

金属增材制造构件的激光超声无损检测研究进展

胡平^{1*}, 艾琳², 邱梓妍², 左俊杰², 刘胜^{1,3}, 刘洋³, 彭志鑫¹, 宋长辉⁴¹ 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;² 武汉大学弘毅学堂, 湖北 武汉 430072;³ 武汉大学工业科学研究所, 湖北 武汉 430072;⁴ 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

摘要 金属增材制造技术具有高效成型、节省材料和短加工周期等优点,能突破传统制造工艺的局限生产出空间结构复杂的构件,深受汽车工业、航空航天和医疗器械等领域的青睐。然而,增材制造技术在成形过程中产生的未熔合、裂纹和孔洞等缺陷限制了增材制造技术在工业上的推广与广泛应用。因此,金属增材制造产品的质量控制特别是在线监测具有重要意义。超声检测是材料内部缺陷最常用的手段。相较于传统超声无损检测技术,激光超声无损检测具有非接触、灵敏度高和适用于恶劣环境等优势,可以实现快速在线监测。本文扼要地介绍了金属增材制造和激光超声无损检测的技术特点,分析了激光超声的两种作用机制,简单地介绍了激光超声无损检测的原理和检测系统的搭建,系统地总结了国内外激光超声无损检测在普通金属材料 and 增材制造材料上的应用进展,并对激光超声无损检测技术应用于增材制造过程进行了展望。

关键词 激光技术; 金属增材制造; 激光选区熔化; 激光近净成形; 无损检测; 激光超声

中图分类号 TG146; TN249; TB553

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1402803

1 引言

1.1 金属增材制造技术

增材制造(AM)技术是一种新型的、革命性的先进制造技术。不同于传统的切削加工,该技术基于数字化、离散化的数学模型,通过逐层增加材料的方式成型出最终的工件^[1],具有成本低、快速成型和加工周期短等优势。作为新兴的颠覆性技术,增材制造技术被研究人员用于各种金属构件的成型,该技术制造的钛合金、合金钢、铝合金和高温合金等金属构件在航空航天、机械、医疗等领域被广泛应用。

根据能量束的不同,金属增材制造技术通常可分为激光增材制造技术、电子束增材制造技术和电弧增材制造技术。其中,激光增材制造技术包括激光选择性烧结(SLS)技术和激光选区熔化(SLM)技术。SLS系统由送粉装置、铺粉装置、零件成型工作台和 CO₂ 激光器组成。CO₂ 激光器根据分层模型在工作台上对粉末进行逐层扫描,每层工作完之后,工作台下降一层,送粉活塞上升,铺粉滚筒在工作台上均匀铺粉,循环往复完成 SLS 零件的烧结^[2-4],如图 1 所示。SLM 以激光为热源逐层熔化金属粉末,金属粉末经加热熔化后形成熔池,激光束远离后熔池温度快速下降

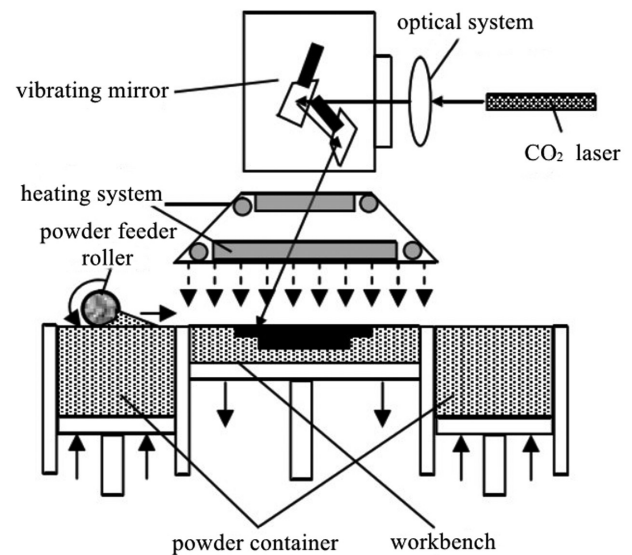


图 1 SLS 原理示意图^[4]

Fig. 1 Schematic of selective laser sintering (SLS) technology for material molding^[4]

并凝固,可以获得涂层/基体呈良好冶金结合和精度较高的近净型产品^[5-6],如图 2 所示^[5]。相应地,电子束增材制造技术采用高能电子束作为热源,该技术包括电子束选区熔化(EBSM)和电子束自由成型

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-22; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103900)、国家自然科学基金(51605340)

通信作者: *ping.hu@whu.edu.cn

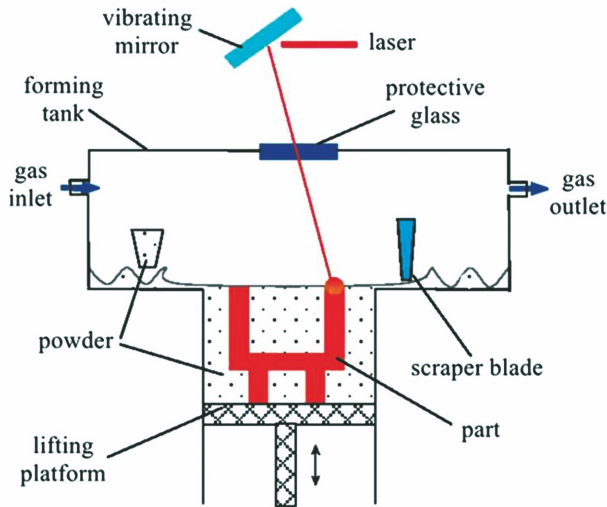


图 2 SLM 原理示意图^[5]

Fig. 2 Schematic of selective laser melting (SLM) technology for material molding^[5]

制造 (EBF) 技术。其中: EBSM 采用高能电子束在电磁偏转线圈的作用下轰击金属粉末形成熔池, 其原理^[5] 如图 3 所示; EBF 使用金属丝材作为原材料, 将丝材通过送丝装置送入熔池熔化, 其原理^[1] 如图 4 所示。电弧增材制造技术是基于钨极惰性气体保护焊接 (TIG)、熔化极惰性气体保护焊接 (MIG)、等离子体弧焊 (PA) 等焊接技术发展起来的, 该技术以电弧为热源, 采用堆焊的方式制造金属零件^[7]。与激光和电子束增材制造技术相比, 电弧增材制造不用考虑惰性气体保护箱或真空箱的尺寸限制以及由此带来的附加成本, 可在较小的成本下实现大型金属

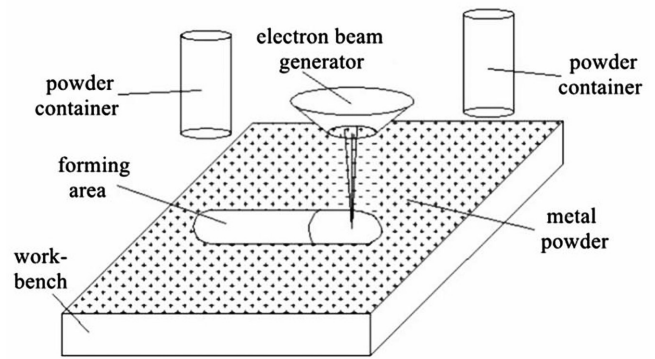


图 3 EBSM 技术示意图^[5]

Fig. 3 Schematic of electron beam selective melting (EBSM) technology^[5]

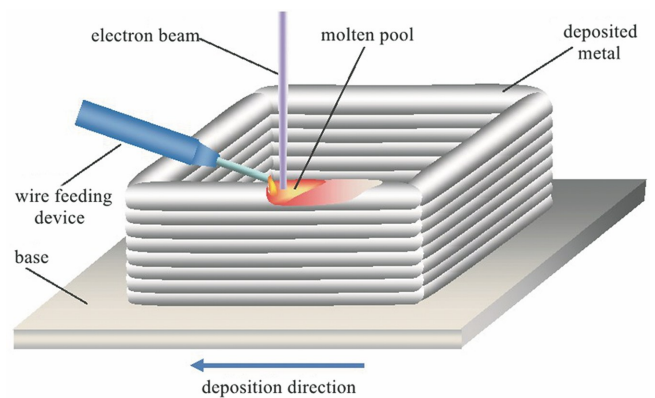


图 4 EBF 技术示意图^[1]

Fig. 4 Schematic of electron beam freeform fabrication (EBF) technology^[1]

构件的制造成型。电弧增材制造技术的原理^[1,8] 如图 5 所示。

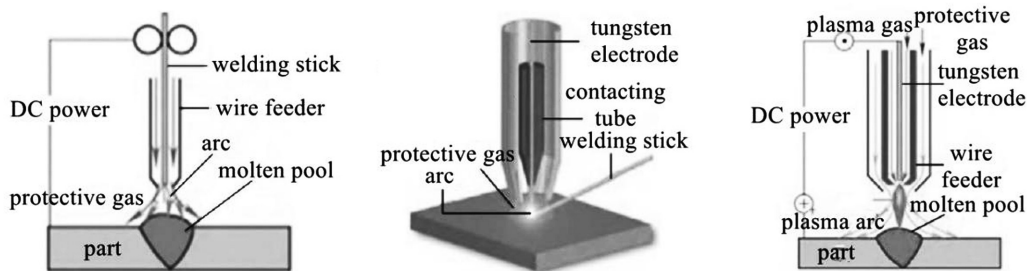


图 5 电弧增材制造技术示意图^[1]

Fig. 5 Schematic of arc additive manufacture technology^[1]

1.2 增材制造无损检测技术

当前, 多种金属增材制造技术正逐步从实验室过渡到实际应用, 但大规模的工业生产尚未实现, 其主要原因在于构件内部成型质量和内部应力等尚未得到有效控制, 具体表现在增材制造构件的晶粒结构、表面质量和内部缺陷等方面。研究表明, 晶粒结构会随增材制造工艺中的激光功率、工艺方法和扫描参数的改变而显著变化^[9]。此外, 保护气体会影响相的稳定性以及微观结构的特征。另外, 增材制造构件用作高精度零件时, 需要严格控制其尺寸和轮廓形貌。在增材制造过程中, 需要将几何设计分层离散化, 每一层的表面

质量和偏差都会导致最终成型构件的尺寸出现偏差^[9]。增材制造构件的内部缺陷主要表现为孔隙、夹杂和裂纹。孔隙从宏观尺度上分为气孔和未熔合两大类^[10], 其形成与增材制造工艺参数、原料粉末的品质有关系。孔隙会影响金属增材制造构件最终的力学性能, 尤其是疲劳性能^[9]。夹杂也是增材制造构件中的一种内部缺陷, 会导致构件内部组织不均匀, 从而降低构件的力学性能^[11]。此外, 增材制造过程中的内应力形成的裂纹也会使增材制造构件的力学性能和抗疲劳性能降低, 甚至使构件失效。从这个角度来看, 增材制造构件在成形过程中产生的气孔、未熔合、夹杂和裂纹

等缺陷限制了增材制造技术在工业上的推广与广泛应用。因此,金属增材制造产品的质量控制,特别是质量在线监测,具有重要意义。

目前,应用于金属增材制造构件的无损检测技术主要有计算机断层扫描(CT)检测技术、射线照相检测技术、荧光渗透检测技术和超声检测技术。CT 检测技术可以检测最小尺寸为 $4\sim 200\ \mu\text{m}$ 的缺陷,检测精度高,但其对检测时间和检测尺寸有一定限制^[12-13]。射线照相检测技术适用于复杂结构的检测,适合对气孔、夹杂等缺陷进行检测。荧光渗透检测技术受被检件结构的影响较小,检测表面开口缺陷的灵敏度高,且结果直观,但仅适用于表面较光滑构件的表面开口缺陷的检测,无法对内部缺陷进行检测^[14]。

超声检测信号通常以 A 扫描、B 扫描及 C 扫描的方式呈现,如图 6 所示。超声检测技术具有穿透性强、灵敏度高的特点^[15],可用于探伤、定位、测量,但脉冲-回波超声检测、相控阵检测和水浸式超声检测均不适用于高温工作环境(500 K 以上)。激光超声无损检测技术作为一种新型的无损检测技术,不仅可以在非常高的温度下工作,还可以用于检测复杂的表面及结构。此外,激光超声具有长距离非接触、频带宽、分辨率高等优点,可实现现场快速检测,对材料表面缺陷的检测灵敏度高,且不需要耦合剂,避免了耦合剂对测量范围和精度的影响。另外,激光超声检测避免了常规超声检测的声场盲区问题。这些优势使得激光超声检测技术在增材制造构件的无损检测中得到了越来越多的关注和研究^[16-18]。

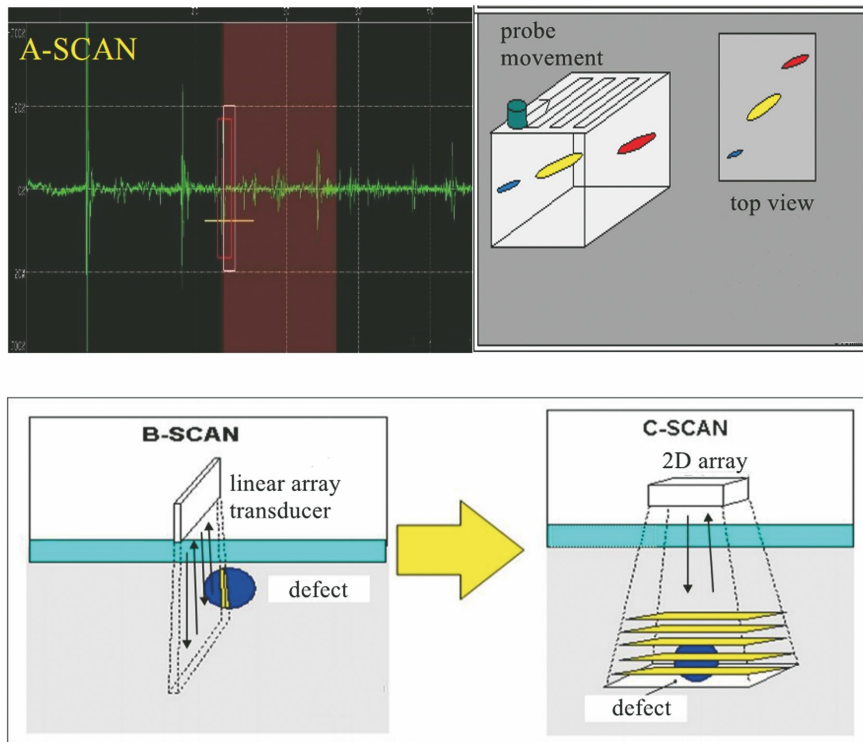


图 6 超声检测中的 A 扫描、B 扫描和 C 扫描^[19]

Fig. 6 A, B and C scans in ultrasonic nondestructive testing^[19]

2 激光超声无损检测概述

激光超声检测技术按激光能量密度的高低可分为两种,即基于热弹机制的激光超声无损检测技术和基于热蚀机制的激光超声无损检测技术^[1]。热弹机制和热蚀机制示意图^[20]如图 7 和图 8 所示。在基于热弹机制的激光超声无损检测技术中,入射激光脉冲的功率密度小于 $10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$,此时的热扩散很少,温度仅在几微米厚表层区域瞬间上升几十到几百摄氏度,相当于非常薄的表层有一个瞬态热源使材料膨胀,从而产生瞬态热应力和热应变。在基于热蚀机制的激光超声无损检测技术中,入射激光脉冲的功率密度大于 $10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$,此时由于固体表面温度急剧升高,超过了材料熔点,约几微米厚范围的表层材料发生烧蚀,导致

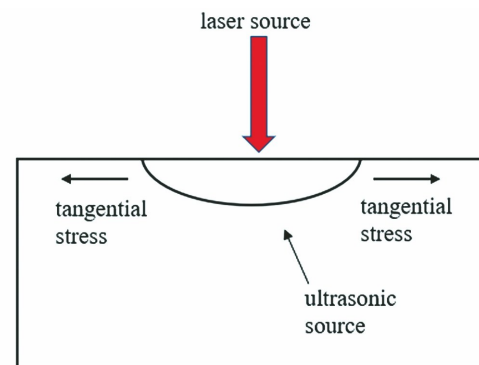
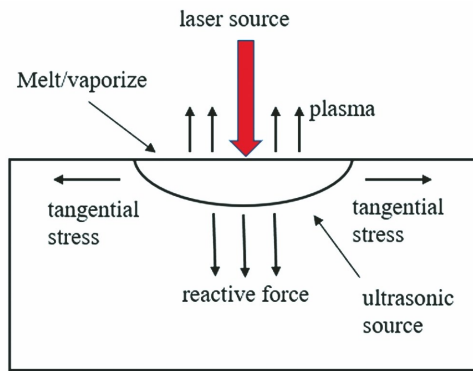


图 7 热弹机制示意图^[20]

Fig. 7 Schematic of thermoelastic mechanism^[20]

金属表面及其上方形成等离子体,产生垂直于表面的反冲力。由于基于热蚀机制的激光超声检测技术可能

图 8 热蚀机制示意图^[20]Fig. 8 Schematic of thermal ablation mechanism^[20]

会使材料表面产生点蚀,并且在增材制造过程中应用该技术时可能会使熔池中的夹带气体(孔隙)、未熔融粉末增加,进而使沉积层中产生缺陷,因此,该技术通常不被视为真正的无损检测。基于热弹机制的激光超声无损检测技术不会对样品表面造成破坏,因此该技术更适合用于增材制造构件的在线无损检测^[18]。

1963年,White^[21]发现可以利用脉冲激光、电子束等在固体中激发超声波,同年,Aakaryan等^[22]发现了脉冲激光在液态中激发超声的瞬态物理过程,此后,在激光激发超声的机理、检测技术及其应用等方面涌现出了大量研究成果。20世纪80年代初期以来,研究人员进一步从理论和实验上研究了激光激发超声的过程。1984年,Rose^[23]从经典热弹体源(volume sources)理论出发,提出并研究了一种点源表现形式的激光激发超声波理论,并将该理论称为“表面膨胀中心”。该理论为在金属表面采用激光激发超声波进行无损检测奠定了基础。

1989年,McDonald^[24]提出了一种可以推广和实践的数学形式,利用汉克尔-拉普拉斯变换反演(Hankel-Laplace Transform Inversion)描述脉冲激光入射到样品表面激发的超声波,使得“光声现象”(激光激发超声波)的计算形式得到实践和推广。次年,McDonald^[25]根据热弹机制下无约束表面激发超声波需考虑热扩散这一条件,提出用热-弹耦合模式来描述激光激发超声波的过程。1995年,张淑仪研究团队^[26]利用本征函数扩展法描述热弹激发超声模型,研究了不同厚度的板对激发超声波的影响,得出结论:随着样品厚度增加,不仅要考虑最低阶兰姆波模的高频分量,还要考虑高阶兰姆波模态。1996年,Murray等^[27]研究发现,用Nd:YAG激光器阵列激发窄带宽超声信号和相控阵单脉冲信号,同时控制激光脉冲的时间间隔、脉冲空间调制及脉冲输出能量,可以进一步提高光学检测系统的灵敏度。2000年,Royer等^[28]提出了各向同性固体中由热弹性激光线源产生表面声波(瑞利波)的解析模型,并采用该模型分析了激光线源在热弹机制下发声表面波的近场与远场位移特征,模型分析结果与实验结果具有了良好的一致

性。2004年,沈中华研究团队^[29]采用有限元方法对激光热弹机制在板状材料中激发超声导波的过程进行了数值模拟,得到了激光激发超声波后材料中的瞬态温度场分布、超声波的传播曲线,以及激光参数与超声波特征之间的关系,为热弹条件下材料的激光超声检测提供了理论基础。

在White发现激光激发超声波现象之后,研究人员陆续从理论层面和实验层面同时展开激光超声机理研究,用理论推导、数值计算与实验结果相互印证,共同完善了激光超声的理论和模型,为激光超声应用于缺陷的无损检测提供了理论基础和研究模型。

3 激光超声有限元仿真研究

在激光超声检测中,激光超声源能同时激发纵波、横波、表面波等在形状不规则的复杂媒介中传播。因此,基于有限元方法在处理复杂多物理场问题上的优势,利用有限元方法求解热传导和热弹方程比传统的解析方法更能灵活地处理复杂几何模型,并得到全场的数值解;同时,有限元方法还可以兼顾材料参数的温度依赖性^[30]。

1999年,Moser等^[31]利用有限元研究了超声波在环形结构中的传播特征,并将导波在平板和厚环结构中传播的有限元结果与理论结果、实验结果进行比较,证明了有限元在仿真导波传播方面的优势。2003年,Zerwer等^[32]通过有限元模型研究了表面不连续性对瑞利波在结构单元中传播的影响,并将板内不同位置的一系列阵列的模拟测量结果与实验测量结果进行了比较;在研究中,他们将阵列测量的时域信号转换为频域信号,揭示了兰姆波的传播模式。2003年,Hassan等^[33]重点研究了远场裂纹深度与表面波的波长相当时裂纹的反射系数,结果发现,有限元模拟结果和实验结果比较符合,而解析结果不再适用,而且在高裂纹深度、高波长比的情况下,有限元和实验得到的裂纹反射系数逼近裂纹90°角方向反射系数的极限值。2006年,许伯强等^[34]采用有限元方法模拟了激光热弹机制激发的板状材料中的超声波,在模拟中他们考虑了激光作用过程中材料的热物理参数依赖于温度的特性。他们的模拟结果表明,瞬态温度场分布在材料表层非常小的区域内,温升区域是产生超声的体源。他们还得到了材料中的瞬态温度场分布、超声波的传播曲线以及激光输入参数与激光超声波特征值之间的关系。此外,他们进一步考虑了热扩散以及激光源的有限宽度和持续时间的影响,结果发现热物理参数的温度依赖性对激光产生的高频表面声波有显著影响。

2004年,沈中华等^[35]采用有限元方法模拟了激光热弹机制激发单层和双层材料中的超声波,仿真结果表明,在较薄的单层铝板中激发出来的是典型的兰姆波形,而在较厚铝板中激发出来的是掠面纵波和声表面波波形;此外,他们还计算了NiAl和AlCu这两种

双层材料中不同接收距离处垂直于表面的位移,在 NiAl 系统中得到了正常色散,但在 AlCu 系统中得到了反常色散。2005 年,Jeong^[36]将无损表面热弹性激光源近似成一个剪切偶极子和节点力,建立了有限元模型,得到了瑞利波模型并给出了横波和纵波的正确指向性模式;他们在不同深度的表面断裂裂纹中采用固定源和 SLS 进行瑞利波仿真,得到了符合实验观测结果的仿真结果;同时,模型再现了实验观察到的特征,这些特征可以用于表征表面断裂裂纹。2007 年,倪辰荫等^[37]在脉冲激光源入射铝材料表面激发超声波模型的基础上,采用有限元方法进行了数值模拟研究;他们通过对比入射激光光斑半径内同一位置处存在的 100 μm 宽、深度不同的表面缺陷以及无表面缺陷情况下垂直于材料表面的位移,研究了缺陷深度对声表面波的影响,并通过对固定缺陷的位置和尺寸进行分析,得到了距离激光入射光斑边缘不同位置的近场点在垂直于材料表面方向的位移,进而分析了激光激发声表面波模态变化的规律。

2010 年,关建飞等^[38]采用有限元法研究了脉冲激光源在含有表面缺陷的铝板模型中激发声表面波的物理过程,分析了激光源作用位置的改变对声表面波时域波形的影响,结果发现表面缺陷的深度唯一地决定了激光激发的声表面波中能够形成振荡的波长成分,因而可以利用表面缺陷对声表面波的这一滤波效应定量地测量表面缺陷的深度。2012 年,Pei 等^[39]建立了一种基于有限元法的激光超声检测裂纹的数值模型,研究了热弹性超声波法在裂纹检测中的应用。2014 年,Hernandez-Valle 等^[40]利用激光超声瑞利波检测技术来表征具有不同分支和几何形状的缺陷,模拟了应力腐蚀开裂(SCC)类型缺陷的几何形状,展示了分支位置和长度与近场增强、远场反射函数的关系,分析了表征缺陷几何形状的信号;实验结果和有限元模型显示了该技术在检测 SCC 部件表面断裂缺陷方面的潜力。2015 年,Liu 等^[41]通过在板上施加模拟激光脉冲的热流来激发兰姆波,采用有限元方法研究了缺陷对接收到的兰姆波的影响,并对非聚焦光源和线聚焦光源激发的兰姆波进行了比较;他们通过对仿真信号进行小波变换得到了 A0 模的群速度,并发现小波变换得到的群速度与瑞利-兰姆方程的结果高度一致;此外,他们还将设置有不同长度缺陷的板的面外位移与无缺陷板的位移进行了比较,并利用小波变换确定了兰姆波以 A0 模式群速度行进的到达时间,结果发现缺陷大小与小波系数之间存在很强的相关性。2015 年,Zhou 等^[42]采用有限元方法分析了激光产生的瑞利波与表面裂纹相互作用的时域和频域特征,结果表明,脉冲激光引起的表面声波对表面裂纹敏感,而随着裂纹深度的增加,透射系数几乎呈线性下降,反射系数呈下降趋势。2016 年,Liu 等^[43]对铝板上的激光超声波进行了模拟,并利用非线性特征

(Bhattacharyya distance)来检测铝板模型中引入的微裂纹;他们在多物理场仿真中通过 Bhattacharyya distance 计算获得了测量点附近裂纹导致的几何差值,并将 3D 模型仿真结果与非接触式激光超声测量结果进行了比较;他们在插入微裂纹并提取 Bhattacharyya distance 后实现了裂纹的提取和可视化,并研究了嵌入尺寸和频带等 Bhattacharyya distance 参数对损伤可视化的影响。2017 年,Guo 等^[44]建立了一种基于表面波探针的激光超声检测系统,并采用此系统对铝盘上不同深度的缺陷进行测试,同时详细分析了缺陷深度与表面波最大振幅之间的关系,以及缺陷深度与表面波中心频率之间的关系;结果表明:当缺陷深度小于表面波波长的一半时,表面波的最大振幅、中心频率与缺陷深度呈线性关系。

在目前的激光超声有限元仿真研究中,对激光超声缺陷响应的研究主要针对的是表面缺陷,针对内部缺陷的研究尚显不足,而且有关增材制造构件的重要材料特征(如表面粗糙度和孔隙率等)对缺陷响应影响的研究也比较少。

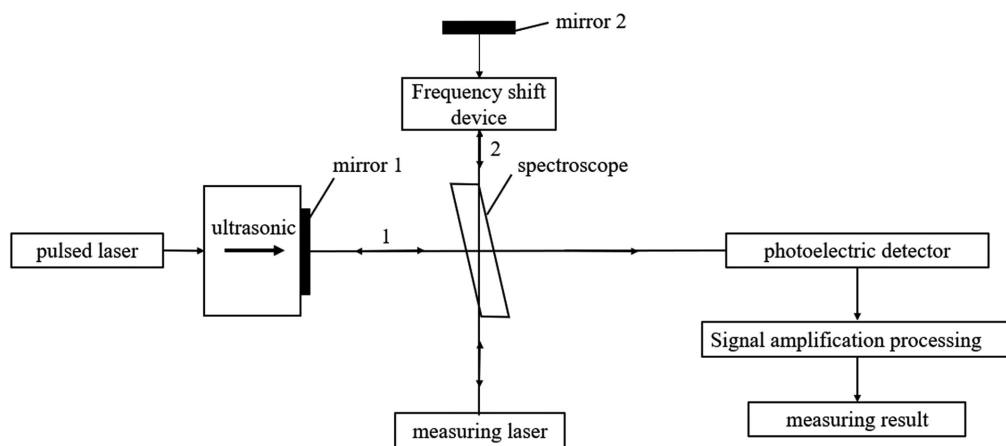
4 激光超声检测系统

激光超声检测系统主要由发射系统和接收系统两部分构成,其原理^[45]如图 9 所示。脉冲激光器发射的激光在物体表面产生超声脉冲信号,该信号沿物体内部传播,会携带与物体相关的缺陷、应力及晶体结构等信息。用检测激光器在测试材料表面接收携带了超声信号的散射光与反射光,然后用干涉仪检测其中细微的光程变化并进行信号解调分析处理,得到激光超声波形,就可以探测出材料的内部信息^[45]。

4.1 激光超声检测系统的搭建

激光超声系统是一个集光、机、电、算的复杂检测系统,主要由超声波的产生与接收部分组成^[46]。根据现有的研究,系统的脉冲激光发射器普遍使用的是 Nd:YAG 脉冲激光器。为了实现非接触检测,对激光超声的接收多采用光学法^[46],如外差干涉法。为了使系统接收激光超声更灵敏、稳定,探测装置更简便,研究人员在系统接收激光超声的方法及仪器上开展了大量研究。

目前,产生超声波的激光器主要有 Nd:YAG 激光器、CO₂ 激光器和 XeCl(308 nm)激光器,其中选用 Nd:YAG 激光器的超声检测系统比较常见。Millon 等^[47]以钢作为检测对象,研究了激光束参数对系统探测到的频率的影响,在实验中,他们通过权衡高分辨率和超声衰减系数,选择激发表面波的频率在 15 MHz 以上。他们通过研究发现:激光源的尺寸和性质会影响系统探测的频率;为保证激发的表面波在 15 MHz 频率下有较高的穿透率,需选择直径小于 0.2 mm 的激光源。

图 9 激光超声检测系统原理图^[45]Fig. 9 Schematic of laser ultrasonic detection system^[45]

4.2 激光超声常用检测方法

激光超声无损检测经常被用于非接触、极端环境(如高温、低温等)、无需耦合剂、快速扫描等条件下,因此,非接触式检测超声信号的方法引起了人们的广泛关注。常用的非接触式超声检测技术需要使用电磁声换能器、电容或静电换能器、空气超声换能器来实现,但这些仪器有其自身的局限性,如,电磁声换能器要求被检测样品为导体,电容换能器要求样品表面抛光,空气换能器的带宽较窄等。更重要的是,这些仪器与待测样品不能相隔太远,通常要求相隔几毫米到几十毫米,因为探测灵敏度会随着样品与换能器之间距离的增大而降低。因此,研究人员普遍采用光学检测技术来实现真正的远距离非接触式检测^[46]。超声的光检测技术分为非干涉技术和干涉技术^[48]。非干涉技术主要是刀边技术,即,当入射到表面的探测光点的尺寸小于超声波长时,超声波纹引起反射光偏转(偏转量可以由刀边切割的光通量测定),通过检测表面声波和体声波的传播情况,就可以表征样品的微结构及内部缺陷等^[48]。干涉技术是基于两束及两束以上的相干波在空间相遇时振动此消彼长的现象建立的光检测技术,主要分为光外差干涉技术、差分干涉技术和速度干涉技术。在光外差干涉技术中,聚焦的激光束入射到样品表面产生反射光束,反射光束与另一束从激光源分离出的参考光发生干涉,就可以有效测量样品表面的振动位移。差分干涉技术通过使同一光源的两分离激光束照射于样品上的同一点来实现差分干涉探测。速度干涉技术考虑了表面运动产生的多普勒频移,因此能够敏感地响应表面的振动速度^[48]。

针对基本的激光超声检测方法,陆续有研究人员提出了改进方法,以减小其局限性并增强其功能性。2006年,沈中华研究团队^[49]提出了非接触式、全光学激光超声检测的实验方法,并搭建了基于光束偏转法的光差分检测系统,提高了检测光路的抗噪声能力。2008年,严伟^[50]将光纤斐索干涉仪用于激光超声检测系统,以检测激光超声表面波,并验证了该系统的有效

性;该系统因光纤探头的微米级尺寸而具有更高的分辨率,而且该系统结构简单,价格便宜。2016年,为了提高超声检测系统的测量精度和灵敏度,增强系统的抗干扰能力,司高潞等^[51]采用双光路外差干涉仪对该系统的光路进行改进,最终使该系统的位移分辨率达到了0.1 nm。

5 激光超声在缺陷检测方面的应用

5.1 激光超声检测在金属材料上的应用

早在2000年左右,激光超声就以其非接触、适用于恶劣环境等优势受到了研究人员的青睐,研究人员从理论和实验两个层面探究了普通金属构件的激光超声检测。

1995年,Pierce等^[52]用脉冲Nd:YAG激光成功地在金属铝块中激发出了超声波,并通过调制激光源的频率(250 kHz~1 MHz)增大了激光超声信号,挖掘出了激光超声在无损检测中的巨大潜力。1999年,di Scalea等^[53]初步探索了激光超声检测,研制出了可对不透明固体进行激光超声检测的光束控制的c扫描系统,并采用该系统对12 mm厚铝板进行了60 mm×35 mm的区域扫描,观测到了铝板背面6 mm深度处的“H”型凹槽。2006年,沈中华研究团队^[49]通过其搭建的基于光束偏转法的光差分检测系统,对带有深度为0.71 mm、宽度为2.00 mm的人工表面缺陷的矩形金属铝块进行检测,成功实现了表面缺陷的精确定位,验证了非接触式全光学激光超声检测方法的可行性,并验证了线光源产生的超声波适合于材料表面缺陷的检测。2007年,Nadeau等^[54]采用超短脉冲激光器对薄金属电镀层的厚度进行激光-超声脉冲回波测量,他们使用飞秒激光耦合法布里-珀罗干涉仪(CFPI)对厚10~100 μm的薄金属铝/铜片进行了厚度测量,测量结果与实际厚度相吻合,验证了激光超声的检测精度可达微米级。同年,Nagata等^[55]采用脉冲Nd:YAG激光激发超声波与法布里-珀罗干涉仪相结合的方法,在钢板实际热轧生产过程中通过横

波的速度表征钢板的各向异性,进一步探讨了利用各向异性参数评估再结晶的可行性。2015年,丁一珊等^[56]基于热弹机制下的理论模型,采用有限元方法分别对无裂纹、表面裂纹(0.2 mm×0.8 mm)、其他裂纹(0.2 mm×0.8 mm)三种情况下激光与材料的相互作用进行了二维数值仿真计算,研究了这三种情况对表面波信号的影响,得到了缺陷对超声表面波具有滤波效果以及裂纹深度会增大信号幅值并丰富信号成分等结论。2018年,冯湾湾等^[57]基于声弹性理论,采用激光激发表面波法测得了铸铁制动盘表面不同位置的残余应力,测量结果与X射线应力法测试结果具有良好的一致性。2018年,李俊燕等^[58]利用合成孔径聚焦技术(SAFT)实现了厚钢板样品内部缺陷(直径2 mm的圆形孔洞缺陷)的定位及成像,实现了表面粗糙样品的非接触无损检测。2018年,孙凯华等^[59]提出了激光超声反射横波双阴影检测法,解决了激光超声检测内部缺陷时衍射回波信号弱和透射体波检测无法获得缺陷深度信息等难题。2019年,Nomura等^[60]研究了激光超声检测技术在焊接过程中的实时缺陷检测,并将检测结果与焊接结束后的检测值进行了对比,结果发现两者仅存在5%的偏差;若采用高温下超声波速度降低来解释该偏差,则足以确定缺陷的位置,从而再次论证了激光超声检测在高温环境下实时检测的可行性。2021年,潘宗星等^[61]采用ABAQUS有限元仿真软件模拟了热弹机制下激光超声检测GH4169高温合金残余应力的声弹效应,结果表明,该合金表面波的波速与应力之间具有良好的线性关系,有限元模拟与X射线衍射测量方法在残余应力场分布上取得了较为一致的测量结果。2020年,谷艳红等^[62]对比分析了激光干涉仪和电磁超声换能器(EMAT)对金属激光超声探测的准确度和实用性,结果表明,采用激光超声与电磁超声相结合的方法可以有效降低检测条件的复杂性,提高激光超声的实用性。姬保平等^[63]探究了基于激光超声导波的钢板内应力非接触无损检测方法,结果表明,导波的首波超前时间、波包延迟时间和群速度相对变化率都能用于表征钢板的内应力,可满足在线检测的需要。2021年,陈楚等^[64]分析了脉冲激光辐照于工件表面激发的多模式、宽带超声体波信号,并将分析结果与合成孔径聚焦技术(SAFT)结合,实现了工件内部微小缺陷的检测、定位和成像。

综上所述,国内对激光超声检测技术的研究始于2000年前后,研究人员通过理论分析、实验和有限元模拟验证了激光超声检测技术的可行性与可靠性,为激光超声在增材制造领域的实时原位监测奠定了基础。

5.2 激光超声检测在金属增材制造材料上的应用

随着增材制造技术的崛起,激光超声无损检测技术应用于增材制造构件的无损检测引起了越来越多的关注。特别地,增材制造成型过程中的实时激光超声

在线监测系统已成为该领域的研究热点。已有文献表明,激光超声可以检测增材制造构件内部的微小缺陷^[62],也可以实时监测增材制造过程中热影响区域的温度^[65],其研究方向正逐步向实时在线质量监测推进。

5.2.1 激光超声对金属增材制造构件缺陷的检测

2004年,Klein等^[66]利用激光超声技术探测了不锈钢和钛合金激光粉末沉积件中的盲孔人工缺陷,进一步说明了激光超声检测和定位缺陷的可行性。2009年,Pantano等^[67]运用有限元模拟得到了激光于固体表面激发的超声波在空气中传播的数值模型,改进了以前没有考虑声波在空气中传播的数值模型,允许模拟接收过程中非接触式换能器的存在,从而可以对实验过程进行完整的数值模拟。2013年,Cerniglia等^[68]对激光粉末沉积构件的激光超声检测技术进行了探究,结果显示该技术对尺寸为0.15~0.5 mm、深至0.7 mm的缺陷具有较高的检测灵敏度;同时,他们还采用有限元仿真了超声波的传播。2015年,Cerniglia等^[69]对激光粉末沉积构件进行了激光超声检测,结果表明,该技术可检测出近表面范围内直径为0.1 mm的缺陷以及深度为0.8 mm的较大缺陷(直径0.5 mm)。2018年,Millon等^[47]对激光超声检测增材制造构件的检测方法进行了评估,结果表明,激光超声检测精度可以达到0.05 mm宽和0.1 mm深。2018年,陈帅等^[70]搭建了一套激光超声线源扫查系统,并采用该系统对增材制造零件中的缺陷(尺寸为2 mm×1 mm×1 mm)进行检测,通过该系统能看到有无缺陷信号的区别,并能判断出缺陷的宽度等,为今后的增材制造在线检测提供了思路。2019年,Bakre等^[71]探究了增材制造构件表面粗糙度对激光超声检测的影响,并发现激光激发瑞利波的幅值和噪声水平随着表面粗糙度的增加而增大,而信噪比则随着表面粗糙度的增加而下降。Bigelow等^[72]讨论了激光光斑和干涉仪聚焦在相同空间位置进行孔隙探测的可行性,同时利用COMSOL进行仿真;仿真结果显示,新检测方法的灵敏度可与基于瑞利波散射的传统检测方法相媲美,而且不需要在激光超声光斑和干涉仪之间留出1~3 mm的间隙,从而提高了空间检测分辨率。Davis等^[73]在试样上集成一个狭缝掩模,通过改变这个狭缝的宽度激发出特定主波长的窄带宽兰姆波,然后将其用于增材制造构件的激光超声无损检测,完成了较大区域内多种缺陷的检测。2020年,Yu等^[74]将激光超声检测技术应用于带有内部孔洞缺陷的金属增材制造试样的检测,然后将检测结果与XCT技术的检测结果进行对比,发现了激光激发的超声瑞利波幅值与孔洞缺陷之间的关系,并得出了可检测到直径为0.8 mm的孔洞缺陷的结论。Zhang等^[75]探究了在表面粗糙度较高的情况下,激光超声影像系统对金属增材制造构件缺陷的检测能力,结果表明,对于没有处理

过的粗糙的 SLM 构件,该系统可检测到深度为 0.05 mm、直径为 0.05 mm 的孔洞。

综上所述,我国关于激光超声应用于增材制造领域的研究成果还较少,目前大多采用激光超声技术检测增材制造工件中的人工缺陷。可以通过降低表面粗糙度来进一步提高激光超声检测的精度。国外也在积极推进激光超声无损检测的各项研究。研究人员目前发现的激光超声检测缺陷的极限尺寸为 0.05 mm 宽和 0.1 mm 深,该极限尺寸的突破需要进一步改进现有的激光超声检测系统。

5.2.2 激光超声检测在金属增材制造上的其他应用

2017 年,Manzo 等^[65]结合脉冲激光产生的超声表面波和连续波激光外差传感技术,表征了增材制造过程中的局部温度,通过记录表面波到达时间的变化实现了热影响区温度的监测。2019 年,Zhan 等^[76]首次将激光超声检测技术应用于激光增材制造(LAM)钛合金零件残余应力的测量上。2019 年,Lévesque 等^[77]利用激光超声与 Gleeble 相结合的系统,通过监测超声波纵向速度随时间和温度的变化,对冷喷涂增材制造后热处理过程中的再结晶和烧结过程进行了实时监测。2020 年,Ma 等^[78]利用激光光学超声双重检测(LOUD)方法,实时监测了电弧送丝增材制造(WAAM)过程中零件的成分、内部缺陷及残余应力。同年,Ma 等^[79]利用激光光学超声双重检测(LOUD)同时对增材制造粉材的成分和粒度进行测量,他们还利用 LOUD 技术同时测量了 WAAM 铝合金试件中的晶粒尺寸和 Ti 富集度,测量结果与电子背散射衍射(EBSD)结果取得了 98.1% 的线性拟合度,这表明 LOUD 方法在研究增材制造合金成分和力学性能的关系方面具有巨大潜力。Yang 等^[80]基于激光超声技术测量的频散曲线提取 3D 打印零件的弹性模量,弹性模量反演值与实验值基本一致,控制误差为 0.02%~1.35%,实现了激光超声无损检测在增材制造构件力学性能表征方面的应用。2021 年,Zhan 等^[81]利用激光超声检测技术进一步研究了热处理对激光增材制造钛合金零件中残余应力的影响,这也是国内首次将激光超声技术应用于热处理过程中零件残余应力的测量。

近年来,部分研究团队开始利用激光超声无损表征增材制造材料或者构件的性能(如弹性模量、晶粒尺寸等),测量增材制造合金零件的残余应力及热处理后的残余应力变化,监测或评估增材制造过程中的重要参数或变化(如热影响区温度或再结晶、烧结等)。

上述的性能表征、残余应力测量和过程参数已实现实时监测,证明了激光超声在线实时检测增材制造构件中缺陷的可行性。研究人员还需更深入地探究增材制造过程中的特征,建立过程参数与工件质量之间的联系,便于实时判断制造过程是否会产生缺陷,并进行相应的参数调整,以避免缺陷的产生,提高最终的成

品率。

6 结束语

本文简要介绍了激光超声无损检测技术及增材制造过程的特点,分析了将激光超声检测技术应用于增材制造构件缺陷实时监测的优越性,阐述了激光超声检测技术的两种作用机制和选择、激光超声的建模仿真,以及激光超声检测系统的原理和搭建,分别列举并总结了国内外关于激光超声检测技术在普通金属材料 and 增材制造材料上的应用。

目前,增材制造工艺参数对增材制造构件质量的影响已被广泛地研究和报道。根据是否可测或可控,对工艺参数、工艺特征和产品质量进行分类,是过程控制的首要工作。工艺参数是粉末床熔融工艺的输入,它们要么是潜在可控的,要么是预定义的。可控参数(如激光扫描参数、层厚和温度)用来控制加热熔化和凝固过程,进而控制质量。预定义参数包括试样的几何形状、粉末材料的物性、基板材料和温度等。可控的工艺参数通常可以与可导出的工艺特征(如熔池尺寸、温度、孔隙率和残余应力)具有一定联系。可导出的特征虽然不能被直接测量,但是可以通过模型计算出来,如熔池的最大深度。为了强化相关性,可以进一步将工艺特征分为熔池、轨迹和层。工艺特征决定着最终的过程质量(几何尺寸、力学性能和物理性能)。发展可控工艺参数和工艺特征之间的联系需要运用前馈和反馈控制,以便将其应用于未来的控制系统中^[82]。

尽管如此,从目前已有的研究可以发现,未来搭建在线监测系统仍面临着许多挑战^[83]:

1) 目前实验只能直接测得部分重要参数,如熔池温度,仍有一部分起重要作用的参数无法直接获得,如残余应力等。它们如同增材制造过程中的衍生信号,对于理解增材制造过程中缺陷的产生并设计在线监测系统以实时调控构件的成型过程具有重要意义。因此,需要寻找实验衍生信号与可直接测量的实验参数之间的关联,从而构建出准确完善的在线监测系统。

2) 增材制造过程中产生的缺陷类型繁多,应当寻找一种能快速识别不同类型缺陷并能及时反馈出相应调控方案的算法,以提高工件的成品率。

3) 全程在线监测制造过程反馈的数据是大量的、难以处理的,需要寻找一种算法来高效地处理这些数据,实时发现制造过程中的异常,并反馈相应的解决方案给闭环检测系统,进而实时调控工件的制造过程,提升成品率。

参 考 文 献

- [1] 朱忠良,赵凯,郭立杰,等.大型金属构件增材制造技术在航空航天制造中的应用及其发展趋势[J].电焊机,2020,50(1):1-14,124.
Zhu Z L, Zhao K, Guo L J, et al. Application and development

- trend of additive manufacturing technology of large-scale metal component in aerospace manufacturing [J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(1): 1-14, 124.
- [2] 冯淑莹, 张慧梅. 选择性激光烧结的研究进展[J]. *江西化工*, 2020(4): 56-57.
Feng S Y, Zhang H M. Research progress of selective laser sintering[J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2020(4): 56-57.
- [3] 汪飞, 李克, 曹传亮, 等. 选择性激光烧结成型材料研究现状及展望[J]. *铸造技术*, 2017, 38(6): 1258-1262.
Wang F, Li K, Cao C L, et al. Research status and prospect of selective laser sintering molding materials[J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(6): 1258-1262.
- [4] 吴芬, 邹义冬, 林文松. 选择性激光烧结技术的应用及其烧结件后处理研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(11): 2666-2673.
Wu F, Zou Y D, Lin W S. Application of selective laser sintering technology and research progress in post processing of its sintered parts[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, 45(11): 2666-2673.
- [5] 李怀学, 巩水利, 孙帆, 等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(20): 26-31.
Li H X, Gong S L, Sun F, et al. Development and application of laser additive manufacturing for metal component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(20): 26-31.
- [6] 周玥丞, 赵阳. 增材制造技术制备 316L 不锈钢的拉伸性能[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(10): 26-35.
Zhou Y C, Zhao Y. Tensile performance of 316L stainless steel by additive manufacturing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(10): 26-35.
- [7] 杨延华. 增材制造(3D 打印)分类及研究进展[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(3): 309-318.
Yang Y H. Analysis of classifications and characteristic of additive manufacturing (3D print)[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(3): 309-318.
- [8] 马驰, 刘永红, 纪仁杰, 等. 电弧增材制造综述: 技术流派与展望[J]. *电加工与模具*, 2020(4): 1-11.
Ma C, Liu Y H, Ji R J, et al. Review of wire and arc additive manufacturing: technology genre and prospect[J]. *Electromachining & Mould*, 2020(4): 1-11.
- [9] Koester L, Taheri H, Bigelow T, et al. Nondestructive testing for metal parts fabricated using powder-based additive manufacturing[J]. *Materials Evaluation*, 2018, 76: 514-524.
- [10] Ng G K L, Jarfors A E W, Bi G, et al. Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition [J]. *Applied Physics A*, 2009, 97(3): 641-649.
- [11] Ahn S H, Montero M, Odell D, et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2002, 8(4): 248-257.
- [12] 张祥林, 姜迎春, 张祥春, 等. 激光选区熔化增材制造构件工业 CT 检测方法研究[J]. *无损探伤*, 2020, 44(3): 34-36.
Zhang X L, Jiang Y C, Zhang X C, et al. Research on industrial CT detection method of laser selective melting additive manufacturing components[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2020, 44(3): 34-36.
- [13] 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.
Zhang X C, Zhang X L, Liu Z, et al. Application of industrial CT technology for additive manufacturing product by selective laser melting[J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(3): 52-57.
- [14] 孙长进, 赵宇辉, 王志国, 等. 增材新概念结构无损检测技术发展现状及趋势研究[J]. *真空*, 2019, 56(4): 65-70.
Sun C J, Zhao Y H, Wang Z G, et al. Development status and trend research of nondestructive testing for additive new-conceptual structure[J]. *Vacuum*, 2019, 56(4): 65-70.
- [15] Roy M, Walton K, Harley J B, et al. Ultrasonic evaluation of segmental variability in additively manufactured metal components[C]//2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, October 22-25, 2018, Kobe, Japan. New York: IEEE Press, 2018: 18326785.
- [16] 裘进浩, 张超, 季宏丽, 等. 面向航空复合材料结构的激光超声无损检测技术[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(19): 14-23.
Qiu J H, Zhang C, Ji H L, et al. Non-destructive testing for aerospace composite structures using laser ultrasonic technique [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(19): 14-23.
- [17] 袁久鑫, 秦训鹏, 张进朋, 等. 基于激光超声的电弧增材制件内部缺陷深度检测[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(1): 65-73.
Yuan J X, Qin X P, Zhang J P, et al. Depth detection of internal defects for arc additive products based on laser ultrasound[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(1): 65-73.
- [18] 周辛庚, 何存富. 激光超声无损检测[J]. *实验力学*, 1996, 11(4): 87-94.
Zhou X G, He C F. Laser ultrasonic techniques for non-destructive testing [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, 11(4): 87-94.
- [19] Karthik N, Gu H, Pal D, et al. High frequency ultrasonic non destructive evaluation of additively manufactured components [EB/OL]. [2021-02-06]. <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2013/2013-25-Karthik.pdf>.
- [20] 吴瑞. 基于激光超声的表面微裂纹检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
Wu R. Study on surface microcrack detection based on laser ultrasound[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [21] White R M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption [J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(7): 2123-2124.
- [22] Aakaryan A, Prolhorov A M, Chanturcy G F, et al. The effects of a laser beam in a liquid [J]. *Soviet Physics-Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1963, 17: 1463-1465.
- [23] Rose L R F. Point-source representation for laser-generated ultrasound [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, 75(3): 723-732.
- [24] McDonald F A. Practical quantitative theory of photoacoustic pulse generation [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(16): 1504-1506.
- [25] McDonald F A. On the precursor in laser-generated ultrasound waveforms in metals [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(3): 230-232.
- [26] Lei W, Chen J, Zhang S Y. Mechanisms of laser-generated of ultrasonic waves using an array of laser sources [J]. *Journal of Physics D*, 1995(28): 957-964.
- [27] Murray T W, Deaton J B, Jr, Wagner J W. Experimental evaluation of enhanced generation of ultrasonic waves using an array of laser sources [J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(1): 69-77.
- [28] Royer D, Chenu C. Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source [J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(9): 891-895.
- [29] 许伯强, 倪晓武, 沈中华, 等. 激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, 31(5): 621-625.
Xu B Q, Ni X W, Shen Z H, et al. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(5): 621-625.
- [30] 陈锡栋, 杨婕, 赵晓栋, 等. 有限元法的发展现状及应用[J]. *中国制造业信息化*, 2010, 39(11): 6-8, 12.
Chen X D, Yang J, Zhao X D, et al. The status and development of finite element method [J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2010, 39(11): 6-8, 12.
- [31] Moser F, Jacobs L J, Qu J M. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method [J]. *NDT & E International*, 1999, 32(4): 225-234.
- [32] Zerwer A, Polak M A, Santamarina J C. Rayleigh wave propagation for the detection of near surface discontinuities: finite element modeling [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2003, 22(2): 39-52.
- [33] Hassan W, Veronesi W. Finite element analysis of Rayleigh

- wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks [J]. *Ultrasonics*, 2003, 41(1): 41-52.
- [34] Xu B Q, Shen Z H, Wang J J, et al. Thermoelastic finite element modeling of laser generation ultrasound [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(3): 033508.
- [35] 沈中华, 许伯强, 倪晓武, 等. 单层和双层材料中的脉冲激光超声数值模拟 [J]. *中国激光*, 2004, 31(10): 1275-1280.
Shen Z H, Xu B Q, Ni X W, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(10): 1275-1280.
- [36] Jeong H. Finite element analysis of laser-generated ultrasound for characterizing surface-breaking cracks [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2005, 19(5): 1116-1122.
- [37] 倪辰荫, 石一飞, 沈中华, 等. 激光激发材料中近场声表面波的数值模拟 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 324-327.
Ni C Y, Shi Y F, Shen Z H, et al. Numerical simulation on near-field surface acoustic waves induced by laser line source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 324-327.
- [38] 关建飞, 沈中华, 倪晓武, 等. 激光超声探测铝板表面微缺陷深度的数值研究 [J]. *测试技术学报*, 2010, 24(1): 15-21.
Guan J F, Shen Z H, Ni X W, et al. Numerical study on depth evaluation of micro-surface crack by laser generated ultrasonic waves [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, 24(1): 15-21.
- [39] Pei C X, Demachi K, Zhu H T, et al. Inspection of cracks using laser-induced ultrasound with shadow method: modeling and validation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 860-865.
- [40] Hernandez-Valle F, Dutton B, Edwards R S. Laser ultrasonic characterisation of branched surface-breaking defects [J]. *NDT & E International*, 2014, 68: 113-119.
- [41] Liu W Y, Hong J W. Modeling of three-dimensional Lamb wave propagation excited by laser pulses [J]. *Ultrasonics*, 2015, 55: 113-122.
- [42] Zhou Z G, Zhang K S, Zhou J H, et al. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 73: 173-178.
- [43] Liu P P, Nazirah A W, Sohn H. Numerical simulation of damage detection using laser-generated ultrasound [J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 248-258.
- [44] Guo H, Zheng B, Liu H. Numerical simulation and experimental research on interaction of micro-defects and laser ultrasonic signal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 58-64.
- [45] 张立东, 李方贵. 激光超声技术在 NDT 中的应用 [J]. *四川兵工学报*, 2000, 21(3): 33-36.
Zhang L D, Li F G. The application of laser ultrasonic technique in NDT [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2000, 21(3): 33-36.
- [46] 杜丽婷, 刘松平. 激光超声检测技术 [J]. *无损探伤*, 2011, 35(5): 1-4.
Du L T, Liu S P. Laser ultrasound testing technology [J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2011, 35(5): 1-4.
- [47] Millon C, Vanhoye A, Obaton A F, et al. Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing [J]. *Welding in the World*, 2018, 62(3): 653-661.
- [48] 张淑仪. 激光超声与材料无损评价 [J]. *应用声学*, 1992, 11(4): 1-6.
Zhang S Y. Laser ultrasonic and nondestructive evaluation of materials [J]. *Applied Acoustics*, 1992, 11(4): 1-6.
- [49] 严刚, 徐晓东, 沈中华, 等. 激光超声表面缺陷检测的实验方法 [J]. *光电子·激光*, 2006, 17(1): 107-110.
Yan G, Xu X D, Shen Z H, et al. An experimental method of the laser-generated ultrasonic waves for detecting the surface-breaking defects [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, (1): 107-110.
- [50] 严伟. 光纤斐索干涉仪在激光超声表面波探测中的应用 [J]. *实验技术与管理*, 2008, 25(11): 63-66.
Yan W. Application of fiber Fizeau interferometer in detection of laser-induced surface acoustic wave [J]. *Experimental Technology and Management*, 2008, 25(11): 63-66.
- [51] 司高瀚, 张志伟. 基于外差干涉的激光超声检测技术 [J]. *电子器件*, 2016, 39(1): 124-127.
Si G L, Zhang Z W. Laser ultrasonic displacement detection technology based on heterodyne interference [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2016, 39(1): 124-127.
- [52] Pierce R, Ume C, Jarzynski J. Temporal modulation of a laser source for the generation of ultrasonic waves [J]. *Ultrasonics*, 1995, 33(2): 133-137.
- [53] di Scalea F L, Green R E. High-sensitivity laser-based ultrasonic C-scan system for materials inspection [J]. *Experimental Mechanics*, 1999, 39(4): 329-334.
- [54] Nadeau A, Martin F, Blouin A, et al. Application of laser-ultrasonics to the non-contact, pulse echo measurement of the thickness of micron thin metallic coatings [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 894: 225-232.
- [55] Nagata Y, Yamada H, Hamada N, et al. Development of a system to measure recrystallization ratio of plate steel using laser-based ultrasonics [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 894: 1676-1683.
- [56] 丁一珊, 杨世锡, 甘春标. 利用激光超声技术研究金属裂纹缺陷的检测波特性 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(14): 33-37.
Ding Y S, Yang S X, Gan C B. Detecting features of defect metal based on laser ultrasonic technique [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(14): 33-37.
- [57] 冯湾湾, 潘永东, 茹东恒, 等. 激光激发表面波法测铸铁制动盘残余应力 [J]. *机械工程材料*, 2018, 42(9): 78-82.
Feng W W, Pan Y D, Ru D H, et al. Residual stress in cast iron brake disc measured by laser-generated surface wave technique [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2018, 42(9): 78-82.
- [58] 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0904003.
Li J Y, Shen Z H, Ni X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0904003.
- [59] 孙凯华, 沈中华, 李远林, 等. 材料内部缺陷的激光超声反射横波双阴影检测方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0710001.
Sun K H, Shen Z H, Li Y L, et al. Inspection of material internal defects using double shadow method based on laser ultrasonic reflected shear waves [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0710001.
- [60] Nomura K, Otaki S, Kita R, et al. *In-situ* detection of weld defect during the welding process by laser ultrasonic technique [J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2019, 38(3): 030016.
- [61] 潘宗星, 宋俊凯, 高玉魁. 基于激光超声的 GH4169 高温合金残余应力检测 [J]. *力学季刊*, 2021, 42(1): 98-107.
Pan Z X, Song J K, Gao Y K. Residual stress measurement of GH4169 superalloy based on laser ultrasonic method [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2021, 42(1): 98-107.
- [62] 谷艳红, 张振振, 高先和, 等. 激光超声结合电磁超声在铝板无损检测中的应用研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0504002.
Gu Y H, Zhang Z Z, Gao X H, et al. Application of nondestructive detection of aluminum using laser ultrasonic technology and EMAT method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0504002.
- [63] 姬保平, 曹建树, 黄钢, 等. 钢板内应力激光超声导波检测方法研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(6): 0604001.
Ji B P, Cao J S, Huang G, et al. A new detection method for steel strip distribution based on laser ultrasonic guided waves [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(6): 0604001.

- [64] 陈楚, 应恺宁, 刘念, 等. 相移迁移法在激光超声合成孔径聚焦技术中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0304001.
Chen C, Ying K N, Liu N, et al. Application of phase shift migration method in laser ultrasonic SAFT[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0304001.
- [65] Manzo A J, Helvajian H. Pulsed laser ultrasonic excitation and heterodyne detection for *in situ* process control in laser 3D manufacturing[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(1): 012012.
- [66] Klein M, Sears J. Laser ultrasonic inspection of laser clad 316LSS and Ti-6-4[J]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2004: 1006.
- [67] Pantano A, Cerniglia D. Simulation of laser-generated ultrasonic wave propagation in solid media and air with application to NDE[J]. Applied Physics A, 2009, 98(2): 327-336.
- [68] Cerniglia D, Scafidi M, Pantano A, et al. Laser ultrasonic technique for laser powder deposition inspection [C] // 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM-XIII), May 20-24, 2013, Le Mans, France. [S.l.: s.n.], 2013.
- [69] Cerniglia D, Scafidi M, Pantano A, et al. Inspection of additive-manufactured layered components[J]. Ultrasonics, 2015, 62: 292-298.
- [70] 陈帅, 王海涛, 赵纪元, 等. 激光超声表面波用于增材制件表面缺陷检测[C]//远东无损检测新技术论坛论文集. 南京: [出版者不详], 2018: 266-270.
Chen S, Wang H T, Zhao J Y, et al. Application in surface defect inspection of additive manufactured based on laser ultrasonic surface wave [C] // 2018 Far East Nondestructive Testing New Technical Forum Proceedings. Nanjing: [s. n.], 2018: 266-270.
- [71] Bakre C, Hassanian M, Lissenden C. Influence of surface roughness from additive manufacturing on laser ultrasonics measurements [C]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2102(1): 020009.
- [72] Bigelow T A, Schneider B, Taheri H. Detection of pores in additive manufactured parts by near field response of laser-induced ultrasound [C]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2102(1): 070002.
- [73] Davis G, Rajagopal P, Balasubramaniam K, et al. Laser generation of narrowband lamb waves for *in situ* inspection of additively manufactured metal components [C]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2102(1): 070001.
- [74] Yu J, Zhang D Q, Li H, et al. Detection of internal holes in additive manufactured Ti-6Al-4V part using laser ultrasonic testing[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 365.
- [75] Zhang J, Wu J F, Zhao X, et al. Laser ultrasonic imaging for defect detection on metal additive manufacturing components with rough surfaces[J]. Applied Optics, 2020, 59(33): 10380-10388.
- [76] Zhan Y, Liu C, Zhang J J, et al. Measurement of residual stress in laser additive manufacturing TC4 titanium alloy with the laser ultrasonic technique[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 762: 138093.
- [77] Lévesque D, Bescond C, Cojocaru C. Laser-ultrasonic inspection of cold spray additive manufacturing components [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2102(1): 020026.
- [78] Ma Y Y, Hu X J, Hu Z L, et al. Simultaneous compositional and grain size measurements using laser opto-ultrasonic dual detection for additive manufacturing [J]. Materials, 2020, 13(10): 2404.
- [79] Ma Y Y, Hu Z L, Tang Y, et al. Laser opto-ultrasonic dual detection for simultaneous compositional, structural, and stress analyses for wire + arc additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100956.
- [80] Yang C H, Jeyaprasath N, Chan C K. Inhomogeneous mechanical properties in additively manufactured parts characterized by nondestructive laser ultrasound technique [J]. NDT & E International, 2020, 116: 102340.
- [81] Zhan Y, Xu H X, Du W Q, et al. Research on the influence of heat treatment on residual stress of TC4 alloy produced by laser additive manufacturing based on laser ultrasonic technique [J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106466.
- [82] Mani M, Lane B M, Donmez M A, et al. A review on measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes [J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(5): 1400-1418.
- [83] Chua Z Y, Ahn I H, Moon S K. Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: status and applications [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(2): 235-245.

Laser Ultrasonic Nondestructive Testing on Metal Additive Manufacturing Components

Hu Ping¹, Ai Lin², Qiu Ziyang², Zuo Junjie², Liu Sheng^{1,3}, Liu Yang³, Peng Zhixin¹,
Song Changhui⁴

¹ School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

² Hongyi Honor College, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

³ The Institute of Technological Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

⁴ School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China

Abstract

Significance Metal additive manufacturing technology has several advantages such as efficient formation, short processing cycle, and cost effectiveness. Components with complex spatial structures can be produced via additive manufacturing, thereby overcoming the limitations of traditional manufacturing. Therefore, this technology is favored by the automotive, aerospace, and medical equipment industries. However, possible internal defects, such as lack of fusion, cracks, and holes during the forming process of additive manufacturing, limit its promotion and wide application in the industry. Furthermore, the microstructure of the components changes significantly with the variation in the laser power,

process approaches, and scanning parameters during the additive manufacturing process. Furthermore, the stability of the phase and characteristic microstructures are affected by the protective gas, while controlling the surface topography. Therefore, the quality control of metal additive manufacturing products, particularly online monitoring, is of great strategic significance. Several approaches of nondestructive evaluation of flaw inspection and material characterization, such as X-ray computed tomography, fluorescent penetrant inspection, and ultrasonic testing, have attracted much interest. Particularly, ultrasonic testing is one of the most commonly used nondestructive methods for detecting internal defects. Compared to traditional ultrasonic nondestructive testing technology, laser ultrasonic nondestructive testing has the advantages of no-contact, high sensitivity, and suitability for harsh environment, which can realize rapid online monitoring.

Progress In this paper, the characteristics of metal additive manufacturing and nondestructive testing on additive manufacturing are briefly introduced, highlighting the fact that applying laser ultrasonic testing on metal additive manufacturing has great strategic significance. Then, two kinds of laser ultrasonic mechanisms are analyzed: thermoelastic mechanism and ablation mechanism. Under the laser ultrasonic simulations and experimentations, the thermoelastic mechanism is chosen without destroying the integrity or performance of the additive manufacturing components. Next, the finite element simulation studies on laser ultrasonic detection are introduced. Based on the finite element method (FEM), the complex models can be processed and the global numerical solution can be obtained by solving heat conduction and thermoelastic equations. Afterward, the principle of laser ultrasonic nondestructive testing and the testing system are introduced, in which common detection methods on laser ultrasonic are listed and briefly explained. Some improving methods on laser ultrasonic testing systems are also discussed. Yan *et al.* proposed an experimental method of a no-contact all-optical laser ultrasonic detection and built the optical differential detection system using the beam deflection technique, which improved the antinoise ability of the optical path. Finally, the application progress of laser ultrasonic nondestructive testing of metal traditional and additive manufacturing material at domestic and foreign industries is systematically summarized. Moreover, we have analyzed the research progress—both home and abroad—for reference. Studies on laser ultrasonic began earlier abroad. One example is the study by Pierce *et al.* (1993), who successfully used a pulsed Nd:YAG laser to excite ultrasonic waves in metal aluminum blocks and increased the laser ultrasonic signals by modulating the frequency of laser source, thus excavating the great prospect of laser ultrasonic in nondestructive testing. In comparison, relevant research in China only started in 2006. For instance, Shen *et al.* detected rectangular metal aluminum blocks with an artificial surface defect with depth of 0.71 mm and width of 2.00 mm by constructing an optical differential detection system based on the beam deflection method, accurately locating the surface defect position. In addition, laser ultrasonic can be used for detecting the defects and measuring other significant parameters or monitoring other important processes, such as characterizing the elastic modulus, measuring residual stress of additive manufacturing alloy parts, and monitoring the changes in additive manufacturing process like recrystallization.

Conclusion and Prospect Several studies have shown the feasibility of laser ultrasonic nondestructive testing on metal additive manufacturing. Given that the effect of additive manufacturing process parameters on quality has been widely studied and reported, developing a link between controllable process parameters and the required process characteristics to support feedforward and feedback control is the best way to achieve the goal of its application in future control systems. However, various challenges still exist. For example, the relationships among the parameters must be identified, including the parameters measured from experiments and those important parameters for monitoring and characterizing but cannot be obtained directly. Furthermore, an algorithm for quickly identifying different defects should be explored, and a corresponding feedback control scheme must be established to improve the quality of the additive manufacturing components. Moreover, the feedback data obtained from the entire online monitoring of the additive manufacturing process are expected to be massive and difficult to deal with. Thus, we should find an algorithm that can efficiently process these data, detect the anomalies in real time, and provide corresponding feedback to the closed-loop detection system, thus allowing us to control the manufacturing engineering of the workpiece in real time and ultimately improve the quality of finished products.

Key words laser technique; metal additive manufacturing; selective laser melting; laser near net forming; nondestructive testing; laser ultrasonic