

无损检测在增材制造技术中的应用研究进展

帅三三, 刘伟, 王江*, 任忠鸣

上海大学材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444

摘要 论述了增材制造的特点及增材制造技术在国内外的发展和应用情况;分析了增材制造成型工艺过程中形成缺陷的类型及特征,同时结合各类无损检测方法的应用特点,介绍了针对增材制造制件的超声检测、计算机断层扫描、涡流检测和红外相机测量等多种无损检测方法,以及它们在增材制造制件检测中的适用性和优缺点;提出了未来增材制造制件无损检测应向无损检测新技术的应用、在线检测方法和无损检测方法标准的建立和完善等方向发展。

关键词 增材制造; 工艺缺陷; 无损检测; 在线检测

工业的快速发展对产品的质量、性能要求逐渐提高,传统的机械制造成形技术对一些单件小批量且形状复杂的零件存在工艺复杂、精度有限、开发周期长、材料浪费、制造成本增加等问题。因此,增材制造技术的出现具有重要的意义。增材制造技术又称3D打印技术,是一种基于构件的三维数字模型,通过使用激光束或电子束作为热源将金属母材熔化后逐层堆积成实体构件的先进制造技术^[1],这种点-线-面-体的加工方式使其在制造复杂形状构件方面具有独特的优势。与传统的机械制造技术相比,增材制造技术在一体化成形零件的基础上,减少了模具设计与开发、缩短了产品的研发周

期、提高了材料的利用率^[2-3]。因此增材制造制备的零件在航空航天、汽车医疗、军工化学等领域得到广泛的应用^[4-5]。尽管增材制造技术有众多优点,但其成形零件的性能仍然存在不足,即使成形的试样致密度接近100%,也难以避免成形零件存在微观裂纹、粉末未完全熔化、冶金结合不良、孔洞形成等缺陷^[6]。这也阻碍了激光增材制造技术的应用,因此为推广和扩大激光增材制造技术的应用,减少和消除这些缺陷的方法和工艺对激光增材制造技术的发展至关重要,需要对其内在缺陷进行深入研究,探索出有效的解决方法,而无损检测的发展对提高增材制造制件的质量有重要作用。本文

收稿日期:2019-12-05;修回日期:2020-01-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1106400);国家自然科学基金项目(51690163, 51701112)

作者简介:帅三三,副研究员,研究方向为先进X射线成像技术、增材制造、金属凝固技术等,电子信箱:shuaisansan.cool@163.com;王江(通信作者),教授,研究方向为激光增材制造、电子冶金技术,电子信箱:jiangwang@i.shu.edu.cn

引用格式:帅三三,刘伟,王江,等.无损检测在增材制造技术中的应用研究进展[J].科技导报,2020,38(2):26-34;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.02.004

阐述了增材制造技术的发展现状,对增材制造工艺过程中产生的缺陷类型进行了总结,重点介绍了无损检测技术(non destructive testing, NDT)在增材制造方面的应用和研究进展,并对该技术未来应关注的研究方向提出建议。

1 增材制造技术的发展

增材制造技术的快速发展已成为当前工业生产中最具有前景的技术之一,国内外对其非常重视。增材制造技术最早在1982年由美国学者提出,并创办全球第一家增材制造公司3D Systems^[7]。该技术在20世纪80年代得到大力发展,各个国家都发展并创办增材制造公司,其中包括德国EOS、Concept Laser等公司,英国Renishaw公司,法国Phenix System公司等^[8]。进入21世纪,增材制造技术已经得到大力发展和运用。2012年美国为重振制造业提出一系列计划,将3D打印技术列为11项重要技术之一,其中在2015年A320飞机首飞成功,该飞机将通过选区激光熔化(selective laser melting, SLM)技术制造的燃油喷嘴头用在美国制造的LEAP发动机上^[9]。英国技术战略委员会“未来的高附加值制造技术展望”中,把增材制造技术列为提升国家竞争力,应对未来挑战的22个应优先发展技术之一。澳大利亚政府倡导成立增材制造协同研究中心,促进以终端客户驱动的协作研究。新加坡将5亿美元的资金用于发展增材制造技术,使新加坡的制造企业能够拥有全球最先进的增材制造技术。日本组织实施以增材制造技术为核心的制造革命计划,以构建其完备的增材制造材料与装备体系,提高其增材制造技术的国际竞争能力^[9-10]。

中国于20世纪90年代初开始对增材制造技术进行研究,虽短短20余年时间,却得到了学术界及企业的高度重视。中国高校和科研机构在增材制造技术领域的研究起步较早,20世纪90年代初,华中科技大学、北京航空航天大学 and 西北工业大学等高校已经开始了增材制造的研究。其中,华中科技大学侧重SLM技术,并且已经在SLM系统制造

技术上取得创新和突破;北京航空航天大学 and 西北工业大学主要集中在对金属熔融沉积技术的研究;西北工业大学建立了激光快速成形系统,针对多种金属材料开展了工艺实验;近年来西北工业大学团队采用3D打印技术打印了最大尺寸3 m、重达196 kg的飞机钛合金左上缘条^[11]。此外,大连理工大学、南京航空航天大学、中北大学以及中国科学院深圳先进技术研究院、中国科学院自动化研究所等科研机构在设备研制、软件开发、产品制造和材料研发等领域开展了一系列的研究^[12]。在2012年,中国成立了增材制造技术产业联盟以促进该技术的协同发展;2016年,中国成立了全国增材制造标准化技术委员会,致力于增材制造技术相关标准的研究和制定。在国内,针对材料、工艺和设备的研究成果部分已实现产业化,应用范围覆盖航空航天、汽车、生物医疗和装备制造等重要领域^[13-14]。

尽管国内外在增材制造制件的成形及应用研究方面取得了大量成果,但增材制造制件在航空航天、汽车等领域的大量应用还存在差距。其中,成形质量控制、残余应力以及制件精度是增材制造技术面临的主要困难,亟需通过材料、工艺、检测、控制等多学科交叉,提升制件质量。

2 增材制造技术的缺陷类型

尽管国内外已经将3D打印技术逐渐应用到了工业领域,但此技术还不太完善,仍有需要探索和研究优化的地方。特别是在工程应用上,还需要考虑如何进一步降低设备与材料成本、提高成型效率,提高设备与工艺的稳定性,解决大工作台范围内的预热温度场难以控制、工艺过程监控不完善等问题。目前,常见的增材制造制件如图1所示^[9,15-16]。研究发现,增材制造材料中缺陷形成的不同特征可以分为3个方面,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。1) 材料特性导致的缺陷,主要包括粉末颗粒形貌、粒度分布、松装密度、空心粉末以及夹杂物;2) 特征参量导致的缺陷,激光束对材料的作用时间极短,在材料逐层堆积的过程中,不断经历急热和急

冷的交替过程,致使熔池及其附近部位的加热熔化、凝固和冷却的速度比周围的区域速度快,在此过程中不同的参数导致出现不同缺陷,如残余应力、表面缺陷、孔隙、球化以及裂纹等缺陷;3) 服役

导致的缺陷,在零件服役过程中形成的缺陷主要有表面缺陷、裂纹和变形。其中常见的缺陷类型如图2所示^[17]。

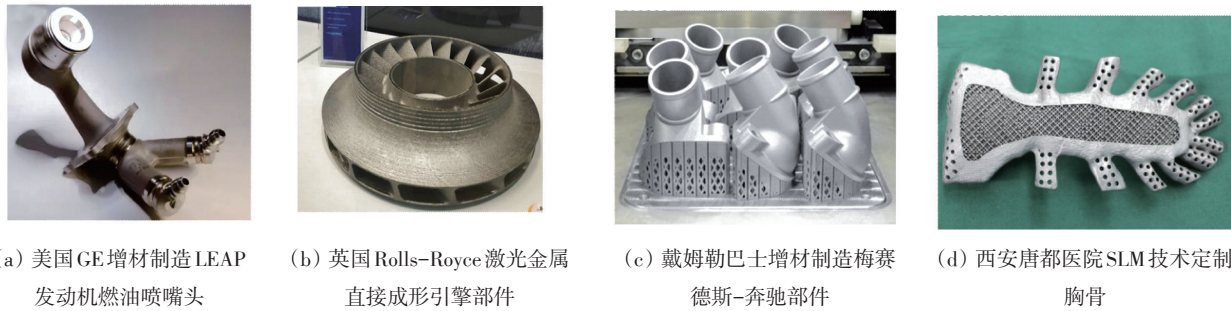


图1 典型增材制造制件

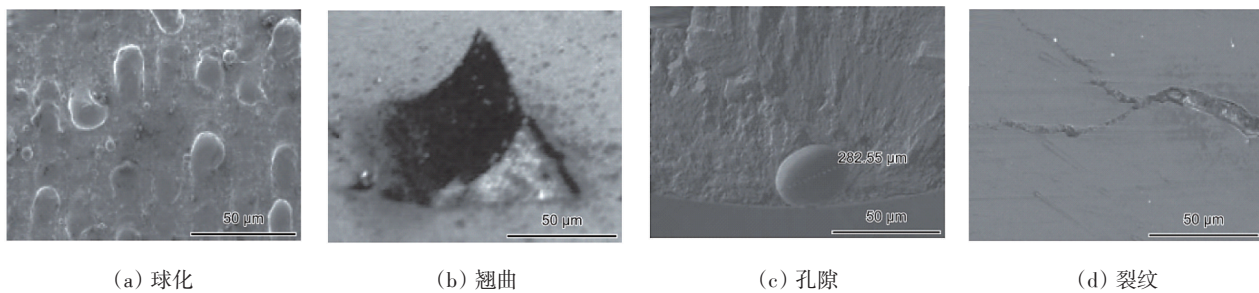


图2 增材制造制件典型缺陷

金属增材制造制件在制造和使用过程中产生缺陷是不可避免的。孔隙形成的主要原因是粉末质量差,存在空心粉以及工艺参数导致的缺陷。空心粉在快速熔化快速凝固过程中,内部空气无法及时逃逸,被困在成形零件中形成孔隙,这类孔隙一般呈球形^[18]。在凝固过程中,熔池表面张力对流对微小熔池相当于起到了搅拌作用,如果成形工艺参数不当,激光能量密度过大,熔池会形成涡流,抑制了气体的逃逸也会形成孔隙^[19]。裂纹是激光增材制造常见的缺陷,一般分为热裂纹和冷裂纹。热裂纹是在熔池完全凝固前由于金属的冷却收缩率不同而产生的,其外观形状曲折不规则。冷裂纹是在金属完全凝固后由于内部的拉应力大于金属的抗拉强度而产生的,其形状呈直线^[17]。激光选区熔化成形技术由于熔池小粉末粒径小的原因,其成形过程中产生的孔隙往往不到 100 μm ,此外还有尺度

极小的微裂纹。

综上所述,激光增材制造构件成形缺陷控制是成形质量的重要保证,应针对不同材料,选择合适的成形工艺参数,最大限度减少成形缺陷的产生,并通过无损检测对成形构件缺陷进行评价与表征。

3 增材制造技术中无损检测方法

现实应用中,用于传统制造零部件的破坏性试验无法用于增材制造的制件,因为它们往往是一次性的,而且制造成本极其昂贵。此外,由于增材制造的制件是一层层创建,属性更加难以预测。增材制造零部件的独特性给产品质量检验带来了挑战,而它正好适合使用无损检测。无损检测就是在不用破坏工件的前提下对工件内部的缺陷和表面的缺陷进行检测。该技术适用于具有复杂几何形状

以及成本昂贵的零部件。它能够满足增材制造部件所有独特的检验要求^[20]。

无损检测的方法不仅可用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,整个过程可实现快速、无损、原位的检测^[21]。在制备过程中使用无损检测来实时监控3D打印制品中残余应力的分布,可以防止其翘曲和开裂;在产品的研发阶段,使用无损检测结合数字计算机技术可以为制品提供其相应的密度、弹性参数、孔隙率,指导产品研发工艺的提高与升级,为制备出更高质量的3D打印制品起到指导作用,对缩短材料的研发与生产周期和成本有积极意义。

针对增材制造的无损评价主要包括3个方面的需求:原料无损检测、工艺过程监控、完成工件无损检测^[22]。原材料的检测属于离线检测,离线测量一般是应用于大批量生产中,适于流水生产线作业。加工与测量分别在专用检测设备上进行,在加工设备上加工完后,需将产品移至测量设备上测量。因此,对于3D打印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;其理化特性的测试检验项目与传统减材加工技术的原材料有很大的不同,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,采用无损检测技术对粉体材料的粒度、粒度分布、形貌及空心粉末含量等参量的三维表征具有重要意义,研究粉末质量,为建立增材制造用材料性能数据库,实现增材制造技术的高性能、高效率和经济可行性提供稳定可靠的原材料保障。

工艺过程检测属于在线实时监控。在线测量是加工与测量在同一设备上进行的测量方法,通过对制造过程进行监控,以减少缺陷的产生,提高产品的尺寸精度和力学性能,最终达到提高产品质量的目的^[23]。目前很多国内外的研究人员对激光过程监控进行研究,他们研究出很多能对激光增材制造过程进行监控的系统,这些系统集中在对熔池的物理参数进行在线检测和对组件的缺陷进行检测并且通过反馈控制减少这些缺陷上。激光监控过

程主要分为2个部分,一个是数据采集,一个是数据处理。通过这两种数据处理,在检测工艺上,针对其工艺的特殊性构建出一套与之匹配的检测方法和体系。

完成工件检测也属于离线检测,主要包括制造工件(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构件内部缺陷特征;同时也可以对服役后的零件进行检测,了解使用后可能产生缺陷部位,方便后续修复工作和预测使用期限^[22]。无损检测的方式可以通过大量数据库的统计和研究,建立一套完整的产品数据库,便于理解产品不同缺陷属性对于产品质量和性能的影响,为制备出更高质量的增材制造产品发挥作用。

无损检测阶段分为3个过程,首先是能发现缺陷,其次将缺陷进行定量分析,最后将缺陷进行判定。因此目前在无损检测方面的技术主要包括:超声检测、计算机断层扫描(computed tomography, CT)、涡流检测和红外相机测量。图3是一种采用计算机断层扫描技术的实验设备^[24]。但现阶段,这些无损检测手段在增材制造方面还刚刚起步,由于数据量有限,仍缺乏系统性和完整性的数据库,没有完整的检测标准和验收等级,还需进行大量的试验和分析。

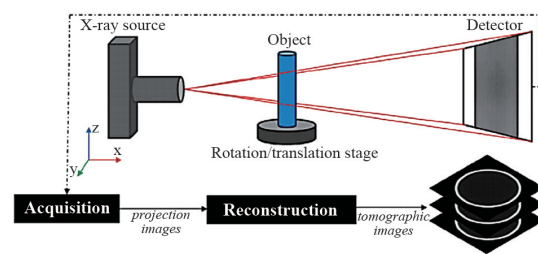


图3 工业CT原理

3.1 超声检测

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^[25]。增材制造结构件中典型缺陷的超声波信号特征与缺陷的大小和深度有一定对应关系,西北工

业大学研究了TC4钛合金激光增材制造件中孔洞类缺陷与超声信号的相互作用关系,当缺陷深度一致时,超声信号幅度随缺陷尺寸的增大而增大,当缺陷尺寸一致时,超声信号幅度随缺陷深度的增大而减小^[26]。增材制造结构件由于其声学特征与常规金属锻件铸件不同,可检测的缺陷灵敏度也不同,中国航发北京航空材料研究院针对钛合金增材制造件的气孔和未熔合缺陷的检测灵敏度开展超声检测试验研究,可检测的气孔大小为200~660 μm ,超声检测得到的气孔大小通常比实际气孔表面测量结果更大,如图4所示^[27]。可检测的未熔合大小为1~3 mm,超声检测得到的未熔合大小通常比实际未熔合表面测量结果更小。加拿大国家研

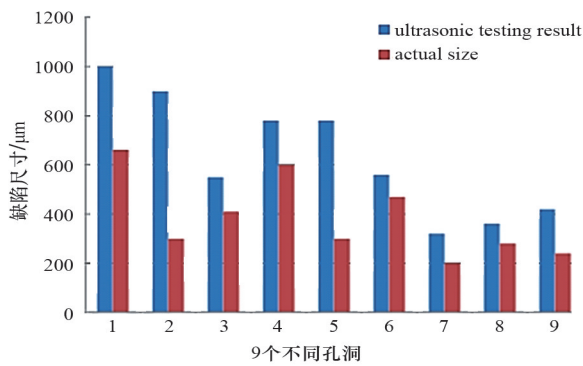
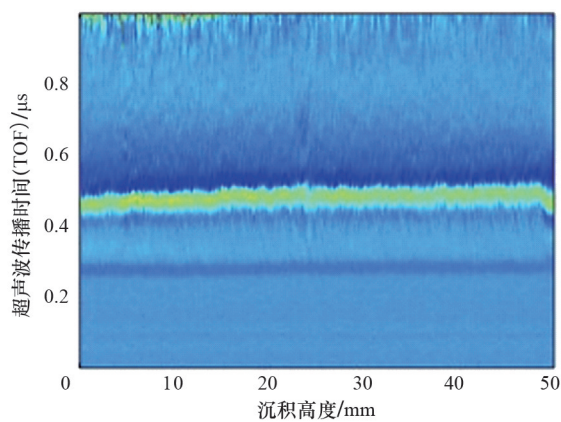
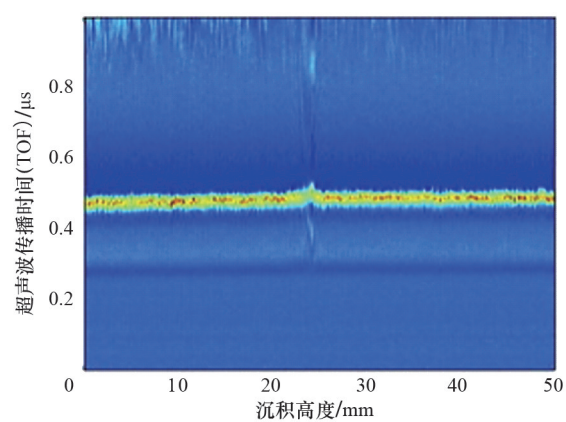


图4 气孔的实际尺寸与超声检测结果对比



(a)



(b)

图6 沉积样品(a)和(b)在50 mm长度上缺陷的B扫描图形

超声检测方法可检测增材制造结构件中的气孔、熔合不良、裂纹和夹杂等缺陷,但对于裂纹缺

陷,超声检测只能检测垂直于声束方向的裂纹,需多方向检测或与其他无损检测方法补充使用。超

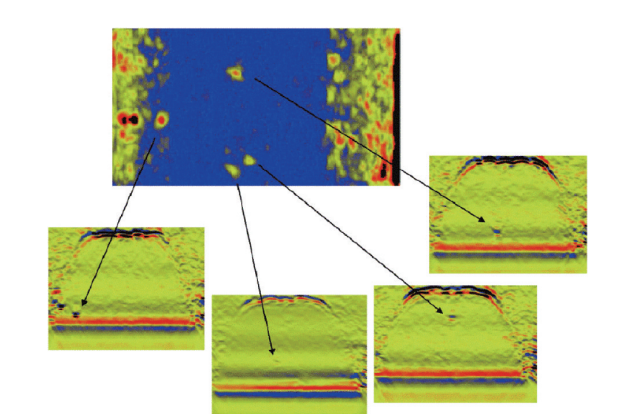


图5 激光超声检测的C扫描及B扫描图像

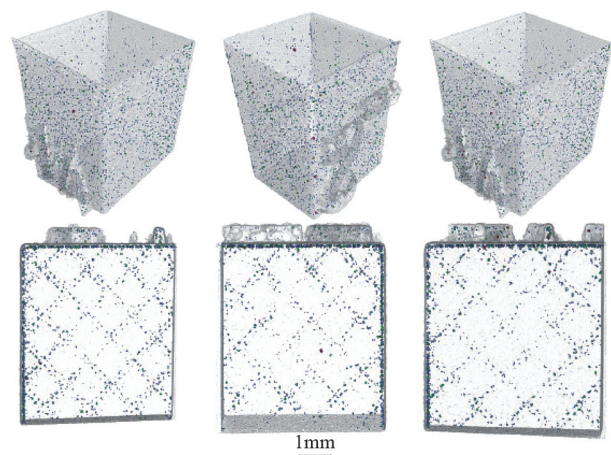
由于激光超声具有非接触、可检测复杂形状制件以及对检测环境要求不高等优势,特别适合于进行制造过程中的在线实时检测。TWI公司等提出了一种用于激光粉末沉积器件在线检测的激光超声技术,并制造加工缺陷以确定该技术的灵敏度。建立了激光产生超声波的数值模型,以加深对物理的理解,优化设置和验证实验测量结果(图6)^[29]。

声检测方法适用于检测大型结构件、形状结构复杂性相对不高的增材制造件,可与相控阵超声、工业机器人等技术结合,提高检测效率。

3.2 CT检测

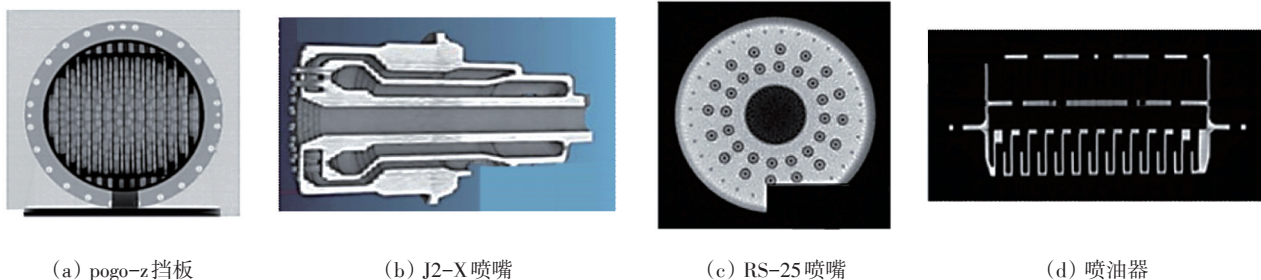
计算机断层扫描可以对样品进行表面和内部检测,包括表面粗糙度、尺寸精度以及内部缺陷,而超声检测和渗透检测是针对工件表面。CT检测技术检测精度高,可成三维断层扫描图像,结果直观,适用于复杂构型的中小型结构件的无损检测。对于精细的零件,CT技术在检测内部孔隙、裂纹等方面有其独特的优势。诺丁汉大学增材制造课题组^[30]采用CT检测技术测量金属增材制造件的孔隙,可检测孔隙率为0.06%的铝合金激光选区熔化制造件,且可检测出直径为260 μm 的孔隙。Sukal等^[31]利用选区激光熔化打印不同回收粉末次数的样品,在CT检测技术下发现样品孔隙主要集中在边缘部位,同时在一定粉末回收次数内,对零件质量几乎没有影响,结果如图7所示。Anton等^[32]采用 μCT 检测技术成功检出了孔隙率仅为0.005%的激光增材制造钛合金复杂构件中采用常规方法难以检出的微孔隙,并对比了热等静压前后孔隙率的变化情况。尼康测量公司将工业CT检测技术应用于

增材制造结构件的无损检测和几何测量,可检测出增材制造件中网格结构的裂纹,通过改变检测参数还可检测出零件中的粉末残留^[33]。马歇尔太空飞行中心(Marshall Space Flight Center, MSFC)将CT检测技术利用于增材制造的 pogo-z 挡板、RS-25/J2-X 喷嘴和注射器的检测,可检测到模拟内部缺陷和不可达的内部特征,结果如图8所示^[34]。



(a) 1次回收 (b) 5次回收 (c) 10次回收

图7 不同回收次数粉末SLM打印样品中气孔分布的可视化



(a) pogo-z 挡板

(b) J2-X 喷嘴

(c) RS-25 喷嘴

(d) 喷油器

图8 金属增材制造制件工业CT图像

可以发现,相比超声波检测技术,CT检测手段在增材制造中运用得更为广泛,这主要是因为工业CT技术不受被检物体结构、材料及表面状况等限制;同时提供了被检物体某一截面的断层图像或三维图像,成像简单直观,能清晰表征被检物体的内部结构信息,且内部结构信息能精确度量。这些特点正好弥补了超声检测等常规检测方法的不足,很

好地对增材制造复杂零部件的内部缺陷进行检测。总体而言,CT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。

工业CT检测可检测增材制造结构件中的气孔、熔合不良、裂纹和夹杂等缺陷,特别是细小缺陷,并可给出被检件的二维断层扫描图像。对于尺

寸较小、形状结构复杂的增材制造件,例如金属网格结构和发动机喷嘴等复杂结构件,以及要求检出较小孔隙和残留粉末等缺陷,适合采用工业CT检测方法。

3.3 涡流检测

涡流检测技术是利用电磁感应原理,通过测定被检工件内感生涡流的变化来无损评定导电材料及其工件的某些性能,或发现缺陷的无损检测。涡流检测技术对增材制造过程中可能出现的小表面裂纹和浅表面裂纹有极高的分辨率和灵敏度,常被用来检测产品表面缺陷。Rudlin等^[35]在激光熔融沉积镍基合金试样上制作人工缺陷,对涡流方法的检测能力进行实验表明,涡流检测对于0.2 mm表面缺陷以及1 mm深度处0.6 mm大小的缺陷检出率可达90%。马歇尔太空飞行中心同时也采用涡流检测技术对Pogo-Z挡板和阀体表面质量进行了检测,主要是区分表面粗糙度情况^[34]。NASA的格伦研究中心应用涡流检测技术对选区激光熔化工工艺制造的液体推进火箭发动机关键部件的表面进行测试分析。

涡流检测技术检测的增材制造部件缺陷尺寸取决于产品表面的可接触性材料、几何形状和表面粗糙度等。由于涡流检测只适用于导电金属材料或能感生涡流的非金属材料的检测,因此其运用受到很大局限性,但同时该技术简便,适用于在制造工艺过程中进行质量控制,或在成品剔除不合格品;另外对于在役零件可实现机械零部件及热交换管等设施进行定期检验。

3.4 红外相机检测

采用传统的离线检测手段进行成形后铸件、锻件的检测具有良好的效果。然而,对于增材制造制件,其成形原理与传统制造方式不同,原材料、成形工艺参数、成形后的加工等都可能产生大量废品的产生从而带来浪费,这使得许多企业和研究机构开始寻找增材制造制件生产过程中的在线无损检测方法。红外相机检测技术在生产线上对生产过程加以监测,即进行所谓“在线测量”,则不仅可以降低消耗、减少成本、增加产量、提高效益,而且还可以保证产品的质量、增强产品的竞争力。慕尼黑工

业大学的Krauss等^[36]在EOS M270型激光选区熔化成形设备上安装了红外摄像机,以监控成形过程中沉积层的温度分布及瞬态演变,从而监测制件内部可能产生的气孔及其他异常,该方法可检出的最小缺陷尺寸为100 μm。Dinwiddie等^[37]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等^[38]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。

若对增材制造过程进行实时检测并反馈给控制系统,控制系统相应的调整工艺参数,可以有效减少增材制造产品的缺陷数量,保证产品的可靠使用。但从总体来看,目前国内外对于增材制造制件在线检测方法的研究仍处于探索阶段,检测对象多局限于形状简单的试样,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。

4 增材制造过程无损检测的发展趋势

为使增材制造的制件可以大范围地应用于航空航天、汽车等重要领域,就需要提高无损检测的检测技术与水平,现阶段国内外相关研究人员在其检测方式的研究上已经获得一定的研究成果。接下来还需要进一步跟进增材制造技术的发展,在以下4个方面开展更深入的研究工作。

1) 加强对无损检测新型技术的使用。增材制造制件已经逐渐呈现出大型化、复杂化的发展趋势,并且以往的无损检测方式是无法满足其相关要求的,所以应积极研究激光超声、CT检测等新型NDT的使用方法。

2) 加强对增材制造在线检测方法的研究力度。就目前形势看,增材制造制件的未来发展离不开在线检测的参与,虽然国内外已对增材制造制件的在线检测技术进行有效的研究,但研究进度和实

际应用之间仍有一定距离,例如激光超声、热成像等内容在未来的线检测研究中需要继续深入。

3) 加强应力测试以及表征技术的研究。内应力始终是对大型铸件成型的阻碍,假如能使用NDT可以对其内应力进行有效表征和检测,那么将在确保铸件质量等方面提供强有力的支撑。

4) 积极建立与完善增材制造领域无损检测方法的相关标准。因为现阶段金属增材制造铸件中的无损检测标准还未形成科学系统的体系,所以建立与进一步完善无损检测方法标准是未来该领域的重点发展方向。

参考文献(Reference)

- [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] 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 9-21.
- [3] 孙兵兵, 张学军, 郭绍庆, 等. 金属材料激光快速成形的研究进展[J]. 电焊机, 2013, 43(5): 81.
- [4] 张小伟. 金属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.
- [5] Wang M, Lin X, Huang W. Laser additive manufacture of titanium alloys[J]. Materials & Processing Report, 2015, 31(2): 90-97.
- [6] Zhang B, Li Y, Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 515-527.
- [7] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
- [8] 曾光, 韩志宇, 梁书锦, 等. 金属零件3D打印技术的应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2014(6): 376-382.
- [9] 中良. 3D打印在航空制造中的应用与创新[J]. 世界制造技术与装备市场, 2019, 161(2): 80-84.
- [10] 李涤尘, 苏秦, 卢秉恒. 增材制造——创新与创业的利器[J]. 航空制造技术, 2015, 479(10): 40-43.
- [11] 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.
- [12] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015(11): 38-42.
- [13] 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.
- [14] 李礼, 戴煜. 中国增材制造技术现状及发展趋势[J]. 新材料产业, 2018, 297(8): 32-35.
- [15] 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, 480(12): 26-31.
- [16] 张世庆, 孙嘉怿, 陈成, 等. 增材制造骨科植入型医疗器械的发展现状及应用[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2018, 86(1): 82-86.
- [17] 唐超兰, 温竞青, 张伟祥, 等. 钛合金3D打印成形技术及缺陷[J]. 航空材料学报, 2019, 39(1): 42-51.
- [18] 李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [19] 张祥春, 张祥林, 刘钊, 等. 工业CT技术在激光选区熔化增材制造中的应用[J]. 无损检测, 2019, 41(3): 52-57.
- [20] Aleshin N P, Shchipakov N A, et al. Using nondestructive testing methods for in-production quality control of additive manufactured parts[J]. Russian Journal of Non-destructive Testing, 2016, 52(9): 532-537.
- [21] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.
- [22] Chen J, Zhao Y, Ju Y, et al. Research progress on application of NDT in additive manufacturing technique[J]. 2018, 8(2): 91-99.
- [23] Yang P H, Gao X X, Liang J, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13-21.
- [24] Ziokowski, G, Chlebus E, Szymczyk P, et al. Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 608-614.
- [25] Popovich A A, Masaylo D V, Sufiiarov V S, et al. A laser ultrasonic technique for studying the properties of products manufactured by additive technologies[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 52(6): 303-309.
- [26] 阮雪茜, 林鑫, 黄春平, 等. TC4合金激光立体成形孔洞类缺陷的超声检测[J]. 中国激光, 2015(12): 64-71.
- [27] Shi Y W, Yang P H, Liang J, et al. Relations among ultrasonic testing results and defect characteristics and material properties of laser additive manufacturing titani-

- um alloy[C]//19th World Conference of Non-Destructive Testing. Munich, 2016.
- [28] Lévesque D, Bescond C, Lord M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics[C]//42nd Annual Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE. AIP Publishing LLC, 2016.
- [29] Cerniglia D, Scafidi M, Pantano A, et al. Inspection of additive-manufactured layered components[J]. *Ultrasonics*, 2015, 62: 292-298.
- [30] Lavery L, Harris W, Jeff G, et al. Recent advancements in 3D X-ray microscopes for additive manufacturing[J]. *Microscopy & Microanalysis*, 2015, 21(3): 131-132.
- [31] Sukal J, Palousek D, Koutny D. The effect of recycling powder steel on porosity and surface roughness of SLM parts[J]. *Modern Machinery Science Journal*, 2018, doi: 10.17973/MMSJ.2018_12_2018110.
- [32] Anton P, Stephan G R, Johan E, et al. Application of microCT to the non-destructive testing of an additive manufactured titanium component[J]. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2015(4): 1-7.
- [33] Gomez H V. Application of X-ray CT for quality control in additive manufacturing[C]//2016 Additive Manufacturing Users Group 28th Annual Education Training Conference. St. Louis: Additive Manufacturing Users Group, 2016.
- [34] 胡婷婷, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(8): 70-75.
- [35] Rudlin J, Cerniglia D, Scafidi M, et al. Inspection of laser deposited layers[C]//11th European Conference on Non-Destructive Testing. Czech Republic, 2014.
- [36] Krauss H, Zeugner T, Zaeh M F. Thermo graphic process monitoring in powder bed based additive manufacturing[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Conference: AIP Publishing, 2015.
- [37] Dinwiddie R B, Dehoff R R, Lloyd P D, et al. Thermo graphic In-Situ Process Monitoring of the Electron Beam Melting Technology used in Additive Manufacturing[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. 2013.
- [38] Gatto M, Harris R A. Non-destructive analysis (NDA) of external and internal structures in 3DP[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, 17(2): 128-137.

Application of non-destructive testing in additive manufacturing technique

SHUAI Sansan, LIU Wei, WANG Jiang*, REN Zhongming

School of Materials Science and Engineering, State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract The development and the application of the additive manufacturing technology are discussed in this paper, as well as the characteristics of the additive manufacture. The types and the characteristics of the defects formed during the additive manufacturing process are analyzed. Various non-destructive testing (NDT) methods, such as the ultrasonic testing, the computed tomography, the eddy inspection and the infrared camera measurement are used for the additive manufacturing parts, their applicability, the merits and weaknesses are analyzed. Finally, it is suggested that for the additive manufacturing parts, some new NDT methods and the online monitoring technology should be developed, and the related NDT standards should be established.

Keywords additive manufacturing; defect; non-destructive test; online inspection ●



(责任编辑 卫夏雯)