

激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测 评价技术现状(特邀)

徐滨士¹,董世运¹,门平^{1,2},闫世兴¹

- (1. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室,北京 100072;
2. 中国人民解放军海军 92601 部队,广东 湛江 524009)

摘要:无损检测技术是合金钢构件激光增材制造的重要技术支撑,是保证激光增材制造产品质量和在役安全性的关键技术,是贯穿产品全寿命安全保证的重要技术组成。金属激光增材制造合金钢件成形、组织和力学性能不同于传统技术制造构件性能,使得无损检测技术面临诸多挑战。综述了激光增材制造合金钢成形质量特性,包括成形缺陷和力学性能;基于无损检测技术,论述了无损检测技术在激光增材制造合金钢件质量评价中的应用,重点论述了无损检测技术在激光增材制造构件缺陷和力学性能中的应用现状;提出了基于超声和微磁检测技术评价材料力学性能的原理、标定方法和微磁传感器设计方案;最后总结了无损检测评价技术在激光增材制造合金钢件检测评价应用中面临的挑战和发展趋势。

关键词:激光增材制造; 无损检测; 缺陷; 力学性能; 合金钢件

中图分类号: TG115.28; TH878; **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0401001

Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components (invited)

Xu Binshi¹, Dong Shiyun¹, Men Ping^{1,2}, Yan Shixing¹

- (1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;
2. The 92601 Troops of People's Liberation Army Navy, Zhanjiang 524009, China)

Abstract: Nondestructive test (NDT) technology is the important technical support for laser additive manufacturing alloy steel components, the key technology to ensure laser additive manufacturing production quality and in-service safety and the important technical composition to the production safety guarantee through life cycle. The formation, texture and mechanics properties of alloy steel components made by laser additive manufacturing are different from those made by traditional technologies, so NDT technology faces many challenges. The forming quality characteristics of laser additive manufacturing alloy steel were summarized, including forming flaws and mechanics properties; Based on the development of NDT technologies, the applications of NDT technologies in laser additive manufacturing were reviewed, especially in applications of material mechanics properties and flaws; Based on ultrasonic

收稿日期:2017-11-05; 修订日期:2017-12-15

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFB1100205);国家自然科学基金(51705532);北京市科技专项(Z161100004916009);北京市科技计划(Z161100001516007)

作者简介:徐滨士(1931-),男,中国工程院院士,教授,主要从事装备再制造与延寿、表面工程方面的研究。Email:xubinshi@vip.sina.com

and micro-magnetic techniques, micro-magnetic sensor design scheme, calibration method and principles of evaluating the material mechanics properties were outlined; Finally, the challenges and prospects of NDT in laser additive manufacturing alloy steel components were discussed.

Key words: laser additive manufacture; nondestructive test; flaw; mechanics property; alloy steel component

0 引言

根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》和《中国制造2025》等提出的任务,国家重点研发计划启动实施“增材制造和激光制造”重点专项,旨在形成我国增材制造与激光制造的技术创新体系,促进传统制造业转型升级,支撑我国高端制造业发展。激光增材制造(Laser Additive Manufacturing, LAM)成形技术以其数字化、网络化、个性化、定制化的特点,作为新技术的代表,正在推动新的工业革命^[1]。近年来,激光增材制造成形技术发展迅猛,成形材料种类不断增多,成形精度不断提高,成形结构日趋复杂。金属构件激光增材制造成形技术作为增材制造成形技术体系中最前沿的技术,是智能制造领域的重要发展方向之一,在航空航天、汽车船舶、医疗器械等领域应用广泛,具有很大的发展潜力^[2]。

金属构件激光增材制造成形技术以高功率或高亮度激光为热源,基于三维数字模型,通过送粉或者送丝方式进行逐层堆积,直接制造出任意复杂形状的零件,其实质就是CAD软件驱动下的激光三维熔覆过程^[3-4]。金属构件激光增材制造成形技术主要包括以激光立体成形技术(Laser Solid Forming, LSF)^[5]为代表的同步送粉熔覆技术,和以选区激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)^[6]为代表的粉末床成形技术两大技术方向。该技术具有以下优点:(1)成形速度快,材料利用率高,成本低;(2)不需要模具,生产周期降低45%~70%;(3)可以成形传统手段难于成形或者不能成形的形状复杂的功能金属构件;(4)可以在构件不同部位成形不同组织和成分的梯度功能材料结构,不需要反复成形及中间热处理步骤;(5)成形过程凝固快速,构件组织致密,力学性能普遍达到锻件标准;(6)成形金属构件可以直接使用

或者仅需少量的机械加工^[5]。

在激光增材制造合金钢构件成形过程中,合金钢构件的缺陷控制、力学性能和成形质量好坏直接影响构件后续在役时的运行安全和使用寿命,关键结构的缺陷损伤检测和力学性能评价对激光增材制造合金钢构件控形、控性具有重要意义。

无损检测技术(Nondestructive Testing, NDT)是多学科交叉融合的技术,广泛应用于航空航天、石油化工、核工业以及机械制造等各个领域^[7-8]。对于激光增材制造合金钢构件的质量评价和在役期间的缺陷检测,特别是激光增材制造合金钢构件力学性能的评价与表征,无损检测技术相对传统机械方法(拉伸、压入、冲击等)具有快速、非破坏、在役在线等方面的独特优势。

1 激光增材制造合金钢构件成形质量特性

激光增材制造合金钢构件制造工艺区别于传统制造工艺,其是兼精确成形(控形)和高性能成形(控性)需求的一体化制造技术,激光增材制造合金钢构件成形缺陷以及由于组织的各向异性引起构件力学性能的差异性具有其自身的特性。近年来,为抢占技术制造点,美国^[9-12]、德国^[13-14]、英国^[15-17]、意大利^[18-20]、新加坡^[21-22]等发达国家依托重大战略和专门科研机构,正从激光增材制造的缺陷控制、成形精度、成形力学性能等技术层面快速推进这一新型制造模式的理论研究和工程应用。文中主要从成形缺陷和力学性能两方面综述激光增材制造合金钢构件成形质量特性。

1.1 成形缺陷

激光增材制造合金钢构件成形缺陷主要包括:(1)激光增材制造过程属于快速冷却非平衡凝固过程,材料物性和温度不均匀性极强,可能产生残余应力,导致成形构件变形、翘曲甚至开裂,最终影响构

件服役期间疲劳、耐腐蚀、静力学等性能;(2) 熔池流动性差致使熔池内部杂质、气泡不能及时逸出,导致构件内部产生夹杂和气孔等缺陷,无法达到构件服役质量要求;(3) 激光增材制造成形过程中激光能量密度高,容易造成合金元素的烧蚀以及元素偏析,从而使构件物相不均匀或脆性相的产生,导致构件产生裂纹;(4) 激光增材制造热影响区力学性能退化,热循环会引起材料微观组织发生变化,影响晶粒尺寸及均匀性,析出相的种类、大小及分布、元素晶界的偏析程度,最终导致构件的硬度、强度、塑性以及疲劳等力学性能,影响构件服役安全。以激光沉积成形为例,图 1 和图 2 分别为激光沉积成形构件中气孔和裂纹缺陷。

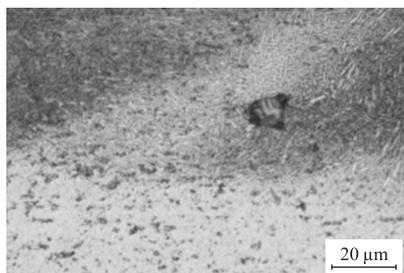


图 1 沉积态试样中的气孔缺陷

Fig.1 Pore defects in as-deposited samples

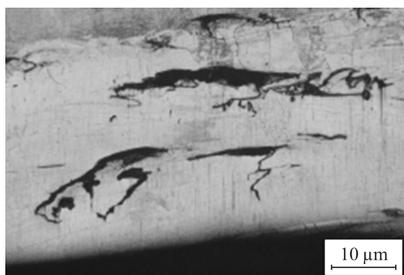


图 2 沉积态试样中的裂纹缺陷

Fig.2 Cracks flaws in as-deposited samples

综上所述,激光增材制造合金钢构件成形缺陷控制是成形质量的重要保证,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,并通过无损检测技术对成形构件缺陷进行评价与表征。

1.2 力学性能

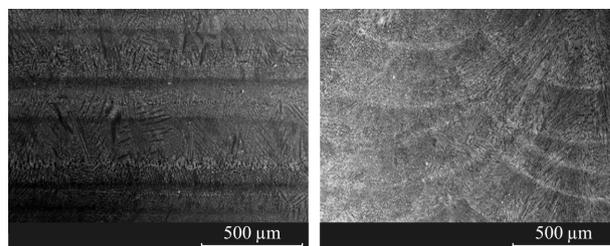
以激光立体成形技术为例,激光增材制造技术是利用 CAD 生成的三维实体模型,利用分层软件分层,每个薄层断面的二维数据用于驱动控制激光光束,激光束扫描粉体材料,打印出指定形状的薄层,

层层累积形成实体零件^[23],图 3 为激光立体成形过程。由此可知,在激光扫描方向、层堆积方向以及单道搭接方向,由于成形构件组织的各向异性,导致三个方向力学性能指标大小各异,采用无损检测方法评价激光增材制造合金钢构件力学性能时,这就需要从上述三个方向对激光增材制造合金钢构件的力学性能分别进行评价与表征,相对于机械力学性能测试方法,无损检测手段具有无损、快速、无需制作标准试样等特点。激光熔覆层微观组织如图 4 所示,激光扫描方向激光熔覆层组织呈“条形层状”分布,激光熔覆层堆积方向熔覆层组织呈“弧形层状”分布^[24],呈现明显的各向异性特征。



图 3 激光立体成形原理图

Fig.3 Schematic diagram of laser solid forming



(a) 激光扫描方向熔覆层
微观组织 (b) 激光熔覆层堆积方向
微观组织

(a) Laser cladding microstructure in laser scanning direction (b) Laser cladding microstructure in stacking direction

图 4 激光熔覆层微观组织

Fig.4 Laser cladding microstructure

2 激光增材制造合金钢件无损检测评价

激光增材制造金属构件的无损检测评价目前主要集中在对其成形缺陷和应力进行检测,对于激光增材制造金属构件的组织 and 材料力学性能包括弹性模量、硬度、屈服强度、拉伸强度、延伸率和冲击韧性主要依靠机械的试验方法进行,采用无损检测的方法对激光增材制造金属构件的组织、成分和材料力

学性能的评价研究甚少。回顾目前国内外激光增材金属构件无损检测应用研究,对于激光增材制造金属构件缺陷和应力的无损检测方法主要集中在超声和电磁的方法,还有少量的其他检测与评价方法。

2.1 超声检测

超声检测^[25]是利用超声波的透射、反射、衍射等特性,通过采集超声波在被测构件中的传播波形、回波、声速、衰减、以及频谱特性的变化来判定构件内部是否存在缺陷或者连续等。常规超声检测已经广泛应用于金属构件内部及表面缺陷的检测,但是常规超声对于激光增材制造金属构件的检测存在较大困难,一方面是由激光增材制造金属构件组织性能决定,堆积层界面及晶粒对超声波存在严重的散射信号,影响缺陷的判别;另一方面从超声波可达性角度讲,对于复杂结构的激光增材制造金属构件,常规超声检测技术对特殊部位的缺陷无法检测,存在漏检情况。

从评价激光增材制造金属构件应力角度来讲,华中科技大学胡木林^[26]等研究了多道搭接激光熔覆层残余应力测试方法,测试结果表明,熔覆层表层残余应力为拉应力,在过渡区出现了压应力;北京理工大学闫晓玲和装甲兵工程学院董世运^[27]等人采用超声表面波对 Fe314 激光熔覆层表面应力进行评价,通过对声弹关系曲线的拟合实现激光熔覆层声弹系数的标定,在此基础上,分析了微观组织及残余应力对应力评价结果的影响;江苏科技大学刘彬^[28-29]等人采用临界折射纵波对 Fe314 合金激光熔覆层应力进行评价,研究表明,在弹性极限范围内,临界折射纵波信号时间差与应力基本呈线性关系,应力验证结果最大误差为 4.5%。

从评价激光增材制造金属构件内部缺陷角度来讲,法国国家科学研究中心 (French National Centre for Scientific Research, FNCSR) Guillaume Haiat^[30]等人采用 CIVA 软件模拟的方法准确定位熔覆层缺陷位置;哈尔滨工业大学刘彬^[24]采用超声表面波实现对小于 1.2 mm 激光熔覆层内缺陷进行检测,采用超声纵波实现对厚度大于 3.0 mm 激光熔覆层内部缺陷进行检测;天津工业大学方艳^[31]等人针对激光再制造中具有复杂形貌的零件,提出基于三角网格模型的缺陷识别技术;北京理工大学闫晓玲^[32]通过有限元模拟的方法,对铁基合金激光熔覆层横穿孔、裂纹缺陷回波信号进行模拟,数值模拟结果与实验测量结果一致。

2.2 电磁检测

电磁检测方法可以对构件表面近表面缺陷和应力状态进行检测和评价,与超声检测方法相同,采用常规电磁检测方法对激光增材制造金属构件表面近表面缺陷和应力检测比较困难,原因在于激光增材制造金属构件组织各向异性,这就对检测结果参量产生影响,如何采用磁巴克豪森噪声、增量磁导率、切向磁场强度、磁滞检测技术以及金属磁记忆等电磁检测方法评价激光增材制造金属构件缺陷及应力是目前无损检测领域研究的难点和热点问题。

刘彬^[33]等人采用金属磁记忆评价对裂纹和应力交互影响的 Fe314 合金激光熔覆层应力状态进行评价,研究表明,随着载荷增大,磁畴的有序转动导致金属磁记忆信号法线分量 $H_p(y)$ 曲线绕 0 点顺时针转动, $H_p(y)$ 曲线的斜率和幅值增大, $H_p(y)$ 信号梯度 K 增大,并且裂纹埋深越小,载荷对裂纹处 K 值影响越明显;采用金属磁记忆检测技术实现厚度介于 1.2~3.0 mm 深度激光熔覆层缺陷评价^[24];董世运^[34]等人采用涡流检测对激光熔覆再制造灰铸铁缸盖裂纹深度和位置进行定量评价,根据涡流信号拟合可精确测定缸盖“鼻裂”裂纹深度;哈尔滨工业大学石常亮^[35]采用金属磁记忆检测技术对再制造毛坯剩余寿命进行评估。

2.3 其他无损检测技术

激光增材制造金属构件缺陷和应力检测除了采用超声和电磁检测方法外,其他无损检测方法也有较少的实际应用。中国航发西安航空发动机有限公司李泽^[36]采用微焦点工业 CT 对激光增材制造涡轮叶片进行成像检测,能够分辨出 100 μm 孔洞类缺陷,如图 5 所示;中国兵器科学研究所的郑子云^[37]等

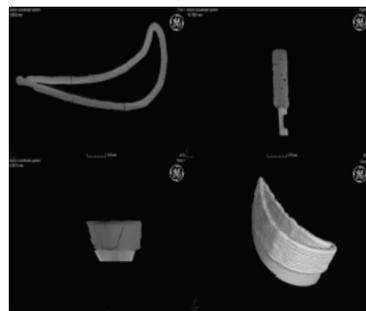


图5 增材制造涡轮叶片微焦点 CT 检测图像

Fig.5 Microscopic CT detection of additive manufacturing turbine blades

人采用渗透检测方法对激光熔覆再制造镍基高温合金气门的表面开口裂纹进行检测；中国航空工业集团公司北京航空材料研究院王晓^[38]等人采用激光超声在线无损检测方法对增材制造零件缺陷进行同步检测，避免了零件制造完成后因形状复杂带来的检测盲区，提高增材制造零件的可靠性。

综上所述，目前针对激光增材制造合金钢构件无损检测评价主要集中在缺陷和应力评价方面，评价手段主要集中在少数几种无损检测技术，现在急需采用多种无损检测方法，诸如非线性超声检测技术^[39]、微磁检测技术、磁滞检测技术^[40]对激光增材制造合金钢构件微裂纹缺陷和强度、硬度、疲劳寿命等力学性能指标进行定量评价与表征。

3 力学性能评价方法

对于金属构件的力学性能测试，通常采取机械破坏的方法获得，在线测试金属构件的力学性能非常困难，这就需要一种快速、无损的检测方式来实现金属构件力学性能检测与表征^[41]。材料的弹性参量如杨氏模量、剪切模量、体模量及泊松比可以通过无损检测的方法测量超声纵波和横波声速来实现无损检测^[42]，但是对于由材料微观组织、晶粒大小、晶向及其他热处理因素导致材料硬度、强度(包括屈服强度和拉伸强度)、冲击韧性、伸长率等材料力学性能就不能简单的通过测量声速来评价与表征，原因在于材料的力学性能与无损检测参量之间是一种非线性映射关系，材料的化学成分、微观组织、热处理工艺及材料成型工艺各异同样会导致材料力学性能各异。对于采用无损检测的方法评价材料力学性能，针对每一种材料要综合考虑上述影响因素建立标定实验，进行曲线拟合，得到材料力学性能与无损检测参量的非线性映射模型，在控制检测允许误差的情况下，实现对材料力学性能的无损检测评价与表征。

上述方式针对的材料均是各向同性的均质材料，对于激光增材制造金属构件的力学性能无损检测评价与表征，目前还没有相关报道和文献，原因在于激光增材制造金属构件属于各向异性材质，沿激光扫描方向、熔覆层堆积方向以及熔覆层搭接方向其力学性能不同，同时堆积层界面对无损检测信号存在干扰，堆积层内部晶粒尺寸各异，这就对采用无损检测方法评价激光增材制造金属构件的力学性能

提出了难度和挑战。

文中针对激光增材制造金属构件力学性能的评价与表征，提出采取高精度的超声检测检测方法和微磁检测方法，建立不同热处理制度下的材料微观组织-材料宏观力学性能参量—超声、电磁无损检测参数之间的映射关系，实现对激光增材制造金属构件材料力学性能的无损检测评价与表征。

3.1 超声评价与表征

对于各向同性材料，通过超声纵波声速、横波声速和衰减的测量，已经建立了超声检测参数与强度^[43-44]、硬度^[41,43,45]、伸长率^[44]、微观组织^[43-44]的定性关系，目前还没有建立超声检测参数与力学性能之间的非线性映射关系模型，也没有给出力学性能预测值与实测值之间的误差估计。

对于激光增材制造合金钢构件力学性能评价，可以从激光扫描方向、层堆积方向和单道熔覆层搭接方向建立超声检测方法评价构件力学性能标定模型，标定模型框图如图 6 所示。将激光增材制造试

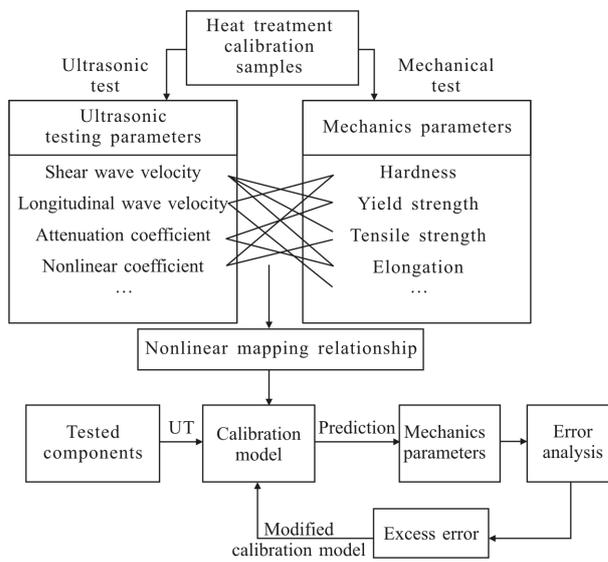


图 6 超声检测方法评价合金钢构件力学性能标定模型框图

Fig.6 Calibration model block diagram of UT method for mechanical properties evaluation of alloy steel components

件在不同热处理制度下进行热处理，得到不同微观组织，直接反映在试件的宏观力学性能不同，采用超声检测方法对不同热处理试件进行检测，反映在超声检测参数如横波声速、纵波声速、衰减系数和非线性系数等不同，基于此关系可以建立超声检测参数

特征值与材料宏观力学性能指标之间的线性或者非线性映射关系,通过对映射关系的曲线拟合,选择合适的拟合数学模型,在达到误差要求的前提条件下,完成采用超声检测评价激光增材制造合金钢件力学性能的标定实验,建立数学模型及数据库,并通过此模型来定量预测相同试件的宏观力学性能指标的大小,同时采用微观组织成分、比例和晶粒的大小等因素变化来解释宏观力学指标大小的差异。

3.2 微磁评价与表征

材料力学性能微磁检测原理:基于材料微观组织结构、磁学性能与材料宏观力学性能指标的内在联系,通过磁巴克豪森噪声、增量磁导率、切向磁场强度、磁滞损耗、矫顽力以及多频涡流检测技术对材

料宏观力学性能指标进行无损评价与表征。

合金钢构件的微观组织决定材料的力学性能,同时,微观组织决定材料的磁学性能,通过上述关系就可以建立材料微观组织-力学性能指标-微磁检测参数特征值之间的线性或者非线性映射关系,并通过微观组织成分、比例和晶粒大小、分布来分析解释力学性能指标大小,宏观反映在微磁检测参数特征值大小上,并建立数学模型实现微磁检测对金属构件力学性能指标的评价与表征,对于激光增材制造合金钢力学性能评价,同样从激光扫描方向、层堆积方向以及单道熔覆层搭接方向分别进行力学性能指标评价,标定模型建立方法同超声检测相同,采用微磁检测方法评价材料力学性能指标如图 7 所示。

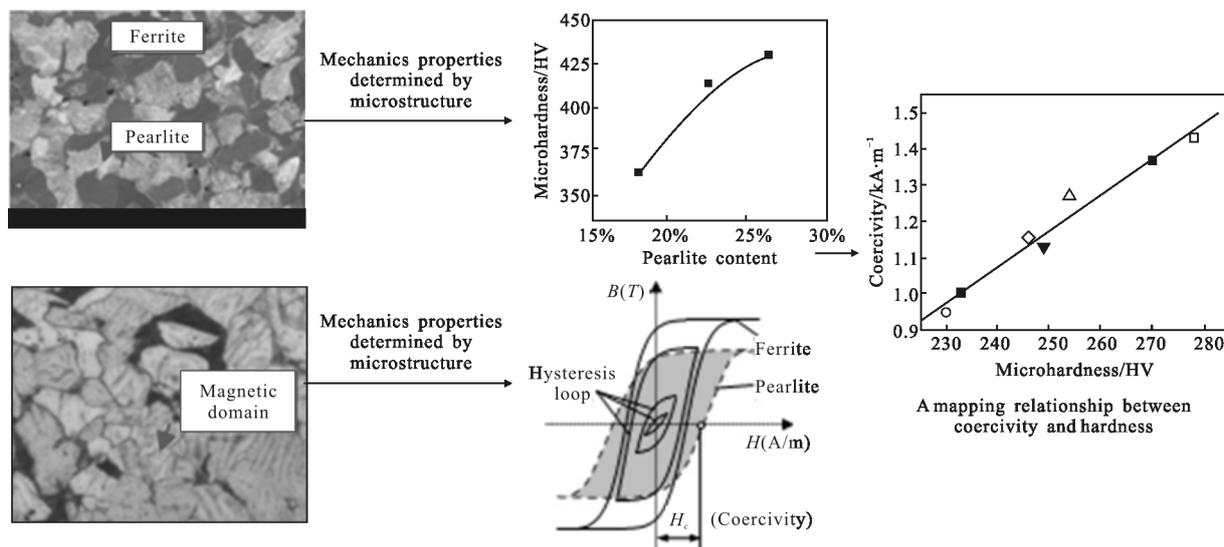


图 7 材料力学性能微磁检测与评价框图

Fig.7 Metal mechanical properties test and evaluation by micro-magnetic

采用微磁检测方法评价激光增材合金钢构件材料力学性能,关键在于传感器的设计。采用单一方法如磁巴克豪森噪声只能对单一力学性能指标硬度或残余应力进行评价,如要对材料力学性能各个指标进行评价与表征,这就需要综合几种电磁检测方法,如磁巴克豪森噪声、增量磁导率、切向磁场强度、磁滞回线和多频涡流检测技术等,采用共源激励的方法同时激励几种电磁检测参量,实现对金属构件的弹性指标、硬度、强度、残余应力进行评价与表征,并且评价误差指标达到工程应用的要求,微磁检测材料力学性能传感器如图 8 所示,1 为磁滞回线功能模块,2 为巴克豪森噪声模块,3 为增量磁导率、切向

磁场强度和多频涡流功能模块。

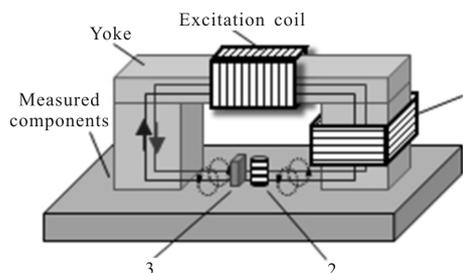


图 8 微磁检测材料力学性能传感器

Fig.8 Micro-magnetic test sensor for material mechanical properties

4 结束语

采用无损检测评价激光增材制造合金钢构件的缺陷和力学性能在国内外研究较少,可以借鉴的方法有限,面临众多挑战,同时也迎来难得的发展机遇,激光增材制造合金钢构件控形控性无损检测评价与表征已经成为本领域的研究重点和热点,总结如下:

(1) 从检测缺陷的角度讲,激光增材制造合金钢构件在成形过程存在搭接界面和堆积界面,这些界面的存在对于缺陷的识别增加了难度,如何区分缺陷检测信号与界面干扰信号成为缺陷识别的难点,这就要深入研究无损检测信号与激光增材制造合金钢构件内部界面的相互作用规律;

(2) 从超声检测的角度讲,可以进一步改进超声波的激发方式,如激光超声或者电磁超声,消除耦合剂对超声波衰减的影响;激发波形可以采用激光超声可以激发超声表面波作为评价波形;检测参数除了采用声速、幅值、相位以及衰减系数,还可以采用超声非线性参数评价材料力学性能;采用超声横波直探头激发超声横波,可以避免在测量横波声速时横波斜探头前沿长度测量引入的长度误差;

(3) 从微磁检测角度讲,如何建立微磁检测参数特征值与激光增材制造合金钢构件力学性能之间的非线性映射关系预测模型至关重要,可以引入神经网络技术构建两者之间的预测数学模型;如何采用同源激励的方法实现多种微磁检测参数对激光增材合金钢构件多个力学性能指标进行评价与表征,传感器的研发至关重要;

(4) 从被检对象角度讲,激光增材制造合金钢构件有别于普通的锻件、铸件,其材料组织属于各向异性,在评价材料力学性能指标时与检测方向密切相关,可以从激光扫描方向、激光熔覆层堆积方向和激光熔覆层搭接方向分别对材料力学性能指标进行评价与表征,前期对激光增材制造合金钢构件微观组织、力学性能、晶粒大小和分布以及强化机制需要深入的研究和表征;

(5) 从评价力学性能指标的角度讲,以往评价材料力学性能仅限于硬度、残余应力和工作应力,对于金属构件屈服强度、拉伸强度、伸长率和冲击韧性还

未深入涉及到无损检测技术方法的应用。对于残余应力和工作应力的检测,多采用磁巴克豪森噪声检测技术和金属磁记忆检测技术,对于硬度及硬化深度的检测主要采用磁巴克豪森噪声测技术,所以可以融合多种超声和电磁检测方法对激光增材制造合金钢构件的多个力学性能指标进行无损评价与表征;

(6) 从评价误差要求角度讲,采用无损检测评价材料力学性能指标工程误差要求控制在10%以内,这就一方面要求在测量超声、电磁信号参数特征值更加精确,需要搭建精准的超声和电磁无损检测系统,另一方面要求标定试验数学模型适用范围要广和预测精度要高;

(7) 从微观组织的角度讲,可以明确的是马氏体组织对超声波抵抗最强,声速最低,衰减最强,其次是珠光体组织,铁素体组织声速最高,但是由于材料微观组织的物相成分、晶粒的大小、晶向、位错密度、晶格畸变程度和不同组织层间距各异以及这些因素相互作用的复杂性,要建立微观组织与无损检测参数之间定量的映射关系,针对每种材质,特别是各向异性激光增材制造合金钢构件,还需从微观组织对无损检测参数的影响进行大量深入的研究。

参考文献:

- [1] Yang Yongqiang, Liu Yang, Song Changhui. The status and progress of manufacturing of metal parts by 3D printing technology [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2013, 42(4): 1-7. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] Li Huaixue, Sui Fan, Huang Baiying. Development and application of laser additive manufacturing for metal component [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 416(20): 26-31. (in Chinese)
- [4] Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4. (in Chinese)
- [5] Huang Weidong. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. (in Chinese)
- [6] Kumar S. Selective laser sintering/melting [J]. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, 26(3): 93-134.
- [7] Zhang Yuanliang, Zhang Hongchao, Zhao Jiayu, et al. Review of non-destructive testing for remanufacturing of

- high-end equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7): 80–90. (in Chinese)
- [8] Xu Binshi, Dong Shiyun. Laser Remanufacturing Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [9] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones [J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36–45.
- [10] Murr L E, Gaytan S M, Medina F, et al. Characterization of Ti–6Al–4V open cellular foams fabricated by additive manufacturing using electron beam melting [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(7–8): 1861–1868.
- [11] Yong H, Ming C L, Mazumder J, et al. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2015, 137(1): 014001.
- [12] Brown D W, Bernardin J D, Carpenter J S, et al. Neutron diffraction measurements of residual stress in additively manufactured stainless steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 678(15): 291–298.
- [13] Sander J, Hufenbach J, Giebeler L, et al. Microstructure and properties of FeCrMoVC tool steel produced by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 89(15): 335–341.
- [14] Gu D, Hong C, Jia Q, et al. Combined strengthening of multi-phase and graded interface in laser additive manufactured TiC/Inconel 718 composites [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, 47(4): 45309–45319.
- [15] Cox S C, Jamshidi P, Eisenstein N M, et al. Adding functionality with additive manufacturing: Fabrication of titanium-based antibiotic eluting implants [J]. *Materials Science & Engineering C*, 2016, 533(64): 407–415.
- [16] Kim T B, Yue S, Zhang Z, et al. Additive manufactured porous titanium structures: through-process quantification of pore and strut networks [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2706–2715.
- [17] Ibrahim K A, Wu B, Brandon N P. Electrical conductivity and porosity in stainless steel 316L scaffolds for electrochemical devices fabricated using selective laser sintering[J]. *Materials & Design*, 2016, 106(15): 51–59.
- [18] Benedetti M, Cazzolli M, Fontanari V, et al. Fatigue limit of Ti6Al4V alloy produced by selective laser sintering [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016(2): 3158–3167.
- [19] Cerniglia D, Scafidi M, Pantano A, et al. Inspection of additive-manufactured layered components [J]. *Ultrasonics*, 2015, 62(7): 292–298.
- [20] Mengucci P, Barucca G, Gatto A, et al. Effects of thermal treatments on microstructure and mechanical properties of a Co–Cr–Mo–W biomedical alloy produced by laser sintering [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 60(March): 106–117.
- [21] Li P. Constitutive and failure behaviour in selective laser melted stainless steel for microlattice structures [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 622(12): 114–120.
- [22] Sun Z, Tan X, Shu B T, et al. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates [J]. *Materials & Design*, 2016, 104(15): 197–204.
- [23] Baek S W, Song E J, Kim J H, et al. Hydrogen embrittlement of 3–D printing manufactured austenitic stainless steel part for hydrogen service [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 130(15): 87–90.
- [24] Liu Bin. Ultrasonic and metal magnetic memory testing method for quality nondestructive evaluation of remanufacturing coating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [25] American Society for Nondestructive Testing. American NDT Manual [M]. Beijing: World Book Publishing Company, 1999. (in Chinese)
- [26] Hu Mulin, Xie Changsheng, Huang Kaijin. Measurement of residual stress in multi-track laser-clad coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 262–264. (in Chinese)
- [27] Dong Shiyun, Yan Xiaoling, Xu Binshi. Influence of microstructure and residual stress on surface stress measurement of laser cladding layer by Rayleigh wave [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51 (24): 50–56. (in Chinese)
- [28] Liu Bin, Dong Shiyun. Stress measurement of laser cladding coating with critically refracted longitudinal wave method [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(9): 53–56. (in Chinese)
- [29] Liu B, Dong S. Stress evaluation of laser cladding coating with critically refracted longitudinal wave based on cross correlation function [J]. *Applied Acoustics*, 2016, 101(1): 98–103.
- [30] Haïat G, Calmon P, Lasserre F. Application of ultrasonic modeling to the positioning of defects in a clad component [C]//American Institute of Physics Conference Proceeding, 2004(2): 1.1711612.
- [31] Fang Yan, Chen Xichen. Research on key techniques of

- defect detection for laser remanufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 54–59. (in Chinese)
- [32] Yan Xiaoling. Numerical simulation and experimental study on ultrasonic testing for laser cladding [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [33] Liu Bin, Gong Kai, Qiao Yanxin, et al. Evaluation of influence of preset crack burial depth on stress of laser cladding coating with metal magnetic memory [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(2): 241–248. (in Chinese)
- [34] Dong Shiyun, Yan Shixing, Xu Binshi, et al. Laser cladding remanufacturing technology of cast iron cylinder head and its quality evaluation [J]. *Journal of Academy of Armored Forces Engineering*, 2013, 27(1): 90–93. (in Chinese)
- [35] Shi Changliang. Metal magnetic memory and ultrasonic complex method for damage degree evaluation of used ferromagnetic component before remanufacturing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [36] Chinese Society for Nondestructive Testing. 2016 China NDT annual report [R]. Shanghai: Nondestructive Testing Editorial Department, 2016. (in Chinese)
- [37] Deng Ziyun, Ma Bing, Yi Yinghui, et al. Microstructure and properties of nickel-based super alloys valve by laser cladding remanufacturing [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(3): 101–104. (in Chinese)
- [38] Wang Xiao, Shi Yiwei, Liang Jing, et al. The method for nondestructive testing additive manufacturing parts on line by laser ultrasonic: China, CN106018288A [P]. 2016–10–12. (in Chinese)
- [39] Men Ping, Dong Shiyun, Kang Xueliang, et al. Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38 (5): 1101–1118. (in Chinese)
- [40] Chen Yunpeng, Li Mangmang, Tang Chenglong. Progression of online detection technologies of mechanical property of cold-rolled strip steels [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2017, 53 (12): 859–865. (in Chinese)
- [41] Ukonski T, Stepinski T. Steel hardness evaluation based on ultrasound velocity measurements[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2010, 52(11):592–596.
- [42] Freitas V L D A, Albuquerque V H C D, Silva E D M, et al. Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(16): 4431–4437.
- [43] Rayes M M E, El-Danaf E A, Almajid A A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE–1040 and –4340 steels [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2015, 216(2): 188–198.
- [44] Wiskel J B, Kennedy J, Ivey D G, et al. Ultrasonic velocity and attenuation measurements in l80 steel and their correlation with tensile properties[C]//19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016(7): 1–9.
- [45] Murthy G V S, Ghosh S, Das M, et al. Correlation between ultrasonic velocity and indentation-based mechanical properties with microstructure in Nimonic 263 [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 488(1–2): 398–405.