

航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展*

胡婷婷, 高丽敏, 杨海楠

(中国商飞北京民用飞机技术研究中心民用飞机结构与复合材料北京市重点实验室, 北京 102211)

[摘要] 增材制造技术成形工艺的特殊性给无损检测带来了新的挑战, 存在各向异性和检测盲区大等问题。为此, 国内外研究者开展了增材制造金属结构件的无损检测方法研究。简要概述增材制造技术在航空航天领域的应用情况, 同时结合无损检测各方法应用特点, 介绍针对增材制造金属结构件的超声、射线、工业 CT 和荧光渗透等多种无损检测方法的应用和研究现状, 分析总结了相关无损检测标准, 并指出了增材制造金属结构件无损检测未来的发展方向, 即高精度无损检测技术、原位监测方法和标准化体系的构建。

关键词: 增材制造; 无损检测(NDT); 金属结构件; 超声检测; CT 检测

Application of Nondestructive Testing Techniques on Additive Manufacturing in Aerospace Fields

HU Tingping, GAO Limin, YANG Hainan

(COMAC Beijing Key Laboratory of Civil Aircraft Structures and Composite Materials, Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

[ABSTRACT] Additive manufacturing bring challenges for the nondestructive testing techniques, anisotropic and large non detection zone were the major obstacles. Therefore, researchers in the world have studied the NDT for additive manufacturing. The application of metal additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics was introduced. The application features of NDT methods were analyzed, the research progress on nondestructive testing of metal additive manufacturing was introduced, including UT, RT, CT and FPT. The related nondestructive testing standards are analyzed. The future development direction of NDT for additive manufacturing metal components is pointed out, that is, high precision NDT, in-situ monitoring and the construction of standardization system.

Keywords: Additive manufacturing (AM); Nondestructive testing technology (NDT); Metal structural part; Ultrasonic testing; CT testing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.070

增材制造技术突破传统切削加工方式, 通过材料累加的制造方法, 实现“自由制造”, 具有无传统模具、制造周期短、可加工复杂构型结构等优点, 广泛应用于航空航天等领域^[1-2]。

增材制造技术在航空航天领域迅速发展的同时, 零件内部冶金缺陷的控制是增材制造技术走向工程推广应用的**关键技术难题^[3], 因此需建立可靠的无损检测体系, 有效评估零件质量。与传统的锻造和铸造制件相比, 增材制造件的组织特征存在方向性, 如 TC4 和 TA15 钛合金增材制造件具有粗大柱状晶组织^[4], 且形状和结构

通常较为复杂, 如点阵结构和拓扑结构, 给无损检测带来了很大挑战^[5], 因此需根据增材制造件的特点, 研究适用于增材制造件的无损检测技术和方法。本文首先介绍了增材制造技术在航空航天领域的应用进展, 随后从不同无损检测方法和标准规范等角度, 介绍了航空航天用增材制造件的无损检测技术研究现状, 并对各无损检测方法作简要评述。

1 增材制造技术在航空航天领域的应用进展

在航空航天领域, 增材制造主要方法为激光熔化沉积技术和激光选区熔化技术, 激光熔化沉积技术属于送粉技术, 可根据不同功能要求完成梯度材料结构件的直

* 基金项目: 国家自然科学基金(51503225)。

接制造,适用于大型或型面相对简单结构件的加工制造与修复。激光选区熔化技术属于铺粉技术,可制造出传统方法无法实现的复杂异型结构,且其尺寸精度和表面质量很高,适用于复杂结构件如轻质点阵夹芯结构、空间曲面多孔结构等的制造^[6-7]。

近年来美国 NASA 增材制造了首个全尺寸铜合金火箭发动机零件,并将增材制造技术应用于 J-2X 和 RS-25 等多个型号航天发动机复杂金属结构件的制造。俄罗斯 TPU 大学增材制造了首个微型卫星 Tomsk-TPU-120,该卫星已搭载太空货运飞船进入太空^[8]。GE 公司开展了喷油嘴的增材制造技术研究,并将应用于下一代的 GE Leap 发动机^[9]。波音公司已经将增材制造技术应用于 X-45、F-18 和 F-22 等机型零部件的制造。空客公司增材制造了 A380 飞机客舱行李架,并通过对飞机短舱铰链进行拓扑优化设计,实现增材制造结构件减重 60%^[10]。中国商飞公司与北京航空航天大学合作完成了 C919 机头工程样机 TC4 钛合金主风挡窗框激光成形,中国商飞与西北工业大学合作采用增材制造技术为 C919 制造了长度超过 3m 的钛合金中央翼肋缘条^[11]。

2 增材制造结构件的无损检测

航空航天用增材制造结构件由于其组织和缺陷特征与传统铸件不同,存在不均匀性和各向异性等特征,且几何形状复杂,传统无损检测方法出现可达性差、检测盲区大等难题,因此不能简单沿用传统铸件的无损检测技术^[12-13],需重新分析组织特征与无损检测信号的对应关系,明确典型缺陷的无损检测信号特征,根据几何结构的复杂情况选择适用的无损检测方法和工艺参数。常用于航空航天金属增材制造结构件的无损检测技术,包括超声检测、射线检测、工业 CT 检测和荧光渗透检测技术等。

2.1 超声检测

超声检测方法穿透能力强、灵敏度高,适用于检测规则形状、表面较光滑的工件,同时材料的声衰减、声速和组织特征等对超声检测的实施具有重要影响。

增材制造件具有独特的逐层快速熔凝组织特征,其超声检测的声学特征与传统铸锻件不同。西北工业大学研究对比了 TC4 钛合金锻件与增材制造件的声学特征,发现 TC4 锻件的声速大于增材制造件,而衰减系数则反之,同时分析了 TC4 钛合金增材制造件不同热处理对超声特征的影响,结果表明超声声速在去应力退火后最大,沉积态声速次之,固溶时效态处理后最小,而衰减系数规律则相反^[14]。中国航发北京航空材料研究院研究了 TC18 钛合金增材制造件的超声检测特征,发现不同成形方向上的超声声速和灵敏度差异大,超声声速

差值将近 160m/s,灵敏度最大差值达 12dB^[15]。德国弗朗霍夫无损检测研究所和 MTU 航空发动机公司研究了不同激光能量下的超声信号分析,如图 1 所示,随着激光能量减小,材料中出现层间未熔合,缺陷的超声信号幅度增强,还研究了相控阵超声检测和评估增材制造件的各向异性和组织特征,通过设计双向试块和相控阵二维阵列,获取零件组织特征的三维信息^[16]。

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^[17]。

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。西北工业大学开展了 TC4 钛合金激光立体成形制件缺陷的超声检测能力研究,可检测内部孔洞类缺陷的大小为 0.6mm,对于表面及近表面缺陷,可检测刻槽宽度为 0.2mm、深度为 1~3mm 的缺陷。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 2 所示^[18]。可检测的未熔合大小为 1~3mm,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。

对于大型增材制造部件的无损检测,采用超声检测方法较为合适。NASA 的约翰逊航天中心采用传统超声检测方法和相控阵超声检测方法对电子束无模成形技术和激光近形制造技术制造的钛合金、铝合金和钢的航天飞行部件进行无损检测,其中 2219 铝合金增材制造件的孔隙和未熔合可用相控阵超声 B 扫检测出,如图 3 所示^[19]。沃尔沃宇航公司将超声检测探头和工业机器人相结合,检测激光熔融沉积制造的金属结构件。

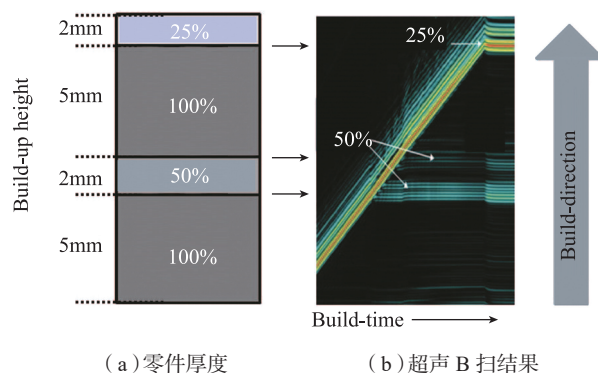


图1 不同激光能量下的超声检测信号

Fig.1 Ultrasonic testing signals of different laser power

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

2.2 CT检测

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。

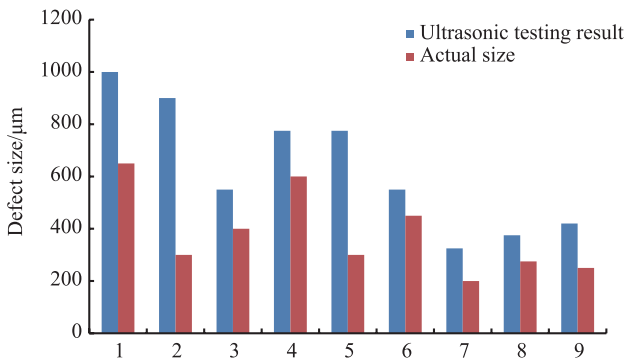


图2 气孔的实际尺寸与超声检测结果对比

Fig.2 Comparison between actual size and ultrasonic testing result of gas pore

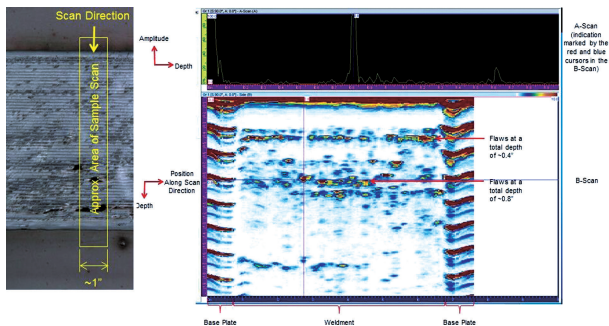


图3 铝合金增材制造件的超声检测结果

Fig.3 Ultrasonic testing result of aluminum additive manufacturing part

CT检测技术由于其技术特征可用于增材制造件孔隙的检测。德国弗朗霍夫无损检测研究所和MTU航空发动机公司研究了不同激光能量下增材制造件的CT检测结果对比分析,当激光能量为50%时,CT检测出3%孔隙率,当激光能量为25%时,CT检测出的孔隙率达到了30%。

高精度和高分辨率的CT检测技术被应用于增材制造件的组织分析。美国卡尔蔡司公司采用三维射线显微镜分析增材制造件的细小缺陷,可实现50nm高分辨率,可在远离工件处检测未烧结的粉末和细小裂纹,如图4所示^[20]。诺丁汉大学增材制造课题组采用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260μm的孔隙^[21]。法国农业科学研究院运用μCT检测技术检测熔融沉积成型件的微组织缺陷,从μCT检测图像中可看出典型缺陷的形态,可检测出直径为254μm的细小缺陷^[22]。

CT检测技术可应用于金属增材制造件的质量控制。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,图5为CT检测金属增材制造件的内部缺陷^[23]。NASA的多个中心采用CT检测航天用增材

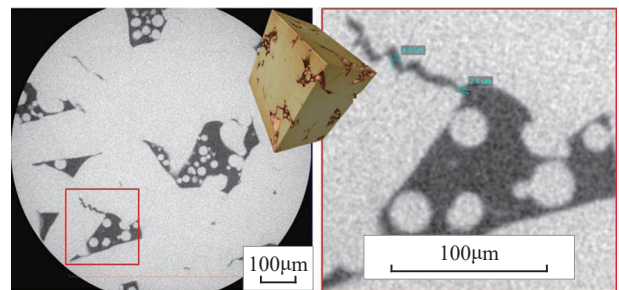


图4 3D打印制件的微组织缺陷特征及尺寸

Fig.4 Characteristic dimensions of microstructural defects induced by 3D printing

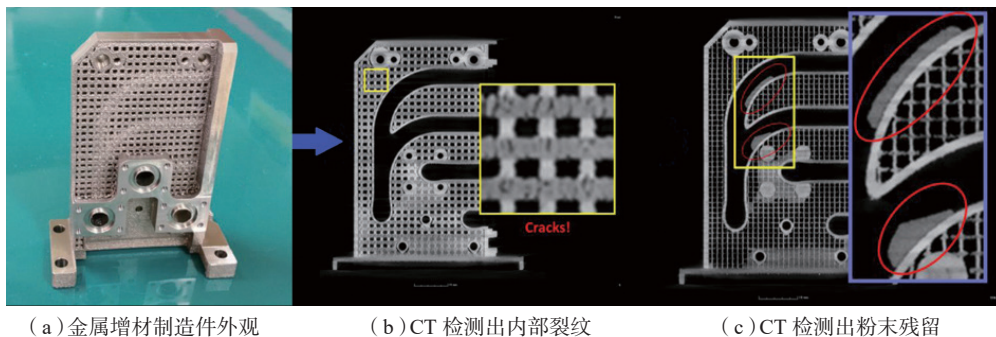


图5 金属增材制造件的CT检测结果

Fig.5 Results of CT inspection of metal made by AM

制造结构件,马歇尔航天飞行中心将 CT 检测技术应用于增材制造的 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。格伦研究中心应用 CT 检测方法检测 SLM 和 EBM 工艺制造的火箭发动机关键部件。约翰逊航天中心采用 CT 检测技术,检测电子束无模成形技术和激光近形制造技术制造的钛合金和钢的复杂概念机部件。

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,并可给出被检件的断层扫描图像。对于尺寸较小、形状结构复杂的增材制造件,如金属网格结构和发动机喷嘴等复杂结构件,和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。

2.3 射线照相检测

射线照相检测二维成像结果直观,不受制件表面质量影响,适用于一般复杂结构件的检测,对体积型缺陷如气孔、夹杂等较易检出,检测面积型缺陷如裂纹、未熔合等需注意射线的方向性。

增材制造件的射线照相检测能力由工件材料、工件厚度、缺陷类型和设备等决定。沃尔沃宇航公司通过激光熔融沉积 Ti-6Al-4V 金属试块试验验证,可检出厚度为 42mm 的 $\phi 0.4\text{mm}$ 、 0.8mm 和 1.2mm 平底孔,射线检测结果如图 6 所示^[24]。沃尔沃宇航公司还分析了气孔和熔合不良缺陷的射线检测特征,气孔通常可以被射线检测出,而垂直于射线源方向的某些熔合不良未被检出,当射线源转换 90° 再次透照就可检出。

射线照相检测可应用于增材制造部件的无损检测。NASA 的多个中心应用 X 射线照相检测技术检测增材制造的航天部件,如戈达德航天飞行中心利用 X 射线检测增材制造完成的探空火箭聚电池盒,约翰逊航天中心采用数字 X 射线检测电子束无模成形技术和激光近形制造技术制造的钛合金、铝合金和钢的航天飞行部件。

X 射线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,对于熔合不良缺陷,射线检测只能检测平行于射线源方向的缺陷,需不同方向多

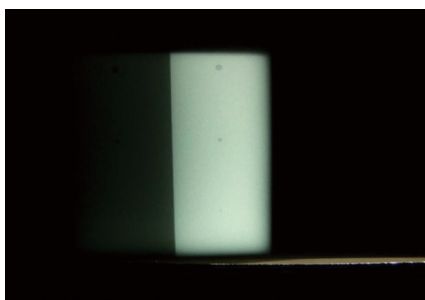


图6 金属沉积平底孔试块的射线检测结果
Fig.6 Results of RT of a MD FBH block

次透照。对于形状结构相对复杂的增材制造结构件,如利用激光熔融沉积工艺和电子束熔融沉积工艺制造的航空航天非点阵结构的金属件,适合用 X 射线检测方法进行无损检测。

2.4 荧光渗透检测

荧光渗透检测技术受被检件结构影响较小,检测表面开口缺陷的灵敏度高,且结果直观,适用于表面较光滑的表面开口缺陷的检测,NASA 采用荧光渗透检测 ASTRO-H 天文卫星钛合金绝热制冷件,图 7 为缺陷渗透显示。渗透检测方法不适合于检测未经过后处理机加和抛光的多孔性或粗糙表面的增材制造件。NASA 的格伦研究中心应用渗透检测 SLM 和 EBM 工艺制造的液体推进火箭发动机关键部件的表面,马歇尔航天飞行中心应用渗透检测 POGO-Z 挡板,如图 8 所示,其中高亮部分为零件表面粗糙导致的信号,这将影响缺陷的检测^[19]。

荧光渗透检测方法可检测表面开口微小裂纹等缺陷,对于经过后处理的非多孔性增材制造结构件的表面开口缺陷,适合用荧光渗透检测方法进行无损检测。

2.5 各无损检测方法比较

增材制造金属件的无损检测方法有其应用特点和适用范围,表 1 总结了增材制造金属件常用的无损检测

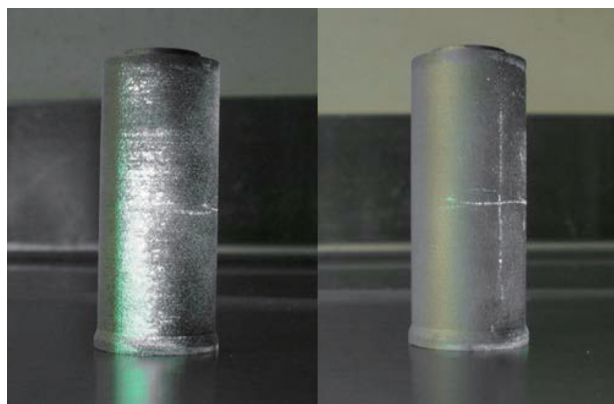
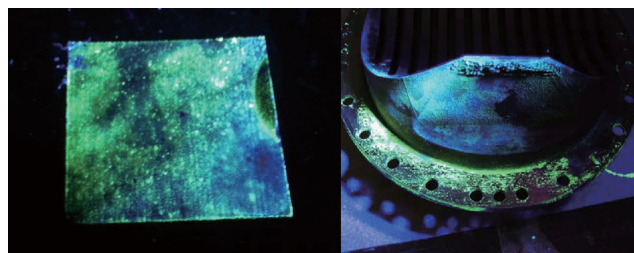


图7 ASTRO-H增材制造结构件的渗透检测结果
Fig.7 Results of PT of AM structure for ASTRO-H



(a) 火箭气体注射器的试样 (b) POGO-Z 挡板

图8 航天用增材制造结构件的渗透检测结果
Fig.8 Results of PT of AM structure for aerospace

表1 增材制造金属件的缺陷和无损检测方法
Table 1 NDT and defect of metal made by AM

检测方法	气孔	裂纹	夹杂	未熔合
超声检测	√	部分√	√	√
射线照相检测	√	√	√	部分√
工业 CT 检测	√	√	√	√
荧光渗透检测	部分√	部分√	—	—

方法的检测范围,其中超声检测能否检出裂纹依据的是超声探头的位置,射线检测能否检测出熔合不良依据的是射线源的位置,荧光渗透检测仅能检测表面光滑的开口缺陷。工业 CT 检测可检测缺陷种类多,且可成断层扫描图像。对于无损检测各类方法,需充分结合增材制造的组织、缺陷和结构特征,针对工艺特殊性构建适用的无损检测技术体系^[25]。

采用传统的无损检测方法进行成形后的增材制件的检测具有良好效果,但当发现超标缺陷时将带来制件的浪费,因此不少企业和研究机构开展了增材制造过程中的在线监测技术研究。在增材制造设备上集成光学、红外热像、热电偶、传统超声、激光超声等检测装置,监测制造过程中熔池的温度分布和缺陷,如弗朗霍夫研究和 EOS 公司等,已实现 SLM 过程的熔池在线监测,对于成型件的质量检测有重要的意义^[26-29]。

3 增材制造结构件的无损检测标准

增材制造技术在实现工程市场应用的进程中,技术标准必不可少。SAE 协会在 2002 年发布了第一个增材制造技术标准(宇航材料规范 AMS 4999),ASTM 的增材制造技术委员会 F42 和 ISO 的增材制造技术委员会 TC261 共发布增材制造技术标准近 20 项,内容涉及术语、工艺和材料测试等方面^[30]。我国的增材制造标准化与国际存在较大差距,仅在增材制造设备方面形成国家标准 8 项,对于设计、工艺、检验与测试等方面的标准化还未有所进展。2016 年成立全国增材制造标准化技术委员会(SAC/TC562),将积极推进增材制造工艺方法、测试方法和质量评价等国家标准的制定^[31],2017 年已有 2 项关于工艺和测试的国家标准送审稿通过审查,包括《增材制造工艺和材料分类》和《增材制造主要特性及测试方法》。

对于增材制造的无损检测相关标准,标准 AMS 4999A Titanium Alloy Direct Deposited Products Ti-6Al-4V annealed 规定了超声波检测和射线检测的方法和合格判据等内部质量要求,标准规定沿沉积方向的超声检

测按 AMS2631,在沉积部分开展的射线检查按 ASTM E 1742 标准,规定直接沉积制件需同时进行超声和射线检测。ASTM F2924 Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion 对零件表面质量和内部质量并没有强制要求,规定了射线检测的检测方法标准,而验收标准等需由供需双方协商确定,标准未规定超声检测要求。ASTM 委员会开展了金属增材制造件的无损检测技术标准 ASTM WK47031 Standard Guide for Nondestructive Testing of Additive Manufactured Parts Used in Aerospace Applications 的编制。

增材制造标准 ISO 17296—3 Additive manufacturing-General principles,其中第 3 部分要求无损检测按现有标准执行^[32],射线检测按 ISO5579,工业 CT 检测按 IEC61675,渗透检测按 ISO3452。NASA 的马歇尔航天飞行中心评估了无损检测在增材制造的应用,编写了增材制造熔合加工的粉末床认证标准,正在研究编制增材制造发动机 pogo-z 挡板的无损检测标准。

检测标准是检验和评价增材制造材料、零部件和应用产品质量可靠性等的重要依据^[33],因此建立增材制造件无损检测标准规范是增材制造的研究重点,增材制造的无损检测标准研究技术还有许多方面亟需研究,如:(1)同样规格增材制造无损检测试样的准备;(2)验证无损检测数据和破坏性测试数据;(3)制造前材料粉末的无损检测资质;(4)制造过程中无损检测的标准化;(5)标准化无损检测记录。

4 结论

增材制造技术发展迅速,有必要跟随其发展趋势,开展新型增材制件的检测方法研究。

(1)增材制造件的复杂内部结构,如点阵结构对无损检测提出了挑战,需发展新型的无损检测方法,如更高精度和更大扫描尺寸的 CT 检测技术,与其他无损检测方法互为补充。

(2)同时增材制造的检测还将向制造过程的在线监测方向发展,研究基于红外热成像、结构光扫描和激光超声等的原位监测技术,实现制件成形质量的实时在线监控,监测制造产生的缺陷并及时修复。

(3)逐渐建立和完善增材制造无损检测的试块要求、材料粉末检测、检测数据和记录等的标准化体系,是增材制造产业发展的有效支撑。

参考文献

[1] DANIEL G, BASTIAN H, FRANZ G, et al. Continuous 3D printing for additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014,

20(4): 320–327.

[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] 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 Huaming. Materials fundamental issues of laser additive manufacturing for highperformance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35 (10): 2690–2698.

[4] 刘彦涛, 张永忠, 陈以强, 等. 激光熔化沉积 TA15 + Ti2 AlNb 合金的组织与力学性能[J]. 航空材料学报, 2017, 37(3): 61–67.

LIU Yantao, ZHANG Yongzhong, CHEN Yiqiang, et al. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 + Ti2 AlNb alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(3): 61–67.

[5] 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.

ZHANG Xuejun, TANG Siyi, ZHAO Hengyue, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122–128.

[6] 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, 58(11): 38–42.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 38–42.

[7] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 66–71.

GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huaixue. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 66–71.

[8] 刘琦, 梁晓康, 陈济轮, 等. 增材制造技术在海外航天领域的研究应用现状[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(6): 103–106.

LIU Qi, LIANG Xiaogeng, CHEN Jilun, et al. Research and application status of additive manufacturing in foreign aerospace[J]. Missiles and Space Vehicles, 2016(6): 103–106.

[9] GE Aviation. Additive manufacturing[EB/OL]. (2015–07–29)[2017–12–29]. <http://www.Geaviation.com/company/additivemanufacturing.html>.

[10] Airbus. Airbus strengthens R&T cooperation with China[EB/OL].(2014–03–14)[2017–12–29]. <http://www.airbus.com/presenter/press-releases/press-release-detail/detail/airbus-strengthens-rt-cooperation-with-china/>.

[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.

LIN Xin, HUANG Weidong. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015, 34(9): 684–688.

[12] 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.

YANG Pinghua, GAO Xiangxi, LIANG Jing, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13–21.

[13] CERNIGLIA D, SCAFIDI M, PANTANO A, et al. Inspection of additive manufactured layered components[J]. Ultrasonic, 2015, 62: 292–298.

[14] 阮雪茜, 林鑫, 黄春平. TC4 激光立体成形显微组织对超声参量的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103005.

RUAN Xueqian, LIN Xin, HUANG Chunping. Effect of microstructure of laser solid forming TC4 titanium alloy on ultrasonic parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0103005.

[15] 杨平华, 史丽军, 梁菁, 等. TC18 钛合金增材制造材料超声检测特征的试验研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 38–42.

YANG Pinghua, SHI Lijun, LIANG Jing, et al. Experimental research on ultrasonic characteristics of TC18 additive manufacturing titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 38–42.

[16] RIEDER H, SPIES M, Bamberg J, et al. On and offline ultrasonic characterization of components built by SLM additive manufacturing[C]//42nd Annual Review of Progress in QNDE. Melville: AIP Publishing LLC, 2015.

[17] 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, 42(12): 1203001.

RUAN Xueqian, LIN Xin, HUANG Chunping, et al. Ultrasonic nondestructive testing of hole type defects in laser solid forming TC4 alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203001.

[18] 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 titanium alloy[C]//19th World Conference of Non-Destructive Testing. Munich, 2016.

[19] WALLER J M, SAULSBERRY R L, PARKER B H, et al. Summary of NDE of additive manufacturing efforts in NASA[C]//Quantitative Nondestructive Evaluation 2014 Conference. Boise: QNDE Conference, 2015.

[20] 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.

[21] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, CORFIELD M R, et al. Quantification and characterization of porosity in selectively laser melted Al–Si10–Mg using X-ray computed tomography[J]. Materials Characterization, 2016, 111: 193–204.

[22] NOURI H, GUESSASMA S, et al. Structural imperfections in additive manufacturing perceived from the X-ray microtomography perspective[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 234: 113–124.

[23] GOMEZ H V. Application of X-ray CT for quality control in additive manufacturing[C]//2016 Additive Manufacturing Users

(下转第87页)

速制造金属零件[J]. 新技术新工艺, 2011(11): 74-77.

YUAN Shaohua, ZHANG Haiou, WANG Guilan, et al. Fusion and milling compound precision moldless rapid manufacturing of metal parts[J]. New Technology & New Process, 2011(11): 74-77.

[9] 徐家文. 整体叶轮的特种加工方法[J]. 航空精密制造技术, 1992(4): 19-21.

XU Jiawen. Special processing method of blisk[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1992(4): 19-21.

[10] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空制造技术, 2006, 49(4): 94-100.

HUANG Chunfen. Modern aviation engine blisk and its manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(4): 94-100.

[11] 汤鑫, 曹腊梅, 盖其东, 等. 高温合金双性能整体叶盘铸造技术[J]. 航空材料学报, 2006(3): 93-98.

TANG Xin, CAO Lamei, GAI Qidong, et al. Superalloy double performance blisk casting technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006(3): 93-98.

[12] SHAN D B, XU W C, LU Y. Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (151): 289-293

[13] 刘芳, 单德彬, 吕炎, 等. 压气机转子的表面造型及等温精密成形工艺[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 474-477.

LIU Fang, SHAN Debin, LÜ Yan, et al. Surface modeling of compressor rotor and isothermal precision forming process[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 474-477.

[14] 刘芳, 林忠钦, 单德彬, 等. 2A70 铝合金转子等温闭塞式锻造工艺研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 161-165.

LIU Fang, LIN Zhongqin, SHAN Debin, et al. Study on isothermal blocking forging process of 2A70 aluminum alloy rotor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 161-165.

[15] CHO M H, KIM D W, LEE C G, et al. CBIMS: Case-based impeller machining strategy support system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 980-988.

[16] INNOTECH S. High-speed milling of large impellers[J]. World Pumps, 2008, 2008(507): 26-27.

[17] YOUNG H T, CHUANG L C, GERSCHWILER K, et al. A five-axis rough machining approach for a centrifugal impeller[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(3-4): 233-239.

[18] 张海鸥, 熊新红, 王桂兰, 等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术[J]. 中国机械工程, 2005, 16(20): 1863-1866.

ZHANG Haiou, XIONG Xinhong, WANG Guilan, et al. Plasma fusion forming and milling finishing technology for direct manufacturing of metal parts[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(20): 1863-1866.

通讯作者: 刘长青, 博士, 副教授, 研究方向为航空航天复杂结构件数字化制造与智能制造, E-mail: lchq0123@126.com。

(责编 铃兰)

(上接第75页)

Group 28th Annual Education Training Conference. St.Louis: Additive Manufacturing Users Group, 2016.

[24] NILSSON P, APPELGREN A, HENRIKSON P, et al. Automatic ultrasonic testing for metal deposition[C]//Proceeding of 18th World Conference on Non-destructive Testing. Durban: World Conference on Nondestructive Testing, 2012.

[25] 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.

LING Song. Additive manufacture technique and related NDT for its products[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(6): 60-64.

[26] LOTT P, SCHLEIFENBAUM H, MEINERS W, et al. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM)[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 683-690.

[27] RAO P, LIU J, ROBERSON D, et al. Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2015, 137(6): 061007.

[28] LEVESQUE D, BESCOND C, LORD M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the European-American Workshop on Reliability of Nde. Melville: AIP Publishing LLC, 2016.

[29] ZENZINGER G, BAMBERG J, LADEWIG A, et al. Process monitoring of additive manufacturing by using optical tomography[C]//41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Aip Conference. Melville: AIP Publishing LLC, 2015: 164-170.

[30] 景绿路. 国外增材制造技术标准分析[J]. 航空标准化与质量, 2013(4): 44-56.

JING Lülu. Analysis of foreign additive manufacturing technical standards[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2013(4): 44-56.

[31] 张渝, 侯慧鹏, 雷力明. 高温合金增材制造标准分析[J]. 材料导报, 2017, 31(29): 62-65.

ZHANG Yu, HOU Huipeng, LEI Liming. Analysis of standardization in super alloy additive manufacturing[J]. Materials Review, 2017, 31(29): 62-65.

[32] ISO 17296-3. Additive manufacturing-general principles (Part 3): Main characteristics and corresponding test methods[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

[33] 刘琼馨, 王顺权. 我国增材制造产业综合标准化技术体系的建议[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(9): 651-654.

LIU Qiongxin, WANG Shunquan. Suggestions for technology system of integrated standardization for additive manufacturing industry in china[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2017, 53(9): 651-654.

通讯作者: 高丽敏, 博士, 高级工程师, 研究方向为无损检测与健康监测, E-mail: gaolimin@comac.cc。

(责编 铃兰)