

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5201

基于同步辐射光源的高温高频原位衍射与 成像疲劳试验机及其应用

郑 严^{1,2,3,4}, 梅金娜^{1,2}, 朱 斌^{1,2}, 李 可⁵, 蔡 振^{1,2}, 林贤军^{1,2}, 赵万祥^{1,2}

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 2. 国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心, 江苏 苏州 215004; 3. 天津大学 化工学院, 天津 300350; 4. 广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538001; 5. 中国科学院上海高等研究院 上海同步辐射光源, 上海 201204)

摘 要:同步辐射光源的出现为材料内部微观表征提供了全新手段,为了将同步辐射光源应用于材料的疲劳研究,一些耦合同步辐射光源的疲劳试验机相继问世,但是这些试验机往往局限于加载频率、试样尺寸和成像表征等。为了解决传统原位疲劳试验机的局限性,本文开发了一种基于同步辐射光源的高温高频原位衍射与成像疲劳试验机,该疲劳试验机通过采用高频疲劳加载模块和超声疲劳加载模块,可实现 20~1 000 Hz 和(20±0.5) kHz 宽频域疲劳加载,在有限时间内可开展低周、高周和超高周疲劳实验。试验机具备常温 and 高温实验能力,高温模式采用高频感应加热和红外实时温度监测,通过比例积分微分(proportional integral derivative, PID)反馈控制动态调节,可实现 400~1 000 °C 高温实验;适配宽范围尺寸疲劳试样,便于纳入尺度效应对材料性能和行为的影响。基于开发的原位疲劳试验机在上海同步辐射光源(Shanghai synchrotron radiation facility, SSRF)BL16U2 线站开展了系列原位衍射、成像及二者的协同实验,结果表明,该原位疲劳试验机具备实现疲劳试验过程中材料内部缺陷的动态表征、材料内部缺陷和裂纹的无损三维形貌表,以及疲劳过程中衍射与成像的多尺度协同表征能力,可为疲劳过程中材料内部损伤演化行为研究提供良好的科研平台。

关键词:同步辐射;原位疲劳试验机;衍射;成像

中图分类号: TH6

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)12-1177-09

High-temperature and High-frequency in Situ Diffraction and Imaging Fatigue Testing Apparatus Based on a Synchrotron Radiation Facility and its Applications

ZHENG Yan^{1,2,3,4}, MEI Jinna^{1,2}, ZHU Bin^{1,2}, LI Ke⁵, CAI Zhen^{1,2}, LIN Xianjun^{1,2}, ZHAO Wanxiang^{1,2}

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China; 2. National Engineering Research Center of Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou 215004, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 4. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538001, China; 5. Research Center for Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: The advent of synchrotron radiation facilities has provided a new approach for characterizing the internal microstructures of materials. To apply synchrotron radiation facilities to material fatigue research, several fatigue testing apparatuses coupled with synchrotron radiation facilities have been developed. However, these testing apparatuses are often constrained by factors such as loading frequency, specimen size, and imaging characterization. To address the limitations of traditional in situ fatigue testing apparatuses, a high-temperature and high-frequency in situ diffraction and imaging fatigue testing apparatus based on a synchrotron radiation source has been developed. A high-frequency fatigue loading module and an ultrasonic fatigue loading module are employed. Moreover, 20~1 000 Hz and (20±0.5) kHz wide-frequency-domain

收稿日期: 2025-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702602); 江苏省卓越博士后计划(2025ZB131); 江苏省青年科技人才托举工程(JSTJ-2025-563)

作者简介: 郑 严, 1995 年生, 博士, 工程师. 主要从事断裂力学及结构完整性评定技术研究. Email: Yanz1028@163.com

通信作者: 梅金娜, 1981 年生, 博士, 正高级工程师. 主要从事材料服役行为评价与寿命预测技术研究. Email: mei.jinna@qq.com

引用格式: 郑严, 梅金娜, 朱斌, 李可, 蔡振, 林贤军, 赵万祥. 基于同步辐射光源的高温高频原位衍射与成像疲劳试验机及其应用[J]. 铸造技术, 2025, 46(12): 1177-1185.

ZHENG Y, MEI J N, ZHU B, LI K, CAI Z, LIN X J, ZHAO W X. High-temperature and high-frequency in situ diffraction and imaging fatigue testing apparatus based on a synchrotron radiation facility and its applications[J]. Foundry Technology, 2025, 46(12): 1177-1185.

fatigue loading can be achieved, enabling low-cycle, high-cycle, and very-high-cycle fatigue experiments within the limited loading time. The apparatus supports both ambient and elevated-temperature testing. The high-temperature mode employs high-frequency induction heating with real-time infrared temperature monitoring, which is dynamically regulated via proportional-integral-derivative (PID) control to enable experiments within the 400~1 000 °C range. A wide range of fatigue specimen dimensions can be accommodated, facilitating the incorporation of the influence of scale effects on material properties and behavior. A series of in situ diffraction, imaging, and collaborative experiments were conducted on the developed in situ fatigue testing apparatus and the BL16U2 beamline at the Shanghai synchrotron radiation facility (SSRF). The results indicate that the in situ fatigue testing apparatus developed in this study enables dynamic characterization of internal defects in materials during the fatigue process, nondestructive 3D morphology characterization of internal defects and cracks, and multidimensional synergistic characterization of diffraction and imaging during fatigue, which can provide an excellent research platform for studying the internal damage evolution behavior of materials during fatigue.

Key words: synchrotron radiation; in situ fatigue testing apparatus; diffraction; imaging

材料服役过程中因承受交变循环载荷不可避免产生疲劳损伤^[1-3]。由于金属材料的不透明性,疲劳损伤产生过程中的材料内部微观组织演变、损伤演化和力学性能退化机制犹如黑箱难以探究。常用的组织与结构表征手段,如透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、光学显微镜(optical microscope, OM)等,无法实时捕捉材料服役过程中微观结构与缺陷的动态演变,即使利用先进的高速可见光成像,也只能监测材料表面,无法实现透过“自由表面”看清材料的“内部世界”。

根据电磁场理论,当电子以接近光速作弯转运动时,会沿其轨道切线方向发射电磁波。这种电磁波是在电子同步加速器上被首次观测到的,因此命名为同步辐射。用于产生和利用同步辐射的科学装置便是同步辐射光源。同步辐射光源所产生的同步辐射光具有宽波段、高准直、高偏振、高亮度、高稳定性,可供多用户同时使用等优异性能。发展至今,全世界有超过 50 台同步辐射光源同时运行,已然成为物理化学、能源环境、生物医学等诸多科学领域进行前沿研究的重要工具。对于金属材料服役过程中的疲劳损伤演化研究,同步辐射光源也提供了绝佳的科研平台^[4-7]。

新材料研发与服役性能研究不断深入,推动了测试技术的快速发展^[8-10]。这些技术旨在精确量化从基本成分、加工工艺到微观结构,最终决定宏观性能的整个关联机制。近年来,许多学者通过开发或利用原位疲劳实验设备,结合同步辐射 X 射线技术,开展了材料原位疲劳性能演化机制研究工作^[11-20]。

Buffière 等^[11]研制了耦合欧洲同步辐射光源(european synchrotron radiation facility, ESRF)的原位低频疲劳试验机,样品舱采用聚甲基丙烯酸甲酯(poly-methyl methacrylate, PMMA)立柱支撑设计,采用伺

服电机驱动对微试样进行疲劳加载,可实现材料的常温低周疲劳(low cycle fatigue, LCF)原位观测。Wu 等^[12]结合上海同步辐射光源(Shanghai synchrotron radiation facility, SSRF)BL13W1 线站的实际条件,在 Buffière 等^[11]的基础上采用高强度结构材料和强化工艺等对原位疲劳试验机进行了优化设计,结合高分辨率同步辐射 X 射线显微断层扫描(synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography, SR- μ CT)技术探讨了激光混合焊接缺陷对 7020-T651 合金疲劳损伤演变的影响。同时,Wu 等^[13]采用 SR- μ CT 技术研究了激光焊接 AA7050-T7451 合金的微观结构特性与疲劳抗力之间的关系。结果表明,焊接过程中发生的微观结构演变、元素变化及缺陷形成会显著降低材料的硬度、拉伸强度和疲劳性能。Bao 等^[14]针对同步辐射光源 SR- μ CT 技术设计了低频(工作频率 0.1~20 Hz)原位疲劳试验机,进一步通过增加电阻丝加热单元实现了对圆形截面微型(最小直径 1.4 mm)哑铃状疲劳试样的高温疲劳加载;针对选择性激光熔融工艺制造的 AlSi10Mg 试样采用 SR- μ CT 技术开展了原位 250 °C 拉伸-拉伸循环载荷下的损伤累积研究,测试周期覆盖其完整疲劳寿命。Dezecot 等^[15]基于紧凑型(25 cm×25 cm)低频原位疲劳试验机在 250 °C 高温条件下进行了 0.1 Hz 原位低周疲劳试验,该原位疲劳设备采用卤素灯辐射聚焦加热,通过两径向对称的通孔使得同步辐射 X 射线可以穿过加热炉,基于石英管对 2.1 mm×2.1 mm 的方形截面哑铃状试样传递疲劳载荷;基于该设备结合同步辐射 SR- μ CT 技术,实现了 AlSi7Cu3Mg 铝合金疲劳损伤演化过程的三维成像监测表征研究,结果表明裂纹对微观结构特征极为敏感,粗大孔隙和共晶区域的硬质颗粒分别对主裂纹萌生和裂纹扩展起关键作用。Chapman 等^[16]通过 SR- μ CT 技术,并辅以电子显微镜,在 350 °C 高温条件下对空气和

真空环境中的疲劳裂纹萌生及扩展过程进行了研究,采用配备石英加热炉的低频原位疲劳设备,对低周疲劳微型试样(最小直径 2.5 mm)进行高温疲劳加载。Pannemaecker 等^[17]基于微型试样(2 mm×2 mm)原位摩擦疲劳测试实验装置,通过同步辐射 X 射线成像实现了圆柱体/平面接触配置下摩擦疲劳裂纹观测。Wang 等^[18]采用 SR- μ CT 原位表征系统对 AZ31 镁合金的单轴低周疲劳损伤进行了表征,该系统是一款功能集成的疲劳测试设备,可安装在同步辐射光源线站上,能够进行拉伸、压缩、低周疲劳、高周疲劳,以及超高周疲劳测试。Teranishi 等^[19]采用 SR- μ CT 技术与基于图像的有限元分析方法,通过疲劳试验及原位成像观测,揭示了铸造 Al-Si-Mg 合金疲劳裂纹萌生过程,即在低周疲劳条件下,裂纹通常由硅颗粒断裂形成的孔洞聚合形成。研究中采用岛津公司生产的气动伺服原位疲劳试验机,可实现薄片微型试样(最小尺寸 0.6 mm)常温低频(0.5~18.5 Hz)间歇疲劳加载,气动伺服驱动相对于伺服电机和机械连杆更加稳定高效,但是仍然局限于小微实验样品、低载荷和低周疲劳。Messenger 等^[20]基于新开发的一种新型超声波疲劳测试装置,应用 SR- μ CT 技术研究材料内部微观结构短裂纹的萌生与扩展机制,通过原位实时快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析实现了内部疲劳裂纹起始现象的直接观测,及内部微观结构短裂纹扩展的原位实时监测。该研究中的原位超声疲劳设备同样采用 PMMA 立柱样品仓设计,可对标准超声疲劳试样进行(20±0.5) kHz 超高频疲劳加载,通过空压机干燥空气冷却,并采用激光测振仪监测试样底端位移,结合同步辐射光源可进行超声疲劳原位成像观测,但是该设备未加载高温模块,不能进行高温下的疲劳试验。

综上所述,诸多学者为了研究疲劳加载过程中材料内部缺陷和损伤演化,研制了基于同步辐射光

源的原位疲劳试验机,并开展了实验研究。然而,现有的原位疲劳试验机往往只适配小微疲劳试样,小微试样与标准试样或实际结构之间因尺寸效应产生的材料性能差异未被考虑,其研究结果在实际工程应用中存在局限性。同时,上述疲劳试验机的频率仅在低频 0.1~50 Hz 和超高频 (20±0.5) kHz 中变化,频率变化范围小,仅适用于低周疲劳或者超高周疲劳。原位疲劳试验机的应用也往往局限于疲劳过程中的原位成像与计算机断层扫描(computed tomography, CT)观测。

针对此问题,本文研制了一种可适配宽范围尺寸疲劳试样(包括标准试样)的宽频域原位衍射与成像疲劳试验机,通过高频疲劳加载模块和超声疲劳加载模块,可实现 20~1 000 Hz 及(20±0.5) kHz 频率范围内的疲劳加载,在有限机时内对疲劳试样进行低周、高周及超高周疲劳加载。并可基于第Ⅲ代同步辐射光源技术实现微米和微秒级高时空分辨率的疲劳原位衍射和成像实验,以及衍射与成像的协同实验,研究材料疲劳过程中多尺度的疲劳缺陷和损伤演化规律。

1 高温高频原位衍射与成像疲劳试验机的组成

图 1 为高温高频原位衍射与成像疲劳试验机,由疲劳加载模块、控温模块、高精度移动平台组成。其中疲劳加载模块分为高频疲劳加载模块和超声疲劳加载模块两部分,试验机框架采用开放式设计,在保证不遮挡实验光路的同时消除传统原位疲劳试验机设计中实验舱材料对同步辐射 X 射线的衰减作用。

1.1 疲劳加载模块

1.1.1 高频疲劳加载模块

如图 1a 所示,高频疲劳加载模块分为压电驱动单元、激光测振仪和操作软件。压电驱动单元由压

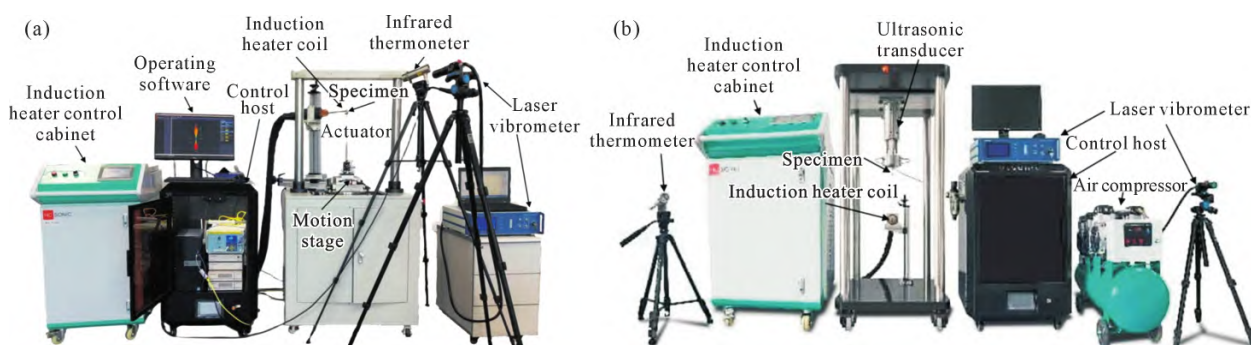


图 1 高温高频原位衍射与成像试验机实物:(a) 高频疲劳加载模块;(b) 超声疲劳加载模块

Fig.1 Photograph of the high-temperature and high-frequency in situ diffraction and imaging fatigue testing machine: (a) high-frequency fatigue loading module; (b) ultrasonic fatigue loading module

电作动器、信号发生电源、压电功率放大器组成(图2),通过逆压电效应将力与位移传递给疲劳试样,根据控制器发出的电信号不同实现宽范围频率(20~1 000 Hz)的疲劳加载。加载振幅(应力)通过电压控制,不同频率下的最大加载振幅随频率的增大而减小,通过改变频率和电压可实现 10~100 μm 振幅的疲劳加载。在操作软件中可设置疲劳试验的加载频率、振幅和试验温度,并可通过激振设置实现试样的间歇加载,基于试样设计功能自动根据要求设计试样尺寸。在疲劳试验过程中通过激光测振仪实时测量疲劳试样端面的频率和位移,显示和记录在软件操作界面中。实验过程中基于谐振振幅-应力转化公式^[21],通过激光测振仪实时测得的振幅计算试样的最大应力幅。操作软件中的拍摄模式可设置在固定加载周次或循环加载周次下向同步辐射光源线的成像探测器发出信号,采集该疲劳周次下的 CT 成像信息。

1.1.2 超声疲劳加载模块

超声疲劳试验基于压电共振原理,将电信号转换为高频机械振动,并将振动能量聚焦放大。如图1b所示,超声疲劳加载模块分为超声驱动单元、激光测振仪和操作软件。超声驱动单元由超声波发生器、超声波换能器和变幅杆组成(图3),可通过更换不同变比的变幅杆在(20±0.5) kHz 加载频率下获得宽范围振幅(10~80 μm)。激光测振仪与高频疲劳加

载模块共用,操作软件功能基本与 1.1.1 节一致。

1.2 控温模块

控温模块由高频感应加热器、空气压缩机以及红外测温仪组成(图1b)。在操作软件中可选择常温或高温控制模式,常温控制模式下需打开空气压缩机,并将涡旋冷却器(图4a)安装在试样上方,或调节气嘴对准试样平行段,通过涡旋冷却器或气嘴吹气对试样提供 1.5~15 L/min 的干燥空气进行气冷。常温模式中通过吹气冷却可保持试样表面温度不超过 50 $^{\circ}\text{C}$;高温模式中需打开高频感应加热器,并移动滑台将半开式感应线圈(图4b)调节到疲劳试样平行段,同时打开红外测温仪,将激光光斑对准加热部位测量其温度。高频感应加热器控制柜与红外测温仪及控制主机联控,基于测得的温度采用比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制动态调节加热功率,使得试样温度达到操作软件上的设定温度。高温模式可实现 400~1 000 $^{\circ}\text{C}$ 下的高温疲劳试验,满足大部分高温试验环境需求。

1.3 高精度移动平台

高精度移动平台采用 KOHZU 定制 MCU456 型号 4 轴组合台(图5)。X 和 Y 轴最大行程范围为 ± 5 mm,最大速度 1.8 mm/s,精度 0.2 μm 。Z 轴最大行程范围 ± 25 mm,最大速度 2 mm/s,精度 0.2 μm 。R 轴旋转覆盖角度 352 $^{\circ}$,精度 0.002 $^{\circ}$,最大转速 10 $^{\circ}/\text{s}$,最大负载能力 2 000 N。高精度移动平台与控制软件联



图2 压电驱动单元:(a) 压电作动器;(b) 信号发生电源;(c) 压电功率放大器

Fig.2 Piezoelectric drive unit: (a) piezoelectric actuator; (b) signal generator power supply; (c) piezoelectric power amplifier



图3 超声驱动单元

Fig.3 Ultrasonic drive unit

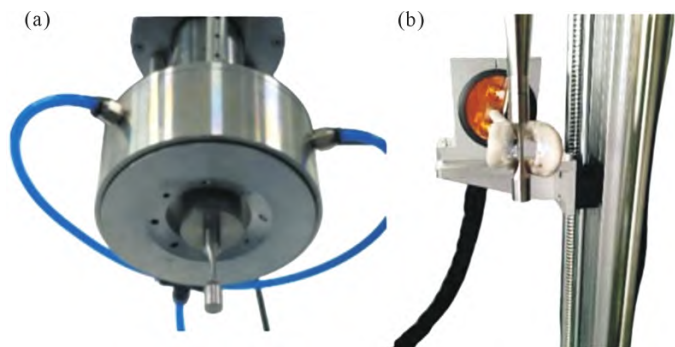


图4 控温模块:(a) 涡旋冷却器;(b) 半开式感应线圈

Fig.4 Temperature control module: (a) vortex cooler; (b) semi-open induction coil

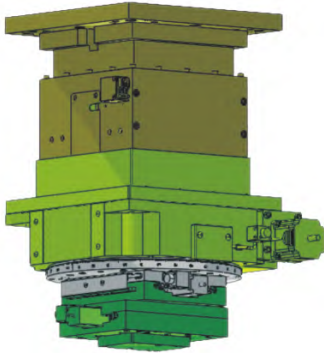


图5 高精度 KOHZU 移动平台
Fig.5 KOHZU precision motion stage

控,可在设定疲劳周次下旋转 180°,完成疲劳过程中的原位 CT 成像。

2 疲劳原位衍射与成像实验

2.1 实验材料及样品

实验材料为铸造 AlSi10Mg 合金,成分如表 1 所示。AlSi10Mg 合金在常温下的密度和弹性模量分别为 2.68 g/cm³ 和 65 GPa。

基于 ANSYS 模态分析设计了 2 种不同谐振频率(1 000 Hz 和 20 kHz)的狗骨状试样,试样尺寸如图 6 所示。基于高频疲劳模块和超声疲劳模块分别对 2 种疲劳试样进行疲劳试验,以研究疲劳过程中材料内部损伤的演化规律。

2.2 实验方法

基于高温高频原位衍射与成像试验机和 SSRF 快速成像线站(BL16U2)开展了系列疲劳原位衍射与成像实验,包括原位成像、CT 成像、原位衍射以及原位衍射与成像协同实验,由于原位成像与 CT 的实验条件基本一致,且原位衍射与成像协同实验包含原位成像和原位衍射实验,故本文主要介绍疲劳过程中的原位衍射与成像协同实验。

为了实现疲劳试验过程中材料物相变化、内部微观结构和微小孔洞、裂纹等的原位表征能力,基于高温高频原位衍射与成像疲劳试验机以及 SSRF BL16U2 快速成像线站搭建了瞬态衍射与成像协同表征平台,如图 7 所示。平台由高温高频原位衍射与成像疲劳试验机、BL16U2 线站毫秒快门、微秒快

表1 AlSi10Mg合金材料组分
Tab.1 The material composition of the AlSi10Mg alloy

Elements	Al	Mn	Pb	Si	Mg	Sn	Fe	Ni	Ti	Cu	Zn
Mass fraction/%	Bal.	0.45	0.15	10	0.25	0.05	0.55	0.05	0.05	0.05	0.1

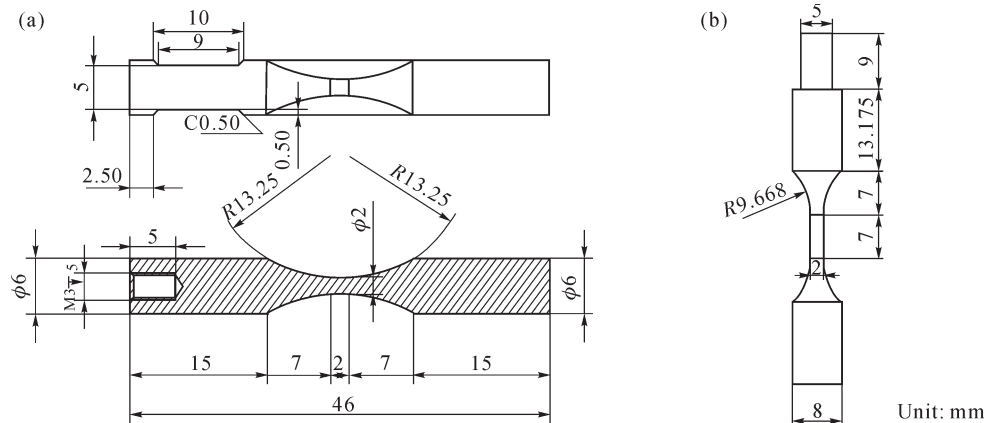


图6 不同谐振频率疲劳试样尺寸:(a) 1 000 Hz 疲劳试样,固有频率 995.2 Hz;(b) 20 kHz 疲劳试样,固有频率 19 829.6 Hz
Fig.6 Dimension diagram of the fatigue samples with different resonant frequencies: (a) 1 000 Hz fatigue sample, with a natural frequency of 995.2 Hz; (b) 20 kHz fatigue sample, with a natural frequency of 19 829.6 Hz

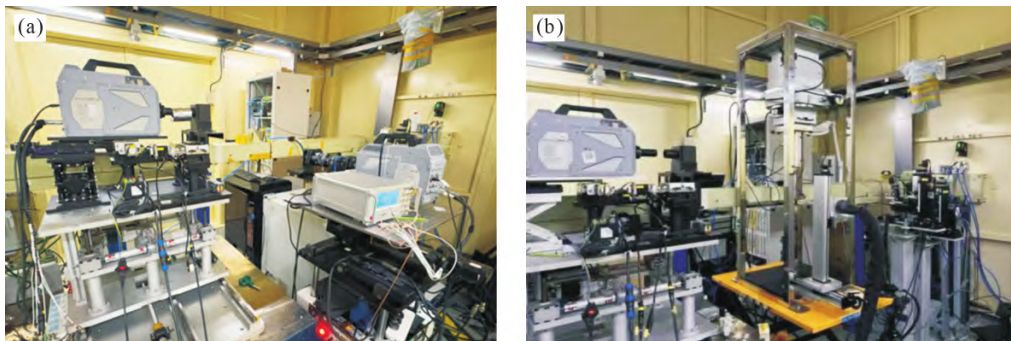


图7 瞬态衍射与成像协同表征平台:(a) 高频疲劳衍射与成像协同表征平台;(b) 超声疲劳瞬态衍射与成像协同表征平台
Fig.7 Transient diffraction and imaging collaborative characterization platform: (a) high-frequency fatigue diffraction and imaging collaborative characterization platform; (b) ultrasonic fatigue transient diffraction and imaging collaborative characterization platform

门、自研超快成像光学耦合系统、Kirana 5M 高速相机、自研衍射光学耦合系统、Photron SAZ 高速相机、Andor ICCD、Photek 像增强器模块,以及 DG 645 数字延迟发生器组成。

实验前,首先将待测试样装载至疲劳加载单元上,再操作软件控制界面设置加载振幅、最大循环周次及运行时间、频率偏移范围等,然后开始疲劳加载。

实验中,线站切换到白光模式,白光狭缝尺寸 $1\,500\,\mu\text{m}\times 900\,\mu\text{m}$,波荡器插入件磁场间隙调节至 $10\,\text{mm}$,对应基波 X 射线的光子能量 $4.9\,\text{keV}$ 。在原位加载装置前方插入一个小孔光阑,孔径为 $600\,\mu\text{m}$,用来遮挡光路上的杂散光,并缩小光斑尺寸来限制衍射光斑扩展造成的分辨率下降。同步辐射 X 射线衍射与成像协同实验光路,如图 8 所示。

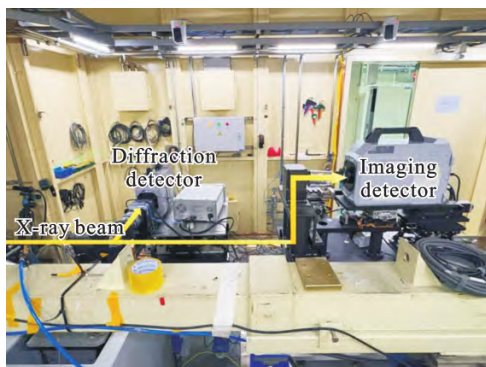


图 8 同步辐射衍射与成像协同 X 射线光路示意图
Fig.8 Schematic diagram of the X-ray optical path for synchronous radiation diffraction and imaging collaboration

高温高频疲劳原位设备、高速成像探测系统和高速衍射探测系统通过高精度时序控制系统实现时序同步。疲劳实验达到设定疲劳周次后,原位疲劳设备向高精度时序控制系统发出 $5\,\text{V}$ 晶体管-晶体管

逻辑电平(transistor transistor logic, TTL)上升沿方波信号,随即线站打开快门,同步辐射 X 射线射出,穿过疲劳试样平行段,时序控制系统在等待指定延时而向高速成像探测系统和高速衍射探测系统同时发送触发信号,两者分别按照设定帧率采集一系列图像序列,从而实现成像与衍射的协同采集。

3 数据分析

基于同步辐射光源的高温高频原位衍射与成像试验机可实现疲劳试验过程中材料内部缺陷的动态表征。图 9 为基于超声疲劳原位疲劳试验模块和 SSRF BL16U2 线站高速成像相机捕捉到的超声疲劳试验中 $20\,\text{kHz}$ 疲劳试样断裂瞬态。本次实验采用狗骨状超声疲劳试样(图 6b),并在平行段表面预制环向缺陷。如图 9 所示,加载一定疲劳周次后,裂纹从试样预制缺口一侧表面开始向中心扩展,裂纹扩展长度达到试样平行段直径($2\,\text{mm}$)约 80% (约 $1.6\,\text{mm}$)时,试样发生瞬断。从图中还可以看出,裂纹呈现多路径扩展,断口裂纹路径基本与加载应力方向垂直,为典型 I 型断裂;瞬断区的断裂面发生偏转,说明随着裂纹向试样内部扩展,试样载荷类型由拉压转为弯曲,未断裂韧带受到弯曲载荷作用,导致试样断裂形式由 I 型断裂向 II 型断裂转变。

基于同步辐射光源的高温高频原位衍射与成像试验机可以实现材料内部缺陷和裂纹的无损三维形貌表征。实验中设定拍摄对应的疲劳周次,疲劳试验将在该周次下停止,同时高精度移动平台开始顺时针旋转 180° ,同步辐射光源线站成像探测器按照一定帧率捕捉试样的截面成像图像。实验前采用激光在试样表面加工出深度约 $45\,\mu\text{m}$ 、宽度约 $10\,\mu\text{m}$ 、

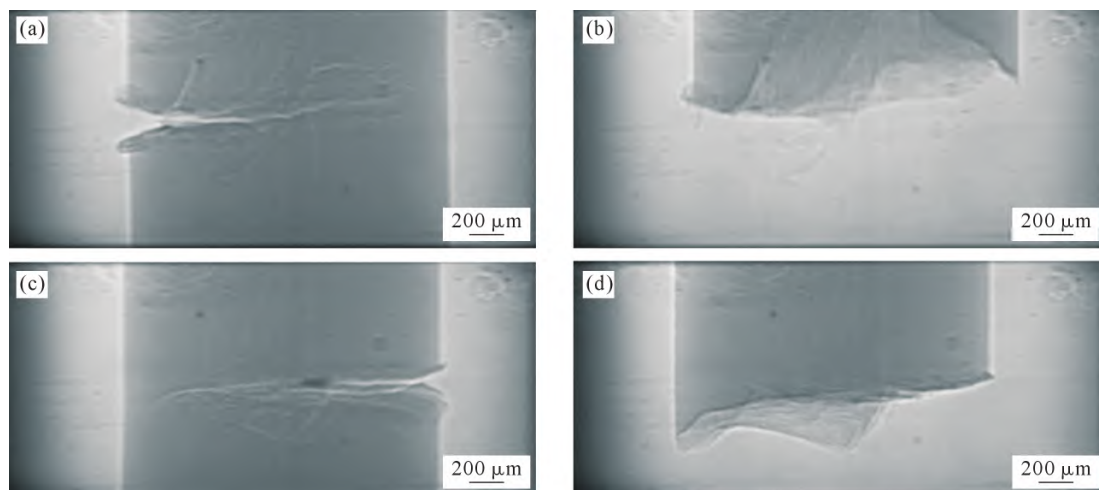


图 9 典型疲劳试样断裂成像:(a) 试样 1,疲劳裂纹扩展极限状态, $N=1.62\times 10^6$; (b) 试样 1,疲劳断裂状态, $N=1.64\times 10^6$; (c) 试样 2,疲劳裂纹扩展极限状态, $N=1.13\times 10^6$; (d) 试样 2,疲劳断裂状态, $N=1.15\times 10^6$

Fig.9 Typical fatigue specimen fracture images: (a) specimen 1, fatigue crack growth limit state, $N=1.62\times 10^6$; (b) sample 1, fatigue fracture state, $N=1.64\times 10^6$; (c) sample 2, fatigue crack growth limit state, $N=1.13\times 10^6$; (d) sample 2, fatigue fracture state, $N=1.15\times 10^6$

环向角度约 180° 的环状缺陷。图 10 为含裂纹 20 kHz 疲劳试样的 CT 图像,可以看出,试样加载一定疲劳周次后,裂纹从预制缺陷表面向试样内部扩展,裂纹前沿呈现半椭圆状,符合典型裂纹扩展形貌。

基于同步辐射光源的高温高频疲劳瞬态衍射与成像协同表征平台可实现疲劳实验过程中衍射与成像的多尺度协同表征。实验前,对疲劳试样进行预制缺陷处理,采用激光在试样表面加工出深度约 $45\text{ }\mu\text{m}$ 、

宽度约 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、环向角度约 180° 的环状缺陷。实验中,设定循环拍摄疲劳周次为 6×10^5 ,即每加载 6×10^5 周次触发相机拍摄功能,通过高精度时序控制同时采集疲劳过程中的衍射与成像图像信息。实验中设置衍射探测器与成像探测器帧率均为 $10\text{ }000\text{ fps}$,即 1 帧成像图像对应 1 张衍射图像。图 11 为基于高频疲劳加载模块和 SSRF BL16U2 线站捕捉的 $1\text{ }000\text{ Hz}$ 疲劳试样加载 $N=1.56\times 10^7$ 后的成像与衍射系列图

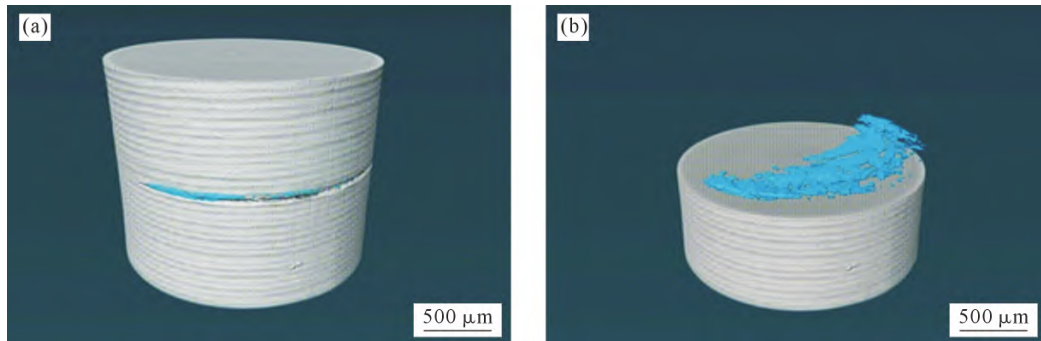


图 10 含裂纹试样 CT 图像($N=5.42\times 10^6$):(a) 试样平行段形貌;(b) 裂纹面形貌

Fig.10 CT images of a cracked sample ($N=5.42\times 10^6$): (a) morphology of the parallel section of the sample; (b) morphology of the crack surface

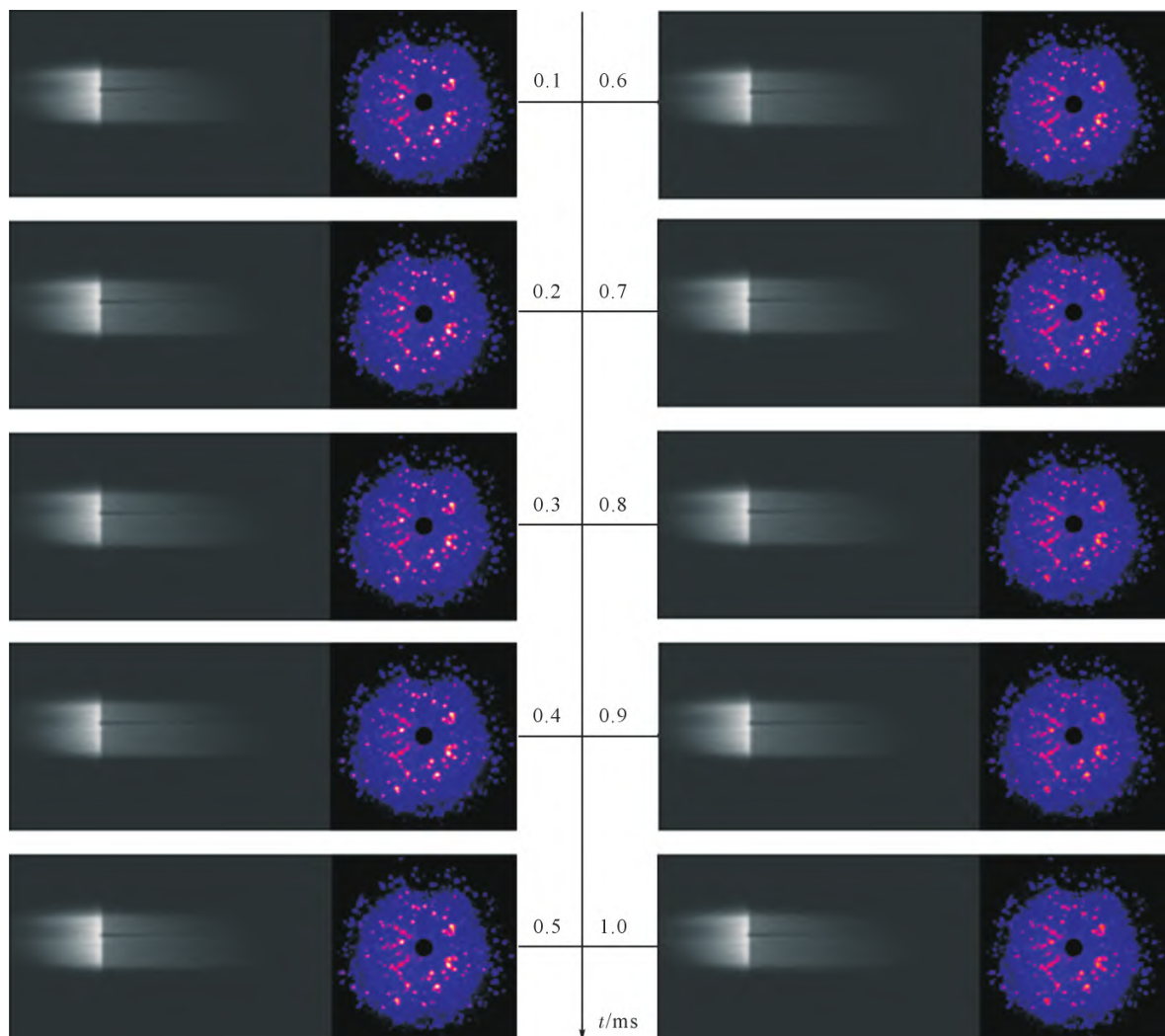


图 11 疲劳过程中衍射与成像协同图像($N=1.56\times 10^7$, $f=1\text{ }000\text{ Hz}$)

Fig.11 Diffraction and imaging collaborative imaging in fatigue processes ($N=1.56\times 10^7$, $f=1\text{ }000\text{ Hz}$)

像,图中左侧为 0.1~0.5 ms 图像,右侧为 0.6~1.0 ms 图像。从成像光路的图像序列可以观察到疲劳加载过程中材料内部缺陷和裂纹形成与扩展的全过程;而从衍射光路记录的衍射图可进一步处理为衍射谱(衍射强度与 2θ 角的关系曲线),进而可以观察到衍射信号的强度波动,说明疲劳加载前后,材料发生了相变、位错或者晶格畸变。

4 结论

(1)开发的原位疲劳试验机具备宽频域:20~1 000 Hz、(20±0.5) kHz 疲劳加载能力,可在有限机时内实现低周、高周和超高周循环周次加载。

(2)该原位疲劳试验机适配宽范围尺寸疲劳试样,便于考虑尺度效应,基于试样的实验结果在实际工程应用中具备可移植性。

(3)基于同步辐射光源的高温高频原位衍射与成像试验机具备实现疲劳试验过程中材料内部缺陷的动态表征、材料内部缺陷和裂纹的无损三维形貌表征、以及疲劳过程中衍射与成像的多尺度协同表征能力,为疲劳过程中材料内部损伤演化行为研究提供了良好的科研平台。

参考文献:

- [1] 轩福贞,朱明亮,王国彪.结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. 机械工程学报,2021,57(6): 26-51.
XUAN F Z, ZHU M L, WANG G B. Retrospect and prospect on century-long research of structural fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 26-51.
- [2] 王润梓,廖鼎,张显程,朱顺鹏,涂善东,郭素娟.高温结构蠕变疲劳寿命设计方法:从材料到结构[J]. 机械工程学报,2021,57(16): 66-86.
WANG R Z, LIAO D, ZHANG X C, ZHU S P, TU S T, GUO S J. Creep-fatigue life design methods in high-temperature structures: From materials to components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 66-86.
- [3] HE J C, ZHU S P, GAO J W, RUI L, LI W, LIU Q, HE Y, WANG Q Y. Microstructural size effect on the notch fatigue behavior of a Ni-based super alloy using crystal plasticity modelling approach [J]. International Journal of Plasticity, 2024, 172: 103857.
- [4] 焦毅.粒子加速器驱动同步辐射光源:现状与展望[J]. 科技导报,2025(5): 37-44.
JIAO Y. Current status and prospect of particle accelerator-driven synchrotron radiation light source[J]. Science & Technology Review, 2025, 43(5): 37-44.
- [5] 许峰,胡小方.基于先进光源的内部力学行为实验研究进展[J]. 中国科学:物理学、力学、天文学,2018,48(9): 21.
XU F, HU X F. Experimental research of inside mechanical behavior based on advanced light source[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(9): 21.
- [6] 肖体乔,谢红兰,邓彪,杜国浩,陈荣昌.上海光源 X 射线成像及其应用研究进展[J]. 光学学报,2014,34: 1-15.
XIAO T Q, XIE H L, DENG B, DU G H, CHEN R C. Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai synchrotron radiation facility [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34: 1-15.
- [7] 吴圣川,吴正凯,胡雅楠,宝剑光,李飞,肖体乔,袁清习.同步辐射光源四维原位成像助力材料微结构损伤高分辨表征[J]. 机械工程材料,2020,44(6): 72-76.
WU S C, WU Z K, HU Y L, BAO J G, LI F, XIAO T Q, YUAN Q X. High-resolution characterization of microstructural damage in materials by synchrotron radiation source 4D in-situ tomography [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(6): 72-76.
- [8] 吴圣川,吴正凯,康国政,陈伟球,李江宇,柯燎亮,王同敏,肖体乔,袁清习,胡春明.先进材料多维多尺度高通量表征研究进展[J]. 机械工程学报,2021,57(16): 37-65.
WU S C, WU Z K, KANG G Z, CHE W Q, LI J Y, KE L L, WANG T M, XIAO T Q, YUAN Q X, HU C M. Research progress on multi-dimensional and multi-scale high-throughput characterization for advanced materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 37-65.
- [9] 邢文娟,于忠瀚,刘长宜,赵宏伟.材料力学性能原位测试技术:发展与应用[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(3): 1-26.
XING W J, YU Z H, LIU C Y, ZHAO H W. In-situ testing techniques for mechanical properties of materials: Development and applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 1-26.
- [10] 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): 90-111.
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): 90-111.
- [11] 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.
- [12] WU S C, HU Y N, SONG Z, DING S S, FU Y N. Fatigue behaviors of laser hybrid welded AA7020 due to defects via synchrotron X-ray microtomography [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42: 1-15.
- [13] 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.
- [14] BAO J, WU S, WITHERS P J, WU Z, LI F, FU Y. Defect evolution during high temperature tension-tension fatigue of SLM AlSi10Mg alloy by synchrotron tomography[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 792: 139809.
- [15] DEZECOT S, MAUREL V, BUFFIERE J Y, SZMYTKA F, KOSTER A. 3D characterization and modeling of low cycle fatigue damage mechanisms at high temperature in a cast aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 123: 24-34.
- [16] CHAPMAN T P, KAREH K M, KNOP M, CONNOLLEY T, LEE

- P D, AZEEM M A, RUGG D, LINDLEY T C, DYE D. Characterization of short fatigue cracks in titanium alloy IMI 834 using X-ray microtomography[J]. *Acta Materialia*, 2015, 99: 49-62.
- [17] PANNEMAECKER A, BUFFIERE J Y, BUFFIERE S, GRATON O. In situ fretting fatigue crack propagation analysis using synchrotron X-ray radiography[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 97: 56-69.
- [18] WANG Z Y, WU S C, KANG G Z, LI H, WU Z K, FU Y N, WITHERS P. In-situ synchrotron X-ray tomography investigation on damage mechanism of an extruded magnesium alloy in uniaxial low-cycle fatigue with ratchetting[J]. *Acta Materialia*, 2021, 211: 116881.
- [19] 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.
- [20] MESSEAGER A, JUNET A, PALIN-LUC T, BUFFIERE J, SAINTIER N, RANC N, MAY M E, GAILLARD Y, KING A, BONNIN A. In situ synchrotron ultrasonic fatigue testing device for 3d characterisation of internal crack initiation and growth[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 43 (3): 558-567.
- [21] 彭文杰, 吴圣川, 薛欢, 彭周, 刘冬. 超声疲劳试样动态应变测量及应力检定方法[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(2): 287-293.
- PENG W J, WU S C, XUE H, PENG Z, LIU D. Measurement approach of dynamic strain and stress calibration for ultrasonic fatigue specimen[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(2): 287-293.

(责任编辑:李亚敏)