

DOI: 10.11973/wsjc201606015

# 增材制造技术及其制品的无损检测进展

凌松<sup>1,2</sup>

(1.上海材料研究所, 上海 200437; 2.上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

**摘要:** 简要论述了增材制造技术在国内外的研究发展状况; 并在此基础上, 对增材制品中常见缺陷的种类、特征和形成机理作了一定的梳理; 最后, 对增材制品的无损检测技术发展方向进行了展望。

**关键词:** 增材制造; 无损检测; 标准体系

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)06-0060-05

## Additive Manufacture Technique and Related NDT for its Products

LING Song<sup>1, 2</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China;

2. Shanghai Key Lab. of Application and Evaluation of Engineering Materials, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** The application of NDE technology and the related system of standard in additive manufacturing technology is described in this paper, and based on that, the future of the development of NDE technology and the related system of standard has been prospected.

**Key words:** Additive manufacturing; Nondestructive testing; The system of standard

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是一种快速自由成形、制造三维实体零件的新技术, 也称为快速原型制造(Rapid Prototyping)、3D 打印(3D Printing)、实体自由制造(Solid Free-form Fabrication)等。其中, 3D 打印是最常用的技术名称之一<sup>[1]</sup>。

增材制造技术的出现被认为是 21 世纪机械制造工业领域中的一次跨时代的工艺技术革新, 给现代社会带来了强大的冲击和震撼。增材制造技术集合了数字建模技术、机电控制技术、信息技术、材料科学与化学等多项高新技术的优势。与传统机械制造技术[即减材制造技术(如切削加工)及等材制造技术(如锻造、铸造、粉末冶金)]相比, 增材制造技术有许多无法比拟的优势, 如快速、环保、无需事先制造模具, 甚至可以一次完成快速成型等<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2015-07-11

基金项目: 上海市重大科技攻关资助项目(13DZ1108902)

作者简介: 凌松(1986—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事无损检测机理与技术的研究。

通信作者: 凌松, E-mail: s.ling@aliyun.com。

## 1 增材制造技术的发展

增材制造技术的发展经历了三个阶段: ① 1982—1988 年的技术孕育期; ② 1988 年开始的快速原型技术; ③ 20 世纪 90 年代初期以来的直接增材制造。

1979 年, 美国联合技术公司(UTRC)提出了激光立体成形技术概念, 并制作出航空发动机涡轮盘模拟件。从此, 增材技术崭露头角, 且越来越多地被应用于大型零件的制造或修复中<sup>[2]</sup>。

### 1.1 国外发展

国外有关大型增材制造技术的研究主要集中在美国。

1995—2005 年间, 在美国国防部先进研究计划署及海军研究办公室等部门的巨额资助下, 美国约翰哈普金斯大学、宾夕法尼亚州立大学及 MTS 公司等对飞机钛合金结构件激光快速成形技术进行了大量研究, 并取得重大进展<sup>[3—4]</sup>。

目前, 增材制造技术已经在航空航天、体育、医疗和教育等领域得到了较好的推广应用。例如, 通用电气航空集团(GE Aviation)使用 3D 打印机制造了喷

气发动机零件；耐克公司使用 3D 打印技术制备出了 6.6 盎司的 Vapor Laser Talon 跑鞋；医疗器械公司 LIMA 使用 3D 打印制造出了 4 万多个孔钛合金人造骨髓关节<sup>[5]</sup>。

## 1.2 国内发展

在“十五”和“十一五”期间，北京航空航天大学王华明团队解决了飞机钛合金次承力结构件激光快速成形工艺及应用关键技术，构件疲劳寿命、断裂韧性等主要力学性能达到钛合金模锻件水平。2005 年，该团队成功使用激光快速成形技术分别制备出 TA15 钛合金飞机角盒、TC4 钛合金飞机座椅支座及腹鳍接头等 4 种飞机钛合金次承力制件，且在 3 种飞机上进行了装机应用；2010 年，利用激光直接制造 C919 大飞机上重达 136 kg 的中央翼根肋<sup>[6-8]</sup>。

但是，我国增材技术标准的发展远落后于国外，没能充分反映国内的技术工艺水平。已在飞机上装备使用的增材技术产品均采用各自的企业标准和规范，这样的局面势必造成产品的质量参差不齐。

由于缺乏对增材工艺过程的表征、控制和认证的规范化要求，增材制造技术的大范围推广使用受到了制约，已有的技术优势并没有迅速转化为市场优势，因此急需开展增材制造技术的标准化工作。

为此，我国有必要专门成立增材制造全国标准化技术委员会，开展相关标准的制订与研究；由于标准化不是一项一蹴而就的工作，故可首先在领先的领域开展工作，如航空航天行业。同时，积极参加国际标准化组织(ISO)增材制造技术委员会 ISO TC 261 的学术和标准制定修订活动，促进我国增材制造业与国际接轨。

## 2 增材制造技术标准的发展

增材制造技术发展到现阶段，制造工艺在继续升级更新的同时，如何将技术迅速转化为功能产品，并形成市场优势，这一系列重大问题亟待关注。在影响从技术向产品转化进而形成市场优势的因素中，技术标准将发挥重要作用。

截至目前，增材制造标准的发展过程可以划分为两个阶段：从 2002 年第一份增材制造标准颁布到 2009 年为起步阶段；从 2009 年开始，增材制造标准开始进入有组织的快速发展阶段。

2002 年，美国汽车工程师协会 SAE 发布了第一份增材制造技术标准——宇航材料规范 AMS 4998《Ti-6Al-4V 钛合金粉末》，同期还颁布了 AMS 4999

《退火 Ti-6Al-4V 钛合金激光沉积产品》标准。20 世纪 90 年代起，为了推动增材技术在军事及民用领域中的协同发展与进步，美国军用标准体系中与材料相关的军用规范开始转化为宇航材料规范。目前，宇航材料规范已经构成了美国军用航空航天材料标准的主体。增材制造技术宇航材料规范的颁布，进一步标志着该技术在美国航空航天领域开始走向实际使用阶段<sup>[9]</sup>。

从 2009 年开始，增材制造标准进入有组织的快速发展阶段。美国材料与试验协会 ASTM 和国际标准化组织 ISO 分别成立了增材制造技术委员会，对推进增材制造标准的制定发挥了重要作用<sup>[9-11]</sup>。

2009 年，美国材料与试验协会 ASTM 成立了专门的增材制造技术委员会 F-42，设立了术语、设计、材料和工艺、试验方法、人员等分委员会，约 215 个成员单位参与相关的工作；并且，已经颁布实施了 10 项标准：ASTM F2792—12《增材制造技术标准术语》、ASTM F2915—12《增材制造文件格式标准规范》、ASTM F2921—12《增材制造——坐标系与命名标准术语》、ASTM F2924—12《铺粉熔覆增材制造 Ti-6Al-4V 标准规范》、ASTM F2771—13《用于增材制造试样试验结果报告的惯例》、ASTM 2924—14《电子束熔化(EBM) Ti-6Al-4V ELI 钛合金增材制造标准规范》、ASTM F3049—14《用于金属增材制造粉末特性的标准指南》、ASTM F3055—14a《铺粉熔覆增材制造 Inconel 718 镍基合金标准规范》、ASTM F3056—14e1《铺粉熔覆增材制造 Inconel 625 镍基合金标准规范》和 ASTM F3122—14《增材制造金属材料力学性能评价标准指南》<sup>[9]</sup>。

2011 年，国际标准化组织 ISO 也成立了增材制造技术委员会 TC 261，秘书处设在德国，下设术语、方法、工艺和材料试验方法，数据处理等 16 个分委员会或工作组。委员会目前有 20 个成员国和 5 个观察员国，我国是其中 20 个成员国之一。目前发布相关标准 5 项：ISO/ASTM 52921:2013《增材制造标准术语 坐标系统和测试方法》、ISO/ASTM 52915:2013《增材制造标准文件格式标准规范》、ISO 17296-4:2014《增材制造 通用原则 第 4 部分：数据处理综述》、ISO 17296-3:2014《增材制造 通用原则 第 3 部分：主要特性和相应的测试方法》和 ISO 17296-2:2015《增材制造 通用原则 第 2 部分：过程类别和原材料综述》<sup>[10]</sup>。

2011 年，美国汽车工程师协会完成了对首份增

材制造技术标准 AMS 4999 的换版。新标准 AMS 4999A 的名称更改为《退火 Ti-6Al-4V 钛合金直接沉积产品》，增加了工艺方法，完善了产品性能和检验的要求，增加了工艺认证、产品认证和工艺过程控制要求等内容。与原标准相比，新标准的性能指标要求更加全面合理，内部质量检验要求更加具体可操作，标准实用性更强。目前，AMS 4998《Ti-6Al-4V 钛合金粉末》所采用的最新修订版本为 2013 年 3 月 15 日发布的 AMS 4998E 版本，而《退火 Ti-6Al-4V 钛合金直接沉积产品》则在 2015 年 3 月 31 日刚刚发布了 AMS 4999B<sup>[11]</sup>。

上述标准涵盖了基础标准、设计指南和产品标准，构成了较为完整的基础标准体系和开放的产品标准体系。

从标准体系构成上看，规范了术语、制造文件（含计算机编码）格式、设计指南等基础标准，这既是增材制造技术领域新概念、新方法数量众多的体现，也是该技术进入大范围应用的客观需要。

从正在开展的标准化活动看，近期将会有一些新的产品标准颁布，其中大部分是激光和电子束铺粉熔覆工艺制造的钛合金和高温合金产品标准，这对我国相关技术和产品的开发与应用具有一定的借鉴意义。

### 3 增材制品无损检测的现状与展望

#### 3.1 增材制品无损检测的现状

增材制品在制备和使用过程中，某些缺陷的产生和扩展是无法避免的。2000 年，美国空军研究实验室的 KOBRYN P A<sup>[12]</sup>，英国伯明翰大学的 WU Xinhua<sup>[13-15]</sup> 以及曼彻斯特大学的 DUTTA MAJUMDA J<sup>[16]</sup> 等人，分别在 TC4 及 316L 不锈钢激光快速成形件内部，观察到了气孔及融合不良缺陷。因此，对该技术制造出的零件表面及内部质量检测和验收评定的关键技术的发展快慢，直接制约了该技术在工程上的应用前景。

目前，国内外的科研人员已对该方面的应用开展了一些工作，主要集中在研究内部缺陷的特征和形成原因方面，但是还未能完整地形成一个有机系统，后续还有许多工作需要推进完成。

研究表明，增材制造中产生的缺陷，主要原因有两方面（根据增材制造材料中缺陷形成的不同特征）：① 材料特性导致的缺陷，它由材料特性导致的无法通过优化增材制造特征参数予以解决的缺陷，

主要为气孔。② 特征参量导致的缺陷，即，由于增材制造工艺参数或设备等原因导致的缺陷，可称之为特征参量导致的缺陷，主要有孔洞、翘曲变形、球化、存在未熔颗粒等<sup>[17-21]</sup>。

2007 年，西北工业大学的张风英等<sup>[19]</sup>对增材制造的钛合金制品的缺陷形成机理作了进一步研究。他们发现气孔的形成取决于粉末材料的特性（主要是指粉末的松装密度），形成的气孔形貌呈球形，它以随机性分布在材料中；粉末的流动性和氧含量对气孔的形成没有影响；熔合不良的形成取决于成形特征参量是否匹配，其中最主要的影响因素是能量密度、多道间搭接率以及 Z 轴单层行程；其形貌不规则，内壁粗糙，多呈带状分布在层间或道间的搭接处。

2011 年，华中科技大学的魏青松等<sup>[20]</sup>就选择性激光融化成形不锈钢零件性能中粉末特性的影响做了细致分析。他们发现粉末的粒度、形状及粉末中氧的质量百分数对零件成形质量均有较大影响。在一定范围内，粒度越小，成形件致密度越高，但太小的粒度又将影响粉末的流动性，反而降低制件成形质量。

2011 年，尚晓峰等<sup>[11]</sup>通过从工艺参数、设备性能和材料特性等方面来研究制品中形成的缺陷，发现送粉延迟会造成欠堆积或过堆积的形成，直接造成成形尺寸精度下降；比能量是产生粘粉的根本原因，不同比能量会产生不同的冷却速度，比能量越高，冷却速度越快；冷却速度过快，会造成粉末颗粒熔化不充分，未熔化的粉末颗粒粘附在成形件表面或侧壁上，降低了成形件表面质量。

2013 年，西班牙加泰罗尼亚理工大学的 ANTONI Turó 等<sup>[12]</sup>采用高频（45 MHz）自动水浸超声技术对金属粉末材料的密度、裂纹和未熔合的探测与表征等进行了研究测试。研究表明，超声检测不仅能够用于增材制品内部质量检测和在役检测，还可以发展成为一个可靠的质量论证工具；甚至可作为增材制造工艺研究的辅助工具，指导其技术升级与创新。

2014 年，澳大利亚莫纳什大学的 PAUL A ROMETSCH 等<sup>[22]</sup>使用多色 X 射线技术，对选择性激光熔融的哈斯特洛伊耐蚀镍基合金制品进行了射线检测灵敏度试验研究；结果表明，射线检测的分辨率不仅与材料的厚度有关，还与缺陷的位置有很大的关系；对于 2 mm 厚的该类制品，射线检测的分辨率为 0.2 mm，对于 10 mm 的厚度，分辨率则不到 2 mm。

### 3.2 增材制品检测的发展展望

#### 3.2.1 增材制造的原材料检测

增材制造的原材料为粉体或丝材,其形态与传统板材、棒材、锻件等有较大区别;因此,其理化特性测试检验项目与传统减材加工的原材料检验项目有较大的不同,诸如力学性能、金相组织等项目无法进行。除化学成分分析外,粉体材料应着重关注其粒度、粒度分布、形貌及颗粒中的空隙率等参量。

#### 3.2.2 增材制品的超声检测

无损检测的方法不仅仅局限于材料内部缺陷的检测与表征,还可实现材料的密度、弹性参数、孔隙率、残余应力分布以及其内部各种非连续性等方面的无损测试与表征<sup>[22]</sup>;整个过程可实现快速、无损、原位的检测,对缩短材料的研发与生产周期和成本有积极意义。

例如:在制备过程中使用超声检测来实时监控增材制品中残余应力的分布,防止其翘曲和开裂;在产品的研发阶段,使用超声检测结合数字计算机技术为制品提供其相应的密度、弹性参数、孔隙率,以指导产品生产工艺的提高与升级,为制备出更高质量的增材制品发挥作用。

由于增材制造材料晶界组织的微小化,故须提高和拓展超声检测的相关条件,故超声检测向高频化和定量化发展的趋势将更加明显。

#### 3.2.3 增材制品的射线检测

射线检测对于复杂构件的检测有着天然的优势,故射线在增材制品的检测上将承担重要的角色;未来,配合高分辨率的工业CT和DR技术,射线检测在增材制造业的发展中将发挥更大的作用。

未来工业射线技术在增材制造领域的应用中,将集数字计算机技术发展于一体,在具有突出检测结果显示直观化优势的同时,还将融入边缘增强或平滑技术以改善影像的细节,并能进行图片降噪、灰阶对比度调整、伪彩色处理等,可提高制品内部不连续性的检出率。

另外,在物理建模上也需要投入力量,通过构建相关的物理模型研究射线在增材制造材料中的作用机理,借助现在的DR技术,开展更加客观的定量研究,表征制品内部的残余应力分布水平、材料的孔隙率等,综合地评估出材料的质量水平。

由于目前专门针对增材制造样品的射线检测的应用还很少,对其主要的评价手段和方法还在沿用其他同类锻件或铸件的检测工艺,故发展和开拓这

方面的研究具有十分重要的意义。

在检测工艺上,需要充分结合样品的制造工艺,针对其特殊性构建出一套与之匹配的检测方法和体系。在使用和验收等级方面,需要考虑到其微观组织的特殊性,调整各个方面的验收参数。

#### 3.2.4 增材制品材料微区的无损评估

为了确保增材制品的可靠性,研究和制备过程中需要充分地分析增材制品的材料性能以及进一步了解材料微区的结构和性能、微区再结晶、Kirkendall空穴、成形过程中内应力演化行为规律、内部组织形成规律、内部缺陷和损伤形成机理。因此,发展分辨率优于微米量级的微米、纳米尺度上的无损评估技术,进行材料微区的力学、电学、磁学和热学等特性的三维成像和评估,是声学和其他学科共同的任务。

#### 3.2.5 增材制品的早期损伤评估

增材制品的早期损伤评估也将是无损检测技术发展的一个方向,作为制造过程和状态预测的一部分,损伤评估技术直接影响到整个装备系统的安全运行。这就要求在现有的基础上开发出稳定性和灵敏度更高的仪器与设备,并实现远程评价。此外,还应注意到在健康监测方面的应用应与‘大数据’技术进行结合,实现实时远程的无损监测,将各种损伤扼杀在‘摇篮’当中。

### 4 结语

增材制造技术进一步发展的主要问题,仍然是成形过程中的“内应力控制及零件变形开裂预防”、“内部质量保障及力学性能控制”、“技术标准体系”等瓶颈难题。

这些难题的存在,一方面是由该技术发展时间还不长,各方面研究工作仍处于探索阶段;另一方面,则是对于该技术的关键性基础问题的研究和把握不够。

增材制造技术发展道路任重而道远,对增材制造制品的无损检测工艺的研究还有许多工作去做,其中针对缺陷的特征、形成机理的研究还需要积累。

### 参考文献:

- [1] 余冬梅,方奥,张建斌. 3D打印技术和应用[J].金属世界,2013(6):6-11.
- [2] 刘业胜,韩品连,胡寿丰,等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J].航空材料,2014(10):62-67.

- [3] BOYER R R. An overview of titanium use in the aerospace industry[J]. Mater. Sci. Eng. A , 1996, 213(1):103-114.
- [4] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5):28-30.
- [5] 杜宇雷,孙菲菲,原光,等.3D打印材料的发展现状[J].徐州工程学院学报:自然科学版,2014,29(1):20-24.
- [6] 王华明,张凌云,李安,等.金属材料快速凝固激光加工与成形[J].北京航空航天大学学报,2004,30(10):962-967.
- [7] 王华明,张述泉,汤海波,等.大型钛合金结构件激光快速成形技术研究进展[J].航空精密制造技术,2008,44(6):28-30.
- [8] 王华明,张述泉,王向明.大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J].中国激光,2012,36(12):3204-3209.
- [9] ASTM International. Committee F42 on additive manufacturing technologies [EB/OL].[2014-11-17]http://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm.
- [10] ISO. Committee TC 261 on additive manufacturing technologies[EB/OL].[2014-10-10]http://www.iso.org/iso/stamdrds\_dvelopmetn/list\_of\_iso\_technical\_comittees/iso\_technical\_committee.htm? commid = 629086.
- [11] SAE International. Aerospace [EB/OL].[2015-03-31]http://standards.sae.org/wip/ams4999b/.
- [12] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMIATIN S L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(4):299-305.
- [13] WU Xin-hua, LIANG Jing, MEI Jun-fa, et al. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V alloy
- [14] WU X. A review of laser fabrication of metallic engineering components and of materials[J]. Maer Sci Technol, 2007, 26(6):631-640.
- [15] WANG F, WU X H, CLARK D. On direct laser deposited Hastelloy X, dimension, surface finish, microstructure and mechanical properties[J]. Maer Sci Technol, 2011,27:344-356.
- [16] DUTTA M J, PINKERTON A, LIU Z, et al. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2005, 247:320-327.
- [17] 陈哲源,锁红波,李晋炜.电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征[J].航天制造技术,2010(1):36-39.
- [18] 鲍林,陈静,林鑫,等.激光快速成形TC21钛合金沉积态组织研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(4):612-616.
- [19] 张凤英,陈静,谭华,等.钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(2): 211-215.
- [20] 王黎,魏青松,贺文婷,等.粉末特性与工艺参数对SLM成形的影响[J].华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(6):20-23.
- [21] 尚晓峰,韩冬雪,于福鑫.钛合金激光快速成形缺陷原因分析[J].工艺与检测,2011(3):103-106.
- [22] ANTONI T, JUAN A, CHÁVEZ A, et al. Ultrasonic inspection system for powder metallurgy parts[J]. Measurement, 2013,46:1108-1108.
- [23] PAUL A R, DANIELE P, DACIAN T, et al. Evaluation of polychromatic X-ray radiography defect detection limits in a sample fabricated from Hastelloy X by selective laser melting[J]. NDT&E Internation, 2014,62:184-192.

~~~~~  
(上接第 52 页)

- [4] 初泰安.螺栓拧紧方法及预紧力控制[J].石化技术,2005, 11(3): 42-45.
- [5] JOHNSON G C, HOLT A C, CUNNINGHAM B. Ultrasonic method for determining axial stress in bolts[J]. Journal of Testing & Evaluation, 1986, 14 (5): 253-259.
- [6] CHAKI S, CORNELOUP G, LILLAMAND I, et al. Combination of longitudinal and transverse ultrasonic waves for in situ control of the tightening of bolts[J]. J Press Vess-T ASME, 2007, 129(3): 383-390.
- [7] 杜刚民,李东风,曹树林,等.螺栓轴向应力超声测量技术[J].无损检测,2006, 28(1): 20-22.
- [8] 何存富,吴克成,石建中,等.大桥螺栓施拧轴力的超声测量[J].实验力学,1994,9(1):74-78.
- [9] 朱士明,肖明正,卢杰,等.超声波高温螺栓应力监测仪的研制[J].同济大学学报:自然科学版,1991, 19(4): 433-439.
- [10] HIRAO M, OGI H. Emats for science and industry [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003:245-260.