[20]。

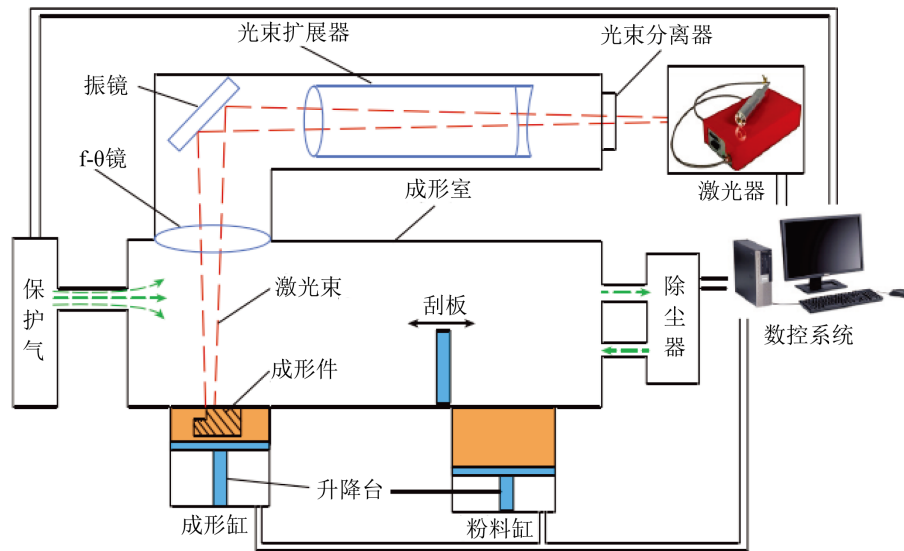


Figure 1. Principle diagram of laser selective melting technique
图 1. 激光选区熔化技术原理图

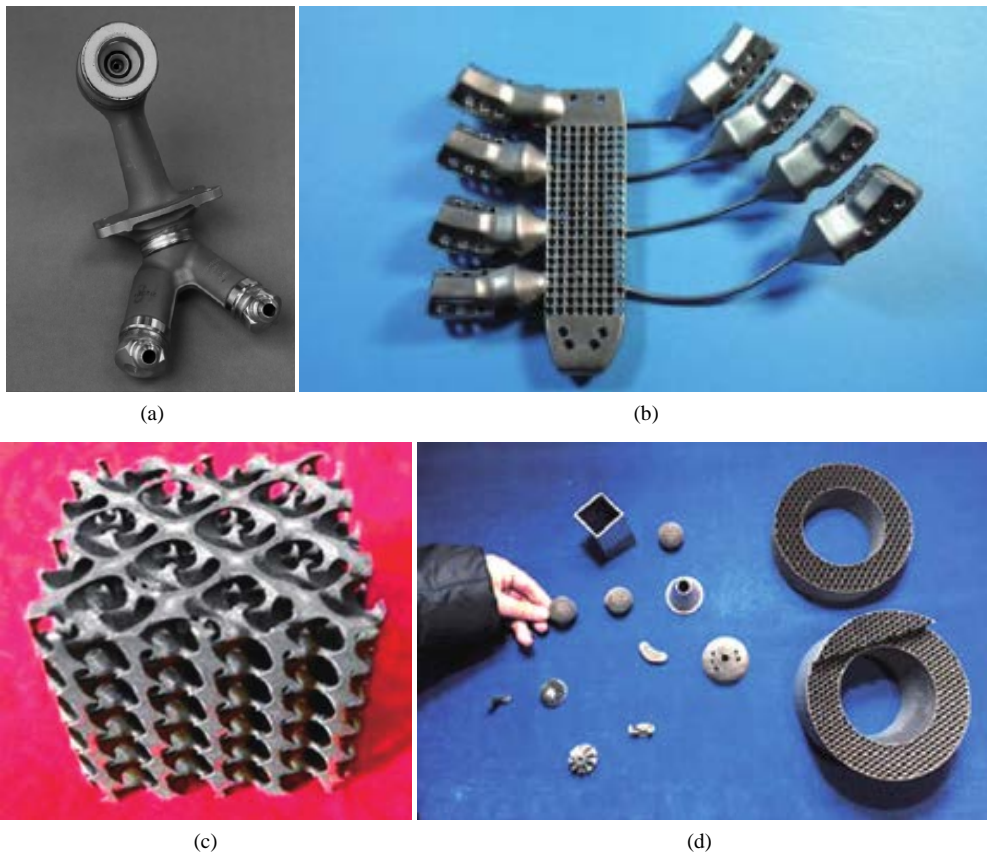


Figure 2. Typical additive manufacturing workpiece: (a) Leap engine fuel injector; (b) Titanium alloy sternum and ribs made by the Salamanca University of Spain; (c) Honeycomb porous metal parts made by Huazhong University of Science and Technology; (d) Complex structural parts made by Northwestern Polytechnical University

图 2. 典型增材制造工件：(a) Leap 发动机燃油喷嘴；(b) 西班牙 Salamanca 大学的钛合金胸骨与肋骨；(c) 华中科技大学的蜂窝多孔金属零件；(d) 西北工业大学的复杂结构零件

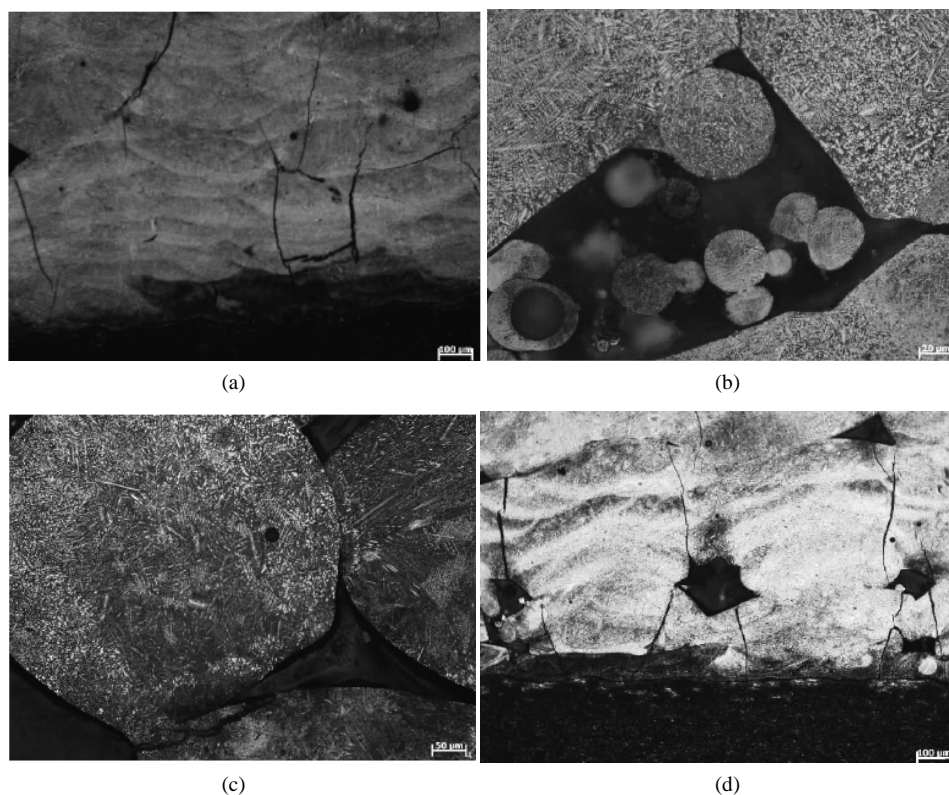


Figure 3. Typical defects in the laser additive manufacturing: (a) Sketch map of spallation in multi-layer laser additive manufacturing; (b) Metallographic micrograph of spheroidizing defects in laser additive manufacturing; (c) Cracked laser additive manufacturing layer with unmelted powder particles; (d) Cavitation in laser additive manufacturing

图 3. 激光增材制造中的典型缺陷: (a) 多层激光增材制造层裂示意图; (b) 激光增材制造中的球化缺陷金相显微图; (c) 夹杂未融化的粉末颗粒的开裂激光增材制造层; (d) 激光增材制造中的空洞现象

3. 增材制造技术的无损检测需求

增材制造的工件通常是一次性的, 并且制造成本极其昂贵, 因此传统的破坏性试验通常无法用于增材制造工件的检测。同时, 由于增材制造工件是一层层创建的, 属性更加难以预测, 这就对增材制造工件的质量检测提出了挑战。从某种意义上来说, 无损检测可以在不破坏工件完整性和服务性能的条件下完成对工件的质量评估, 可以满足增材制造工件的独特检验要求[21]。

全过程检测要求将无损检测方法用于增材制造过程中熔融状态下金属材料的表征, 这远比制备好的工件检测难度大, 同时要求检测过程不能干涉增材制造的加工过程。增材制造设备和工艺中需采用改进的无损检测传感器和控制器以提高检测和控制能力, 提供实时的可见性并调节制造环境。在沉积过程中的实时检测和材料性能的确定, 需能够提高合格零件的生产, 使得增材制造生产的零件可以直接用于安装。

为了提高增材制造的工件质量, 可能需要对整个系统实行闭环过程控制, 例如能够逐层监控零件并控制或减轻零件的扭曲和残余应力, 同时为每个增材制造工件提供详细的生成记录。过程控制也可以扩展到制造之前的原料, 并验证零件的微观结构、几何形状和质量[2]。由于在制造过程中, 工艺参数偏离其最佳值可能会导致所加工工件的服役性能恶化, 所以需要通过无损检测结果对增材制造工艺参数进行评价, 评价的主要参数例如: 声发射方法计算的系统偏差和光学传感器来确定的熔池深度[20]。

针对材料的无损评价主要有五个方面的需求：原料无损检测、完成工件无损检测、缺陷影响监测、设计产品数据库和物理参数参考标准。原料无损检测，例如金属粉末尺寸、颗粒形状、微观结构、形态、化学成分分子和原子组成，这些参数需要被量化并最终评价其性能一致性；完成工件无损检测包括制造工件(无需进一步处理)和后处理工件(需进一步处理)，检测内容包括小尺寸孔隙、复杂工件几何形状和复杂的内部特征；缺陷影响，用无损检测方法对完成工件中缺陷类型、产生频率和尺寸进行表征，便于理解产品属性对于产品质量和性能的影响；设计产品数据库，一个微观结构数据库可以编译阐明过程结构与性能之间的关系，包括每个过程中收集的图片或者照片，例如输入材料特性、原位过程监测及制造和后处理后完成生成的特征等；物理参数参考标准，目前缺乏合适的全尺寸工件来评价增材过程中的无损检测方法的可行性，由于增材制造的零件几何形状复杂、有嵌入较深的缺陷、有不同的微观结构(均与锻造相比)，无损检测必须创建校验仪器的物理参考标准[13]。

在增材制造过程中，需要对可能产生的缺陷进行实时监测，需要克服表面形貌和制备温度的影响，需要无损检测技术与制造过程进行集成而不影响增材制造工艺；加工完成的零件需要在验收阶段和使用寿命期间进行评估，确定其服役性能。此外，在零件的整个生命周期中，需要表征材料的微结构和形态，对原子和分子进行精细测量，表征内部应力状态等[13] [21]。总之，及时可靠的检测不同性质的缺陷和监测这些缺陷如何发展对于增材制造工艺具有重要的意义。因此，采用无损检测方法需要满足材料、设计以及测试需求，能够用于材料的全寿命周期，包括制造过程中优化、实施过程检测、生产后的质量验收以及服役过程中的质量监测。因此，增材制造的各个阶段对于无损检测都有明确的需求[12]。

4. 增材制造技术中无损检测技术的发展

目前在无损检测方面的技术主要包括：计算机断层扫描、渗透测试、涡流检测、超声检测和红外相机测量。如图 4 所示是一种采用声发射方式监测 3D 打印的实验系统[22]。

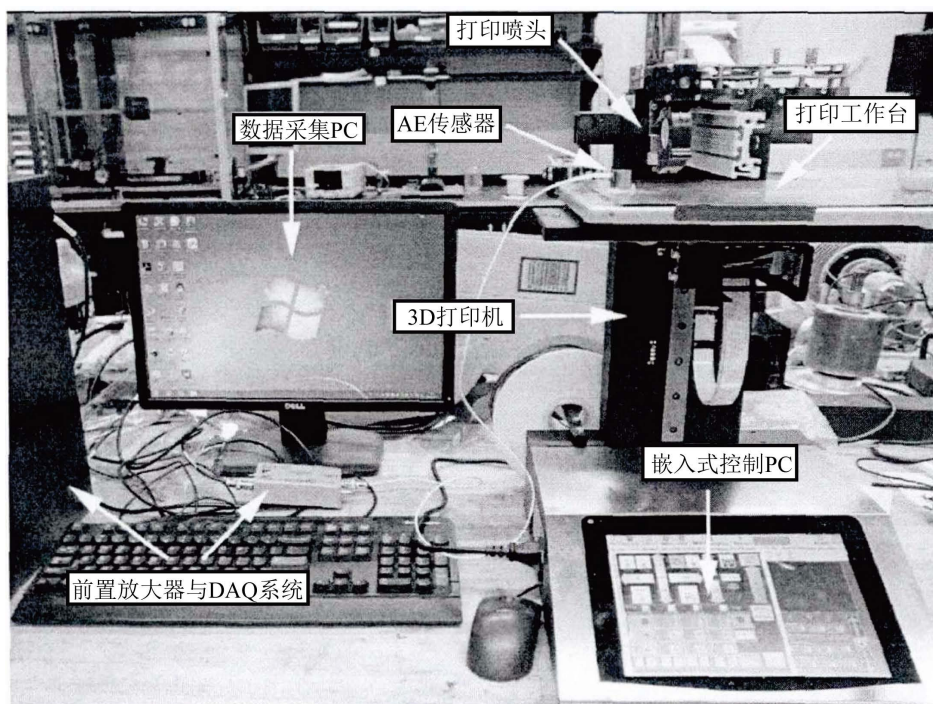


Figure 4. An acoustic emission monitoring system for 3D printing work pieces
图 4. 用于 3D 打印工件的声发射监测实验系统

X 射线检测在工业上有着广泛的应用, 无疑可以用来检测增材制造零件的孔隙率、尺寸误差和其他缺陷[21]。X 射线入射角直接影响检测缺陷的大小和形状, 可以显示小于 2% 的样品厚度的缺陷。计算机断层扫描可以对所有样品进行检测, 而超声检测和渗透检测是针对工件表面。X 射线计算机断层扫描具有检测内部缺陷和内部特征的能力, 可检测封闭孔和高密度夹杂物。同时, 计算机断层扫描检测技术也具有一定的局限性, 例如 X 射线的容积效应明显[21]。同时, 由于不能检测到垂直于 X 射线束的裂纹, 导致其不能可靠的检测缺陷[20]。总体而言, X 射线计算机断层扫描是一种强大的对增材制成品进行无损检测的技术, 使得描述材料的结构、形状分布和缺陷的定量尺寸成为可能。

增材制造的一个突出特点是比传统的锻造、铸造或模具成型零件具有更高的孔隙率, 在这些零件中呈现不规则的粗糙表面, 使得检测表面缺陷的传统无损检测方法难以应用。渗透检测为表面检测技术, 检测固体材料及其制件的表面与近表面缺陷[23], 用于检测不经过加工和抛光的多孔或者粗糙工件, 难度较大, 测量位置较深的复杂的内部结构或者晶格结构, 需要更新更灵敏的非接触无损检测方法[20]。

Dinwiddie 等人[24]采用红外相机揭示了增材制造过程中孔隙、未融合和外溅熔材等缺陷。他们开发的图像处理特殊算法可以定量描述孔隙率, 但是没有具体说明可检测的最小缺陷尺寸。Gatto 和 Harris [25]用分辨率 508 像素/英寸的 CMOS 摄像头, 安装在距离工作面 135 mm 的位置, 在合成过程中, 摄像头采取逐层拍照, 然后通过专门开发的算法处理, 获得各层几何参数, 层照片可以确定孔隙的几何尺寸以及计算横截面的形状偏差等。这种方法的局限在于, 一方面只能分析外部表面情况而无法检测内部, 另一方面表面粗糙度会严重影响检测结果[20]。

Guan 等人[26]采用 EX1301 迈克尔逊光学相干断层扫描系统评价选择性激光烧结的工件, 其可以达到的三维图像的空间分辨率约为 10 μm (相比之下 X 射线为 50 μm), 同时可以检测中空、未粘合和表面粗糙度, 如图 5 所示, 但是这种方法无法检测大尺寸工件。Guan 等人指出, 光波的穿透深度取决于材料的吸收和反射特性, 并且背反射光波的空间相干性和时间相干性会影响测量精度, 所以该技术只能应用于非金属材料。这种方法与 X 射线计算机断层扫描具有相同的灵敏度, 但是光学层析技术可以用于逐层生长的过程检测[20]。

Rudlin 等人[27]研究了涡流、激光超声、激光成像方法用于增材制造过程的检测。实际上, 以上三种方法, 都尚未用于制造过程的检测, 仅能用于制备后的人工缺陷检测, 评估增材制造工件的近表面缺陷。激光热成像的原理是采用红外相机针对样品中激光加热的部分进行实时热成像, 揭示样品断面激光加热的不均匀性, 该方法检测表面以下的缺陷时灵敏度低, 试验中只可靠地检测了一个直径为 0.6 毫米深度为 0.2 毫米的缺陷。在 0.5 mm 以上的深度条件下, 涡流技术的检测灵敏度为 0.4 mm, 而当检测近表面缺陷时, 激光超声和激光成像方法的灵敏度要低于 0.2 mm [20], 如图 6 所示。

激光超声检测是一种可用于快速扫描的非接触检测方法, 利用超声在金相截面上横向和纵向的速度不同, 可以表征样品中超声波传播的各向异性[12], 若采用激光激励干涉接收, 波前参数可用于确定近表面缺陷的尺寸和深度, 通常用于焊缝的缺陷识别以确保管道和轨道的完整性, 目前采用激光超声检查金属样品粉末沉积的研究还较少[15]。由于激光超声可以采用一个激光源产生强大的超声波脉冲, 具有易于支配的波形和宽光谱范围, 因此与压电激励相比, 其空间分辨率高 3~10 倍。同时, 因为激光诱导超声脉冲不存在振荡, 并且脉冲持续时间比 PZT 缩短 6~7 倍, 因此可以实现更高的分辨率和更高的灵敏度, 盲区很小。目前, 激光超声对于尺寸范围 150~500 μm 的不连续缺陷, 检测深度可达 700 μm , 但是当深度超过 300 μm 灵敏度明显减小, 激光超声用于增材制造产品的孔隙率和各向异性检测的研究还很少[28] [29] [30]。总之, 激光超声用于增材制造的无损检测展现了较大的潜力, 但还需要与制造过程进行集成, 考虑使用这种方法对增材制造过程进行逐层实时监测[21]。

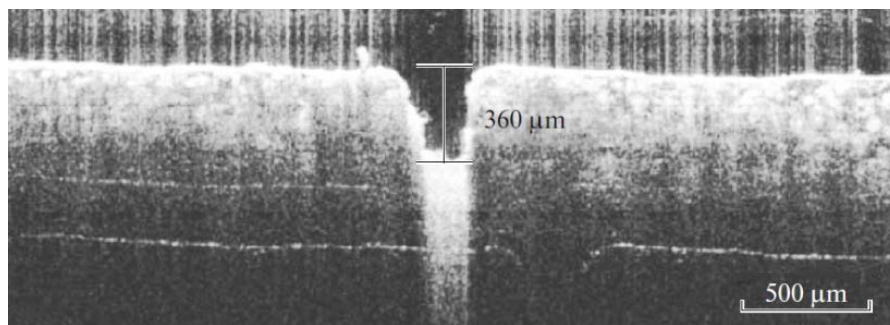


Figure 5. Optical coherence tomography of a rectangular discontinuous melting layer [23]

图 5. 矩形的非连续熔融层的光学相干断层扫描图像[23]

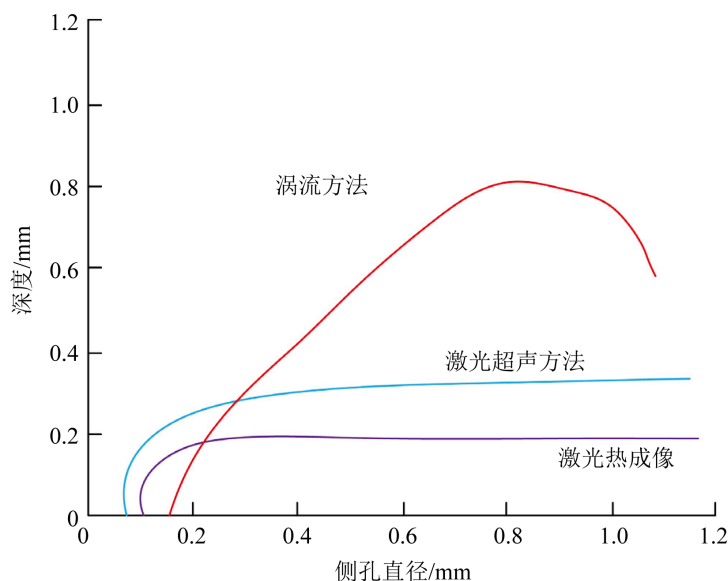


Figure 6. The approximate application range of different testing methods [26]

图 6. 不同测试方法的近似适用范围[26]

此外，残余应力的测定方法可以分为物理测定法和机械测定法，机械测定法通常是破坏性方法，例如切槽法钻孔法。可用于残余应力检测的无损检测方法主要有磁性法、X 射线衍射法及超声波法等。其中，磁性法是根据铁磁体饱和过程中应力与磁化曲线之间的变化关系进行测定，在一定范围内使用；X 射线法理论完善，但存在射线伤害并且仅能测定表面应力及对特定位置的晶格畸变难以测量，因此其应用受到很大限制；超声波法则是无损检测方法中最有发展前景的方法，具有快速、现场实测方便、既能测表面又能测内部残余应力等特点[31] [32] [33]，尤其是激光超声技术具有更大的应用潜力[34]。

5. 增材制造无损检测技术的展望

无损检测在增材制造中的应用存在许多问题，无损表征需要描述的内容有小尺寸孔隙、固有缺陷、复杂几何尺寸和复杂的内部特征等，NASA 还没有完全接受增材制造的一个主要原因是目前增材制造过程中仍缺乏足够的无损评价手段。

对于材料和产品缺陷，无损检测方法中的原位检测目前还不健全，例如对材料沉积和实时测量的高速成像，对不连续的热梯度、空隙和夹杂物的原位检测。此外，目前的控制方法，对于增材制造工件的微观结构等，无法实现传感器的反馈控制。若想解决应用中的这些问题，就必须使开发和实施原位无损

检测技术, 确保最大程度上检测材料缺陷。由无损检测方法测得的工艺参数可能包括在线传送、送粉密度、变形、残余应力、结构成分、吸收功率, 裂纹和孔隙等[13]。阻碍无损检测技术作为一种原位检测工具应用的难点在于: 1) 快速融化和冷却, 使得实时监测微小缺陷十分困难, 2) 任何无损检测方法都必须维持增材制造环境所需的条件, 如室内气压和激光保护安全系统, 3) 大部分增材制造设备的设计不易于集成 NDE 传感器, 必须采取预防措施确保无损检测传感器的插入不影响增材制造加工, 4) 大多数增材制造设备无法开放控制[13]。

总之, 对增材制造技术的无损检测研究还有许多工作要做, 增材制造技术本身缺陷的特征及形成机理还需要积累[35], 针对这些缺陷的无损检测技术应用及增材制造设备和无损检测设备的集成都存在大量的问题需要研究。目前, 增材制造设备存在的关键障碍是现有的无损检测方法和技术无法用于增材制造材料检测和制造过程中的零件检测, 或者是无法用于原位检测。同时, 采用传统的无损检测技术对增材制造完成的零件进行检测, 仍然很具有挑战性。

6. 结论

增材制造技术工艺过程的各个阶段都对无损检测提出了明确的要求, 缺乏足够的无损检测手段是阻碍增材制造技术进一步广泛应用的关键原因。目前存在的主要问题, 一方面是无损检测技术本身的应用局限性, 另一方面是增材制造和无损检测设备的集成问题。

除了增材制造过程中可能存在的缺陷外, 残余应力也是一个需要重点监测的对象。在众多的无损检测手段中, 激光超声技术无论是对于残余应力的检测, 还是对增材制造缺陷的检测都最具有应用潜力。

基金项目

山东省自然科学基金(ZR2017QEE002); 山东省创新型产业集群项目(2016ZDJQ0401); 国家安全生产重大事故防治关键技术科技项目(2017GC10268)。

参考文献 (References)

- [1] Zhou, J.X., Liu, R.X., Chen, L.L. and Liao, D.M. (2004) Applications of Foundry CAE in Steel Casting. *Hot Working Technology*, **11**, 67-68.
- [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(12): 26-31.
- [3] Zlenko, M.A., Popovich, A.A. and Mutylina, I.N. (2013) Additive Technologies in Machine Building. Polytechnical University Press, St. Petersburg.
- [4] Melchels, F.P.W., Domingos, M.A.N., Klein, T.J., *et al.* (2012) Additive Manufacturing of Tissues and Organs. *Progress in Polymer Science*, **37**, 1079-1104. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007>
- [5] Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., *et al.* (2011) High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. *Physics Procedia*, **12**, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.035>
- [6] Baufeld, B., Vanderbiest, O. and Gault, R. (2010) Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Materials & Design*, **31**, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.032>
- [7] Murr, L.E., Martinez, E., Amato, K.N., *et al.* (2012) Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science. *Journal of Materials Research and Technology*, **1**, 42-54. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70009-1](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70009-1)
- [8] Sufiiarov, V.S., Popovich, A.A., Borisov, E.V. and Polozov, I.A. (2015) Selective Laser Melting of Heat-Resistant Nickel Alloy. *Non-Ferrous Metals*, **1**, 32-35.
- [9] Popovich, A., Sufiiarov, V., Borisov, E. and Polozov, I. (2015) Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by SLM. *Key Engineering Materials*, **651-653**, 677-682. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.677>
- [10] 张小伟. 增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.

- [11] 陈忠旭, 姚锡禹, 郭亮, 等. 基于激光的金属增材制造技术评述与展望[J]. 机电工程技术, 2017, 46(1): 7-13.
- [12] Popovich, A.A., Masaylo, D.V., Sufiiarov, V.S., *et al.* (2016) A Laser Ultrasonic Technique for Studying the Properties of Products Manufactured by Additive Technologies. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **52**, 303-309. <https://doi.org/10.1134/S1061830916060097>
- [13] Waller, J.M., Saulsberry, R.L., Parker, B.H., *et al.* (2015) Summary of NDE of Additive Manufacturing Efforts in NASA. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **1650**, 51-62. <https://doi.org/10.1063/1.4914594>
- [14] Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., *et al.* (2016) Review of *in Situ* Process Monitoring and *in Situ* Metrology for Metal Additive Manufacturing. *Materials & Design*, **95**, 431-445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099>
- [15] Everton, S., Dickens, P., Tuck, C. and Dutton, B. (2015) Evaluation of Laser Ultrasonic Testing for Inspection of Metal Additive Manufacturing. In: *Laser 3D Manufacturing II*, International Society for Optics and Photonics, Bellingham, Vol. 9353, 935316.
- [16] Harris, I.D. (2012) Additive Manufacturing: A Transformational Advanced Manufacturing Technology. *Advanced Materials & Processes*, **170**, 25-29.
- [17] 邹小斌, 尹登科, 谷建军. 关于激光熔覆裂纹问题的研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(5): 44-45.
- [18] 毛怀东. 激光熔覆层裂纹控制方法与实践[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.
- [19] 邵玉呈, 陈长军, 张敏, 等. 关于 Deloro40 镍基合金粉末激光增材制造成型件裂纹问题研究[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 397-402.
- [20] Aleshin, N.P., Grigor'Ev, M.V., Shchipakov, N.A., *et al.* (2016) Using Nondestructive Testing Methods for In-Production Quality Control of Additive Manufactured Parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **52**, 532-537. <https://doi.org/10.1134/S1061830916090023>
- [21] Aleshin, N.P., Grigor'Ev, M.V., Shchipakov, N.A., *et al.* (2016) Applying Nondestructive Testing to Quality Control of Additive Manufactured Parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **52**, 600-609. <https://doi.org/10.1134/S1061830916100028>
- [22] 吴海曦. 面向增材制造的声发射监测技术及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [23] 傅洋. 磁粉、渗透检测技术的发展: 庆祝中国机械工程学会无损检测分会成立三十周年[J]. 无损检测, 2008(9): 6-9.
- [24] Dinwiddie, R.B. (2013) Thermographic *in Situ* Process Monitoring of the Electron Beam Melting Technology Used in Additive Manufacturing. *SPIE Defense Security & Sensing*, **23**, 87050K. <https://doi.org/10.1117/12.2018412>
- [25] Gatto, M. and Harris, R.A. (2011) Non-Destructive Analysis (NDA) of External and Internal Structures in 3DP. *Rapid Prototyping Journal*, **17**, 128-137. <https://doi.org/10.1108/13552541111113871>
- [26] Guan, G., Hirsch, M., Lu, Z.H., *et al.* (2015) Evaluation of Selective Laser Sintering Processes by Optical Coherence Tomography. *Materials & Design*, **88**, 837-846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.084>
- [27] Rudlin, J., Cerniglia, D., Scafidi, M. and Schneider, C. (2014) Inspection of Laser Powder Deposited Layers. *The 11th European Conference on Nondestructive Testing*, Prague, 6-10 October 2014, 10 p.
- [28] Klein, M. and Sears, J. (2004) Laser Ultrasonic Inspection of Laser Cladded 316SS and Ti-6-4. In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Laser Institute of America, Orlando, 6 p.
- [29] Herman, P.R. (2013) Defect Detection in Laser Powder Deposition Components by Laser Thermography and Laser Ultrasonic Inspections. *SPIE Laser*, **8611**, 86111N.
- [30] Cerniglia, D. (2013) Laser Ultrasonic Technique for Laser Powder Deposition Inspection. *13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials*, Le Mans, 20-24 May 2013, 8 p.
- [31] Zaeh, M.F. and Branner, G. (2010) Investigations on Residual Stress and Deformations in Selective Laser Melting. *Production Engineering*, **4**, 35-45. <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0192-y>
- [32] 王庆光. 残余应力检测技术及其应用[J]. 重型机械科技, 2002(4): 39-49.
- [33] Hoye, N., Li, H.J., Cuiuri, D. and Paradowska, A. (2014) Measurement of Residual Stresses in Titanium Aerospace Components Formed via Additive Manufacturing. *Materials Science Forum*, **777**, 124-129. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.777.124>
- [34] Zhao, Y., Chen, J.W., Zhang, Z.Z. and Zhu, Y.N. (2015) Nondestructive Evaluation of Residual Stress and TGO by Using Laser Ultrasonic Method. *Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications*, Jinan, 30 October-2 November 2015, 411-417.
- [35] 凌松. 增材制造技术及其制品的无损检测进展[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 60-64.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org