

• 前沿进展 Research Progress •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5071

特邀论文

X 射线断层扫描表征缺陷对增材制造构件力学行为影响研究进展

黎姗姗¹, 李雅莉², 石磊^{2,3}, 帅三三¹, 李子晗¹, 黄成林¹, 王江¹, 任忠鸣¹

(1. 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 2. 中国航发商用航空发动机制造有限公司, 上海 201306 3. 太行实验室, 四川 成都 610213)

摘要: X 射线计算机断层扫描技术(X-ray computed tomography, X-CT)已成为无损检测表征增材制造(additive manufacturing, AM)形成缺陷及其力学性能的重要工具, 能够为工件内部结构和缺陷提供准确的定性和定量分析。缺陷对于材料的力学性能及服役寿命有着极大影响, 而增材制造过程中工艺参数的改变, 最终构件取向及原材料等差异, 都会影响缺陷特征。X-CT 不仅能够进行力学测试前有效区分关键区与无害区, 还能在加载过程中原位观测缺陷的萌生与演化过程, 帮助建立缺陷容限模型。本文综述了 X 射线断层扫描技术在增材制造领域中的应用, 尤其是对于试样内部缺陷的分析, 以及缺陷对试样静力学性能及疲劳变形等关键力学特性的影响。通过高分辨断层扫描图像, 精确评估缺陷类型、位置和尺寸及其对力学性能的影响, 可为优化增材制造工艺、提高工件质量及可靠性提供重要依据。

关键词: X 射线计算机断层扫描; 增材制造; 缺陷; 力学性能; 同步辐射

中图分类号: TP391.73; TG668

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)09-0825-16

Recent Advances in X-ray Tomography Characterization of Defects on the Mechanical Behavior of Additive Manufacturing Components

LI Shanshan¹, LI Yali², SHI Lei^{2,3}, SHUAI Sansan¹, LI Zihan¹, HUANG Chenglin¹,
WANG Jiang¹, REN Zhongming¹

(1. School of Materials Science and Engineering, State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201306, China; 3. TaiHang Laboratory, Chengdu 610213, China)

Abstract: X-ray computed tomography (X-CT) has become an important tool for the nondestructive characterization of defects and mechanical properties in additive manufacturing (AM), providing accurate qualitative and quantitative analysis of internal structures and defects in fabricated components. Defects significantly influence the mechanical performance and service life of materials, whereas variations in AM process parameters, final part orientation, and raw materials can affect defect characteristics. X-CT not only effectively distinguishes critical defect zones from benign regions prior to mechanical testing but also enables in situ observation of defect initiation and evolution during loading, supporting the development of defect tolerance models. This review focuses on the applications of X-ray tomography in additive manufacturing, particularly in analysing internal defects and their impact on key mechanical properties such as static strength and fatigue behaviour. High-resolution tomographic imaging allows precise evaluation of defect type, location, and size and their impact on comprehensive mechanical properties, offering critical insights for optimizing AM processes and improving component quality and reliability.

Key words: X-ray computed tomography; additive manufacturing; defects; mechanical properties; synchrotron radiation

收稿日期: 2025-04-18

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3713800); 上海市启明星计划(21QC1401500)

作者简介: 黎姗姗, 2000 年生, 硕士生. 研究方向为同步辐射 X 射线成像以及金属增材制造. Email: 15000878202@163.com

通信作者: 帅三三, 1988 年生, 博士, 研究员. 研究方向为外场下金属凝固技术、同步辐射 X 射线成像/衍射技术以及金属增材制造等.
Email: shuaiss18@shu.edu.cn

引用格式: 黎姗姗, 李雅莉, 石磊, 帅三三, 李子晗, 黄成林, 王江, 任忠鸣. X 射线断层扫描表征缺陷对增材制造构件力学行为影响研究进展[J]. 铸造技术, 2025, 46(9): 825-840.

LI S S, LI Y L, SHI L, SHUAI S S, LI Z H, HUANG C L, WANG J, REN Z M. Recent advances in X-ray tomography characterization of defects on the mechanical behavior of additive manufacturing components[J]. Foundry Technology, 2025, 46(9): 825-840.

增材制造技术(additive manufacturing, AM)具有成型精度高、表面粗糙度小、加工周期短及能够满足复杂结构零部件制造的优点,广泛应用于航空航天、船舶制造、军工装备及交通运输等多个高科技和重工业领域^[1-4]。这一技术的兴起为生产轻量化、高性能产品提供了强有力的支撑。增材制造技术展现出巨大潜力和应用前景的同时,成型合金的内部却会不可避免地出现缺陷,如气孔、裂纹、未熔合区域等^[5],对成型件的力学性能、耐久性和最终服役寿命有着显著影响^[2, 6-7]。因此,如何有效识别、评估并控制这些内部缺陷,并建立 AM 部件工艺、结构与性能之间的关系^[6, 8],已成为增材制造领域亟待解决的关键问题^[3, 9]。

以往对于零部件内部损伤演化的失效研究主要依赖于高精度显微镜技术和力学测试方法,如光学显微镜(optical microscope, OM)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)和电子背散射衍射(electron back scatter diffraction, EBSD)等。通过对标准件进行拉伸、疲劳测试,能够评估材料在不同应力状态下的性能变化。然而这些传统方法存在明显的局限性,大多检测方式只能对试件表面或小样本进行静态分析,无法实现对试件内部缺陷演化的实时、动态观测。尤其对于增材制造中产生的微小而复杂的缺陷,传统表征方法难以准确捕捉其形成、扩展和演化的全过程。

为克服这一难题,X射线计算机断层扫描技术(X-ray computed tomography, X-CT)迅速成为增材制造领域无损检测及评估的最佳方法之一。X-CT技术利用X射线穿透物质时的衰减特性,通过采集不同角度下的投影数据,经过计算机重构得到试件内部的三维结构信息。这一技术不仅能够直观展示试件的内部结构、微观组织以及缺陷分布,还能够实现定量分析,为缺陷识别、定位和评估提供了强有力的支持^[10-11]。

实验室 X-CT 采用锥形 X 射线束进行扫描,其基本原理是利用电子束轰击靶材而产生 X 射线,并通过调整射线源与试件之间的距离及扫描参数,实现对试件不同部位的穿透和成像^[12]。然而实验室 X-CT 在追求高空间分辨率的同时,仍面临着一些技术限制。由于锥形 X 射线的特性,为了获得更高的分辨率,试件需要尽可能靠近射线源,这限制了试件的大小和形状。同时,由于光通量相对较小,获取一组高分辨率扫描结果往往需要较长的时间,降低了检测效率,可见实验室 X-CT 扫描的实用性

也存在一定局限^[13-18]。

相比之下,同步辐射 X 射线技术则展现出更为优越的性能。同步辐射 X 射线是由带电粒子在接近光速运动时,沿其运动轨道切线方向释放出的电磁辐射^[12]。这种近平行的 X 射线束具有高通量、高准直、高纯净等优点,由于其近平行的特性,同步辐射 X 射线为试验设备的设计与搭建提供了更大的灵活性,使研究人员可以根据具体需求优化扫描参数和实验布局。而高光通量的特点使得同步辐射 X 射线能够在较短时间内获得高质量的扫描结果,时间分辨率得到了显著提升^[11, 19]。在检测效率提高的同时,空间分辨率的提高也提升了成像质量,为精确识别和评估内部缺陷提供有力保障。以上优点使得同步辐射 X 射线在材料科学、物理学、生命科学、地质学等领域都发挥了重要作用^[20]。

本文围绕 X 射线断层扫描技术在增材制造力学性能检测领域的重要应用及发展,对 X-CT 在 AM 构件力学性能测试中的应用,以及 AM 缺陷的不同特征对力学性能的影响等方面进行综述。概述了 AM 构件中缺陷形貌特征、分布特征、构建方向等对试样最终静力学、疲劳性能及寿命的影响。并对 AM 构件的静力学和疲劳性能的 X-CT 原位表征进行介绍。通过对 X-CT 在增材制造领域力学性能表征应用的回顾,以期为增材制造技术的未来发展提供参考。

1 X-CT 表征增材制造缺陷特征

学者们对增材制造力学性能的早期研究,大多集中于微观结构各向异性^[21]和表面粗糙度^[22-24]对材料力学性能的影响机制。微观结构各向异性主要源于增材制造过程中逐层堆积的工艺特性,使材料在不同方向上的晶粒取向和微观组织存在显著差异,造成试样力学性能的各向异性^[25]。而表面粗糙度则与成形过程中的熔池动态行为、粉末飞溅附着以及阶梯效应等因素密切相关,这些表面特征影响着零件的静态力学及疲劳性能。然而以上局限于材料表层区域特征的研究,难以全面解释增材制造件整体力学性能的复杂行为。

随着表征技术的不断发展,计算机断层扫描技术的引入为缺陷表征提供了革命性的研究手段,使得对于增材制造试样内部结构的研究成为可能。增材制造件内部固有缺陷包括各类孔隙和裂纹,目前研究的重点则在于对内部缺陷的位置分布、最大尺寸、孔隙率及试样取向等特征参数的精确分析^[26],并探讨其对材料力学性能可能造成的影响。通过高分

分辨率 X-CT 扫描,研究者能够非破坏性地获取材料内部缺陷的三维空间分布信息,并精确量化缺陷的几何特征参数。这种无损检测方法不仅能够揭示缺陷的空间分布规律,还可以建立缺陷特征与力学性能之间的定量关系模型,为优化增材制造工艺参数,提高成形件力学性能提供了重要的实验依据和理论指导。

1.1 缺陷特征

增材制造过程试样内部缺陷的存在对于工件最终性能的影响极大。Murakami 等^[27]认为,当试件中存在缺陷时,其内部就会引起应力集中从而影响力学性能,而这一现象往往与缺陷的尺寸、数量及位置相关。孔隙数量即孔隙率则是一个被广泛认可的重要因素之一,如在 Salarian 等^[28]的工作中,使用 X 射线断层扫描技术结合不同的工艺参数,人工诱导孔隙使得孔隙度保持在 0.7%~1.2% 的范围内变化,其研究结果证实了孔隙率确实显著影响样品的延展性。Carlton 等^[24]使用增材制造的奥氏体不锈钢 316L 进行 X-CT 原位拉伸试验,跟踪对比了高孔隙率样品与低孔隙率样品在加载过程中材料内的损伤演变。实验结果表明,断裂行为不只与孔隙率相关,孔隙的长径比与形貌特征对于断裂行为的影响也非常大。基于此,研究者们将孔隙率与缺陷形貌相结合,并作了进一步分析。

AM 试样中气孔的形成是由能量输入过高导致,在研究^[29]中发现,当气孔孔隙率保持在 1% 以下时,小气孔的存在对试件的力学性能几乎没有影响。Wilson-Heid 等^[30]的研究同样发现,对于 L-PBF 制造的不锈钢 316L,只有当孔隙直径达 2 400 μm 及以上或占试样横截面积的 16% 以上时,试样的拉伸强度才会明显下降;当孔径为 1 800 μm 及以上或占样品横截面积的 9% 以上时,断裂伸长率才会受到显著影响。而在经过打印参数优化后的成型件内部气孔往往较小且致密度较高,这表明通过参数优化后 L-PBF 制造的 316L 不锈钢在单轴拉伸载荷下,缺陷的直径对其力学性能影响并不大。

当样品在能量输入不足的非最佳工艺参数下制造时(即未熔合缺陷,通常尺寸较大且形状不规则),1% 的孔隙率对机械性能也有很强的不利影响。吴正凯等^[31]通过对比统计了 9 个疲劳源缺陷特征后,发现其中仅有 2 个为气孔,剩余皆为未熔合缺陷(lack of fusion, LOF)。Wilson-Heid 等^[28]通过对比由 L-PBF 制造的 Inconel 625 合金拉伸前后内部孔隙特征变化发现,高扫描功率下(多为气孔)断裂为韧性断裂,而低扫描功率下的样品(主要为 LOF 孔

隙),孔隙长径比变化相对较小,为脆性断裂,且发现了高低功率下试样在断裂后样品内的总孔隙率均与断裂前并无太大差距,但存在孔隙聚集形成大孔的情况。在 Pei 等^[32]的研究中,发现 Inconel 718 水平试样的抗拉强度略高于锻造试样,但断裂韧性低于锻造材料,其结果表明 LOF 孔隙使 L-PBF 试样的疲劳性能较差,抗破坏能力较低。而当试件拥有大的不均匀的 LOF 孔隙,即使经过退火热处理后其力学性能有所改善,也仍旧很差。Carlton 等^[24]的研究也证实了这个观点,认为工艺参数应尽量避免 LOF 孔隙的出现。

综上所述,LOF 孔隙被认为是破坏工件拉伸及疲劳性能的关键因素之一,这一结论与文献[22, 24, 33]的结果一致。而除了不规则状的 LOF 孔隙,Lecarme 等^[34]选取 Ti6Al4V 拉伸试样的中心区域进行损伤定量,发现平坦孔隙比起圆形或细长孔隙生长更快,大孔隙附近的小孔会生长得更快。

当试样内部的缺陷成为断裂源时,疲劳失效往往发生在试样中最大缺陷或不均匀处^[35],因而对于疲劳强度的估算主要依据该体积试样内可能出现的最大缺陷尺寸^[36]。研究者常使用 X-CT 定量分析,用三维缺陷在垂直于最大应力方向上的投影面积平方根,即等效缺陷尺寸参数来描述缺陷尺寸,并结合极值统计法(extreme values statistical method, EVSM)预测最大缺陷的有效尺寸(有效面积),进行缺陷容限统计,以制造合格零部件^[37]。EVSM 的核心原理在于:若样本数据服从某种概率分布,则该数据集中的极大值将渐进收敛于特定的 Gumbel 分布^[38]:

$$G(z)=\exp\{-\exp[-(z-\lambda)/\alpha]\} \quad (1)$$

式中, $G(z)$ 为小于或等于试样内部最大尺寸(z)的概率; α 为尺寸参数; λ 为位置参数。吴正凯等^[31]就通过极值统计法,随机选取了 10 个具有相同性质与大小的激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, L-PBF)成型 TC4 样品,并利用 X-CT 对每个样品内的最大孔隙进行分析统计,最终估算出更大体积的 L-PBF 成型 TC4 合金内部的最大缺陷特征参数。而通过将能够定量表征材料内部缺陷对疲劳强度影响的 Kitagawa-Takahashi (K-T)图与极端缺陷分布相结合,则可以估计出预期疲劳强度分布及给定应力场下材料体积的失效概率^[39-42]。

由于实际工件表面通常较为粗糙,需对基体表面缺口进行测定。然而,此类缺陷无法被分析软件直接分割,因此成为当前研究的难点之一。Nafar Dastgerdi 等^[43]通过 X-CT 原位疲劳测试进一步研究了增材制造 316L 不锈钢部件的疲劳行为,引入了

一种基于缺陷的疲劳寿命预测分析框架。其中采用了 $\sqrt{\text{area}}$ 模型,当2个相邻缺陷的空间距离小于其中较小的缺陷,则将2个缺陷大小相加并共同进行评估,从而推演得到 $\sqrt{\text{area}_{\text{eff}}}$,即最大的临界有效缺陷尺寸,将其视为初始的裂纹尺寸。并结合Hartman-Schijve变体的NASGRO方程^[44]来考虑裂纹扩展过程中裂纹纵横比的变化,以分析样品表面缺陷对于试件力学性能的影响。

1.2 缺陷分布

研究表明,表面或近表面的微孔往往成为疲劳裂纹萌发的起点,直接影响试件的疲劳寿命^[45-46]。且已有数值模拟推演印证了这一结论,即表面及近表面的缺陷会引起试件的应力集中,使得断裂裂纹萌生,降低工件力学性能^[47]。

Wang等^[48]通过显微组织观察和疲劳试验,研究缺陷对L-PBF镍基高温合金高温疲劳行为的影响,利用X-CT捕捉到了内部缺陷的合并和生长。图1显示了由矩形块加工而成的L-PBF镍基高温合金疲劳试样的疲劳裂纹起裂位置分布。定量分析表明,表面和亚表面缺陷的萌生主导了疲劳失效。而在关于优化L-PBF制成Ti6Al4V(同时进行退火热处理)的高周疲劳研究^[49]中表明,尽管在孔隙率低

至0.02%的情况下,几乎所有高周疲劳裂纹仍旧始于加工L-PBF样品表面下的孔隙。当近表面孔隙成为临界裂纹起裂孔,即使样品内部的孔隙多且大甚至为LOF孔时,裂纹仍会优先发生在表面附近孔隙^[50-51]。

吴正凯等^[31]进一步结合同步辐射X-CT技术与自主开发的原位疲劳试验机,对L-PBF制备的Ti6Al4V合金进行了准原位疲劳实验。通过实验统计了材料中缺陷的数量、尺寸、位置以及形貌特征,如图2所示,旨在深入了解缺陷对疲劳性能的影响。为了定量表征缺陷的位置,引入Feret直径(即缺陷在空间形貌上最远两点的直线距离)并将缺陷距离表面的最短距离定为 h ,通过对 h 是否小于Feret直径,判断其是否为近表面缺陷。结果表明,在表面和内部同时存在尺寸相近的缺陷情况下,疲劳裂纹通常优先从表面缺陷处萌生。以上研究表明确定了成型件表面及近表面缺陷控制的重要性。

1.3 构建方向

AM零件的机械性能会因其制造方向(如垂直或水平)的不同而展现出各向异性,从而影响试样的拉伸强度、断裂伸长率和抗疲劳性能^[32,52-58],而通过计算机断层扫描技术,能够直观获得不同取向试样

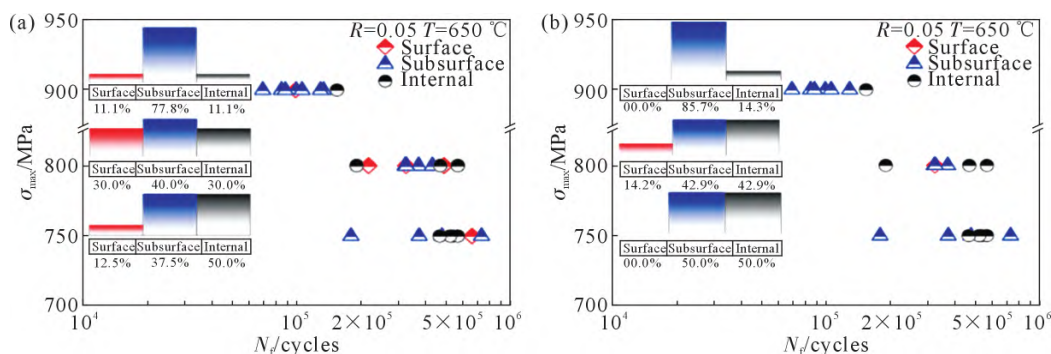


图1 L-PBF镍基高温合金疲劳试样疲劳裂纹起裂位置分布:(a)小平面与缺陷萌生;(b)缺陷萌生^[48]

Fig.1 Distribution of fatigue crack initiation in L-PBF nickel-based superalloy fatigue samples: (a) facet and defect initiation; (b) defect initiation^[48]

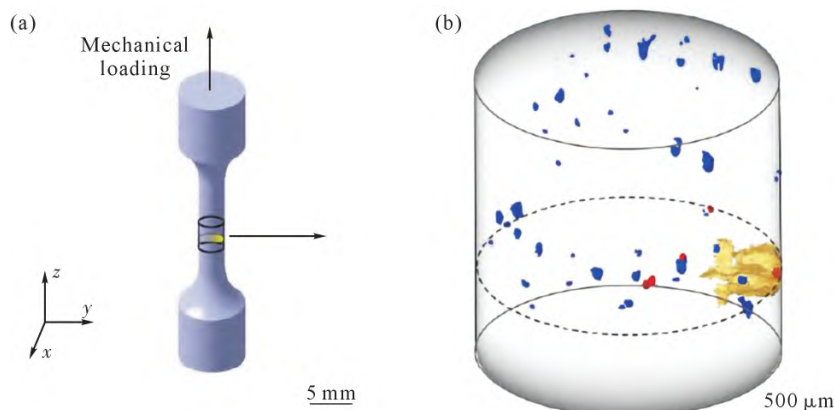


图2 L-PBF制备Ti6Al4V的缺陷分布:(a)Ti6Al4V试样取向示意图;(b)裂纹分布X-CT三维形貌重构结果^[31]

Fig.2 Distribution of defects in Ti6Al4V fabricated by L-PBF: (a) schematic diagram of the Ti6Al4V specimen orientation; (b) 3D morphological reconstruction the crack distribution via X-CT^[31]

的内部缺陷特征^[59],如图3所示。

Voisin 等^[60]将构建取向与断裂伸长率联系,选取 L-PBF 成型 Ti6Al4V 不同构建取向的拉伸样品并进行拉伸测试,系统分析了构建取向对材料延展性的影响机制。结果表明,当拉伸片取垂直于构建方向(垂直样品)时,其断裂伸长率显著低于拉伸方向平行于构建方向的样品(水平样品)。通过 X-CT 对拉伸试样颈缩区与均匀变形区的三维表征发现,垂直样品在拉伸过程中孔隙体积分数仅增加了约 50%,且孔隙的位置和分布未发生显著变化;而在水平样品中,孔隙的生长与聚集行为更显著,其孔隙体积分数增加了约 500%,孔隙数量也大幅增加,但孔隙的空间分布并未发生明显改变,如图4所示。结果表明,水平样品中的孔隙在拉伸过程中倾向于以相近的速率同步生长,在垂直样品中出现强烈的颈缩区域,而水平样品则没有该现象。因而该研究认为,平行于构建方向的样品通常表现出更高的延展性和疲劳性能,而垂直于构建方向的样品则因缺陷和织构的影响性能较差。

Wu 等^[45]为了了解缺陷对 L-PBF 成型 AlSi10Mg 合金结构的各向异性疲劳抗力的影响,从平行和垂直于试件的构建方向分别提取疲劳试样,基于由 X-CT 定量表征的试件初始缺陷特征,结合疲劳断

口分析所确认的关键性缺陷,讨论成型方向对成型件疲劳寿命的影响。结果表明,平行于构建方向的样品通常具有更高的疲劳强度,而垂直于构建方向的样品疲劳强度较低。Mower 等^[61]基于表面表征的研究也证实了,L-PBF 成型 AlSi10Mg 水平构建的样本具有更高的拉伸强度和抗疲劳性。Larrosa 等^[59]使用 X-CT 研究了缺陷的取向对 L-PBF 成型 Al-Si10Mg 疲劳行为的作用。结果发现,当裂纹状或“饼”形孔作为疲劳裂纹萌生和扩展的基点时,如果这些扁平的孔是垂直于加载方向,它们会造成高应力集中,疲劳裂纹得以扩展,进一步证实了垂直于加载方向的缺陷,可能在影响疲劳行为方面发挥更重要的负面作用^[62]。但也有部分 L-PBF 成型 AlSi10Mg 合金的构建方向对于拉伸强度的影响并不明显^[63],这可能与扫描策略、熔池结构以及微观特征有一定关联性,因此还需要进一步研究。

1.4 人工预制缺陷

对于铸件而言,随着孔隙尺寸的增大会导致屈服强度下降、断裂伸长率降低。而在 L-PBF 中孔隙通常较小且具有不同形状,为探究复杂 L-PBF 成型件的力学性能,部分研究者在试件中内置缺陷并进行力学测试以研究在 L-PBF 试样受外加载荷时,特定的孔隙类型对试件力学性能的影响。Wilson-Heid

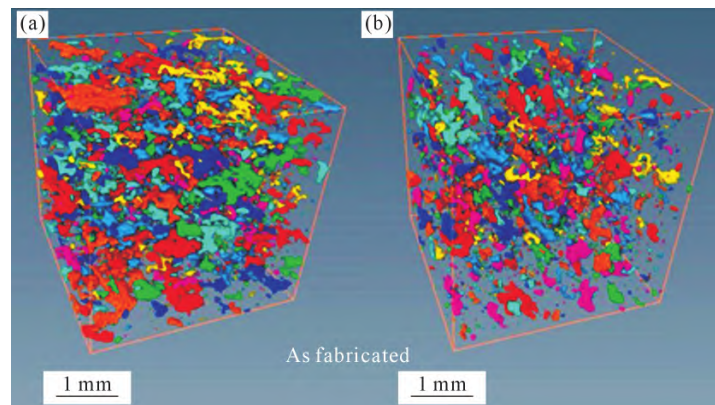


图3 试件沿垂直与水平方向的 X-CT 三维孔隙分布:(a) 垂直方向;(b) 水平方向^[59]

Fig.3 X-CT three-dimensional porosity distributions of the samples in the vertical and horizontal directions: (a) vertical layering; (b) horizontal layering^[59]

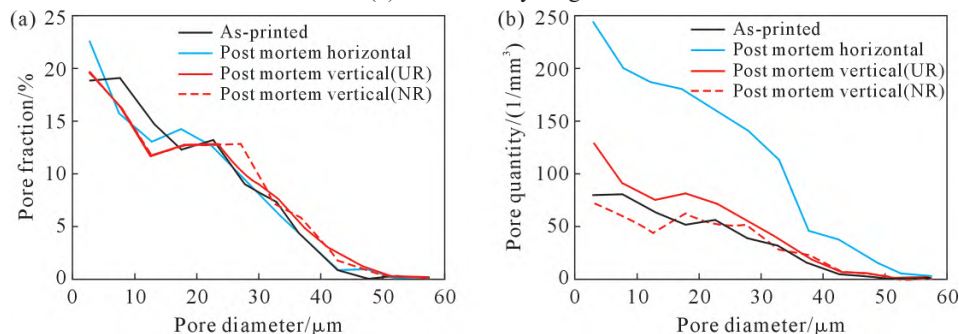


图4 X-CT 测量数据:(a) 孔隙分布;(b) 单位体积缺陷数量(UR 和 NR 分别代表拉伸后样品的均匀区域和颈缩区域)^[60]

Fig.4 X-CT measurement data: (a) pore distribution; (b) defect density per unit volume (UR and NR denote the uniform region and necking region of the post-tension samples, respectively)^[60]

等^[30]通过在 L-PBF 高致密度 316L 试件内部,人工内置了不同直径的圆币孔隙,如图 5a 所示,以探究 6 mm 规格圆柱试件中,150~4 800 μm 直径的 LOF 孔和气孔在受到外加载荷(单轴拉伸)时试件静力学性能的变化。

为了深入探究缺陷对材料力学性能的影响,不仅可以采用圆币型人工孔隙作为研究模型,还可以进一步模拟不同位置、各种形状的缺陷,如图 5 所示,从而更全面地研究材料在复杂、不规则缺陷时的力学性能^[57,64]。

由于实际工件中存在的缺陷呈现不规则且复杂的形态,因此在试样中通过改变工艺参数来刻意引入这类复杂形状的缺陷,能够更有效地将材料的力学性能变化与材料中特定类型的缺陷联系起来。Du Plessis 等^[65]通过调整和优化工艺参数在材料中引入特定的缺陷类型,如 LOF 孔、匙孔等,这种方法为研究不同缺陷类型对材料力学性能的具体影响提供了参考。

2 基于 X-CT 的 AM 试样静力学性能表征

上文系统分析了缺陷的固有特征(构建方向、三维形貌、分布等)对增材成型材料力学性能的影响,然而缺陷对材料性能的具体影响机制,尤其是在外加载荷作用下的演化行为仍需进一步深入研究。利

用 X-CT 技术对增材制造样品在形变过程中的缺陷演化行为进行原位表征,不仅能够揭示缺陷的动态演化机制,还能为优化工艺参数、提高材料性能提供重要的实验依据和理论指导^[66]。通过结合 X-CT 技术与力学性能测试,研究者能够建立缺陷特征与材料性能之间的定量关系,为增材制造材料的可靠性设计和工程应用奠定坚实基础。

2.1 非原位静力学表征

2008 年 Maire 等^[67]对一种 DP 钢进行了拉伸试验。通过 X-CT 对样品在拉伸前后的内部切片与结构的对比,将测量结果进行了定量分析,包括孔隙率、尺寸、长径比,以及试样的局部变形和应力三轴度,以此改进开发了新的孔隙生长模型,利用 SEM 断口表征以及 SEM 原位拉伸试验进行验证。该模型能够在大孔隙的生长、新孔隙的成核,以及现有缺陷的生长与较小的新缺陷成核之间的竞争进行模拟。

更有学者为深入研究金属材料的断裂机制,使用 X-CT 定量观测挑选出的固定孔隙,提出了一种先进的跟踪算法,用于分析变形金属试样的 X-CT 原位三维层析图像,以跟踪缺陷的成核、生长和聚集演变过程^[34]。可见 X-CT 表征对于获取材料在变形过程中损伤扩展的定性表征和定量三维损伤信息十分有益^[68]。

在增材制造领域,通过对测试前的样品与变形

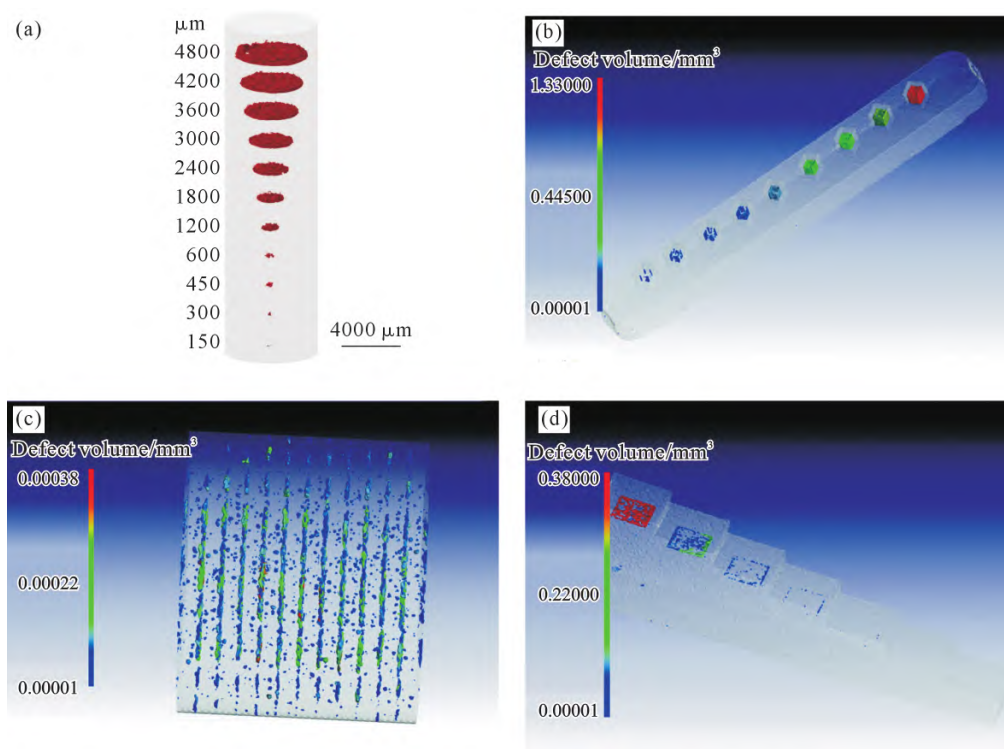


图 5 人孔内置孔隙:(a)圆币型;(b)体块型;(c)等厚片状;(d)不等厚片状^[30,64]

Fig.5 As-fabricated defects: (a) penny-shaped; (b) blocky; (c) constant-thickness plate; (d) nonuniform-thickness plate^[30,64]

前后的样品进行 X-CT 图对比, 能够获得试样内部的三维几何变化, 并进行定量分析, 从而获得缺陷的类型特征、位置分布等与力学性能的联系。

Salarian 等^[28]通过 X-CT 对拉伸实验前后的图像对比, 研究了不同激光功率大小下 L-PBF 制造的 Inconel625 合金的拉伸行为, 将孔隙率、孔隙长径比和取向等特征与试件的拉伸行为相联系, 如图 6 所示。

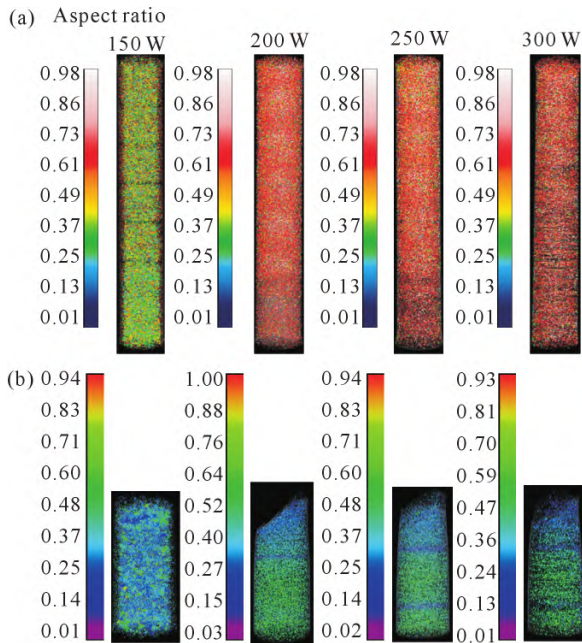


图 6 不同工艺参数下 Inconel 625 的缺陷长径比三维 X-CT: (a) 沉积态拉伸试样; (b) 拉伸后断裂状态^[28]

Fig.6 3D X-CT images of defect aspect ratios in Inconel 625 under different process parameters: (a) as-built tensile coupons; (b) fractured sample after tensile testing^[28]

然而以上类型的测试, 仍然无法确认试件内部的缺陷生成与聚集特征, 缺乏对于变形过程实时变化的统计与分析, 因此需要通过开展原位表征研究进一步揭示缺陷特征在力学加载条件下的响应机制。

2.2 原位单轴加载表征

已有研究表明, 在样品发生应变时, 其内部与表面所展现出现象存在显著差异, 这进一步凸显了仅依赖表面观测的不足^[69-70]。因此, 为了更全面地揭示材料在复杂环境下的真实行为, 亟需开发出能够同时实现原位、高温、低温及内部结构观测的先进实验技术。

2009 年, Terzi 等^[71]成功设计开发出一种用于 X-CT 的可在高温环境下工作的原位拉伸机。该拉伸机能够安装于 X 射线束路径上, 并在不遮挡射线的情况下对样品进行拉伸实验。同时该设备还添加了感应线圈加热系统, 使得铝铜合金能够在加热环境下, 借助 X-CT 实现对半固态铝铜合金变形过程的三维原位观察。

基于同步辐射 X 射线成像的高时间分辨率与空间分辨率, 自 20 世纪 90 年代以来, 各国学者开始研制开发能用于同步辐射光源的原位力学装置^[72-80]。Buffiere 等^[72]首先设计了能兼容欧洲同步辐射光源的原位单轴拉伸和压缩装置, 如图 7a 和 b 所示, 并对 723 K 下纤维材料的单轴力学测试进行追踪观测。实验过程中为了保持压缩过程始终进行, 避免成像模糊, 需要将压缩过程控制缓慢(0.05 $\mu\text{m/s}$)且进行 X 射线快速扫描(总扫描时间缩短到 1 min)。

但这样设计原位单轴拉伸/压缩装置由于腔体中心放置样品的区域距离腔体边缘较远, 不能与实验室 X-CT 的锥形激光束源足够靠近, 无法获得高分辨率的图像, 因而只能适用于平行 X 射线束的同步辐射光源。考虑到同步辐射光源机时的稀有性, 为适应实验室 X-CT 需求, Buffiere 等^[72]又将 PMMA 管更换为更轻薄且不影响 X 射线穿透的铝, 图 7c 使得管径由原本的 65 mm 缩小至 10 mm, 样品更加贴近射线源, 满足原位表征实验的需求。

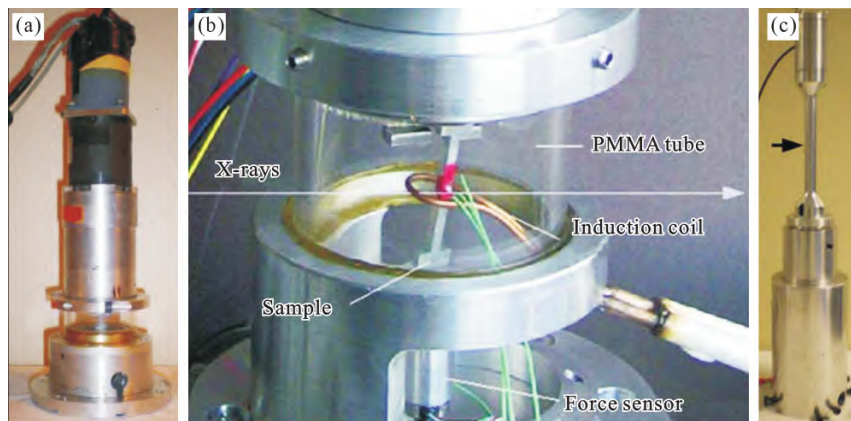


图 7 原位装置: (a) 同步辐射原位单轴拉伸和压缩机; (b) 原位拉伸机 PMMA 管放大图; (c) 实验室原位拉伸机^[72]

Fig.7 In situ device: (a) monotonic tension/compression device; (b) enlarged view of the PMMA tube of the tensile machine; (c) tensile stage used in the laboratory tomograph^[72]

脆性材料的断裂过程非常迅速, Maire 等^[81]于 2016 年首次实现每秒 20 张断层图像的同步辐射原位拉伸试验, 使得脆性材料的断裂过程得以捕捉。

近年来西南交通大学吴圣川教授团队基于上海同步辐射光源具有皮秒时间分辨率和微米空间分辨率的超快 X 射线成像 BL16U2 光束线, 开发了一种新的微型高精度拉伸和压缩测试仪, 实现了单轴载荷下, NEPE 固态推进剂及 AA7050-T7451 铝合金的宏观变形与内部裂纹演化的无损原位观测和定量研究^[82-83]。

在增材制造领域, Liu 等^[84]分析了两组通过选择性激光熔化 L-PBF 技术制备的金属晶格结构(即正八面体和菱形立方八面体)在压缩载荷下的原位变化。类似的, Geng 等^[85]利用原位压缩 X-CT 扫描, 获取缺陷的形貌分布并生成三维网格, 研究损伤的演化行为, 并以此开发模型进行预测, 以揭示增材制造金属晶格中缺陷的损伤演变规律。

Wang 等^[86]利用如图 8 所示的原位拉伸装置对预制了缺陷的 L-PBF 成型 AlSi10Mg 合金进行

X-CT 表征(图 9), 对预制的圆形通孔在受外加载荷时的演变过程进行分析, 并通过三维建模进行 FEM 模拟, 从而为实现避免二次钻孔的成型研究提供基础。

Ma 等^[87]研究对比了铸态及 WAAM 成型 205A 铝件的力学性能, 通过原位拉伸 X-CT 表征铸态及沉积态样品在拉伸过程中的裂纹起源及生长, 发现沉积态试样在拉伸断裂时, 除部分大尺寸孔隙区域表现出局部脆性断裂特征外, 断口表面广泛分布着尺寸均匀的微小韧窝, 这也表明在此断裂机制下, 试样主体遵循微孔形核-聚集的失效机制。因此沉积态样品的断裂机制是以塑性变形为主的混合断裂模式, 在预先存在的孔隙中检测到局部脆性现象。Zaba 等^[88]通过原位微米级 X-CT 表征对比了等通道转角挤压(equal channel angular pressing, ECAP)加工的铸件及 L-PBF AlSi10Mg 合金的断裂行为, 相比之下, L-PBF AlSi10Mg 合金内部孔隙率更低且缺陷分布均匀, 通过追踪裂纹扩展路径, 最终判断 ECAP 加工并未显著影响 L-PBF 式样的断裂模式, 而经过 ECAP 加工的铸造试样断裂机理则与初始结构相关。

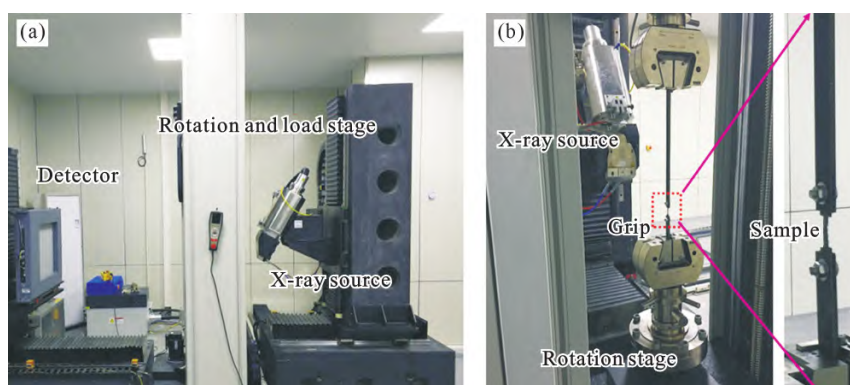


图 8 原位拉伸装置: (a) 原位拉伸断层扫描的实验装置; (b) 样品置物台^[86]

Fig.8 In situ tensile testing device: (a) experimental setup of in situ tensile tomography; (b) sample stage^[86]

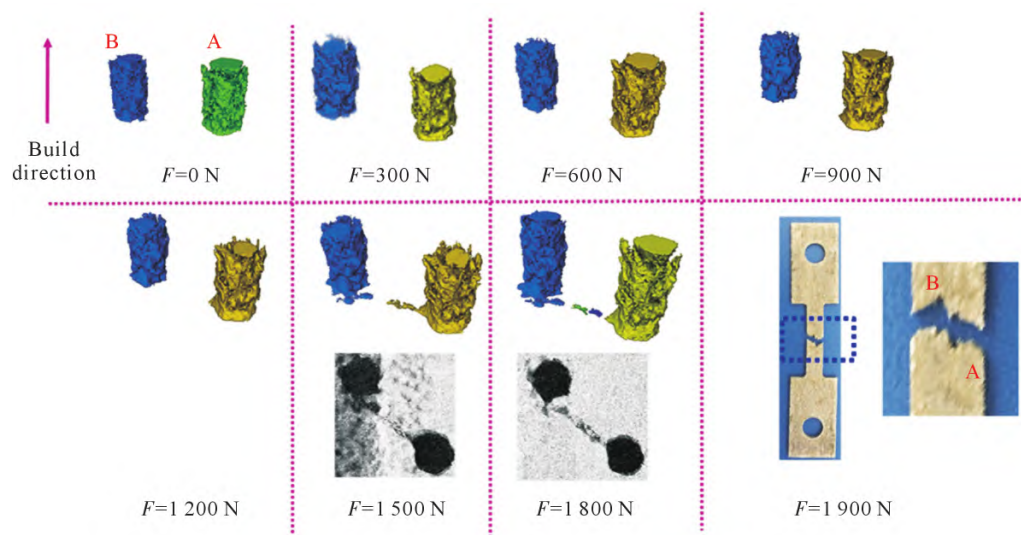


图 9 X-CT 原位表征通孔损伤演变^[86]

Fig.9 Damage evolution of through-holes reconstructed from X-CT in situ tensile images^[86]

Fang 等^[89]研究了激光粉末沉积 Fe30Mn10Cr10-Co3Ni(原子分数,%)合金在拉伸过程中的缺陷演变和断裂机制(图 10),引入等效椭球模型来描述缺陷和裂纹的取向。研究表明,激光粉末沉积制备 Fe30Mn10Cr10Co3Ni 合金中的原始缺陷在拉伸过程中的演变呈胶囊状,其 Feret 直径增加,与外加载荷之间的角度减小,同时球形度降低。而在拉伸过程中,颈缩后缺陷数量的增长速度显著大于颈缩前,但孔隙没有明显的生长和聚集现象。

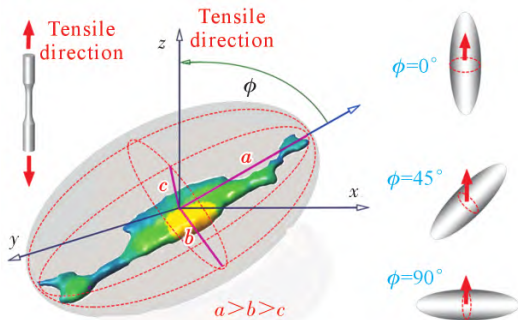


图 10 缺陷的等效椭球模型^[89]

Fig.10 Equivalent ellipsoid model of the defects^[89]

Zhang 等^[90]利用 X-CT 对 L-PBF 成型 K418 在高温(600 °C)下的断裂过程进行原位表征,即在拉伸的 5 个阶段进行 X-CT 扫描,包括打印初始态(Stage I)、弹性变形阶段(Stage II)、屈服阶段(Stage III)、塑性变形阶段(Stage IV)和断裂阶段(Stage V),得到如图 11 所示的阶段性三维缺陷,并重点跟踪其中的典型裂纹萌生与扩展过程,证明 LOF 缺陷的存在及分布

对断裂伸长率的严重影响,最后将扫描结果与 FEM 分析结合进行模型预测。

3 基于 X-CT 的 AM 试样疲劳行为表征

材料的疲劳损伤作为决定试件长期服役性能的关键因素,受到工业界与学术界的广泛关注。增材制造件的力学性能往往优于传统铸造件,但其疲劳强度较低,疲劳寿命分散性较大^[91],去应力热处理是消除残余应力、减少组织各向异性的关键步骤,对提升试件的整体性能至关重要。对于需要长期服役的关键部件而言,表面加工处理不可或缺,旨在消除表面粗糙度对疲劳性能的负面影响。然而即便经过精细的热处理和机加工处理,增材制造部件内部的缺陷仍是决定其疲劳行为的主导因素^[24]。增材制造过程中不可避免地会在打印件内部引入缺陷,这些缺陷可能导致关键区域强度不均匀,因此需要通过无损检测技术验证是否会影响疲劳寿命,并以此建立缺陷容限标准。深入探究增材制造部件内部缺陷的几何特征,并构建缺陷特征、应力状态与疲劳寿命之间的定量关系,成为缺陷容限评估的核心任务。

为实现这一目标,需要发展高效、精确的缺陷检测技术,以便能够准确测量和表征缺陷的尺寸、形状、位置及分布等几何特征。这不仅要求检测技术具备高分辨率和应对复杂三维结构的能力,还具备原位性,确保检测结果的全面性和准确性。同步辐射

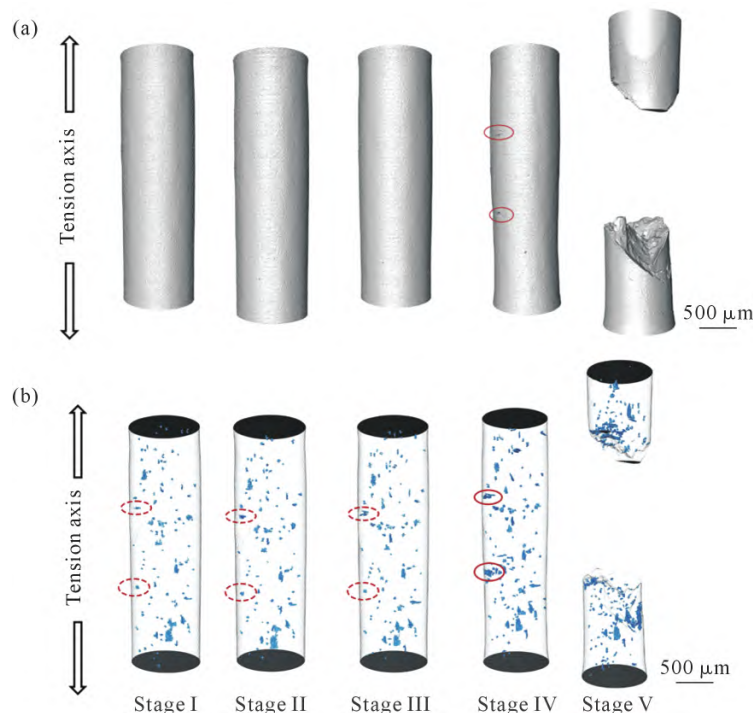


图 11 X-CT 表征 L-PBF 成型 K418 在高温拉伸过程中 5 个阶段的表面与内部缺陷演变:(a)外观图;(b)三维显微结构^[90]

Fig.11 High-temperature internal defect evolution of the L-PBFed K418 sample via X-CT: (a) macrograph; (b) 3D microstructure^[90]

原位疲劳装置, 可为后续的缺陷容限评估提供坚实的数据基础, 进而指导增材制造工艺的优化, 提升产品的疲劳性能和安全可靠性能。

在早期疲劳实验中, 通过将试样使用疲劳试验机进行疲劳测试, 随后取出放置于原位拉伸装置, 施加一定载荷使得疲劳裂纹张开, 以此观测疲劳试样内部缺陷的生长过程。Buffiere 等^[72]通过将循环测试单元(悬臂和偏心凸轮)集成到原位拉伸和压缩测试仪中, 开发了一种原位疲劳加载装置。该装置允许在最大循环频率为 50 Hz 的条件下进行应力比范围为 0.1~0.8 的疲劳试验。

吴圣川教授团队基于上海同步辐射光源开发了原位循环加载装置^[83,92], 能够实现对缺陷演化的无损、动态且高分辨研究, 如图 12 所示。该装置^[92]将单轴力学测试(拉伸和压缩)与轴向疲劳测试(低周疲劳、高周疲劳和超高周疲劳)集成在一起, 为评价先进材料在役性能提供了优质的观察和测试技术。

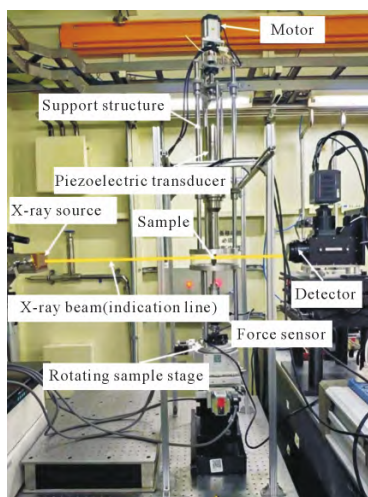


图 12 基于上海 SSRF 光源线站的原位超声疲劳测试系统^[92]
Fig.12 In situ ultrasonic fatigue testing system accommodated on beamline BL13W1 at the SSRF^[92]

自 Tammias-Williams 等^[93]首次使用 4D X-CT 研

究 AM 制备的钛合金内部缺陷引起的裂纹扩展, 开启了增材制造件疲劳失效表征原位领域的研究。Wu 等^[45]研究了缺陷数量对激光粉末床熔融制备的 Al-Si10Mg 合金各向异性疲劳性能的影响, 通过 X-CT 对激光粉末床熔融制备的 AlSi10Mg 合金内部缺陷进行了表征, 并系统分析了缺陷与试样拉伸性能及高周疲劳特性之间的关联。研究发现, 尽管不同构建方向的试样在拉伸强度上表现相近, 但垂直于构建方向测试的试样相较平行于构建方向的试样, 表现出更高的伸长率和疲劳强度。

该团队通过单轴拉伸、疲劳和断裂力学测试, 系统研究了 L-PBF 成型 AlSi10Mg 合金在缺陷影响下的疲劳损伤与失效行为, 利用 X-CT 技术对初始缺陷的形貌、尺寸及分布进行三维表征; 同时基于断裂力学理论, 建立了单裂纹模型和新开发的多裂纹扩展模型, 用于评估材料的疲劳裂纹扩展过程^[94]。

Wu 等还开发了一种基于延时同步辐射显微断层成像技术的原位测试装置, 用于开展旋转弯曲疲劳试验(rotating bending fatigue test, RBF)测试^[95], 如图 13 所示。结果表明在 RBF 载荷作用下, L-PBF 制备的 Ti6Al4V 合金中的裂纹通常表现出螺旋或阶梯状特征, 而非简单的平面扩展。通过实验观察发现, 多裂纹同时萌生和扩展的现象较为普遍, 这些裂纹可能发生交汇, 从而显著改变裂纹扩展路径并影响最终的断裂形貌。上述研究系统揭示了激光粉末床熔融制备的 AlSi10Mg 合金内缺陷的数量、形貌、空间分布及取向特征对材料延展性和疲劳断裂行为的影响机制。

4 基于 X-CT 的极端环境下原位力学性能研究

随着工件服役环境日趋复杂, 极端工况下的力学性能原位测试已成为当前的研究热点, 包括高

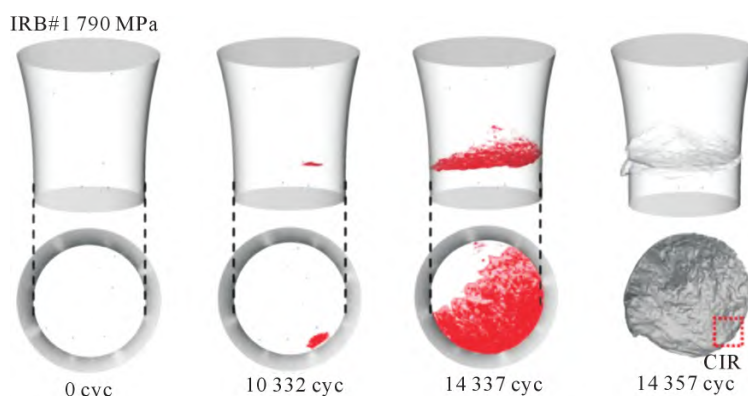


图 13 原位 RBF 测试单裂纹的三维渲染^[95]
Fig.13 3D renderings with single cracks of in situ RBF mini samples^[95]

温^[72,90,96-97]和低温^[98-99]。Bao等^[96]跟踪了250℃下进行高温低周疲劳测试(low-cycle fatigue testing, LCF)的AlSi10Mg试件的损伤积累,结果发现微缺陷的聚合更可能是由次级微孔的形核所决定,而非大孔隙的直接合并。同时在实验中也观察到部分大孔隙(特别是相互呈45°分布时)会发生聚合,这表明在高温循环塑性条件下,剪切应力可能对大尺寸缺陷的聚合起着重要作用。

Bao等^[97]在研究L-PBF AlSi10Mg合金高温LCF性能时进一步发现,在100和250℃条件下,材料主要通过L-PBF工艺缺陷引发的疲劳裂纹扩展导致断裂;在400℃下疲劳的试样则表现出不同的断裂机制,其微孔数量比低温条件下多出10倍,这些高密度微孔的生长和聚集主导了400℃下的断裂过程。

该团队还成功研制了一套创新型实验装置,如图14所示。该装置能够在高温环境下(最高达1500℃)同时施加高达5kN的单调或循环拉伸/压缩载荷。Qian等^[100]通过该设备实现了在室温及1200℃下,对C/SiC复合材料的原位拉伸试验。结果表明,在高

温条件下,试样的破坏模式主要表现为垂直于加载方向的多重水平裂纹,而非在室温下出现的层间分离现象。

Zhang等^[90]则利用激光加热的方式,完成了在600℃下L-PBF成型K418的高温拉伸演化。而对于低温环境下的原位力学性能表征目前研究较少。Hu等^[99]研究了在293K和123K低温条件下,利用自主研发的原位超低温拉伸加载装置(温度调节范围573~83K,利用液氮及液氮制冷),如图15所示,对AA2219铝合金焊缝的损伤演变机制进行了同步辐射X射线原位观测。研究发现焊缝盖面区因硬度显著低于母材而成为拉伸过程中的应变集中区。随着应变增大,材料内部通过沿 α -Al+ θ (Al₂Cu)共晶相,与 θ (Al₂Cu)相相关的穿晶断裂及沿晶断裂机制,形成高密度分布的微孔。这些新生微孔与预制焊接缺陷均呈现明显的取向性延伸生长特征,且球形缺陷的生长显著快于层状缺陷。该研究首次实现了同步辐射X射线超低温环境下的原位拉伸测试,为极端条件下材料损伤研究提供了创新性实验平台。

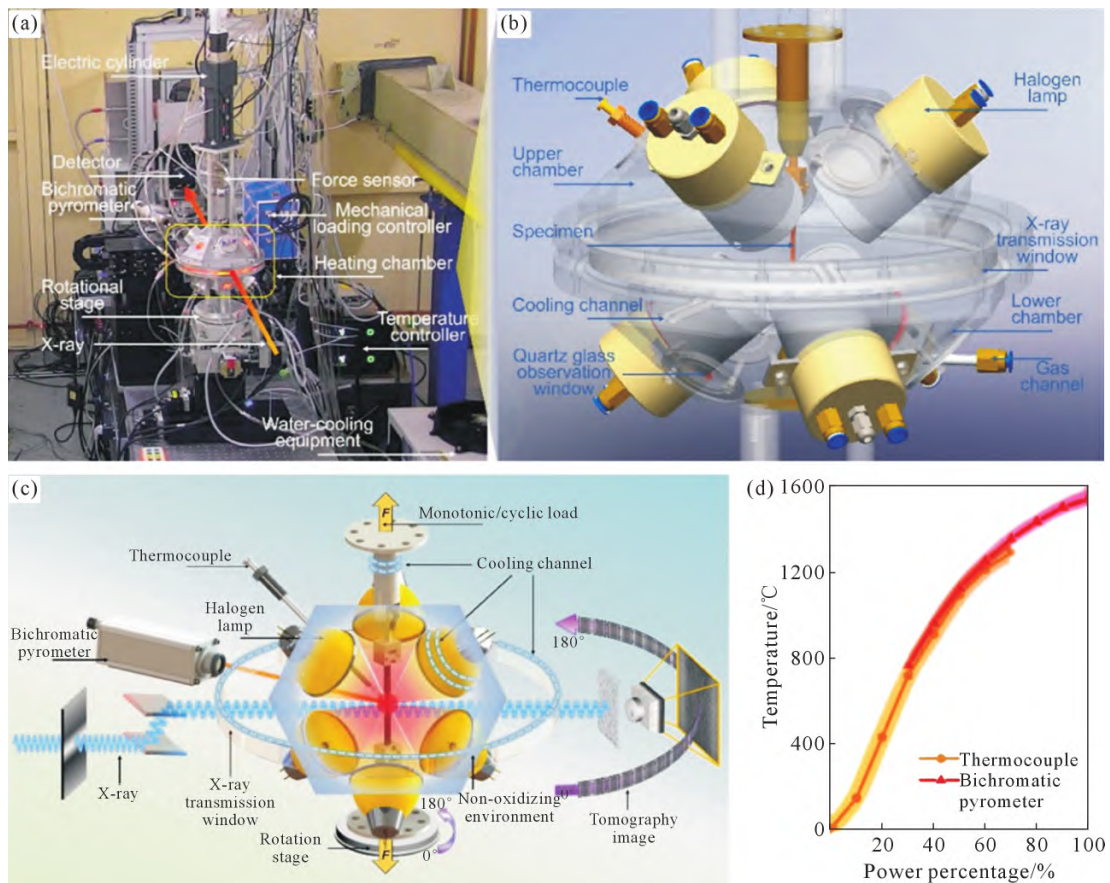


图14 自主研发的多场耦合原位单调/循环加载装置(兼容高分辨X射线表征技术):(a)上海光源运行中的高温原位测试装置实景;(b)热-力耦合原位加载测试系统与断层扫描端站的工作原理示意图;(c)加热腔体三维结构透视图;(d)样品标距区温度随输入功率变化的特性曲线^[100]

Fig.14 Customized multifield coupled in situ monotonic/cyclic loading device compatible with a high-resolution X-ray characterization technique: (a) high-temperature in situ test rig operating at the SSRF; (b) schematic of the operating principles of the in situ thermal-force coupled loading tester and tomography end station; (c) perspective view of the heating chamber; (d) temperature variation in the sample gauge region with input power^[100]

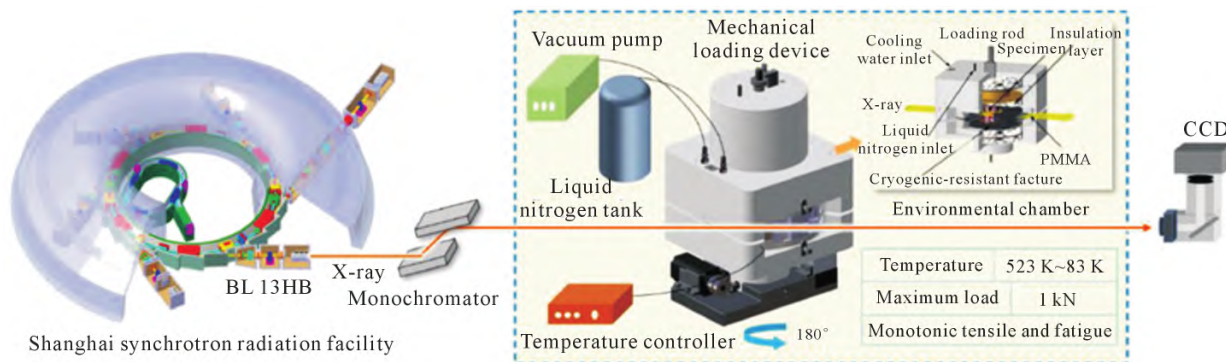


图 15 工作温度范围为 573~83 K 的低温原位拉伸装置

Fig.15 An in situ tensile rig with an environmental chamber with an operating temperature ranging from 573 K to 83 K

5 结论和展望

本文系统综述了基于 X 射线计算机断层扫描 (X-CT) 技术的增材制造构件力学性能研究进展,重点探讨了构件内部缺陷(分布特征、数量统计、形貌参数及构建取向等)与力学性能的关联机制。同时详细介绍了原位力学测试装置的最新发展及其在增材制造领域的应用现状。尽管 X-CT 技术在增材制造零件缺陷及其力学性能表征方面已经开展了大量研究,但是随着增材制造技术的进一步发展和对增材制造技术应用需求逐步提高,基于 X-CT 表征增材制造构件缺陷对力学性能影响的研究仍然面临以下挑战。

(1)缺陷与力学性能关联性模型的建立。由于缺陷对力学性能的影响特征多且复杂,几乎没有任何单一方法能够全面覆盖所有特征,导致模型在实际应用中存在一定的误差。缺陷对于力学性能的影响涉及多尺度、非线性,并且可能存在耦合效应,且增材制造所产生的缺陷特征又极其依赖工艺参数和材料特性,使得缺陷容限的建立十分困难。

(2)利用机器学习建立预测模型。近年来,基于机器学习的大数据驱动方法在材料性能预测领域发挥了重要作用。同步辐射 X 射线表征由于资源限制、实验成本高等因素,能够获得的实验数据十分有限。为突破这一瓶颈,探索将基于实验数据的半经验模型与机器学习方法相结合的新途径,通过融合物理模型与数据驱动算法建立预测模型,既可降低数据量的依赖,又能保持较高预测精度,为工业化质量控制提供可行的技术路径。

(3)同步辐射表征技术的试样尺度扩展。尽管同步辐射技术具有纳米级空间分辨率和皮秒级时间分辨率的独特优势,但受限于穿透率和衬度,实验表征的范围通常局限于毫米尺度的微观力学性能测试,难以满足工程构件宏观统计表征的需求。随着未来

中国第一代同步辐射装置的建成投用,更高的能量使得对大尺寸实验样品和工业级样品的高空间分辨率表征成为可能,从而使实验设计与实际工艺生产更为接近,真实反映实际工艺条件,更好地指导增材制造成型工艺。

(4)随着高/低温及多轴动态载荷等复杂工况需求的增长,现有原位装置面临时空分辨率、信号干扰与同步观测等方面的技术挑战。未来期待能够开发多物理场耦合的原位测试系统,集成超宽温与微秒级高速成像技术,以揭示缺陷在极端载荷下的动态演化规律。

参考文献:

- [1] 李鑫,程向,胡鹏飞,刘壮壮. 激光粉末床熔融镍基高温合金开裂行为研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(8): 763-771.
LI X, CHENG X, HU P F, LIU Z Z. Study on the cracking behaviour of nickel-based superalloys via laser powder bed fusion[J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 763-771.
- [2] 赵扬,杨平华,王铭振,曹逸飞. 钛合金增材制造孔隙缺陷的无损检测研究进展[J]. 激光技术, 2024, 48(3): 432-437.
ZHAO Y, YANG P H, WANG M Z, CAO Y F. Progress in nondestructive testing of pore defects in titanium alloy additive manufacturing[J]. Laser Technology, 2024, 48(3): 432-437.
- [3] 姚讯杰,王佳玮,杨雁程,张馨月,程序,张述泉. 金属构件激光增材制造缺陷产生机理及控制机制探究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 286-296.
YAO X J, WANG J W, YANG Y C, ZHANG X Y, CHENG X, ZHANG S Q. Review on defect formation mechanisms and control methods of metallic components during laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 286-296.
- [4] 张再云,刘印刚,李森泉. 激光增材制造 316L 及 IN718 的原位合金化及其微观组织与力学性能研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(2): 160-166.
ZHANG Z Y, LIU Y G, LI M Q. Research on in-situ alloying of 316L and IN718 via laser additive manufacturing and its microstructure and mechanical properties[J]. Foundry Technology, 2025, 46(2): 160-166.
- [5] 蔡嘉楠,陈超越,赵睿鑫,徐松哲,玄伟东,王江,任忠鸣. 扫描电

- 距对激光粉末床熔融制备 Inconel 939 高温合金裂纹缺陷的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(11): 1015-1024.
- CAI J N, CHEN C Y, ZHAO R X, XU S Z, XUAN W D, WANG J, REN Z M. Effect of hatch distance on the cracking of inconel 939 superalloy fabricated via laser powder bed fusion[J]. Foundry Technology, 2024, 45(11): 1015-1024.
- [6] GORSSE S, HUTCHINSON C, GOUNÉ M, BANERJEE R. Additive manufacturing of metals: A brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2017, 18(1): 584-610.
- [7] 周凡, 吴凡, 冯喆, 王永霞, 彭艺杰, 党铭吉, 张哲, 谭华, 张凤英, 林鑫. 激光粉末床熔融成形 Ti60 合金的工艺优化和组织性能研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(11): 1005-1014.
- ZHOU F, WU F, FENG Z, WANG Y X, PENG Y J, DANG M J, ZHANG Z, TAN H, ZHANG F Y, LIN X. Research on the processing optimization, microstructure, and properties of Ti60 alloy fabricated via laser powder bed fusion[J]. Foundry Technology, 2024, 45(11): 1005-1014.
- [8] DANIEWICZ S R, SHAMSAEI N. An introduction to the fatigue and fracture behavior of additive manufactured parts[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 167.
- [9] 任虔弘, 陈超越, 卢战军, 刘奕, 李华, 所新坤, 帅三三, 胡涛, 李霞, 王江, 任忠鸣. 激光选区熔化制备镍钛合金的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(3): 276-286.
- REN Q H, CHEN C Y, LU Z J, LIU Y, LI H, SUO X K, SHUAI S S, HU T, LI X, WANG J, REN Z M. Progress in the preparation of NiTi alloy by selective laser melting[J]. Material Research and Application, 2021, 15(3): 276-286.
- [10] 帅三三, 刘伟, 王江, 任忠鸣. 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.
- SHUAI S S, LIU W, WANG J, REN Z M. Application of non-destructive testing in additive manufacturing technique[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(2): 26-34.
- [11] 吴正凯, 张杰, 吴圣川, 谢成, 宋哲. 同步辐射 X 射线原位三维成像在金属增材制件缺陷评价中的应用[J]. 无损检测, 2020, 42(7): 46-50.
- WU Z K, ZHANG J, WU S C, XIE C, SONG Z. Application of in-situ three-dimensional synchrotron radiation X-ray tomography for defects evaluation of metal additive manufactured components[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(7): 46-50.
- [12] 虞雨涯, 吴正凯, 吴圣川. 高分辨三维成像原位试验机研制进展及应用[J]. 中国材料进展, 2021, 40(2): 90-104, 111.
- YU Y K, WU Z K, WU S C. Development and application of in-situ testing machines based on high resolution three-dimensional tomography[J]. Materials China, 2021, 40(2): 90-104, 111.
- [13] KRUTH J P, BARTSCHER M, CARMIGNATO S, SCHMITT R, DE CHIFFRE L, WECKENMANN A. Computed tomography for dimensional metrology[J]. CIRP Annals, 2011, 60(2): 821-842.
- [14] ZIKMUND T, ŠALPLACHTA J, ZATOČILOVÁ A, BŘÍNEK A, PANTĚLEJEV L, ŠTĚPÁNEK R, KOUTNÝ D, PALOUŠEK D, KAISER J. Computed tomography based procedure for reproducible porosity measurement of additive manufactured samples[J]. NDT & E International, 2019, 103: 111-118.
- [15] RASHID R, MASOOD S H, RUAN D, PALANISAMY S, RAHMAN RASHID R A, BRANDT M. Effect of scan strategy on density and metallurgical properties of 17-4PH parts printed by Selective Laser Melting (SLM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 502-511.
- [16] TAMMAS-WILLIAMS S, WITHERS P J, TODD I, PRANGNELL P B. The effectiveness of hot isostatic pressing for closing porosity in titanium parts manufactured by selective electron beam melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(5): 1939-1946.
- [17] ZITELLI C, FOLGARAIT P, DI SCHINO A. Laser powder bed fusion of stainless steel grades: A review[J]. Metals, 2019, 9(7): 731-758.
- [18] DU PLESSIS A, YADROITSEV I, YADROITSAVA I, LE ROUX S G. X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: A review of the current technology and applications[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2018, 5(3): 227-247.
- [19] 王绍钢, 王苏程, 张磊. 高分辨透射 X 射线三维成像在材料科学中的应用[J]. 金属学报, 2013, 49(8): 897-910.
- WNAG S G, WANG S C, ZHANG L. Application of high resolution transmission X-ray tomography in material science[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(8): 897-910.
- [20] 龚来凤, 帅三三, 李雅莉, 黎姗姗, 陈超越, 王江, 任忠鸣. X 射线超快成像原位表征激光增材制造过程研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(4): 1405-1427.
- GONG L F, SHUAI S S, LI Y L, LI S S, CHEN C Y, WANG J, REN Z M. X-ray ultrafast imaging in-situ characterization of laser additive manufacturing processes: A review [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(4): 1405-1427.
- [21] YADOLLAHI A, SHAMSAEI N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98: 14-31.
- [22] BRANDÃO A D, GUMPINGER J, GSCHWEITL M, SEYFERT C, HOFBAUER P, GHIDINI T. Fatigue properties of additively manufactured AlSi10Mg - Surface treatment effect[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 7: 58-66.
- [23] PAL R, KEMERLING B, RYAN D, BOLLAPRAGADA S, BASAK A. Incorporating surface roughness into numerical modeling for predicting fatigue properties of L-PBF AlSi10Mg specimens[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 161: 108250-108266.
- [24] CARLTON H D, HABOUB A, GALLEGOS G F, PARKINSON D Y, MACDOWELL A A. Damage evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 406-414.
- [25] 王泽荫, 岳武, 张昊, 张映梅, 薛诚, 李晶. 能量密度对选区激光熔化成型 316L 不锈钢薄板拉伸性能的影响[J]. 铸造技术, 2021, 42(7): 584-588.
- WAHG Z M, YUE W, ZHANG H, ZHANG Y M, XUE C, LI J. Effect of energy density on tensile properties of 316L stainless steel sheet formed by selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2021, 42(7): 584-588.
- [26] 张吴双. 激光增材制造金属构件内部缺陷控制与无损检测特性研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(5): 346-349.

- [27] MURAKAMI Y. Material defects as the basis of fatigue design[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 41: 2-10.
- [28] SALARIAN M, ASGARI H, VLASEA M. Pore space characteristics and corresponding effect on tensile properties of Inconel 625 fabricated via laser powder bed fusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 769: 138525-138537.
- [29] GONG H, RAFI K, GU H, JANAKI RAM G D, STARR T, STUCKER B. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 545-554.
- [30] WILSON-HEID A E, NOVAK T C, BEESE A M. Characterization of the effects of internal pores on tensile properties of additively manufactured austenitic stainless steel 316L[J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 59(6): 793-804.
- [31] 吴正凯, 吴圣川, 张杰, 宋哲, 胡雅楠, 康国政, 张海鸥. 基于同步辐射 X 射线成像的选区激光熔化 Ti-6Al-4V 合金缺陷致疲劳行为[J]. *金属学报*, 2019, 55(7): 811-820.
- WU Z K, WU S C, ZHANG J, SONG Z, HU Y N, KANG G Z, ZHANG H O. Defect induced fatigue behaviors of selective laser melted Ti-6Al-4V via synchrotron radiation X-ray tomography[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(7): 811-820.
- [32] PEI C, SHI D, YUAN H, LI H. Assessment of mechanical properties and fatigue performance of a selective laser melted nickel-base superalloy Inconel 718[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759: 278-287.
- [33] HILAIRE A, ANDRIEU E, WU X. High-temperature mechanical properties of alloy 718 produced by laser powder bed fusion with different processing parameters[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 26: 147-160.
- [34] LECARME L, MAIRE E, KUMAR K C A, DE VLEESCHOUWER C, JACQUES L, SIMAR A, PARDOEN T. Heterogenous void growth revealed by in situ 3-D X-ray microtomography using automatic cavity tracking[J]. *Acta Materialia*, 2014, 63: 130-139.
- [35] ROMANO S, BRANDÃO A, GUMPINGER J, GSCHWEITL M, BERETTA S. Qualification of AM parts: Extreme value statistics applied to tomographic measurements [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 32-48.
- [36] MURAKAMI Y. Inclusion rating by statistics of extreme values and its application to fatigue strength prediction and quality control of materials[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1994, 99: 7-14.
- [37] REVIL-BAUDARD B, CAZACU O. On the effect of the matrix tension-compression asymmetry on damage evolution in porous plastic solids[J]. *European Journal of Mechanics*, 2013, 37: 35-44.
- [38] BERETTA S, MURAKAMI Y. Statistical analysis of defects for fatigue strength prediction and quality control of materials [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2002, 21(9): 1049-1065.
- [39] CETIN A, NAESS A, HÄRKEGÄRD G. A physically based extreme value characterization of material fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 47: 216-221.
- [40] TANG M, PISTORIUS P C. Fatigue life prediction for AlSi10Mg components produced by selective laser melting[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 125: 479-490.
- [41] CETIN A, HÄRKEGÄRD G, NAESS A. The fatigue limit: An analytical solution to a Monte Carlo problem[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 55: 194-201.
- [42] SVENSSON T, MARE' J D. Random features of the fatigue limit [J]. *Extremes*, 1999, 2(2): 165-176.
- [43] NAFAR DASTGERDI J, JABERI O, REMES H, LEHTO P, HOSSEINI TOUDESHPY H, KUVA J. Fatigue damage process of additively manufactured 316L steel using X-ray computed tomography imaging[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 70: 103559-103577.
- [44] JONES R, MICHPOULOS J G, ILIOPOULOS A P, SINGH RAMAN R K, PHAN N, NGUYEN T. Representing crack growth in additively manufactured Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 116: 610-622.
- [45] WU Z, WU S, BAO J, QIAN W, KARABAL S, SUN W, WITHERS P J. The effect of defect population on the anisotropic fatigue resistance of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 151: 106317-106331.
- [46] VANDERESSE N, MAIRE É, CHABOD A, BUFFIÈRE J Y. Microtomographic study and finite element analysis of the porosity harmfulness in a cast aluminium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(12): 1514-1525.
- [47] 万志鹏, 王宠, 蒋文涛, 黄志勇, 王清远. 孔洞缺陷对 3D 打印 Ti-6Al-4V 合金疲劳试样应力分布的影响[J]. *实验力学*, 2017, 32(1): 1-8.
- WANG Z P, WANG C, JIANG W T, HUANG Z Y, WANG Q Y. On the effect of void defects on stress distribution of Ti-6Al-4V alloy fatigue specimen in 3d printing[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(1): 1-8.
- [48] WANG M L, YANG X G, LI B, SHI D Q, MIAO G L, GUO S Q, FAN Y S. The dominant role of defects on fatigue behaviour of a SLM Ni-based superalloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107894-107914.
- [49] MALEFANE L B, DU PREEZ W B, MARING M, DU PLESSIS A. Tensile and high cycle fatigue properties of annealed Ti6Al4V (ELI) specimens produced by direct metal laser sintering [J]. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2018, 29(3): 299-311.
- [50] ANDREAU O, PESSARD E, KOUTIRI I, PENOT J D, DUPUY C, SAINTIER N, PEYRE P. A competition between the contour and hatching zones on the high cycle fatigue behaviour of a 316L stainless steel: Analyzed using X-ray computed tomography[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 757: 146-159.
- [51] BENEDETTI M, FONTANARI V, BANDINI M, ZANINI F, CARMIGNATO S. Low- and high-cycle fatigue resistance of Ti-6Al-4V ELI additively manufactured via selective laser melting: Mean stress and defect sensitivity[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 107: 96-109.
- [52] LEWANDOWSKI J J, SEIFI M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46(1): 151-186.
- [53] EDWARDS P, RAMULU M. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 598: 327-337.

- [54] HERNANDEZ-CONTRERAS A, RUIZ-HUERTA L, CABALLERORUIZ A, MOOCK V, SILLER H R. Extended CT void analysis in FDM additive manufacturing components[J]. *Materials* (Basel), 2020, 13(17): 3831-3847.
- [55] SIMONELLI M, TSE Y Y, TUCK C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 616: 1-11.
- [56] NICOLETTO G. Anisotropic high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V obtained by powder bed laser fusion[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 255-262.
- [57] CARRATURO M, ALAIMO G, MARCONI S, NEGRELLO E, SGAMBITTERRA E, MALETTA C, REALI A, AURICCHIO F. Experimental and numerical evaluation of mechanical properties of 3D-printed stainless steel 316L lattice structures[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(7): 5247-5251.
- [58] 袁璐恺,王理林,丁汉林,薛爱堂,林鑫,黄卫东. 激光直接能量沉积 Ti6242S-0.75Ni-1.65Fe-0.05B 合金的组织及力学性能各向异性研究[J]. *铸造技术*, 2023, 44(3): 233-239.
- YUAN L K, WANG L L, DING H L, XUE A T, LIN X, HUANG W D. Study on the microstructure and mechanical property anisotropy of Ti6242S-0.75Ni-1.65Fe-0.05B alloy by laser direct energy deposition[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(3): 233-239.
- [59] LARROSA N O, WANG W, READ N, LORETTO M H, EVANS C, CARR J, TRADOWSKY U, ATTALLAH M M, WITHERS P J. Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg alloy[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 98: 123-133.
- [60] VOISIN T, CALTA N P, KHAIRALLAH S A, FORIEN J B, BALOGH L, CUNNINGHAM R W, ROLLETT A D, WANG Y M. Defects-dictated tensile properties of selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. *Materials & Design*, 2018, 158: 113-126.
- [61] MOWER T M, LONG M J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 198-213.
- [62] SANAEI N, FATEMI A. Analysis of the effect of internal defects on fatigue performance of additive manufactured metals[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 785: 102638-102652.
- [63] 奥妮,何子昂,吴圣川,彭鑫,吴正凯,张振先,祝弘滨. 激光增材制造 AlSi10Mg 合金的力学性能研究进展[J]. *焊接学报*, 2022, 43(9): 1-19, 113.
- AO N, HE Z A, WU S C, PENG X, WU Z K, ZHANG Z X, ZHU H B. Recent progress on the mechanical properties of laser additive manufacturing AlSi10Mg alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(9): 1-19, 113.
- [64] DU PLESSIS A, LE ROUX S G, BOOYSEN G, ELS J. Directionality of cavities and porosity formation in powder-bed laser additive manufacturing of metal components investigated using X-ray tomography[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3(1): 48-55.
- [65] DU PLESSIS A, LE ROUX S G. Standardized X-ray tomography testing of additively manufactured parts: A round robin test[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 125-136.
- [66] 李杰,万杰,李金山,王军. 金属激光粉末床熔融成形缺陷及其原位表征研究进展[J]. *铸造技术*, 2024, 45(3): 228-248.
- LI J, WANG J, LI J S, WANG J. Research progress on defects in metals fabricated via laser powder bed fusion and their in situ characterization[J]. *Foundry Technology*, 2024, 45(3): 228-248.
- [67] MAIRE E, BOUAZIZ O, DI MICHIEL M, VERDU C. Initiation and growth of damage in a dual-phase steel observed by X-ray microtomography[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(18): 4954-4964.
- [68] LANDRON C, MAIRE E, BOUAZIZ O, ADRIEN J, LECARME L, BAREGGI A. Validation of void growth models using X-ray microtomography characterization of damage in dual phase steels[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(20): 7564-7573.
- [69] SAEED K, MCILHAGGER A, HARKIN-JONES E, MCGARRIGLE C, DIXON D, ALI SHAR M, MCMILLAN A, ARCHER E. Characterization of continuous carbon fibre reinforced 3D printed polymer composites with varying fibre volume fractions[J]. *Composite Structures*, 2022, 282: 115033-115045.
- [70] MARTIN C F, JOSSEYND C, SALVO L, BLANDIN J J, CLOETENS P, BOLLER E. Characterisation by X-ray microtomography of cavity coalescence during superplastic deformation[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 42(4): 375-381.
- [71] TERZI S, SALVO L, SUÉRY M, LIMODIN N, ADRIEN J, MAIRE E, PANNIER Y, BORNERT M, BERNARD D, FELBERBAUM M. In situ X-ray tomography observation of inhomogeneous deformation in semi-solid aluminium alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61(5): 449-452.
- [72] BUFFIERE J Y, MAIRE E, ADRIEN J, MASSE J P, BOLLER E. In situ experiments with X-ray tomography: An attractive tool for experimental mechanics[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(3): 289-305.
- [73] VOGELGESANG M, FARAGO T, MORGENEYER T F, HELFEN L, DOS SANTOS ROLO T, MYAGOTIN A, BAUMBACH T. Real-time image-content-based beamline control for smart 4D X-ray imaging[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(5): 1254-1263.
- [74] WITHERS P J. Mechanical failure: Imaging cracks in hostile regimes[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(1): 7-9.
- [75] HU X, WANG L, XU F, XIAO T, ZHANG Z. In situ observations of fractures in short carbon fiber/epoxy composites[J]. *Carbon*, 2014, 67: 368-376.
- [76] HABOUB A, BALE H A, NASIATKA J R, COX B N, MARSHALL D B, RITCHIE R O, MACDOWELL A A. Tensile testing of materials at high temperatures above 1 700 degrees C with in situ synchrotron X-ray micro-tomography[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 083702-083716.
- [77] HU X, FANG J, XU F, DONG B, XIAO Y, WANG L. Real internal microstructure based key mechanism analysis on the micro-damage process of short fibre-reinforced composites[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34761-34770.
- [78] WU S C, XIAO T Q, WITHERS P J. The imaging of failure in structural materials by synchrotron radiation X-ray microtomography[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 182: 127-156.
- [79] TERANISHI M, KUWAZURU O, GENNAI S, KOBAYASHI M, TODA H. Three-dimensional stress and strain around real shape Si particles in cast aluminum alloy under cyclic loading[J]. *Materials*

- Science and Engineering: A, 2016, 678: 273-285.
- [80] WU W, QI D, HU W, XI L, SUN L, LIAO B, BERTO F, QIAN G, XIAO D. Synchrotron X-ray micro-computed tomography imaging of 3D re-entrant micro lattice during in situ micro compression experimental process[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108743-108752.
- [81] MAIRE E, LE BOURLOT C, ADRIEN J, MORTENSEN A, MOKSO R. 20 Hz X-ray tomography during an in situ tensile test [J]. International Journal of Fracture, 2016, 200(1-2): 3-12.
- [82] 苑永祥, 刘岳勋, 赵蒙, 王龙, 侯传涛, 王煊军, 吴圣川. 动载荷下固体推进剂损伤演化原位成像研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(7): 071412.
- YUAN Y X, LIU Y X, ZHAO M, WANG L, HOU C T, WANG X J, WU S C. In-situ tomography on damage evolution of solid propellant under dynamic loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(7): 071412.
- [83] WU S C, SONG Z, KANG G Z, HU Y N, FU Y N. The kitagawa-takahashi fatigue diagram to hybrid welded AA7050 joints via synchrotron X-ray tomography[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 210-221.
- [84] LIU L, KAMM P, GARCÍA-MORENO F, BANHART J, PASINI D. Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: The role of geometric defects induced by selective laser melting[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 107: 160-184.
- [85] GENG L, WU W, SUN L, FANG D. Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 157-158: 231-242.
- [86] WANG P, ZHOU H, ZHANG L, CHEN H, ZHU X, LEI H, FANG D. In situ X-ray micro-computed tomography study of the damage evolution of prefabricated through-holes in SLM-Printed Al-Si10Mg alloy under tension[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 821: 153576-153584.
- [87] MA T, GE J, CHEN Y, JIN T, LEI Y. Observation of in-situ tensile wire-arc additively manufactured 205A aluminum part: 3D pore characteristics and microstructural evolution[J]. Materials Letters, 2019, 237: 266-269.
- [88] ŻABA K, SNOPIŃSKI P, WAŁACH D, KACZMARCZYK G P, RUSZ S. Insight into the fracture behaviour and mechanical response of ECAP processed cast and LPBF AlSi10Mg alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 295: 109785-109806.
- [89] FANG J X, HE H T, WANG Y J, WANG J X, ZHANG D B, CAO Y. Tensile fracture behaviors of a laser powder deposited Fe-30Mn-10Cr-10Co-3Ni high-entropy alloy: In situ x-ray computed micro-tomography study[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 840: 142948-142961.
- [90] ZHANG X, LIU X, LI R, WU H, MA Y, MIAO K, WU H, LI X, FAN G. Effects of defects on the high-temperature performance of selective laser melting K418 superalloys: An in-situ 3D X-ray analysis[J]. Materials Characterization, 2024, 218: 114533-114544.
- [91] BERETTA S, ROMANO S. A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 178-191.
- [92] WANG Z, WU S, KANG G, LI H, WU Z, FU Y, WITHERS P J. In-situ synchrotron X-ray tomography investigation of damage mechanism of an extruded magnesium alloy in uniaxial low-cycle fatigue with ratchetting [J]. Acta Materialia, 2021, 211: 116881-116894.
- [93] TAMMAS-WILLIAMS S, WITHERS P J, TODD I, PRANGNELL P B. The influence of porosity on fatigue crack initiation in additively manufactured titanium components [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7308-7321.
- [94] QIAN W, WU S, WU Z, AHMED S, ZHANG W, QIAN G, WITHERS P J. In situ X-ray imaging of fatigue crack growth from multiple defects in additively manufactured AlSi10Mg alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 155: 106616-106629.
- [95] WU Z, HE Z, WU S, GAO X, LEI L, LIU C, CHEN B, DONG C. Rotating bending fatigue mechanisms of L-PBF manufactured Ti-6Al-4V alloys using in situ X-ray tomography[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107876-107889.
- [96] BAO J, WU S, WITHERS P J, WU Z, LI F, FU Y, SUN W. Defect evolution during high temperature tension-tension fatigue of SLM AlSi10Mg alloy by synchrotron tomography[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 792: 139809-139822.
- [97] BAO J, WU Z, WU S, WITHERS P J, LI F, AHMED S, BENAARBIA A, SUN W. Hot dwell-fatigue behaviour of additively manufactured AlSi10Mg alloy: Relaxation, cyclic softening and fracture mechanisms[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151: 106408-106421.
- [98] BHREASAIL Á N, LEE P D, O'SULLIVAN C, FENTON C H, HAMILTON R, ROCKETT P, CONNOLLEY T. In-situ observation of cracks in frozen soil using synchrotron tomography[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(2): 170-176.
- [99] HU Y, WU S, WANG Z, MENG F, XUE Y, FU Y, KANG G, WITHERS P J. Void nucleation and growth behavior of TIG welded AA2219 deformed at cryogenic temperatures[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 274: 109221-109236.
- [100] QIAN W, ZHANG W, WU S, HU Y, ZHANG X, HU Q, DONG S, TU S. In situ X-ray imaging and numerical modeling of damage accumulation in C/SiC composites at temperatures up to 1 200 °C [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 197: 65-77.

(责任编辑:李亚敏)