岛津
SHIMADZU
Excellence in Science

SGCOE-26-06

岛津跨尺度全频域多类型疲劳测试应用文集



前言

在工程结构服役寿命与安全评估中，材料疲劳失效始终是攸关设计与运行的基石性课题。随着航空航天、轨道交通、清洁能源、生物医疗及精密电子等领域快速发展，材料服役场景日趋复杂。疲劳载荷在时间上跨越低频准静态至万赫兹超高周，在空间尺度上涵盖从宏观大部件到微米级微器件、在环境条件上涉及常温到高温乃至腐蚀介质的多种组合。传统的疲劳测试手段，已难以全面刻画材料在跨尺度与全频域下的损伤演化与失效行为。为此，岛津依托近百年力学测试技术积淀，系统开发了电液伺服、电磁力驱动、超声共振及原位扫描电镜观测等多类型疲劳试验平台，形成了“跨尺度·全频域·多类型”的测试解决方案体系。

- **跨尺度：从宏观大部件到微纳元器件的全覆盖**

材料疲劳测试面临载荷跨尺度难题。岛津 EHF 电液伺服疲劳试验机为重载测试基石，载荷±5kN～±500kN 及以上，支持金属、复合材料、大型构件与零部件的静拉、疲劳、断裂韧性、裂纹扩展测试，选配环境装置可实现高低温、热疲劳性能评价。MMT/EMT 电磁力疲劳试验机主打微尺度场景，高响应电磁作动器提供±10N～±5kN 载荷，满足生物材料、IC 封装、MEMS 微小样品精密疲劳测试。二者组合，可完成从大型结构件到毫牛级试样的全跨度疲劳试验。

- **全频域：从低频长寿命至 20kHz 超高周疲劳的极限覆盖**

除载荷尺度外，疲劳加载频率是影响测试效率、决定材料疲劳机理研究深度的另一核心维度。岛津设备谱系兼顾多频段需求，既包含 100Hz 以内的常规疲劳试验机，也拥有可达 20kHz 的超声疲劳试验机。以 10^{10} 次循环测试为例：100Hz 常规疲劳试验机完成该循环量需要约 3.2 年；而岛津 USF-2000A 超声疲劳试验机依托压电元件激励产生 20kHz 共振波形，仅需约 6 天即可完成同等循环次数。该设备可在共振工况下输出高应力，支持 1000MPa 级钢材试验，能够精准捕捉 10^7循环以上、由微纳夹杂物引发的超高周疲劳断裂行为，为探究传统疲劳极限平台背后的材料失效机制提供了独有试验手段。依托 20kHz 高频加载与超高周寿命评价能力，设备突破了传统疲劳设备的频率上限。

- **多类型：从单一力学表征到“力学+显微”原位综合分析的范式革新**

疲劳失效机理研究的另一瓶颈在于：传统测试只能获取宏观力学响应，无法同步揭示裂纹萌生与扩展中的微观结构演变。岛津 SEM-Servo 原位疲劳试验机将液压伺服加载系统（最大动态加载 10kN，行程±10mm）与扫描电镜（SEM）及能谱仪（EDS）深度整合，可在室温至 800℃范围内进行拉-拉、拉-压、三点弯等动态加载，并在不卸载、不中断的条件下实时观测同一区域的微观形貌变化。这一“动态加载+原位观测”设计，既避免了卸载取件造成的裂纹闭合与二次损伤，又能真实捕捉疲劳裂纹从纳米级萌生到贯穿的全过程。研究人员不再局限于断口反推失效原因，而能实时观察疲劳损伤演化轨迹，为疲劳理论验证与精细化模型构建提供了最直观的实验依据。

《岛津跨尺度全频域多类型疲劳测试应用文集》内容涉及金属材料、复合材料、高分子、生物材料、微电子器件、汽车零部件、航空航天等多个应用领域。期望本文集能够为广大材料科学家、力学研究者和工程设计人员提供有益的技术参考与方法借鉴，共同推动疲劳研究迈向更深入、更精细、更高效的发展阶段。

本文集仅供有关人员学习交流使用，不用于任何商业用途。

岛津企业管理（中国）有限公司
分析中心

目录

第 1 章 EHF 系列电液伺服疲劳试验机介绍 4
第 2 章 EMT/MMT 电磁疲劳试验机介绍 7
第 3 章 USF-2000A 超声疲劳试验机介绍 11
第 4 章 SEM-Servo 扫描电镜(高温)原位疲劳试验机介绍 13
第 5 章 EHF 系列电液伺服疲劳试验机应用方案 16
径向锻造制备电动汽车电机轴的性能评价-空心轴扭转疲劳试验 17
胶粘剂的剪切疲劳测试 21
电动汽车电机外壳的耐久试验与动态三维 DIC 分析 27
精确测量垫圈压缩疲劳试验中的微位移 34
硬质塑料疲劳试验（JISK7118） 37
碳纤维增强热塑性塑料疲劳测试 40
采用银烧结芯片粘接材料连接的 SiC 芯片与铜基板键合耐久性评估 45
骨内牙种植体的动态疲劳试验 50
焊点试样的低周疲劳试验 53
L605 钴基合金室温低周疲劳测试 56
尼龙 66 材料单一应力水平疲劳测试 60
第 6 章 EMT/MMT 电磁疲劳试验机应用方案 64
电动汽车母线排耐久性测试 65
使用气体轴承改进承受水平载荷的疲劳试验机的测试控制 71
通过组合试验软件对橡胶隔振器进行耐久性试验前后静态弹簧常数与动态特性的连续自动测量 75
悬架支柱的阻尼力特性试验[JASOC611] 83
牙科矫正种植体的疲劳试验 89
小型金属试样疲劳试验 91
MMT-100N 对 EVA 薄膜的耐久性测试与动态粘弹性测量 94
固体高分子燃料电池用电解质膜的耐久试验 96
第 7 章 USF-2000A 超声疲劳试验机应用方案 98
内部空洞对 3D 打印钛合金试样疲劳寿命的影响 99
超声疲劳试验系统对碳纤维增强塑料进行十亿周次三点弯曲疲劳试验 105
Inconel718 高温合金超高周疲劳试验与断口元素分布测量 109
超声频率下金属板材弯曲疲劳试验观测 115
金属材料超声疲劳试验 118
超声波疲劳试验机的对金属材料夹杂物检测 121
带平行段的金属沙漏形试样的超声疲劳试验 125

第 8 章 SEM-Servo 扫描电镜原位疲劳试验机应用方案.....128
使用 SEM 伺服脉冲器进行焊接材料的三点弯曲疲劳试验.....129
使用 SEM 伺服脉冲器进行的碳纤维增强塑料的三点弯曲疲劳试验.....134

SHIMADZU
Excellence in Science

第 1 章 EHF 系列电液伺服疲劳试验机介绍

一、概述与系列划分

岛津（SHIMADZU）EHF系列电液伺服疲劳试验机（Servopulser）是采用电液伺服控制技术的动态与疲劳测试系统，由控制器发出的电信号驱动伺服阀，伺服阀控制压力油的方向与流量，进而驱动液压缸活塞产生加载动作，实现对试件的静、动态载荷施加。该系列以高性能标准机为基础，按照各种试验要求为客户提供定制化产品，可极其真实地再现输入波形，从大容量到小容量实现高精度的加载。

EHF-L型　　EHF-E型　　EHF-U型



EHF系列电液伺服疲劳试验机

二、核心特点

（1）两自由度PID自适应控制技术

EHF系列采用先进的两自由度PID自适应控制方式，具备控制参数自动调整功能。在面对不同刚度、不同阻尼特性的试样时，系统能够智能地优化控制参数，确保载荷或位移控制的快速响应与高度稳定，有效抑制超调与振荡，为获取高精度、可重复的疲劳数据提供了核心保障。

（2）“无量程”高精度测量技术

配备的4830控制器采用24位高精度A/D转换器，提供“无量程”特性——该技术摒弃了传统传感器分段量程切换带来的误差和不便，实现了在整个测量范围内的连续、无级高精度测量。无论载荷大小，系统均能保持一致的测量分辨率与精度，确保了从微小裂纹萌生到最终断裂全过程的完整数据记录。载荷精度达到显示值的±0.5%。

（3）高性能伺服阀与无级调速

采用高性能伺服阀作为电-液转换核心元件，能够对压力油的方向和流量进行精确控制，实现载荷与速度的无级调整，可在从低速到高速的大范围内进行试验。

（4）高刚性机架设计

采用高刚度框架结构，有效减少试样在测试过程中机架变形，保证了各种试验的高可靠性和数据准确性。部分系列配备两级横梁驱动机构，通过液压横梁驱动与液压夹具组合，配合手柄操作更加直观，有助于

防止误操作和事故的发生。

（5）节能运行功能

可选配节能单元ECU（EnergyControlUnit），能够根据试验条件和试验状况将液压源动力最佳化，实现节能运行。在试验待机模式下可降低液压源的功率输出级别。

（6）扩展环境模拟能力

EHF系列可配置高温炉、环境箱、高频感应炉等多种环境附件，支持高温应变疲劳试验、低温应变疲劳试验、热疲劳试验以及腐蚀疲劳试验等复杂工况下的材料性能测试。

三、工作原理

EHF系列电液伺服疲劳试验机基于闭环反馈控制原理工作，其核心工作流程如下：

（1）信号输入与设定：由控制器发出设定电信号，经控制器设定信号级大小后，驱动作为电-液转换元件的伺服阀。

（2）电-液转换与功率放大：伺服阀接收来自控制器的电指令信号，将其转换为液压功率信号，精确控制由液压源（液压泵站）输送的压力油的方向和流量。

（3）执行驱动：受控的压力油被送入液压缸（执行元件）的上腔或下腔，推动活塞杆上下往复运动，对安装在活塞杆前端的试件施加静态或循环交变动载荷。

（4）信号检测与反馈：加载在试件上的载荷（力）或变形（位移）由载荷传感器（负载检测器）和位移传感器（差动变压器等）实时检测，转化为电气反馈信号。

（5）偏差比较与闭环控制：反馈信号与控制器中的设定信号进行比较，产生的偏差信号再送入伺服阀，形成闭环控制回路。系统持续调整伺服阀输出，直至反馈信号与设定信号之间的偏差趋近于零，从而实现高精度的载荷控制、位移控制或应变控制。用户通过模式选择开关可根据试验目的切换控制模式。

该系统的最大特色是可再现任意波形。在实验室中，可通过再现道路路面状况、地震波等实际记录波形来进行模拟疲劳试验。

四、应用领域

（1）材料科学与基础研究

- 金属材料：可对钢铁、铝合金、钛合金等金属材料进行静态拉伸、高/低周疲劳测试、断裂韧性（K_{IC}、J_{IC}）测试、裂纹扩展速率（da/dN）测试等。
- 复合材料：对碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强复合材料等进行疲劳性能评估。
- 高分子材料与塑料：对尼龙66等工程塑料进行疲劳性能测试与寿命评估。
- 树脂材料：包括各类工程树脂的动态力学性能评价。

（2）汽车工业

EHF系列广泛应用于汽车零部件的疲劳耐久性测试，包括：

- 动力系统部件：发动机连杆、曲轴、活塞、气门弹簧等关键运动部件的疲劳寿命评估。
- 底盘与悬架系统：悬架摆臂、稳定杆、转向节等结构件的耐久性验证。
- 车身结构：车身骨架、副车架等承载结构的疲劳性能测试。
- 紧固件：螺栓、螺母等连接件的疲劳强度评价。
- 内饰件：仪表板骨架、座椅骨架等塑料/金属复合结构件的疲劳测试。

EHF-JF系列伺服作动器尤为适合汽车部件的循环载荷可靠性评价。

（3）航空航天

- 航空铝合金、钛合金、高温合金的疲劳特性研究。
- 轻质合金结构件的低周疲劳和高周疲劳试验。
- 机身结构、机翼连接件的疲劳与裂纹扩展测试。

（4）生物医用材料

EHF系列可对人工关节、骨科植入物等生物医用材料进行复杂的实动波疲劳试验。例如，通过遥测系统获取人体行走时的应变数据并生成试验力波形，导入疲劳试验机对人工踝关节中使用的聚乙烯角材进行实际受力工况模拟测试，验证产品在实际使用场景下的耐久性能。

（5）氢能与新能源领域

在氢能材料测试中，EHF系列可开展多项关键试验：高温高压氢气环境下的材料强度试验、液氢浸润后材料强度试验，以及结合电化学方法的氢致慢应变拉伸试验（SSRT），用于评价储氢容器及配管构件在氢环境下的抗氢脆与氢致延迟断裂性能。

（6）土木工程与建筑

- 钢筋、预应力钢绞线的疲劳性能评价。
- 结构用钢材的断裂力学性能测试。
- 桥梁缆索、锚具等连接构件的疲劳耐久性验证。

（7）高校与科研院所

适合大学及研究所进行各类材料的疲劳性能测试、断裂力学测试、环境疲劳试验以及材料本构关系研究，是科研工作中动态力学性能表征的核心装备之一。

五、总结

岛津EHF系列电液伺服疲劳试验机是覆盖从±5kN台式小型设备到±500kN大型落地式系统的完整产品线，通过PID自适应控制、无量程高精度A/D转换、高性能伺服阀闭环控制等核心技术，实现高精度、高稳定性的动态加载与疲劳测试。该系列广泛应用于钢铁冶金、汽车工业、航空航天、生物医用材料、氢能新能源以及高校科研等领域，能够满足从标准材料样品到复杂结构部件、从常规环境到高温/低温/腐蚀/高压氢气等极端工况下的材料疲劳性能评价与寿命评估需求。

第 2 章 EMT/MMT 电磁疲劳试验机介绍

一、概述与系列划分

岛津EMT/MMT电磁疲劳试验机（ElectromagneticForceFatigueTestingSystem）是岛津公司以电磁力驱动为核心技术的动态与疲劳测试系统，与传统的电液伺服疲劳试验机（EHF系列）形成鲜明的技术路线差异。该系列的直接驱动力来源于电能转换的电磁力，无须液压油、压缩空气及循环冷却水等辅助介质，因此被称为“干式”或“清洁型”疲劳试验系统。

从产品代号结构来看，该技术平台包含两大主要系列：

两大系列共享相同的电磁作动器技术平台和4830控制器平台，但在载荷量级、行程长度、最大频率及目标应用上各有侧重，形成从微小力（百N级）到中小力（kN级）的完整电磁疲劳测试产品覆盖。



EMT/MMT电磁疲劳试验机

二、核心特点

1.电磁直接驱动，无油清洁运行

EMT/MMT系列最根本的技术特征在于采用电磁型作动器(ElectromagneticActuator)作为加载机构。该作动器通过电能直接转化为直线运动的机械能驱动负载，无需液压油、压缩空气或循环冷却水等中间介质，是一种完全“干式”驱动技术。这一特征带来了以下优势：

- 洁净运行：设备不产生废油，不对安装现场造成任何污染，可在要求极高的洁净环境中使用，如半导体制造车间、生物医用材料实验室等。
- 低运行成本：无需定期更换液压油、过滤器或进行液压管路维护等消耗品支出。
- 无特殊地基要求：由于无液压源及相关振动干扰，EMT/MMT系列对安装地基的要求远低于同级别电液伺服系统，无需进行专门的地基工程，只需安装在足以承受设备重量的坚固地面上即可。

2.高速、高精度闭环控制

电磁作动器具有极高的频率响应特性，与4830伺服控制器的闭环控制系统相结合，可在微小试验力、微小位移的条件下实现高速、高精度的控制与测量。

电磁驱动本身几乎无机械回隙与摩擦滞后，配合低摩擦导向轴承，波形的再现性极佳。两自由度PID自适应控制方式可针对不同刚度和阻尼特性的试样自动优化控制参数，进一步保障了控制稳定性与波形真实

度。

3.“无量程”高精度测量

4830控制器具备岛津独有的“无量程（Rangeless）”测量特性—在整个测量范围内保持一致的测量分辨率与精度，无需传统传感器在不同力值区间切换量程，从而避免了因切换带来的精度损失和操作不便。载荷精度达到显示值的±0.5%或最大试验力的±0.02%（取较大值）。

4.兼顾小载荷高频与大行程快速响应

EMT系列特别强调高速与大幅度运动的兼容性。在该系列中，EMT-1kN型号最高试验频率可达200Hz，最大作动速度高达2m/s，最大行程可达±50mm（即总行程100mm），使其既能胜任微小振动的高周疲劳测试，也能完成大变形橡胶类材料或大型结构件的高频快速循环加载。

MMT系列则在极小力的超高精度方面更胜一筹，最小可输出±10N，力值分辨率可达0.01N，在微小力应用中具有无与伦比的精细控制能力。

5.紧凑、轻量、低噪声、低能耗

电磁驱动技术使得MMT系列成为高刚度台式紧凑型设计，最小型号主机重量仅约80kg，可灵活放置于标准实验台面上。无需隔音措施即可在任何实验室环境中使用。设备仅需供电即可运行，在最大载荷下，MMT系列功耗为数百VA至1kVA，EMT-5kN系列满负荷功耗为5kW～6kW。待机或非满负荷工况下功耗极低，无待机能源浪费。在最大试验力条件下，设备产生的热量可通过主机内置的风冷单元（Air-coolingunit）进行有效散热。

6.灵活的环境试验扩展能力

EMT/MMT系列具备宽大的试验空间，可灵活配置多种环境附件：

- 温控箱（恒温箱/低温箱/高温炉）：实现宽温度范围内的疲劳性能评价，如高分子材料的玻璃化转变温度附近的动态力学行为。
- 恒温水浸试验装置：特别适合生物材料及植入物在模拟体液环境下的测试，如人工关节、骨板等在37℃生理盐水中的疲劳性能评价。
- 腐蚀环境试验装置：可用于材料在盐雾、酸性或碱性等腐蚀介质中的腐蚀疲劳测试。

系统还支持光学显微镜的实时观测，可在试验过程中原位观察试样的微观形貌变化。

7.高刚度机架与安全设计

EMT/MMT系列采用高刚度载荷框架，有效抵抗共振对测试精度的干扰。EMT系列配备电动横梁驱动机构及两级式横梁驱动机构，通过两个独立的按钮分别控制横梁升降与夹具夹紧，显著降低误操作和事故风险。紧急停止开关设计保证在异常情况下的快速断电停机。

三、工作原理

1.电磁力驱动基本原理

EMT/MMT电磁疲劳试验机的核心工作原理基于电磁力直线驱动技术。其作动器由高响应电磁线圈（ElectromagneticCoil）和永磁体/励磁系统组成。当控制器向电磁线圈输入交变电流信号时，电流在磁场中受到洛伦兹力的作用，产生与电流大小成正比的驱动力（F=I×L×B，其中I为电流，L为导体有效长度，B为磁感应强度）。该电磁力直接推动与线圈耦合的运动部件（活塞杆/作动器输出端）产生轴向往复直线运动，从而对试样施加拉伸、压缩或拉压交变的循环载荷。

相较于传统电液伺服系统需要通过伺服阀进行电—液—机械的两次能量转换，电磁直接驱动路径更为简短：

- 传统电液伺服路径：电信号→伺服阀→压力油→液压缸活塞→机械运动
- 电磁力直接驱动路径：电信号→电磁作动器→机械运动

电磁直接驱动的能量路径更短，没有任何中间液压环节的延迟，因此具有无与伦比的频率响应速度和控制精度。

2.闭环反馈控制过程

EMT/MMT系列采用典型的闭环反馈控制系统，其工作流程如下：

（1）信号设定：操作者通过4830控制器（LCD触屏方式）设定试验目标值，包括目标试验力（载荷）、目标行程（位移）以及加载波形（正弦波、三角波、梯形波、矩形波等）。

（2）信号比较与偏差计算：控制器内的信号发生部分将设定信号与来自传感器的反馈信号进行比较，计算偏差值。

（3）功率放大与电磁驱动：偏差信号经控制器内部的电子功率放大电路（PowerAmplifierUnit）进行功率放大，驱动电磁作动器工作。该功率放大电路内置于主机中，可直接安装在控制器的台面上，占用空间小、布线简洁。

（4）力与位移的测量反馈：

- 载荷测量：采用专用的片式剪切应变型测力传感器（专门为疲劳试验机优化设计），与试样串联安装，能够精确测量拉伸、压缩及弯曲产生的载荷，并具有良好的抗过载和抗侧向力能力。对于高频率测试中因运动部件惯性产生的测量误差，系统还具备惯性力补偿功能。
- 位移测量：采用高精度位移传感器（如差动变压器式LVDT或光学编码器），实时测量作动器活塞的行程位置。
- 两种传感器的信号均实时回传至控制器形成完整闭环。

（5）误差校正：控制器持续比较设定值与反馈值，不断调整输出信号，直至两者偏差趋近于零，实现精确的载荷控制或位移控制。

（6）波形记录与数据分析：控制器记录全过程的力—时间、位移—时间数据及力—位移滞回曲线，用于疲劳寿命评估（S-N曲线）、动态力学性能分析（动态弹性模量、损耗因子等）。

（7）高频驱动特性对控制算法的要求

由于电磁力驱动频率最高可达200Hz，对控制系统的实时性要求极高。岛津的4830控制器采用全数字控制架构与控制参数自动整定功能，并配备波形畸变校正功能，在高速动态循环过程中依然能够产生极其真实和稳定的加载波形（包括正弦波、三角波、梯形波等常用波形）。当试样的刚度或阻尼在疲劳过程中发生变化时，系统仍能保持稳定的峰值控制，确保全程测试数据的可靠性。

四、应用领域

1.MMT系列（微小电磁力疲劳试验机）

MMT系列专注于微小力载荷下对微小材料、微小部件进行超高精度疲劳测试。

- 生物医用材料：生物可降解聚合物、人工血管材料、组织工程支架、医用缝合线、药物缓释载体等在模拟体液环境中的动态力学性能评价。系统可配置恒温水浸试验装置，在37℃生理盐水中实现对植入物的疲劳耐久性测试。
- 电子封装与半导体器件：IC封装中微焊球（solderball）及微凸块（micro-bump）的剪切疲劳寿命评价、芯片贴装胶的粘接疲劳特性、晶圆级封装中铜柱（copperpillar）的循环力学响应、3D封装中TSV结构的微动疲劳、印刷电路板上SMT元件的焊接点强度评估。

- 高分子薄膜与复合材料：聚合物电解质膜（PEM）在模拟燃料电池工况下的反复拉伸耐久性测试、EVA胶膜（太阳能电池封装材料）紫外辐照前后的拉伸疲劳与动态粘弹性测试。
- 精密微机电系统（MEMS）：微型弹簧、微悬臂梁、微驱动机构等在动态循环载荷下的疲劳特性评价。
- 航空航天微小构件：航空用轻质合金箔（0.1mm级厚度）、复合材料薄片、传感器弹性元件等的微小力疲劳寿命评估。

2. EMT系列（电磁力动态疲劳试验系统）

EMT系列在MMT系列基础上进一步扩展了载荷容量、试验行程和最大速度，使其在更广泛的应用领域中发挥作用。

- 高分子材料与橡胶：橡胶材料的宽应变幅高频疲劳测试、高弹性体（弹性恢复性能评价）、橡胶—金属复合结构的粘接耐久性。
- 生物医用材料（中载荷级别）：人工关节（髋关节、膝关节）衬垫材料的磨损疲劳耦合测试、骨科内固定系统（接骨板、髓内钉、脊柱内固定棒）在模拟体液中的循环弯曲疲劳、牙科种植体（dental implant）的连接强度疲劳评价。
- 电子电器部件：智能手机/平板电脑用柔性电路板（FPC）及铰链、连接器端子（connector contact）的插拔疲劳、微型开关与继电器的机械寿命测试、微型散热风扇轴承的耐久性评估。
- 汽车非金属部件：汽车内饰件（仪表板表皮、门板饰条）的耐久性、车用密封件（车门密封条、风窗密封条）的压缩回弹疲劳、树脂齿轮和传动带在低速高频下的疲劳寿命。
- 消费品与包装材料：包装用薄膜及复合软包装材料的耐疲劳性、运动器材（网球拍、高尔夫球杆握把）用高分子材料的动态性能。
- 恒温箱环境试验：配合恒温箱在宽温度范围内完成上述各类材料的动态力学性能评估，包括高分子材料在玻璃化转变温度上下的储能模量和损耗模量变化。

五、总结

岛津EMT/MMT电磁疲劳试验机基于电磁直接驱动技术，提供清洁、低噪声（62dB）、低能耗（MMT数百VA，EMT最大5~6kW）且无需地基安装的动态测试方案。

MMT系列为微小电磁力疲劳试验机，载荷范围±10N～±500N，频率最高100Hz，行程±2mm～±10mm，位移分辨率±0.125μm，力值分辨率0.01N，专精于生物医用材料、高分子薄膜、IC封装、电子器件及航空航天微小构件等领域的超高精度微小力高频疲劳测试。

EMT系列为电磁力动态疲劳试验系统，动态载荷±1kN～±5kN，频率最高200Hz，行程±30mm～±50mm，最大速度2m/s，适用于树脂、橡胶、生物材料、电子电器及汽车非金属部件等中小载荷、中高频且兼顾大行程的疲劳与耐久测试。

两系列均配备两自由度PID自适应控制与无量程高精度测量，实现从毫牛至kN级的全范围精确控制。在岛津疲劳测试产品矩阵中，EMT/MMT与EHF电液伺服系列（大载荷、大构件）及USF-2000A超声疲劳系列（超高周次）形成明确互补，共同覆盖从微小到大载荷、从常规到极高频率的完整测试需求。

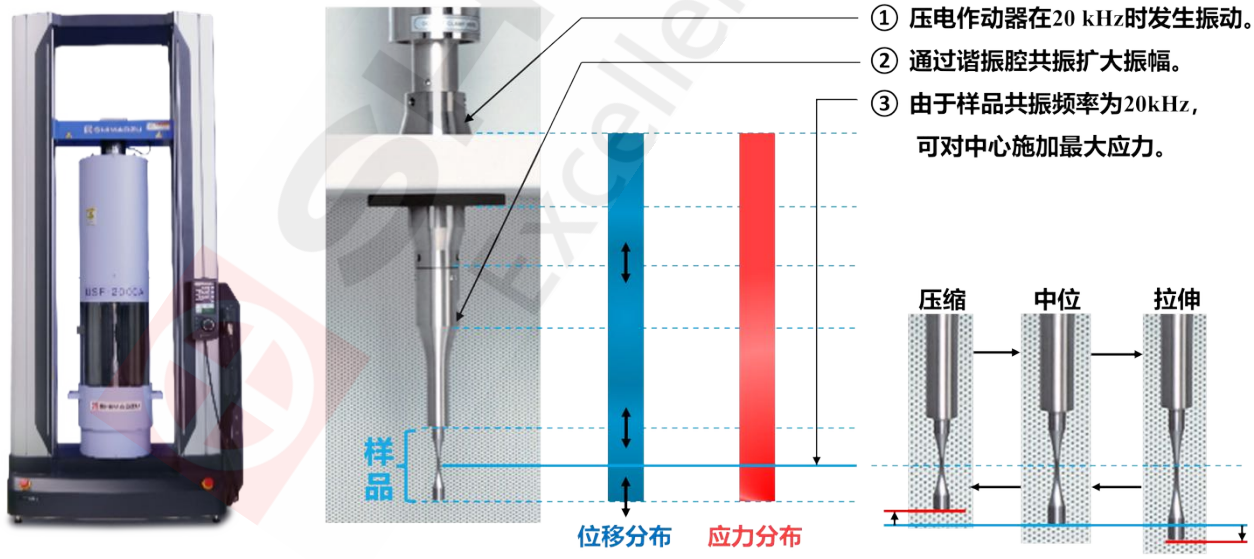
第 3 章 USF-2000A 超声疲劳试验机介绍

岛津USF-2000A超声疲劳试验机（Ultrasonic Fatigue Testing System），是为解决现代工业对材料超长寿命服役需求而设计的专用测试平台。其核心价值在于通过极高的加载频率，将常规需要数月甚至数年的超高周疲劳试验（10^9~10^{10}次循环）缩短至数天完成，是研究材料“次疲劳极限”行为（即(10^7)次循环后依然可能发生的疲劳断裂）的关键科研工具。

一、核心特点

该系统的核心优势来自于其独特的共振工作原理，这在测试效率和操作便捷性上带来了质的飞跃：

- 极高的测试效率：系统以20kHz的频率进行加载，可在约10分钟内完成10^7次循环。相比常规100Hz的伺服疲劳试验机，获得10^{10}次循环数据的时间从3.2年锐减至仅6天。这使得在合理时间内测定材料的超高周疲劳极限10^8~10^{10}次循环成为可能。
- 独特的共振驱动模式：基于精密设计的声学共振系统工作，而非依靠传统的大功率作动器。这一特性使USF-2000A能以极低能耗维持高频振动。
- 卓越的材料适用性与应力生成能力：由于在共振状态下运行，系统可产生极高的交变应力，能够支持1000MPa级的高强度钢材测试。
- 极低的运行功耗：整机运行时功耗极低，仅约100W，节能且经济。能耗远低于传统大型电液伺服疲劳试验机。
- 精准的微缺陷分析能力：通过使试样在10^9周次后发生疲劳断裂，其断口表面会暴露为裂纹源的微小内部夹杂物或缺陷。这为分析材料内部微观缺陷对疲劳寿命的影响提供了直接而高效的物理证据。
- 智能化的控制与软件：设备由计算机控制，操作者仅需输入材料的弹性模量和密度，专用软件即可自动生成满足共振条件的试样图纸，支持Pulse-Pause（脉冲-暂停）间歇加载等功能，有效控制试样温升。



USF-2000A超声疲劳试验机和测试原理

二、工作原理

USF-2000A的加载过程基于精心设计的机械共振原理，分为三个步骤：

1.信号生成与机电转换：首先由控制器产生20kHz的电信号，驱动内部的压电陶瓷元将其转换为相同频

率的机械振动。

2.机械放大与传递：此微小机械振动随后经由一个名为“horn”（变幅杆）的声学谐振腔进行放大，最终传递至特殊设计的试样。

3.试样共振与加载：试样的几何尺寸经过精密计算，使其固有频率与20kHz相匹配。在变幅杆的激振下，试样发生机械共振，内部形成稳定的驻波，以20,000次/s的频率进行轴向的周期性拉伸和压缩，从而产生所需的循环应力。系统不直接测量载荷，而是通过电涡流位移传感器测量试样端部的位移（振幅），再根据试样的几何尺寸和材料弹性模量，通过标定关系换算出施加的应力。

三、应用领域与应用案例

- 学术研究：广泛用于探究金属材料在10^8~10^{10}循环寿命区间的疲劳损伤机理与模型构建。
- 先进制造业：为航空航天、新能源等领域长寿命、高可靠性的关键部件（如齿轮、轴承、压气机叶片）提供选材依据与寿命评估。
- 新材料研发：用于评价高强度钢、钛合金等新材料的次疲劳极限和内部夹杂物敏感性。
- 焊接工艺评估：用于评价各类焊接接头在超长寿命下的疲劳性能。

四、总结

岛津USF-2000A凭借其20kHz的超高试验频率和创新的共振加载原理，在材料超高周疲劳评估领域具有不可替代的价值。它极大地缩短了极长寿命区间的疲劳测试周期，攻克了传统试验机在该领域的测试瓶颈。同时，其仅约100W的极低功耗、对1000MPa级高强度材料的支持能力，以及在微观缺陷分析方面的独特优势，使其成为现代材料科学研究和高端装备制造业不可或缺的科研重器。

第 4 章 SEM-Servo 扫描电镜(高温)原位疲劳试验机介绍

一、概述与设备定位

岛津SEM-Servo是一款将扫描电子显微镜（SEM）与电液伺服疲劳试验系统深度融合的一体化原位观察试验设备。该设备的正式产品名称为“SEMServopulser”或“SEM-SERVO带扫描电镜高温原位疲劳试验机”。其名称中“SEM”指集成于系统中的高分辨率扫描电子显微镜，“Servopulser”则是岛津电液伺服疲劳试验机（Servopulser）系列的产品命名。

该设备的核心定位在于解决传统疲劳研究中的一个关键难题—传统疲劳试验通常只能在试验结束后对试样断口进行离位观察，无法捕捉疲劳过程中裂纹萌生与扩展的动态演化过程。SEM-Servo通过在疲劳加载过程中同步进行SEM原位成像，实现了力学性能测试与微观组织演变的实时关联分析，为材料疲劳机理研究提供了从“事后分析”到“过程可视化”的方法学突破。

通常，SEM-Servo系统采用岛津EHF-L台式电液伺服疲劳试验机作为其力学加载核心单元，与SEM腔体协同工作，构成一套完整的原位力学测试平台。



SEM-Servo扫描电镜高温原位疲劳试验机

二、核心特点

1.疲劳试验与SEM原位观察的一体化集成

SEM-Servo最显著的特点是成功将大载荷、高频率的动态疲劳加载装置与高分辨率扫描电镜集成在同一个系统中。在疲劳试验过程中，操作人员无需将试件卸载和取出，即可原位观测样品表面的微观破坏模式，并通过能谱仪（EDS）读取微区成分与含量变化。这一设计既避免了试件反复取出和放回时造成的二次损伤，又可捕捉到加载时出现、卸载时闭合的裂纹（这类裂纹在传统离位分析中极易被忽略），从而更真实地反映试件在实际服役条件下的疲劳损伤演化过程。

2.液压伺服加载的高性能保障

SEM-Servo的加载系统为完整的电液伺服疲劳试验机，有别于放置于普通SEM中的电机-丝杠驱动型静态力学加载机构，其液压伺服系统可实现大载荷、高速度、多种波形的动态加载。该设备的加载能力覆盖动态±10kN（根据所使用的夹具而有所不同），活塞有效行程±10mm，试验频率范围为0.001～5Hz（正弦

波)。系统支持正弦波、三角波、梯形波、矩形波、斜波保持波形、等多种波形加载，控制量可选试验力或活塞行程。

3. 高精度检测与精密控制

系统采用岛津4830伺服控制器，该控制器配备24位高分辨率模数转换器，并具备全数字控制能力与控制参数自动整定功能，可实现优异的载荷波形再现性，载荷精度达到指示值的±0.5%（标准系统)。在试样存在间隙的情况下，系统仍能实现稳定的峰值控制。

4. 清晰的SEM图像与抗振设计

电子显微镜SEM与疲劳试验机采用一体化结构设计，具有高效防振效果，确保在加载过程中仍能获得清晰的SEM图像。扫描电镜单独使用的放大倍数为5x~300000x，配备数字放大自动显示功能，与伺服脉冲发生器组合使用时的倍率为在室温下约2000x，高温下约1000x，SEM分辨率为3nm（30kV条件下)，观察视野范围为6mm×16mm（通过X轴、Y轴移动台实现)。

5. 宽温域环境模拟能力

系统配备高效的加热线圈，最高可将样品温度提高到800℃，工作温度范围为室温至800℃（高温试验温度通常为300℃～800℃)，温度控制精度在温度检出端为±3℃以内。这一能力使得SEM-Servo能够在模拟材料实际服役温度环境的条件下进行原位疲劳测试，大幅拓展了其应用边界。

6. 负载时的静止图像观察（可选功能)

通过选配负载时样品变形的同步机构，系统可以在动态加载过程中获得静止的SEM图像。该功能通过将电子束扫描与载荷加载信号进行同步控制，有效消除了因试样周期性变形所导致的图像模糊，使研究人员能够清晰地观察到特定加载相位下的微观形貌细节。

7. 灵活的多模式使用

系统支持三种工作模式：可在利用SEM观察的同时进行裂纹扩展观察试验；可单独使用试验机进行常规材料强度试验；可单独使用SEM进行样品表面观察。

三、工作原理

SEM-Servo的工作原理基于电液伺服闭环控制与SEM原位成像两大系统的协同工作。

力学加载子系统采用与岛津EHF系列相同的电液伺服闭环控制原理。设定电信号由控制器发出，经由伺服阀转换为液压功率信号，控制来自液压源的压力油方向和流量，驱动液压缸活塞产生往复运动，对安装于活塞前端的试件施加静态或循环交变动载。加载过程中的载荷信号与位移信号通过载荷传感器和位移传感器实时检测并反馈至控制器，与设定信号进行比较后产生偏差信号，持续驱动伺服阀进行校正，形成闭环控制回路，从而实现对试验力或位移的高精度动态控制。

SEM观测子系统与加载子系统实现协同控制。系统通过同步机构，使扫描电子束的扫描周期与载荷加载信号同步，从而实现负载状态下的静止图像获取。在疲劳试验过程中，SEM可对试件表面的特定区域进行持续或间歇性高分辨率成像，记录裂纹萌生、扩展及微观组织演变的全过程。

真空环境兼容性是该系统区别于常规疲劳试验机的另一个关键技术要点。液压伺服加载机构需与SEM的高真空腔体实现密封兼容，同时加载力通过真空馈通装置传递至腔体内的试件上。系统中的真空吸力消除机构确保了试验力检测的准确性，避免了因腔体真空度变化对力学测量结果产生干扰。

四、应用领域

SEM-Servo凭借其在疲劳加载过程中实时原位观察微观损伤的独特能力，主要服务于以下研究领域：

1. 复合材料疲劳机理研究

复合材料（如纤维增强树脂基复合材料FRP、碳纤维增强复合材料CFRP）的疲劳破坏涉及基体开裂、界面脱粘、分层、纤维断裂等多种破坏模式的组合，传统研究方法难以实时区分各类损伤的发生顺序和主导机制。SEM-Servo可在疲劳试验过程中原位观测各类损伤的出现时机与演化规律，为建立复合材料疲劳失效模型提供直接的微观证据支撑。

2. 金属材料的疲劳裂纹扩展行为研究

对于金属材料，SEM-Servo可用于研究疲劳裂纹在晶界、夹杂物、第二相等微观结构特征处的萌生机制，以及裂纹在不同晶体取向条件下的扩展路径与速率变化规律。该系统尤其适用于对预制缺口试样进行三点弯曲疲劳试验，实时跟踪裂纹尖端的塑性变形区演化与裂纹的稳定扩展过程。

3. 焊接接头的疲劳性能评价

焊接接头是工程结构中的薄弱环节，其疲劳性能受焊缝显微组织、热影响区、残余应力以及焊接缺陷等多种因素影响。SEM-Servo可对焊接接头进行原位三点弯曲疲劳试验，实时观察裂纹在焊缝区、热影响区及母材不同区域的萌生与扩展行为，并结合EPMA（电子探针微分析仪）对断口进行成分分析，为焊接工艺优化提供科学依据。

4. 高温环境下的原位疲劳测试

系统最高可实现800℃高温环境下的原位疲劳试验，适用于航空发动机高温合金、热结构材料等需要在服役温度下评估疲劳性能的材料研究。例如，已有研究利用SEM-Servo在973K真空环境下对Hastelloy-X高温合金进行了疲劳裂纹萌生与扩展行为的原位观测。

5. 生物医用材料的力学性能评价

SEM-Servo可用于生物医用金属材料（如医用不锈钢、钛合金、钴铬合金等）以及可降解生物镁合金的疲劳性能研究，原位观察材料在模拟生理环境条件下的微观损伤演化过程和表面腐蚀疲劳行为。

6. 先进功能材料与仿生材料研究

对于具有复杂微纳结构的先进功能材料（如金属陶瓷、仿生复合材料等），SEM-Servo可在力学加载过程中实时观察其多相界面的应力传递、裂纹偏转与桥接等微观增韧机制，为材料的微观结构设计—力学性能关联研究提供直接的原位观测手段。

7. 核电与能源装备材料

核电异材焊接接头、压力容器用钢等能源装备关键材料的疲劳裂纹扩展行为研究，可利用SEM-Servo开展原位观测实验，分析析出相、晶体取向、不同材料界面对疲劳裂纹扩展的影响规律。

五、总结

岛津SEM-Servo带扫描电镜高温原位疲劳试验机是一款以EHF-L台式电液伺服疲劳试验机为力学核心、集成高分辨率扫描电子显微镜的专业研究型设备。其核心价值在于实现了“疲劳加载过程”与“微观损伤演化观察”的同步进行，使材料疲劳研究从传统的“事后断口分析”提升至“动态过程可视化”的层次。

第5章EHF系列电液伺服疲劳试验机应用方案



豆包AI生成

径向锻造制备电动汽车电机轴的性能评价-空心轴扭转疲劳试验

1.引言

近年来，为减少温室气体排放，脱碳化趋势不断加速。汽车行业向电动汽车（EVs）的转型在实现低碳社会中发挥着重要作用。为了促进电动汽车的普及，需要提高车辆的续航里程，因此减轻车身重量成为一项开发课题。特别是，减轻轴类零件的重量是一个重要的开发方向，因为通过降低惯性力，不仅可以提升续航里程，还能改善电机的响应性能。径向锻造是一种用于制造空心轴的新型锻造技术。在通过锤头（模具）从空心轴或实心轴的径向施加力的同时，通过插入芯棒并传递内径形状，可以同时成形轴的内径和外径[1]。采用径向锻造方法制造的空心轴能够兼顾强度与轻量化，因此作为下一代轴的制造方法而备受关注。由于空心轴常用于电机轴和曲轴等部件，因此经常承受扭转载荷。除了简单的拉伸和压缩试验外，通过扭转疲劳试验进行评价也至关重要。

在前期报告[2-4]中，为了评估径向锻造过程中力学性能的变化，从实际产品中切取试样，并进行了多方面的评价。结果表明，产品在径向锻造加工区域表现出优异的特性。本研究针对三种实际产品（空心轴形状），即径向锻造件、锻件和毛坯，进行了扭转疲劳试验，并对其疲劳特性进行了评价。

2.样品信息

图1所示为试样的照片。试样带有花键。从花键的尖端到中心进行了空心处理。试样共有三种类型：径向锻造（RF）、锻造（F）和毛坯（N）。表1显示了试样的详细信息。1.2实验器皿及试剂。

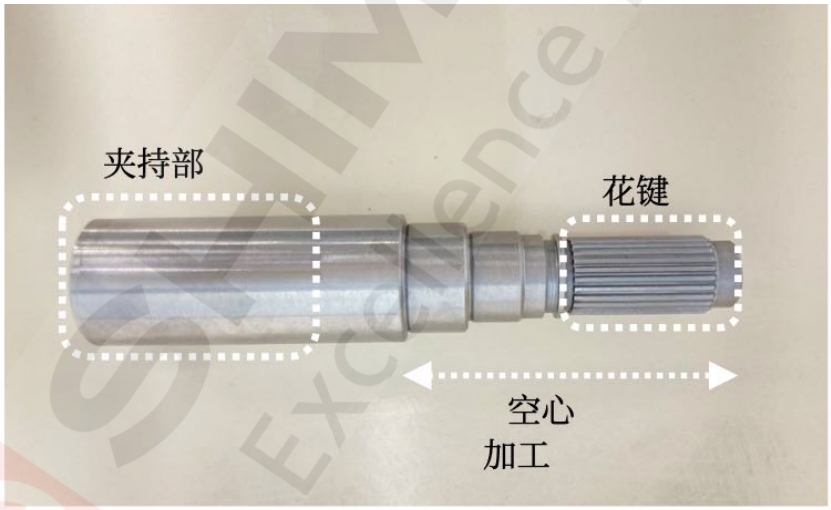


图1 试样照片

表1 试样信息

参数	参数设定
试样形状	真实产品（空心轴：见图1）
试样类型	径向锻造(RF)、锻造(F)、毛坯(N)

3.测试设备

扭转测试使用一台EHF-EV/TV轴向扭转试验机进行。表2和图2显示了设备的配置和测试结果。试样圆棒形部分（图1左侧）由用于圆形试样的液压夹头直接夹持。另一方面，花键侧通过花键配合夹具固定。该花键配合夹具加工有与花键部分的不规则形状相匹配的沟槽，通过插入试样的花键部分即可在扭转方向上

进行固定。图3展示了花键配合夹具。该试验机不仅能控制扭转，还能同时控制轴向力，测试是在轴向力方向通过位置保持来控制的条件下进行的。

表2 测试设备

参数	参数设定
测试设备	EHF-EV100kN/TV1kNm轴向扭转疲劳试验机
夹具	用于圆形试样的液压夹头夹具（花键配合夹具）
软件	Windows®Softwarefor4830

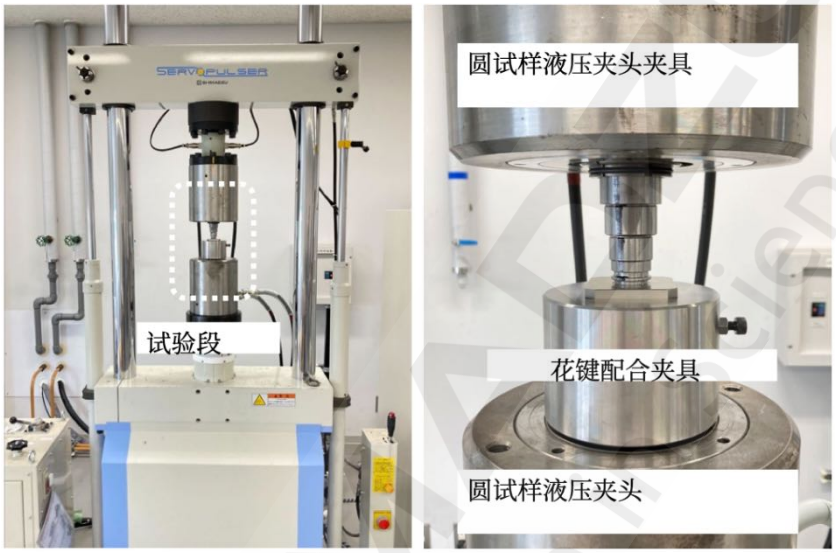


图2 试验（左：整个试验机，右：试验段）



图3 花键配合夹具

4.静态试验

为确定扭转疲劳试验的扭矩水平，首先进行了静态扭转试验。静态扭转试验的测试条件如表3所示。扭矩-角度图的示例如图4所示。径向锻造（RF）与锻造（F）的扭矩-角度图趋势相似，但毛坯（N）的最大扭矩、屈服点扭矩等均小于径向锻造（RF）和锻造（F）的对应值，且其趋势也不同。表4显示了静态扭转试

验的结果。基于这些结果，扭转疲劳试验的扭矩条件设定为各屈服点扭矩的约85%、75%、65%和55%。

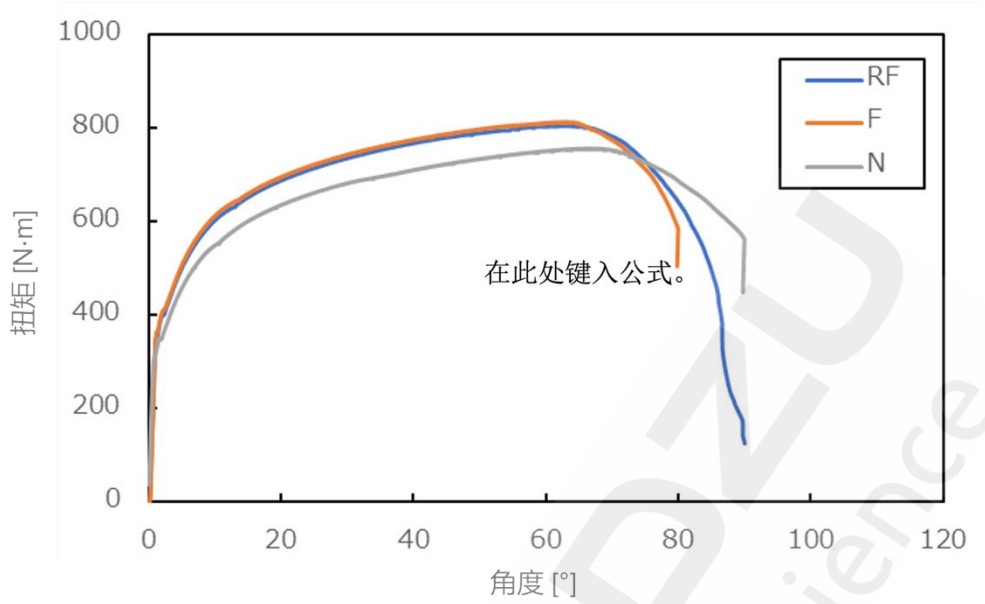


图4 图扭矩-角度图(整体测试)

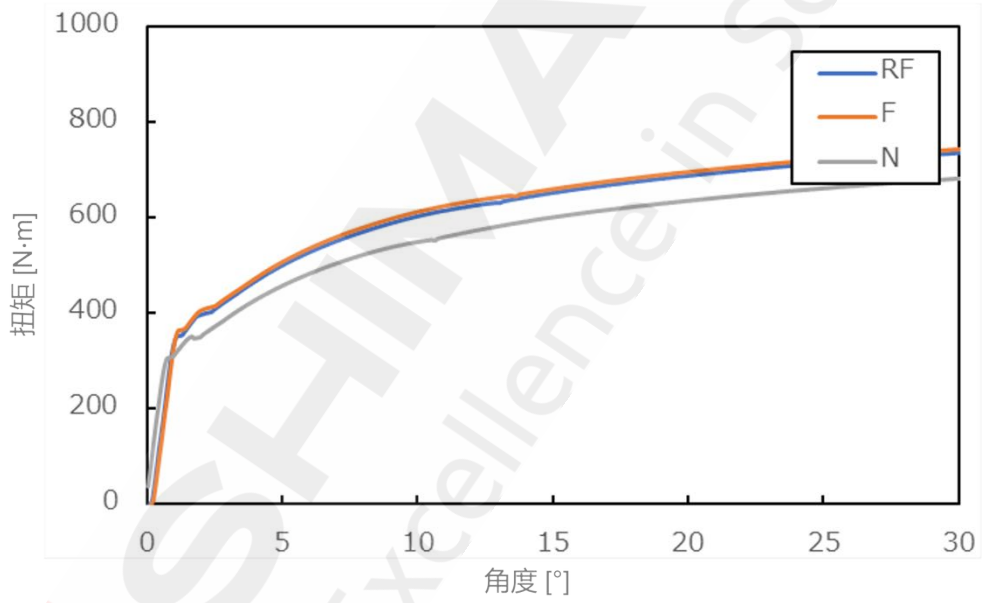


图5 图扭矩-角度图(初始测试)

表3 静态扭转试验结果

试样类型	最大扭矩[N·m]	屈服点[N·m]
RF	802.5	352.5
F	801.5	351.1
N	751.5	310.0

5.扭转疲劳试验

表5显示了扭转疲劳试验条件。最大载荷循环为100万次，试验在达到100万次后即停止，即使载荷未断裂。图5显示了S-N图。在200N·m下，径向锻造（RF）和锻造（F）在100万次循环后均未断裂。图5显示，锻造（F）与毛坯（N）的疲劳强度几乎相等。扭矩在270N·m或以上的径向锻造（RF）的疲劳强度优于锻造（F）和毛坯（N），但在230N·m或以下时，其疲劳强度在S-N图上几乎相当。

表4 测试设备

参数	参数设定
控制TD	扭矩控制
测试频率[Hz]	8Hz
最大负载扭矩[N·m]	300,270,230,200(RF,F) 290,265,230,200(N)
测试数量	n=2 (n=1，对应最大负载扭矩为200N·m
应力比R	-1
最大循环次数[N]	1000000



图6 S-N图

6.结论

使用复合轴向力扭转试验机，对经过径向锻造和锻造处理的轴以及毛坯进行了静态扭转和扭转疲劳试验。研究发现，与毛坯相比，径向锻造和锻造产品的最大扭矩和屈服扭矩均得到提升；扭转疲劳试验结果表明，径向锻造产品的耐久性等同于或优于锻造产品。

胶粘剂的剪切疲劳测试

1.引言

胶粘剂常用于连接物体。由于其几乎可用于任何材料，因此能够连接异种材料。它还具有不改变所粘接材料特性或形状的优点。正因如此，胶粘剂被广泛应用于各行各业，例如包括汽车和航空航天领域在内的运输机械、电气电子设备以及土木工程。特别是在运输车辆领域，用于强化或替代点焊（焊接胶接）的应用日益增多，因此，评估这些连接的能力对于确保其长期可靠性是必要的。本文描述了根据JISK6864(ISO9664)标准，对四种类型胶粘剂进行的剪切疲劳测试。试验中使用了ServopulserEHF-L台式动态疲劳试验系统。

2.试件信息与测量系统

在这些试验中，使用了来自Three Bond公司（下文简称TB）的四种类型的胶粘剂。试件如图1所示。试件信息如表1所示，每种胶粘剂的固化条件如表2所示。SUS304不锈钢被用作被粘接材料。试验使用ServopulserEHF-L台式动态疲劳试验系统进行。试验设备配置如表3所示，试验设置如图2所示。

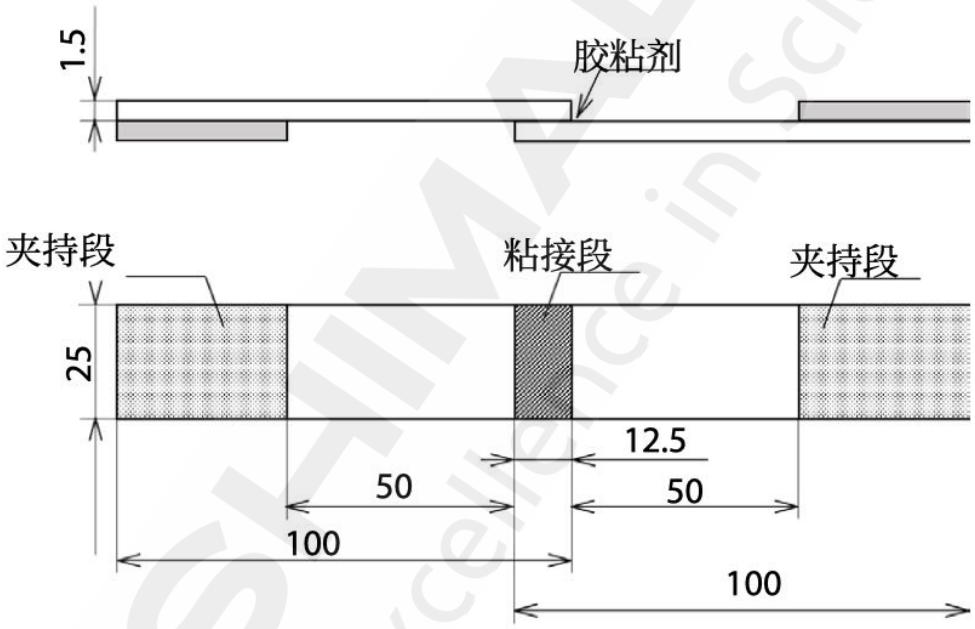


图1 试样形状

表1 试样信息

参数	参数设定
粘合类型	TB1160（单组分室温固化非硅酮密封胶固化非硅酮密封胶 TB2049/2149（双组分室温固化环氧复合树脂环氧固化剂树脂 TB2237J(单组分热固化型环氧复合树脂) TB3953(双组分室温固化弹性胶黏剂)
被粘接材料	SUS304
粘接区域	25×12.5
试样尺寸	W25×t6×L187.5mm（仅适用于TB1160，厚度7mm）

表2 固化条件

参数	参数设定
TB1160	（23°C，50%RH）×168h
TB2049/2149	25°C×24h
TB2237J	120°C×60min
TB3953	（23°C，50%RH）×168h

表3 设备配置

参数	参数设定
疲劳试验机	EHF-L
载荷传感器	10kN
夹具	手动定位型平板夹具
控制器	4830控制器
软件	Windows®SoftwareforServo4830

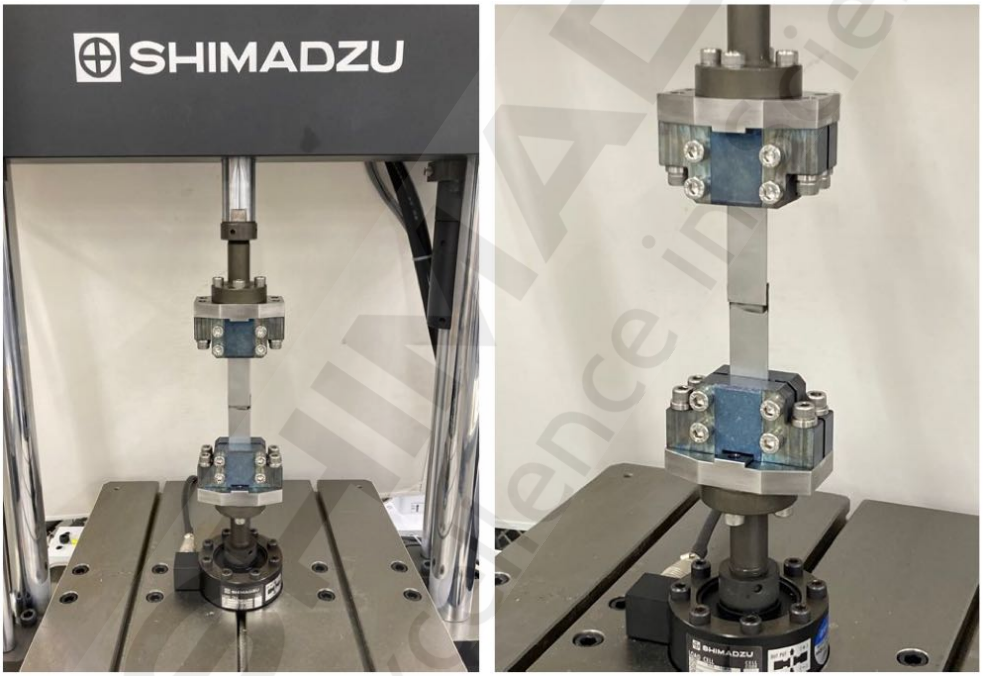


图2 测试仪器

3.静态剪切试验结果

为设定疲劳试验的条件，进行了静态剪切试验。静态剪切试验条件如表4所示。各试件的剪切应力-位移曲线如图3所示，各试件剪切强度试验得到的剪切强度汇总于表5中。

表4 测试条件

参数	参数设定
测试速度	1.2mm/min
测试数量	n=3

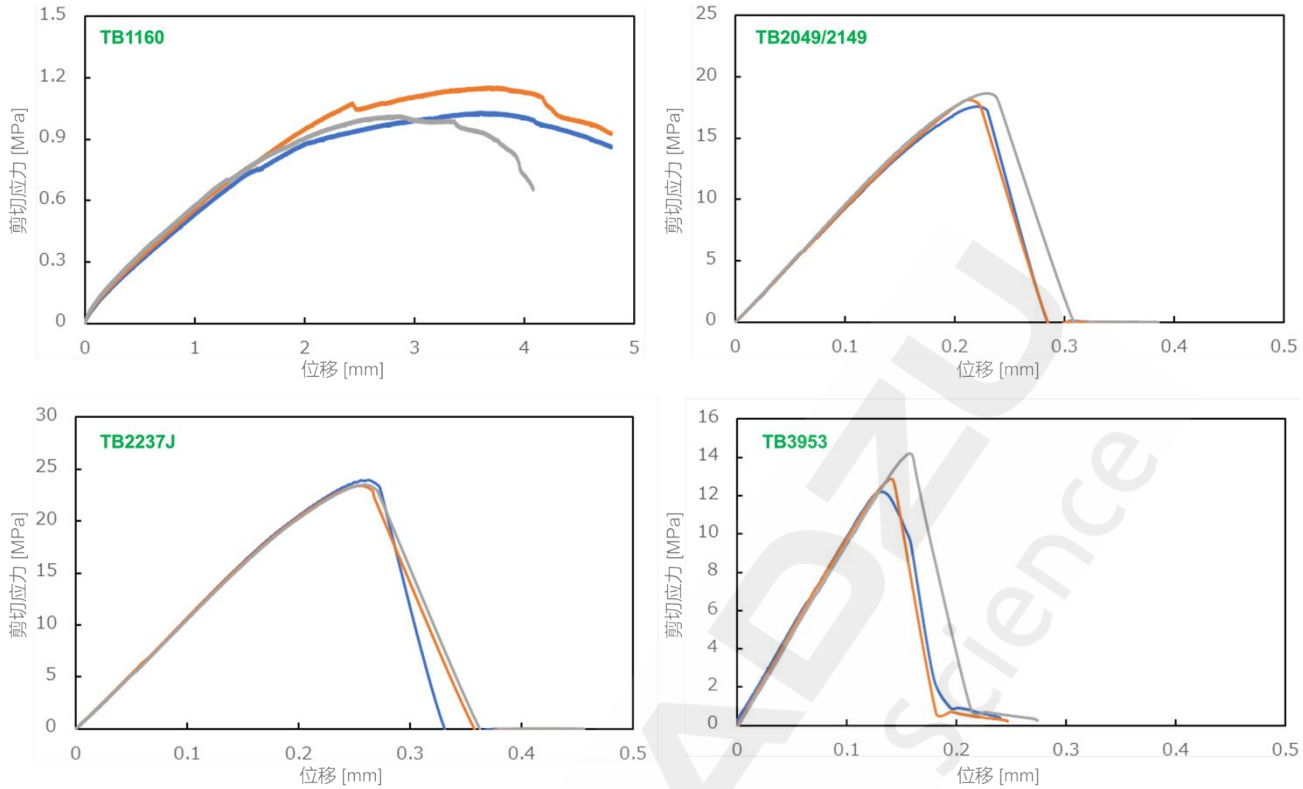


图3 剪切应力-位移曲线

表5 静态剪切试验结果

试样	平均剪切强度[MPa]	标准差	离散系数[%]
TB1160	1.070	0.077	7.17
TB2049/2149	18.14	0.537	2.96
TB2237J	23.64	0.286	1.21
TB3953	13.11	1.109	7.78

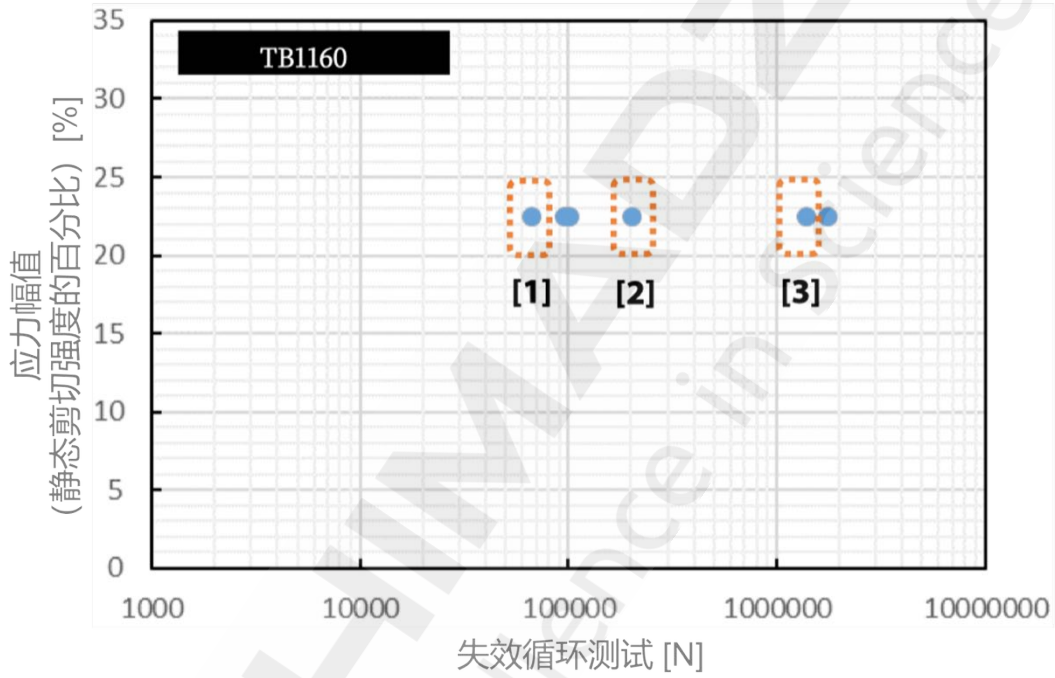
4.剪切疲劳试验结果

通常，疲劳试验中的平均应力设定为0.35τ_R，其中τ_R为根据JISK6864测得的静态剪切强度。相对于该平均应力值的应力幅被设定为疲劳试验条件。在本研究中，设定静态剪切强度的5%至30%作为剪切应力的应力幅。除非另有规定，试验频率需为30Hz。疲劳试验条件汇总于表6中。

使用试件TB1160和TB3953，在应力幅条件下产生了较大的疲劳寿命差异。图4分别展示了TB1160和TB3953在应力幅为22.5%和25%下的疲劳试验结果。同时展示了相应试验结果的破坏面照片。对于TB1160，当失效循环次数较低时，出现了界面失效和内聚失效，如照片[1]和[2]所示。然而，当失效循环次数较高时，仅发生内聚失效，如照片[3]所示。通常，当发生界面失效时，疲劳破坏的发生会早于胶粘剂的实际疲劳寿命。因此，要评估胶粘剂的纯疲劳寿命，实现内聚失效是理想的。然而，界面失效的发生取决于胶粘剂所粘附物体的表面状况，因此该物体也被包含在此次评估中。在这些试验结果中，存在许多界面失效和内聚失效的情况，故试验结果根据破坏模式进行了总结。对于TB3953，所有破坏均为界面失效和内聚失效。但失效循环次数越高，胶粘剂在整个破坏面上铺展得越薄。对于TB3953，中心三点被总结为试验结果。每个试件的S-N曲线如图5所示。

表6 疲劳试验条件

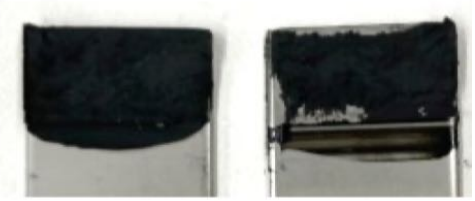
参数	参数设定
平均应力	35%ofτ_R
应力幅	τ_R的比例构成如下 TB1160(20,22.5,25,27.5,30%) TB2049/2149(2.5、5、10、15、20、25、30%) TB2237J(5,10,15,20,25,30%) TB3953(20,25,30%)
测试频率	30Hz
测试数量	n=3



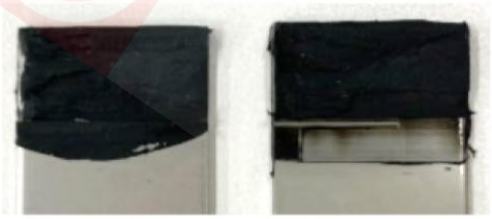
[1] 界面失效和内聚失效

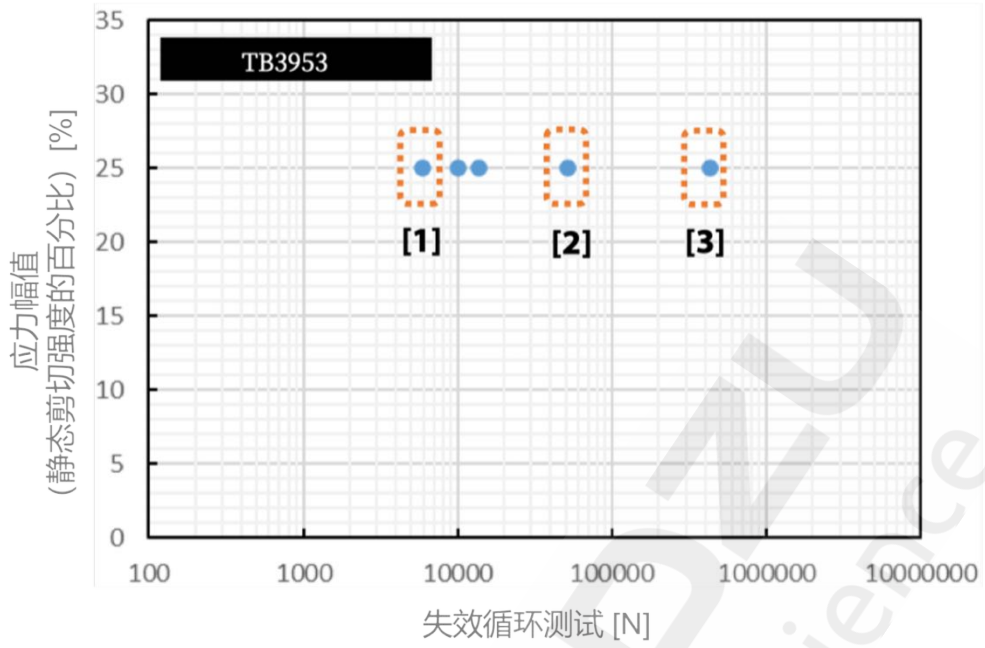


[2] 界面失效和内聚失效



[3] 内聚失效





[1] 界面失效与内聚失效

[2] 界面失效与内聚失效



[3] 界面失效与内聚失效



图4 TB1160与TB3953疲劳试验结果示例

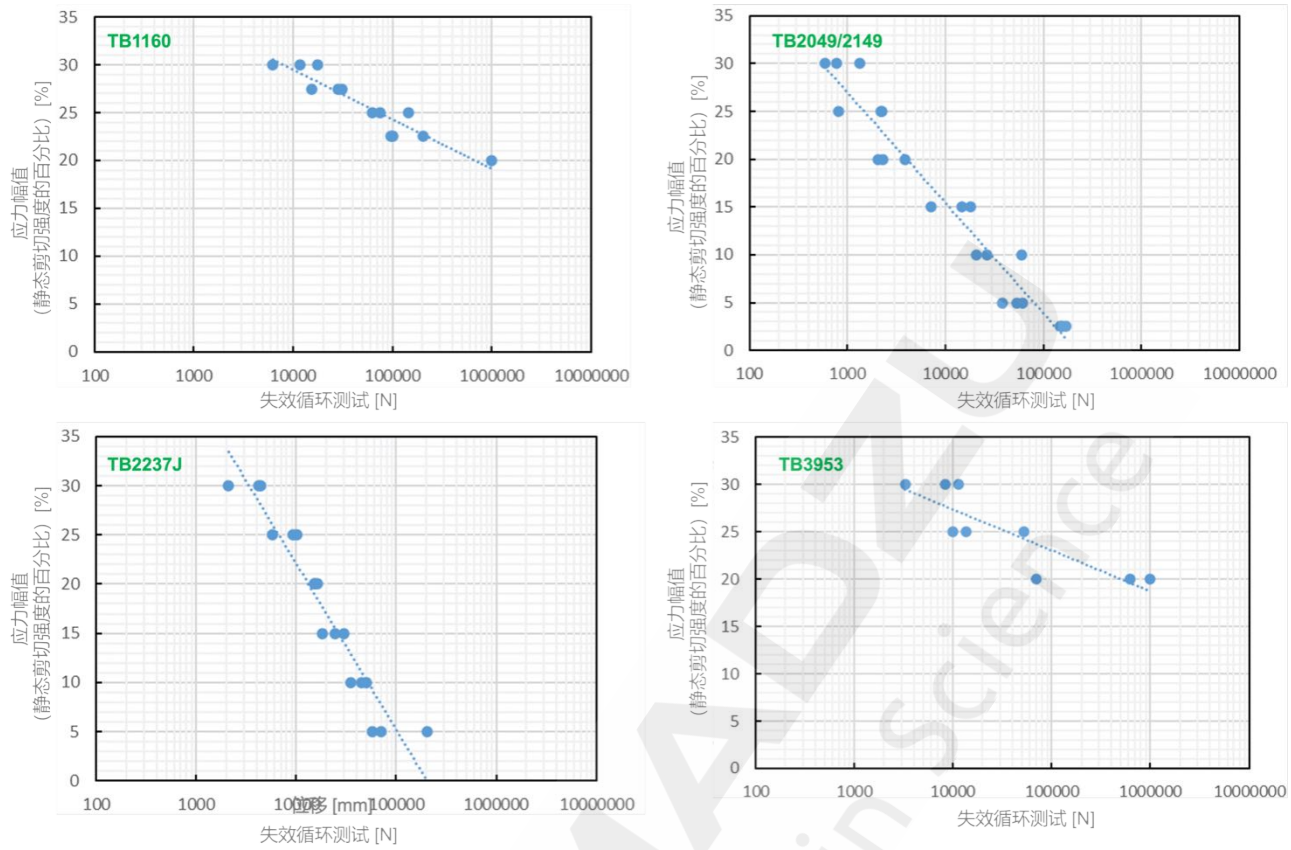


图5 S-N图

5.结论

参照JISK6864标准，对四种类型的胶粘剂进行了剪切疲劳测试。使用本设备配置，可根据JISK6864对胶粘剂进行剪切疲劳测试。

电动汽车电机外壳的耐久试验与动态三维 DIC 分析

1.引言

近年来，为减少温室气体排放，脱碳趋势日益加速。特别是在汽车工业中，向电动汽车（EVs）的转型对实现脱碳社会正发挥着重要作用。为减轻电动汽车的重量，主要的汽车部件采用轻质耐用的铝压铸件制造。压铸用铝合金粘度低，易产生内部缺陷，因此设计时需要考虑开裂问题。这些部件为进一步减重而被铸造成更薄、更复杂的形状，并在实际行驶中承受持续高速旋转和振动。因此，需要具备耐久性，观察其动态变形状态至关重要。

本文介绍了一个用于电动汽车的电机外壳（电机壳体）的耐久试验和动态三维DIC分析*1的示例。

*1什么是DIC分析?

DIC分析是一种通过比较物体表面变形前后的随机图案，以确定该图案移动程度的方法。本例中，使用喷涂在试样表面形成了随机图案。

2.样品信息

图1展示了试样的照片，表1则列出了试样信息。该试样由滨松次世代汽车中心、滨松地域创新推进机构捐赠。为进行DIC分析，我们在受载部件的整个表面喷涂了随机图案，并在其背面粘贴了应变片，以对比应变值。

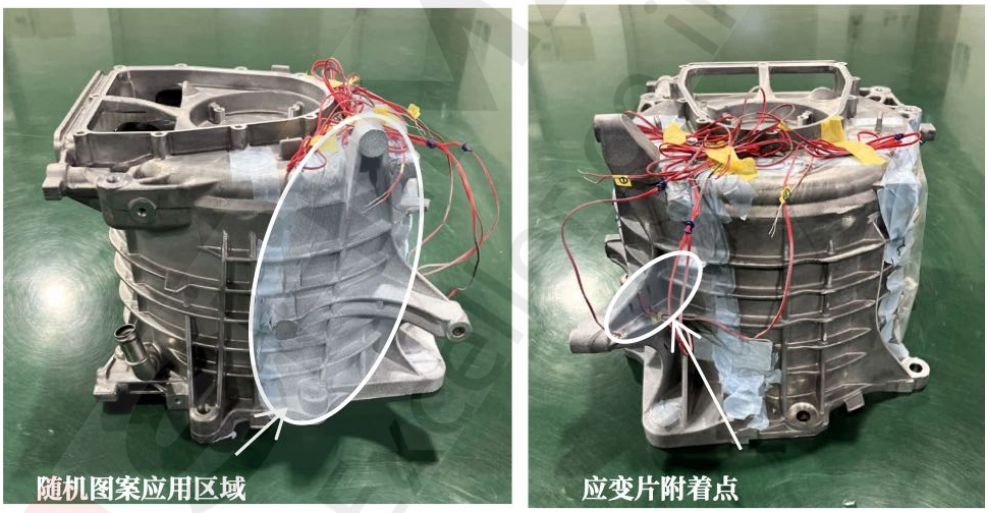


图1 试样照片（左）正面;（右）侧面

表1 试样信息

参数	参数设定
样品零件	电动汽车电机外壳
材料	铝合金
加工方法	铝压铸

3.测试设备

耐久试验使用EHF-UV疲劳试验机（图2）对试样进行测试，该试验机机架下部配备有T型槽平台及一个上置作动器。EHF-UV的宽阔测试空间适用于对各种试样、实物及结构进行动态评估。试验机和测量系统的配置分别如表2和表3所示。我们使用两台DIC分析相机进行三维分析。

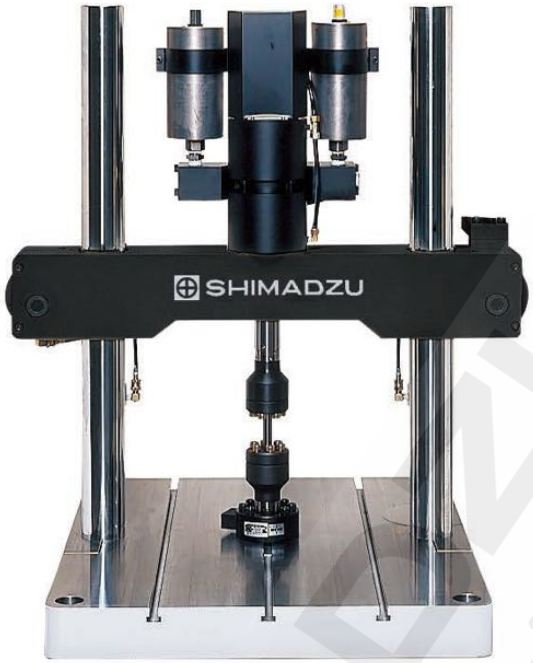


图2 EHF-UV疲劳试验机

表2 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	EHF-UV020KNA-040
夹具	专用夹具
载荷传感器	10kN
软件	Windows®Softwarefor4830

表3 测量系统

参数	参数设定
DIC分析软件	VIC-3D (使用Vic-snap10拍摄)
DIC分析相机	boA5328-100cc（像素5328×4608） 由BASLER×2PC提供
应变片	KFGS-5-120-C1-11L1M2R
电桥盒	DBT-120A-1用于120Ω通道
动态应变放大器	DC-97A

4.耐久试验

耐久试验如图3所示。在耐久试验中，将载荷传感器和万向节安装到试验机上部执行器的活塞顶端，并连接到试样的凸起上，以垂直向试样凸起施加载荷。试样的下部使用阶梯夹具和连接到试验机机身的T型槽面板上的T型螺母进行螺栓固定。试验条件如表4所示。

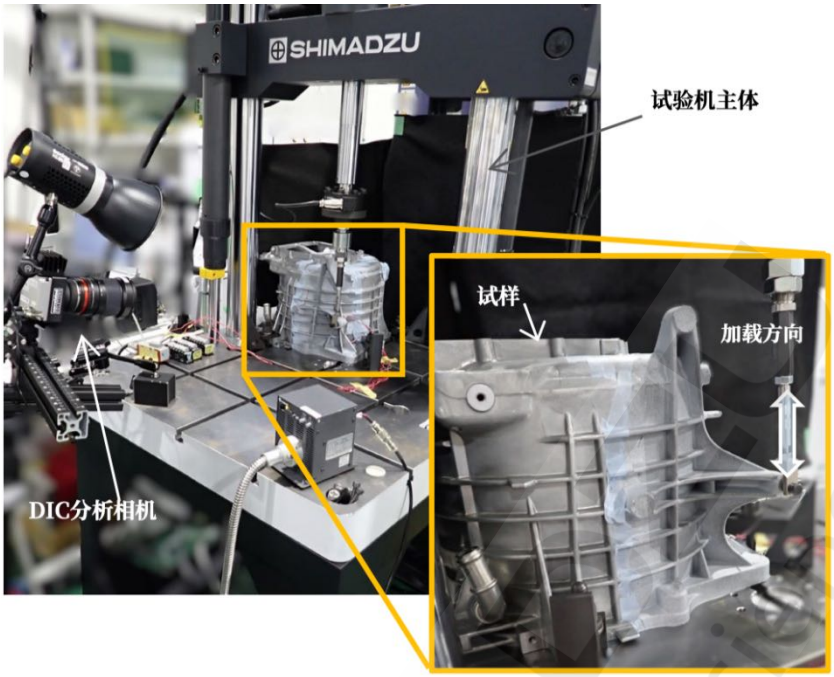


图3 耐久试验

表4 测量条件

参数	参数设定
测试波形	Haver-sine
控制模式	试验力
最大试验力	1000N（从试验机视角看的拉伸方向）
最小试验力	0N
测试频率	0.5Hz

5.试验机作动器行程与分析计算位移比较

将试验机测量的行程值与DIC分析计算的垂直位移值(Y)进行了比较。图4展示了位移彩色图。位移值是在图4所示的两个点-R0点和R1点测量的。

在图4中，左侧显示的是最小载荷(0N)，右侧显示的是最大载荷(1000N)。比较左右两侧可以看出，在最小载荷下，整个区域的变形较小；而在最大载荷下，变形分布呈现出向凸起尖端方向变形较大的趋势。

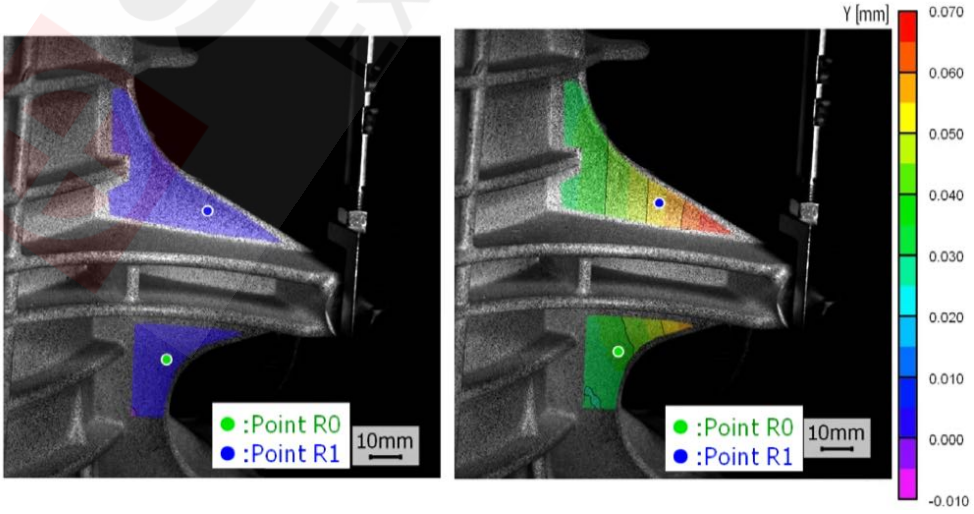


图4 最小载荷下的垂直位移图（左）；最大载荷下的垂直位移图（右）

图5和图6展示了位移-图像帧号图与测试力-图像帧号图。图像帧率为5fps，即每帧0.2秒。位移-图像帧号图与测试力-图像帧号图的横轴具有相同的尺度。下方图表的横轴显示了相同的条件。可以看出，通过对R0点与R1点进行DIC分析计算出的位移值(R0点DIC位移与R1)与测试力（力）和行程在相位上是同步的，没有延迟。

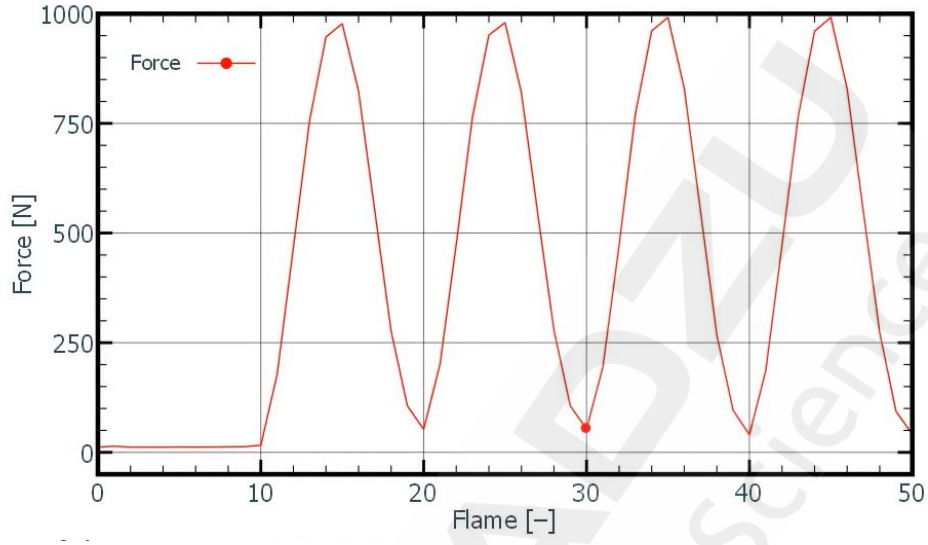


图5 测试力-图像帧号图

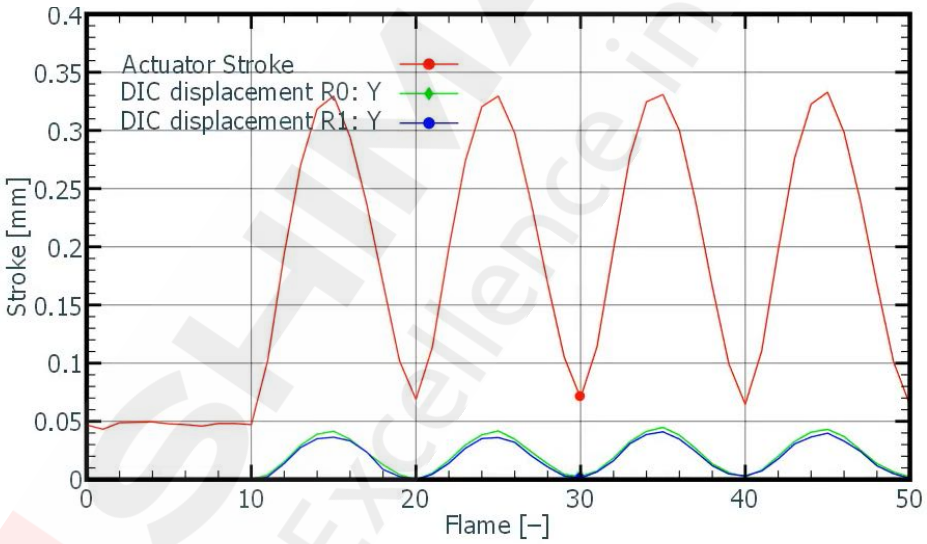


图6 行程-图像帧号图

6.应变片结果与解析应变的对比

将应变片测得的应变值与DIC分析计算出的纵向应变值(eyy)进行了比较。图7显示了纵向应变的彩色云图。应变片贴在图6所示PointR2位置的背面，即Straingage4处。在图7右侧的最大载荷时，突起部上部产生负（压缩）方向的应变，而下部则产生正（拉伸）方向的应变，上下变形方向发生了反转。

图8和图9展示了应变-图像帧号图和试验力-图像帧号图。请注意，测试力与每个应变值的相位相差180度。可以看出，无论是应变还是位移，都没有延迟。通过比较测量同一点应变的R2点与应变片4，我们可以看到两者的相位重叠，且通过DIC分析获得的应变值接近由应变片测量的数值。利用DIC分析，无需使用多个应变片即可在任意位置估算应变值。

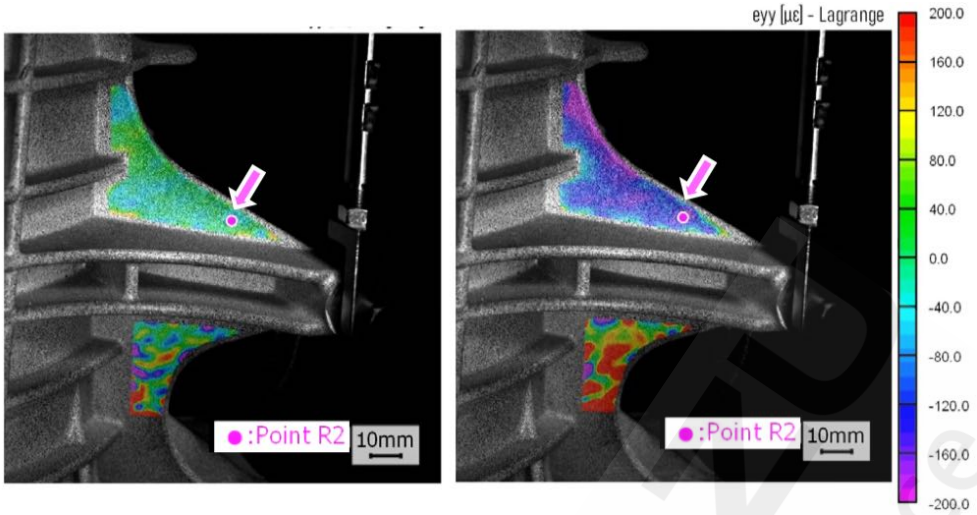


图7 纵向应变彩色映射图（左：最小载荷加载，右：最大载荷加载）

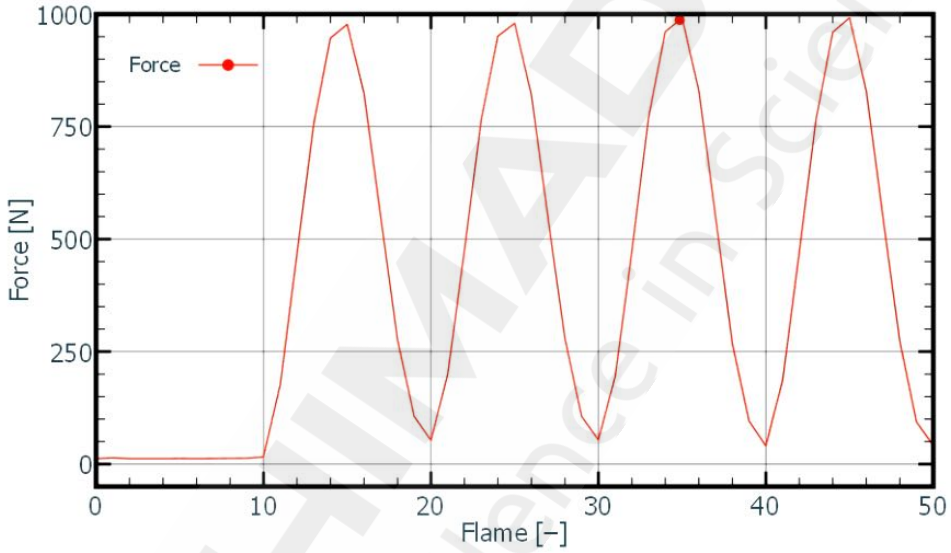


图8 测试力-图像帧号图

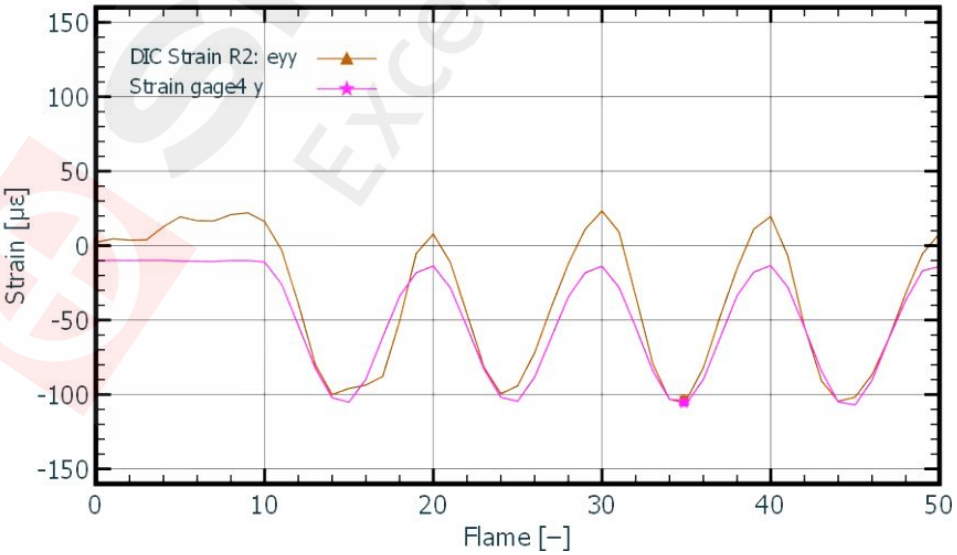


图9 应变-图像帧号图

图10显示了横向应变值（exx）的彩色映射。可以看出，左侧最小载荷与右侧最大载荷之间的分布变化很小。

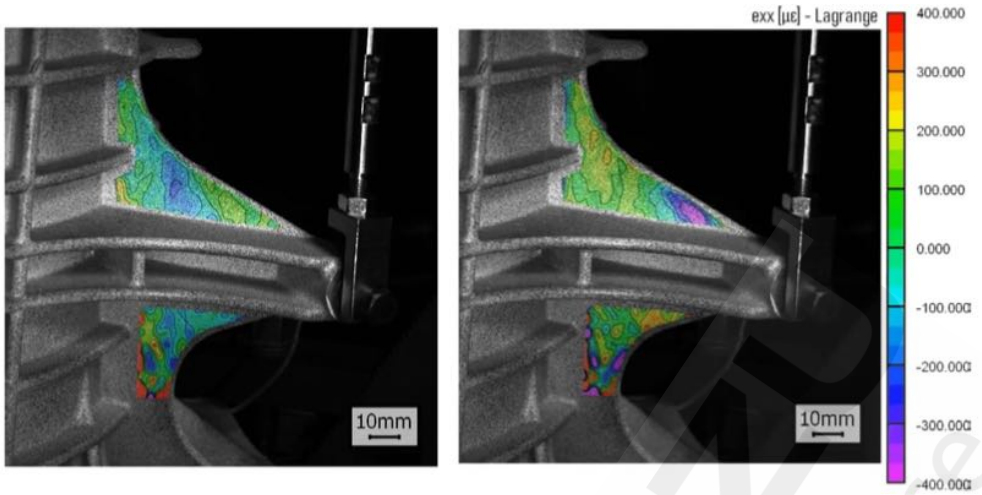


图10 横向应变彩色映射（左：最小载荷加载，右：最大载荷加载）

7.主应变矢量显示

对通过DIC分析计算得出的主应变方向应变值(e1)进行了彩色映射和矢量显示。结果如图11所示。请注意，虽然载荷是垂直施加在凸起上，但主应变从底部到顶部呈逆时针旋转。这是因为试样处于悬臂状态，并承受弯矩作用。

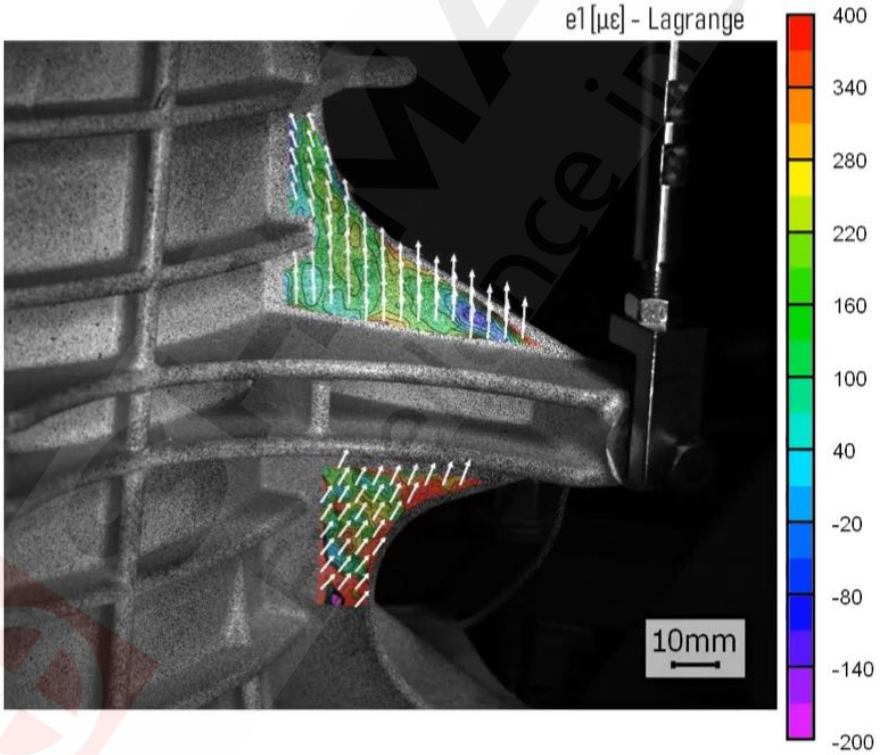


图11 主应变彩色映射与矢量显示

8.结论

使用疲劳试验机对电动汽车电机外壳进行了耐久试验，并通过三维DIC分析进行了评估。通过DIC分析计算的位移和应变，与试验机的行程和应变片结果进行了比较，发现测量结果是同相的。在DIC分析中发现，可以在任何指定点计算应变值，且所得数值与同一点处应变片测得的值接近。还可以创建主应变方向应变值的彩色映射，并显示主应变方向的矢量。利用此功能，可以观察到施加在试样上的弯矩。在使用疲劳试验

机进行的耐久试验中，动态三维DIC分析能够如实分析应变分布。这有望为未来电动汽车（EVs）的开发做出贡献。

致谢：滨松地区滨松创新机构的下一代汽车中心为本应用开发提供了试件，对此表示由衷的感谢。

SHIMADZU
Excellence in Science

精确测量垫圈压缩疲劳试验中的微位移

1.引言

垫圈是一种密封材料，用于防止金属管道内部气体和液体的泄漏，并阻止外部异物进入。它们广泛应用于汽车发动机、化工厂和发电厂等各种场合。以汽车发动机为例，运行过程中产生的燃烧气体压力会反复作用在垫片上。因此，耐内压性能至关重要，这也是垫圈需要通过压缩试验来评估的原因。汽车用垫圈的厚度通常为1–1.5mm，在压缩此类样品时，预期的位移量仅为数微米。当压缩试验中样品的位移很小时，不宜将试验机的作动器行程位移直接当作样品的位移来评估。这是因为作动器的行程位移包含了载荷传感器和试验夹具的变形量。本文通过在动态及疲劳试验机（伺服脉冲器）上安装可测量微小位移的压缩板位移测量装置，对垫圈进行了压缩疲劳试验。该装置测得的位移数据约为作动器行程位移的三分之一，从而能够更精确地测量样品的位移。

2.测量设备

测量使用了动态疲劳试验机（伺服脉冲器EHF）。将包含Φ50mm压缩板（垫片）和垫圈样品的试件置于Φ200mm球面座压缩板之间。球面座压缩板能够调整压缩板表面以匹配试件上下表面的平行度，从而对试件施加均匀载荷。此外，采用压缩板位移测量装置以更精确地测量试件的位移。由于作动器行程位移包含了载荷传感器、作动器、试验夹具等的变形量，因此不适用于此类微小位移的测量。在本试验中，位移计安装于压缩板左右两侧的两个位置，通过取平均值来测量压缩板之间距离的变化。这样，即使压缩板相对于试件发生倾斜，也能够测量压缩板中心（即试件中心）的位移。试验设备列于表1，并显示在图1的照片中。

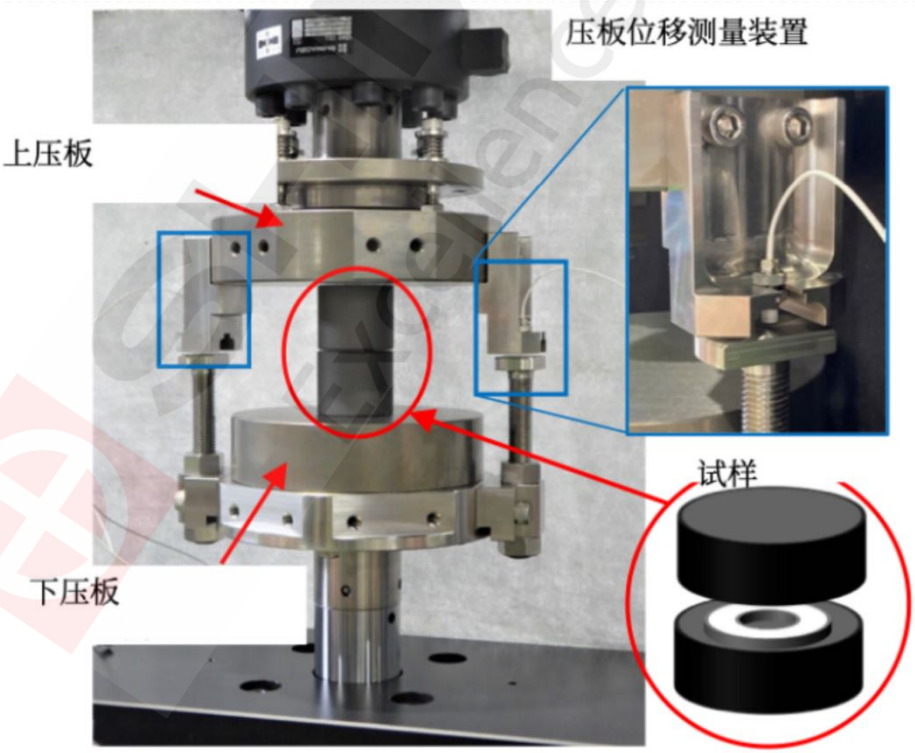


图1 测试设备

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	EHF-EV100k1A
载荷传感器	100kN
压缩版	Φ200毫米（上） Φ200毫米（下）
作动器行程	25mm
压缩版测量装置	2mm（全行程）

3.测试条件

对试样反复施加力，并比较行程与位移计读数。表2显示了测量条件，图2则显示了第1000循环的力波形。

表2 测试条件

参数	参数设定
测试波形	正弦波
控制模式	试验力
最大试验力	1000N
最小试验力	100N
测试频率	10Hz

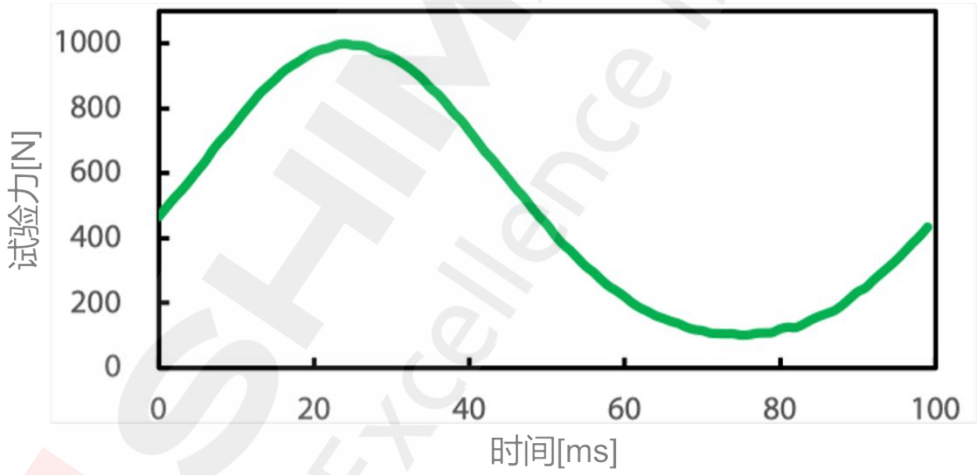


图2 试验力-测试时间图

4.测量结果

图3显示了第1000循环时的作动器行程和位移计波形，表3则显示了各波形的峰值。测试确认，在最大值处，行程大约是位移计读数的三倍。这是因为位移计仅测量压缩板之间距离的变化，而行程则测量夹具等结构的变形。因此，两者的测量点不同。测试表明，在测量几个μm到几十个μm的位移时，位移计比作动器行程能更准确地测量试样的变形。

表3 行程和位移计波形的峰值

	最小值[μm]	最大值[μm]
作动器行程	12.3	32.1
压缩版位移	7.4	12.4

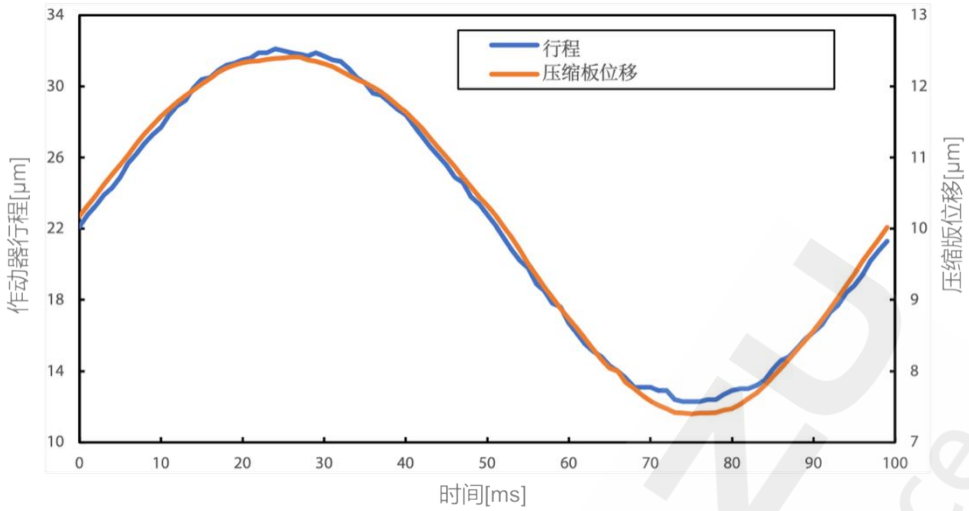


图3 位移-时间图

5.结论

图本文使用压板位移测量装置进行垫圈的压缩疲劳试验，以比较其行程波形与位移计波形。由于行程包含夹具等部件的变形，其位移值约为位移计读数的三倍。另一方面，加压板位移测量装置能够比作动器行程更精确地测量微位移，它不包含夹具等部件的变形，因此是测量垫圈性能的理想设备。

硬质塑料疲劳试验（JISK7118）

1.引言

塑料材料因其质轻、成本低、优异的成型性和着色性，广泛应用于PET瓶等日用品中。近年来，除了聚氯乙烯（PVC）和聚乙烯（PE）等通用塑料外，像聚碳酸酯（PC）和聚酰胺（PA）这样耐热性和机械强度得到提升的工程塑料也备受关注。这些材料被用作汽车、飞机和管道系统中的结构材料与机械部件，并且在要求能在特别恶劣环境下保持性能的应用中，其使用也日益增多。

在材料失效的过程中，即使是像振动这样单次加载不会破坏材料的微小载荷，也可能因反复作用而导致失效。这种现象被称为“疲劳”。由于用作结构材料的塑料材料预期会长期承受重复载荷，因此评估其疲劳特性对产品安全性至关重要。

本文介绍了按照JISK7118标准进行塑料疲劳试验的一个示例。

2.测量设备

表1展示了仪器配置。本次测试使用了台式动态疲劳试验系统ServopulserEHF-L（见图1）。表2显示了试样信息。测试中使用了硬质聚氯乙烯和聚碳酸酯。众所周知，塑料材料的机械性能与温度相关，在疲劳试验期间，温度可能因试样产生的热量而升高。这种现象取决于材料特性，并且随着频率和施加应力的增加，往往会变得更加明显。因此，在本试验中，使用辐射温度计测量了试样的表面温度，并将疲劳试验的频率设置为使试样温度不超过30°C。为了进行温度测量，在试样的中心部位涂覆了黑体涂料。此外，本次测量使用了操作性更佳的新型夹具。



图1 测试设备（左：动态疲劳试验机ServopulseEHF-L；右：测试视图）

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	ServopulserEHF-LV20k1A
载荷传感器	5kN
作动器行程	25mm
控制单元	ServoController4830控制器
测试夹具	防移位螺旋夹具（新型）
温度计	辐射温度计FT-H10(基恩士)

表2 测试样品

参数	参数设定
材料属性	硬质聚氯乙烯（PVC） 聚碳酸酯（PC）
样品形状加工标准	ISO527-2-1A(JISK7161-2-1A)
平行段尺寸	W10×t4×L80mm

3.静态试验结果

为设定疲劳试验条件，进行了静态拉伸试验。表3显示了静态拉伸试验的试验条件。图2显示了每个试样的应力-应变图。表4显示了根据静态试验结果得出的每个试样的极限拉伸强度。

表3 测试条件

参数	参数设定
测试速度	50mm/min
测试数量	n=3

表4 静态拉伸测试结果

样品	抗拉强度[MPa]	标准差	离散系数
硬质PVC	74.70	0.059	0.001
PC	64.05	0.118	0.002

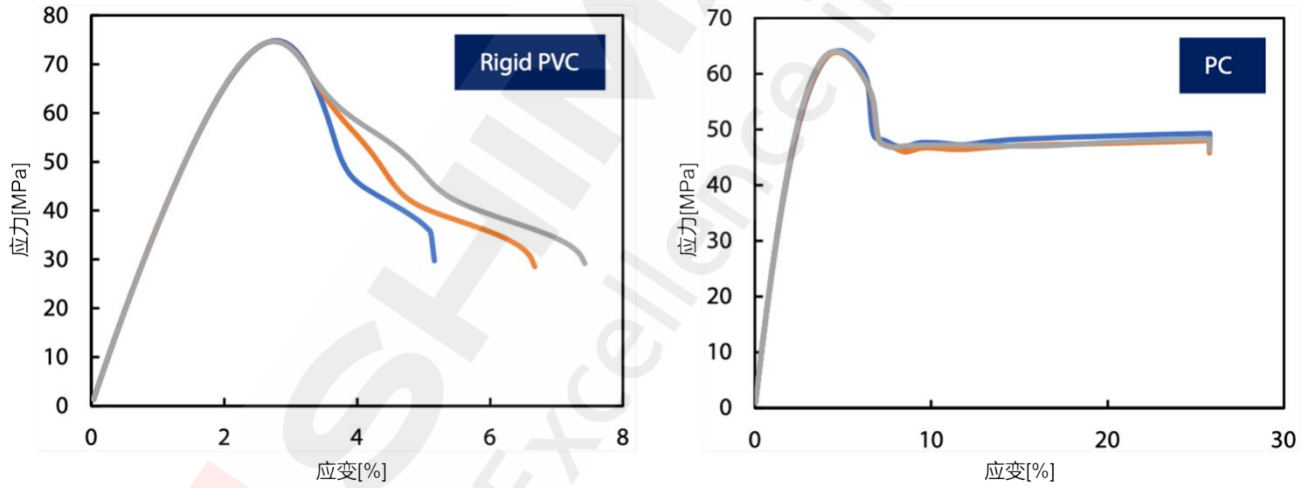


图2 硬质PVC和PC应力-应变曲线

4.疲劳试验结果

表5展示了疲劳试验条件。在疲劳试验中，针对最大加载应力设定了六个条件：为静态试验结果中极限拉伸强度的20%至70%。图3显示了最大加载应力与试样温度之间的关系。本次试验确定的频率保证了表面温度在30°C或以下。尽管随着最大加载应力的增加，试样表面温度也随之升高，但从图4可以确认，所有试验均在30°C或以下的条件下进行。图4显示了最大加载应力与失效循环次数（S-N图）之间的关系。本文中获取了两种材料的S-N图，从而能够评估它们的疲劳性能。

表5 疲劳试验条件

参数	参数设定
最大加载应力	静态极限拉伸强度的百分比 PVC（20,30,40,50,60%）; PC（20,30,40,50,60,70%）
应力比	0.1
最大循环次数	1×10^6
测试频率	5Hz
试样数量	n=2
测试温度	23℃

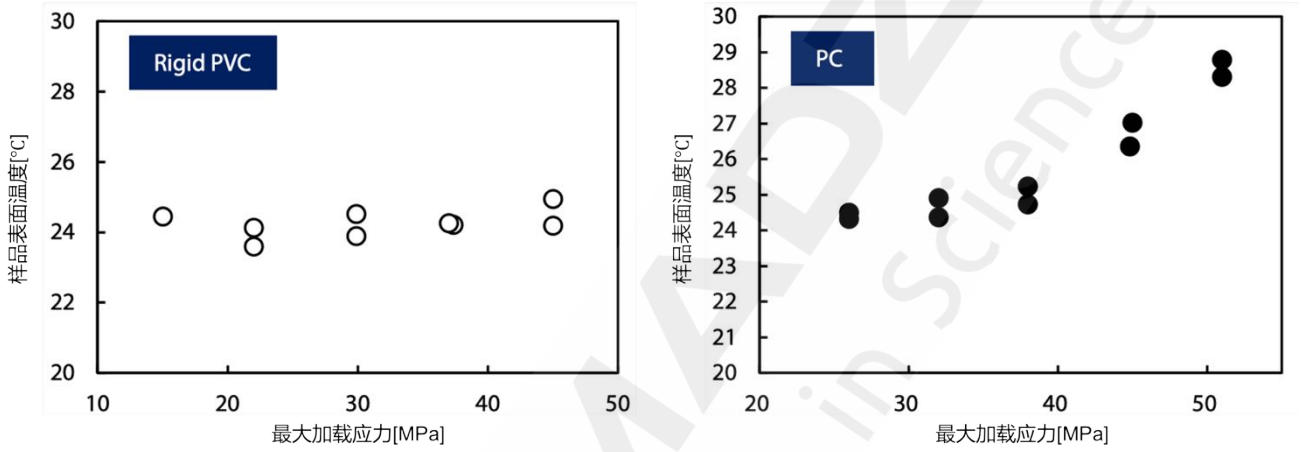


图3 最大加载应力-样品表面温度图

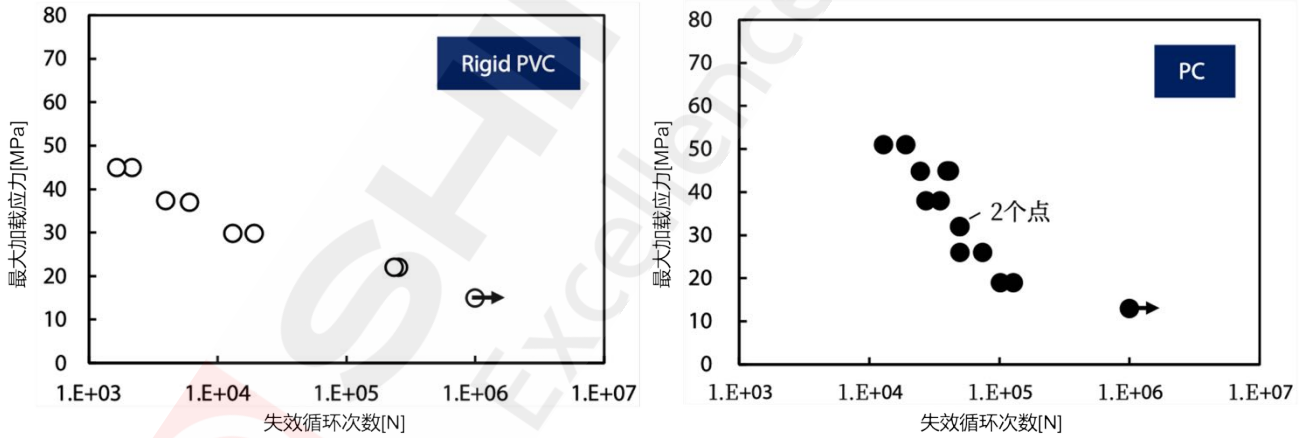


图4 S-N图

5.结论

在这些试验中，硬质聚氯乙烯PVC和聚碳酸酯PC根据JISK7118标准，使用动态疲劳试验机ServopulserEHF-L进行了疲劳试验。试样的表面温度使用辐射温度计进行测量。如上所述，此仪器配置可用于塑料材料的疲劳特性表征。

碳纤维增强热塑性塑料疲劳测试

1.引言

碳纤维增强塑料（CFRP）比金属材料具有更高的比强度和比刚度，有望为减轻运输设备的重量做出贡献。另一方面，它也面临着制造、加工和回收工艺复杂以及成本高昂等问题，这限制了其在飞机和特定类型运输车辆上的应用。碳纤维增强热塑性塑料（CFRTP）作为一种有望解决这些问题的材料而备受关注。作为CFRTP基材的热塑性树脂在加热时会软化，冷却时会硬化，因此适用于注塑成型和模压成型等大规模生产。由于其高成型性，它具备出色的成本效益和可回收性，有望应用于量产汽车。然而，当它被用作汽车的结构材料时，通常会长期承受重复载荷，这可能导致疲劳破坏。特别是，运输设备中的疲劳破坏有引发严重事故的风险，因此需要通过疲劳试验进行适当的评估，以确保产品的可靠性。

在对复合材料的测试中，试样容易因缺陷或缺口而发生失效，且使用传统锉刀齿夹具时，破坏往往出现在夹持部位。本文使用新开发的复合材料专用夹持齿对碳纤维增强热塑性塑料进行了疲劳试验。新开发的夹持齿能够减少对试样的损伤，并降低在夹持处发生失效的风险。

2.样品信息

测量中使用的是随机取向CFRTP。随机取向CFRTP是一种碳纤维增强复合材料，其制作方法是：将单向（UD）预浸带（由浸渍了热塑性树脂的碳纤维束构成）切割成固定长度的小段，然后将其随机取向（图1）。在这些试验中，将基于热塑性环氧树脂、宽度为6至8毫米的UD预浸带切割成26毫米长的小段，然后通过压制形成厚度为3毫米的材料板。再将此板材切割成长250毫米、宽25毫米的小片，以提供试验试样。

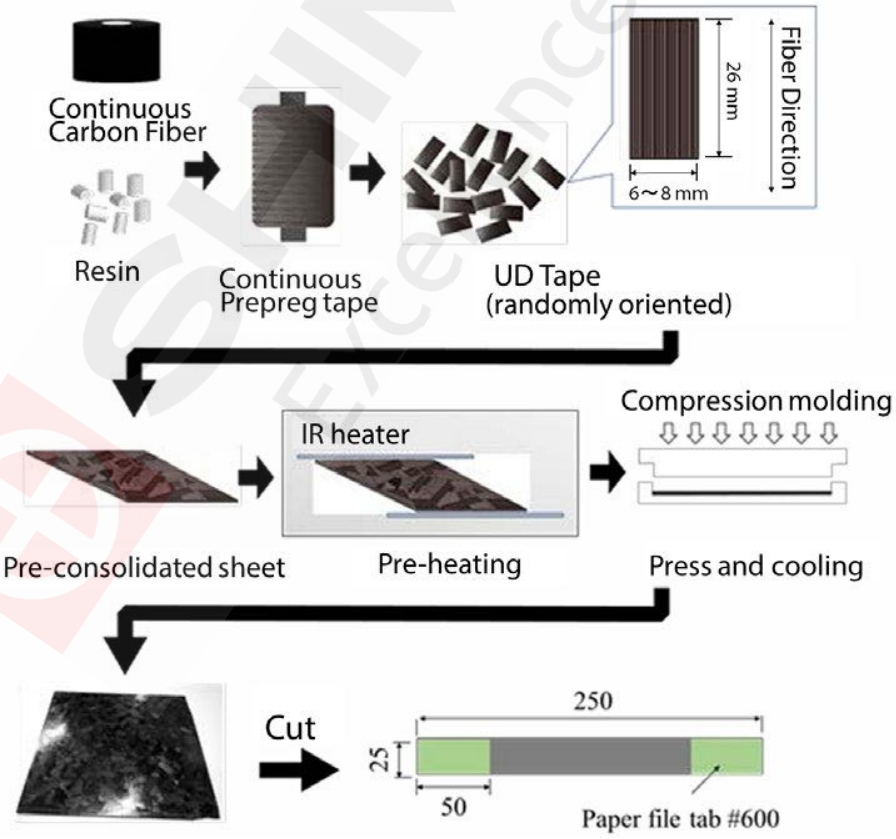


图1 随机取向碳纤维增强热塑性复合材料（CFRTP）的成型工艺及试样几何形状

3.测试设备

表1展示了仪器配置。本测试使用了一台台式动态疲劳试验系统ServopulserEHF-L。测试装置如[图2]所示。

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	ServopulserEHF-LV20k1A
载荷传感器	5kN
作动器行程	25mm
控制单元	ServoController4830控制器
软件	Windows®Softwarefor4830
测试夹具	手动平面型定位夹具
夹面	细锉齿



图2 试验视图

4.静态试验结果

进行静态拉伸试验以设定疲劳试验条件。表2显示了静态拉伸试验的测试条件。图3显示了每个试样的应力-位移图。表3根据静态试验的结果，显示了试样的平均极限抗拉强度。

表2 测试条件

参数	参数设定
测试速度	1mm/min
测试数量	n=3

表3 静态拉伸测试结果

样品	抗拉强度[MPa]	标准差	离散系数
CFRTP	191.3	11.7	0.06

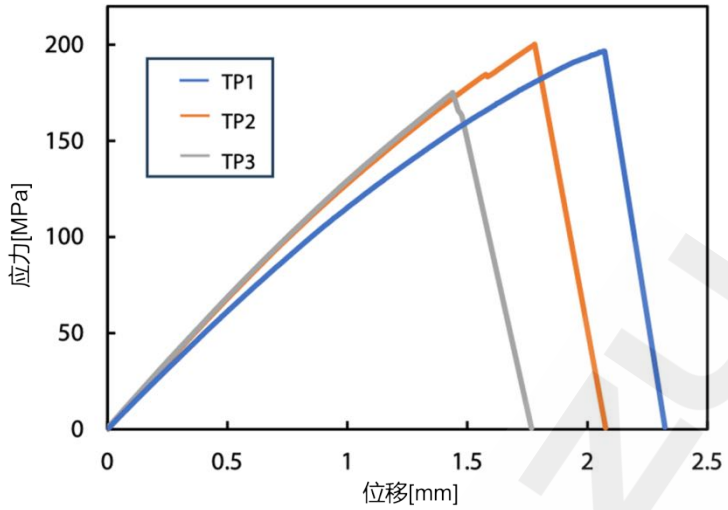


图3 应力-位移图

5.疲劳试验结果

表4显示了疲劳试验的条件。疲劳试验中的最大加载应力设置为五个等级，范围在静态拉伸试验测得的抗拉强度的35%至55%之间。

作为测试波形的一个示例，图4显示了在105MPa的最大加载应力下，1000次循环时的应力和位移时间波形。从图4可以看出，观察到了一个稳定的正弦波，这表明载荷控制良好。此外，图5显示了断裂失效时的试样。通过使用新开发的复合材料专用夹持齿，试样如预期在中心部位发生失效。图6显示了最大加载应力与失效循环次数之间的关系（S-N图）。

表4 疲劳试验条件

参数	参数设定
最大加载应力	静态极限拉伸强度的百分比 35,40,45,50,55%（(67~105MPa)；
应力比	0.1
最大循环次数	1×10^6
测试频率	10Hz
试样数量	n=2
测试温度	23℃
夹具间距	175mm

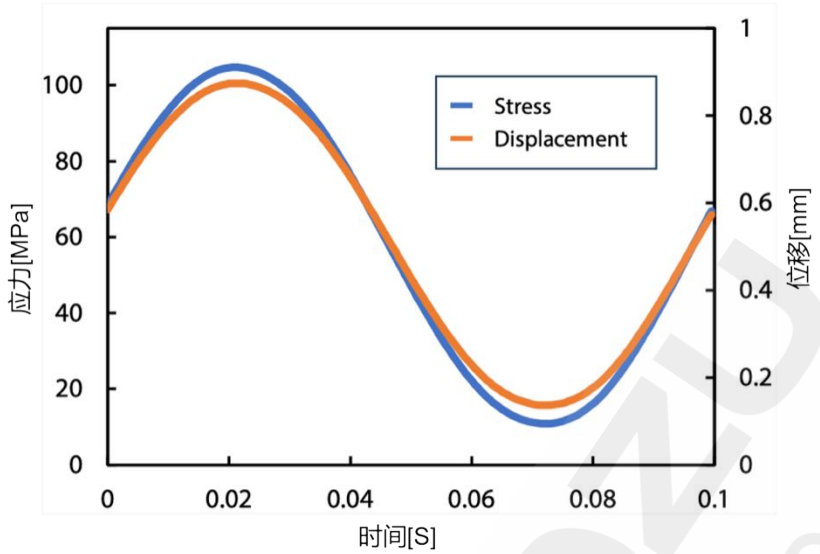


图4 应力、位移-时间波形图

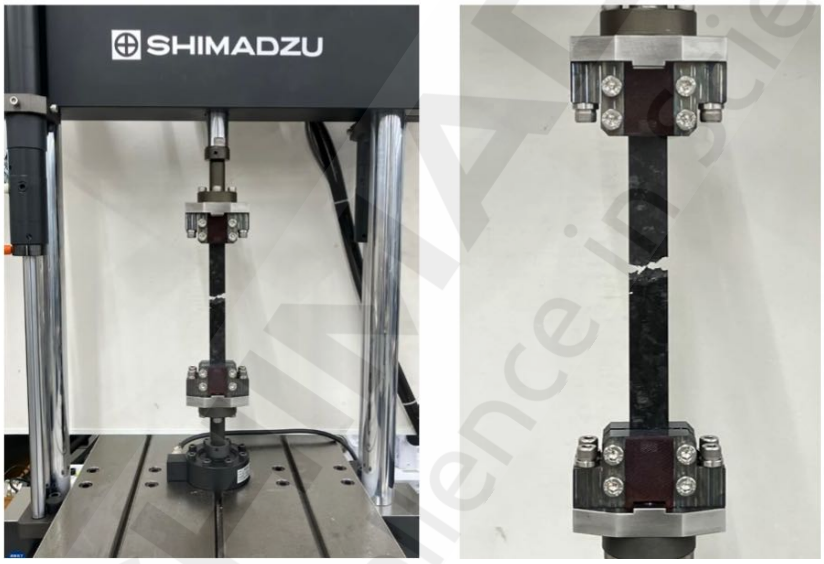


图5 试样断裂失效图

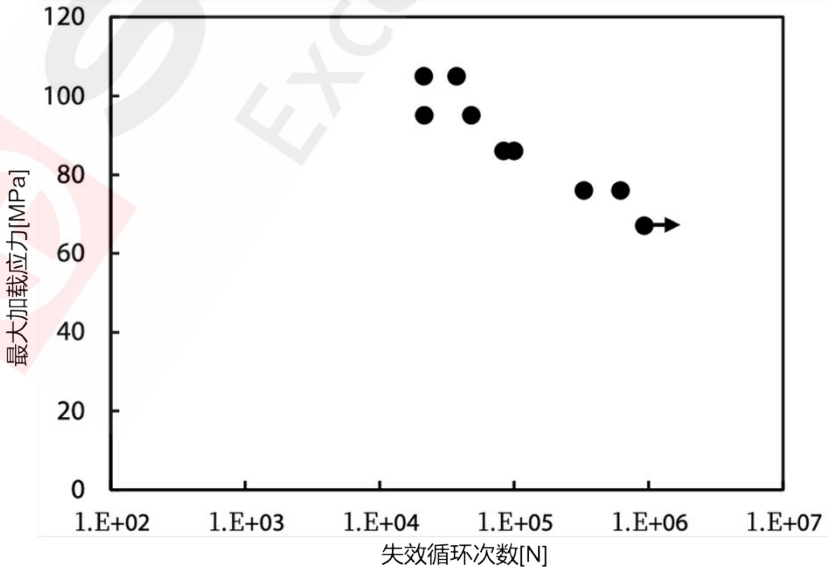


图6 S-N曲线图

6.结论

在这些测试中，使用动态疲劳试验机ServopulserEHF-L评估了热塑性碳纤维增强复合材料的疲劳特性。此外，通过使用新开发的复合材料专用夹持齿，减少了试样夹持部位的损伤，并且试样如预期样品在中心部位发生断裂失效。

SHIMADZU
Excellence in Science

采用银烧结芯片粘接材料连接的 SiC 芯片与铜基板键合耐久性评估

1.引言

银（Ag）烧结连接是一种通过加热/加压含有银颗粒的浆料，使颗粒之间相互结合的技术。近年来，作为实现脱碳社会的关键技术，电动汽车（EV）备受关注，而有望降低能量损失并具有优异导热性/耐热性的宽禁带功率半导体（如SiC），已成为提升EV性能不可或缺的元件。特别是在使用大电流/高密度功率半导体时，要求其在高温环境下仍具备良好性能。为此，银烧结连接引起了人们的兴趣，因为与传统钎焊接头相比，银烧结接头在更高温度环境下仍能保持良好的力学性能。

本文使用Servopulser动态疲劳试验机，对通过银烧结连接形成的SiC芯片与铜基板之间的接合部进行了剪切疲劳试验，并利用X射线CT观察了耐久试验后SiC芯片的断裂模式。

2.样品信息与测量系统

图1展示了试验片的示意图。将一个边长为3mm、厚度约为0.35mm的SiC芯片粘接于边长为24mm的铜基板中心。图2为试验夹具。由于试验过程中粘接层的变形极小，因此除了试验机的行程之外，还使用激光位移传感器进行了位移测量。目标SiC芯片本身非常脆，如果载荷集中于一点，则会从加载点开始产生裂纹。这将导致无法对接合面进行评估，因此夹具上配备了微调平台，以便对SiC芯片的整个表面均匀施加压缩力，并在显示器上观察试验片的同时调整压头接触角度和试验位置。图3为试验片位置调整的状态，表1为仪器配置。耐久试验后，使用X射线CT对试验片进行了观察。



图1 试样尺寸（碳化硅芯片厚度：0.35mm）

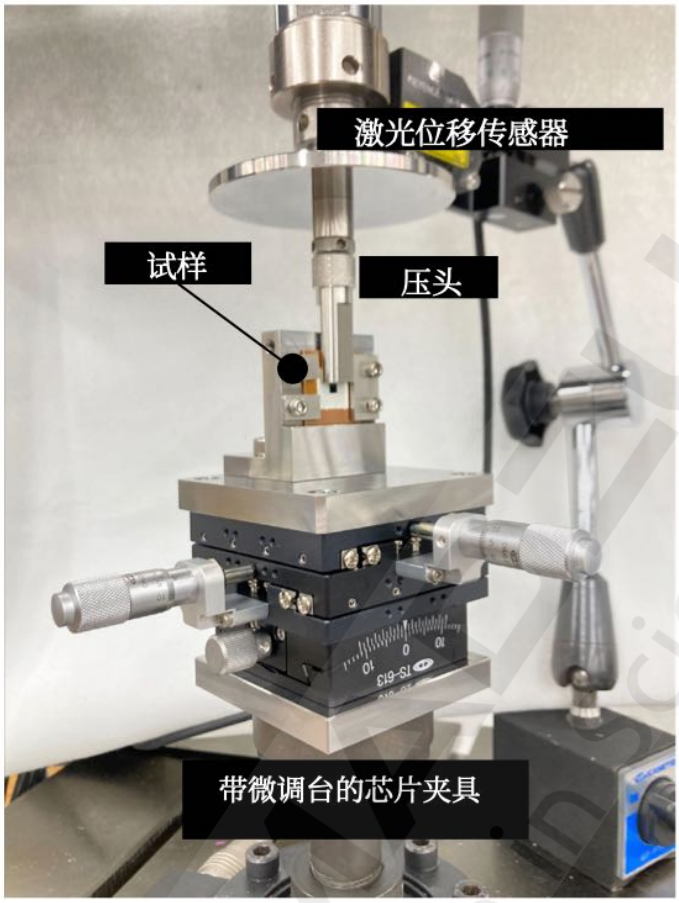


图2 测试夹具

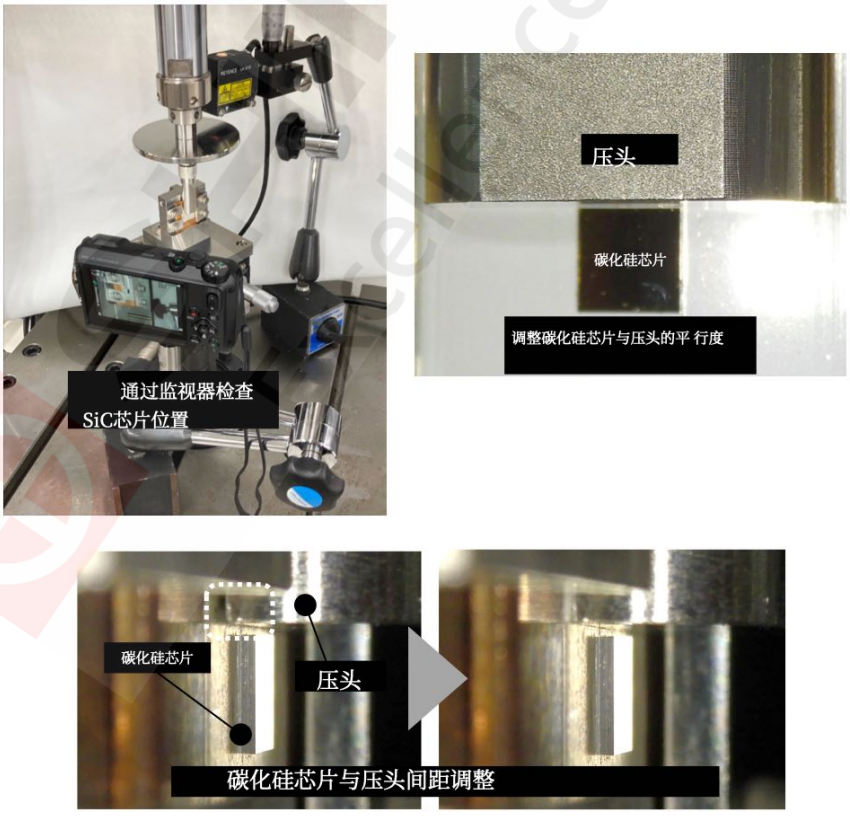


图3 试样位置调整状态

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	ServopulserEHF-LV
载荷传感器	5kN
控制单元	ServoController4830控制器
软件	Windows®Softwarefor4830
测试夹具	带微调平台的SiC芯片夹具
X射线CT设备	inspeXioSMX-225CTFPDHRPlus

3.静态剪切试验

为了设定疲劳试验的条件，首先进行了静态剪切试验。表2展示了静态剪切试验的条件，图4为各试样的试验力-位移曲线，图5为试验后试样的示例。在图5(a)中，SiC芯片发生了断裂；在图5(b)中，则发生了剪切断裂。表3汇总了试验结果。表3中的结果是排除了SiC芯片断裂情况后的结果。

表2 测试条件

参数	参数设定
测试速度	0.1mm/min
拉伸起点试验力（预应力）	5N
测试数量	n=3

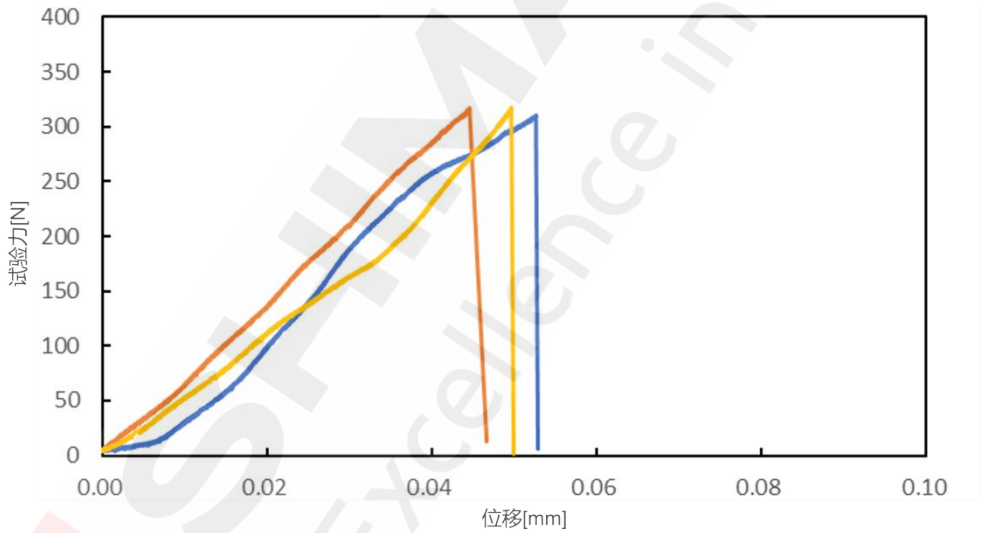


图4 试验力-位移曲线图

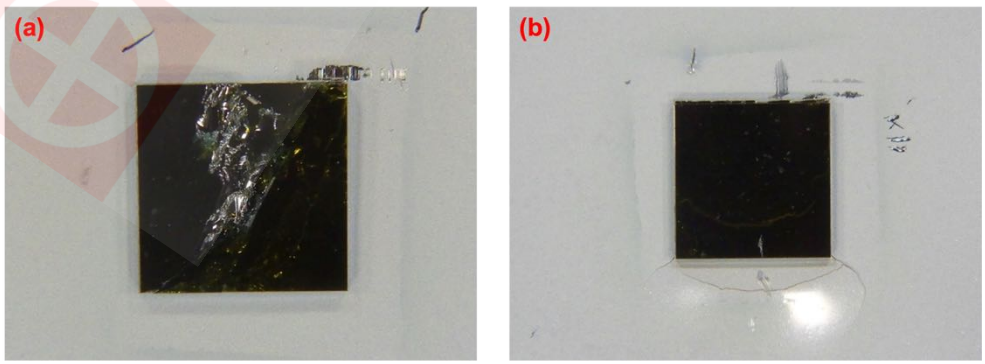


图5 试验后试样示例(a)SiC芯片断裂;(b)剪切断裂

表3 静态拉伸测试结果

样品	最大试验力[N]	最大行程[mm]	最大位移[mm]
1	310.39	0.0569	0.0527
2	316.98	0.0477	0.0446
3	317.97	0.0510	0.0496
平均值	315.11	0.0519	0.0489
标准差	4.12	0.0047	0.0041
离散系数	1.31	8.99	8.36

4.耐久试验

对试样A和试样B进行了耐久试验。耐久试验的条件设定为以静态剪切试验中0.0519mm的平均最大行程为基准，采用位移控制，最大行程设为0.03mm。表4汇总了耐久试验的条件。图6为试样A在10,000次循环时的波形。从图6(a)可看出，行程能按目标控制为近似的正弦波。图6(b)为试验力-行程图。作为耐久试验的结果，图7展示了试样A和试样B峰值的特征值曲线。从图7可以看出，试验过程中试验力的峰值大致保持恒定，在达到断裂循环次数时瞬时发生脆性断裂。试样A的断裂循环次数为17988次，试样B为19262次。

表4 耐久试验条件

参数	参数设定
控制方法	行程位移控制
最大行程位移	0.03mm
测试频率	1Hz
测试数量	n=2（试样A和B）

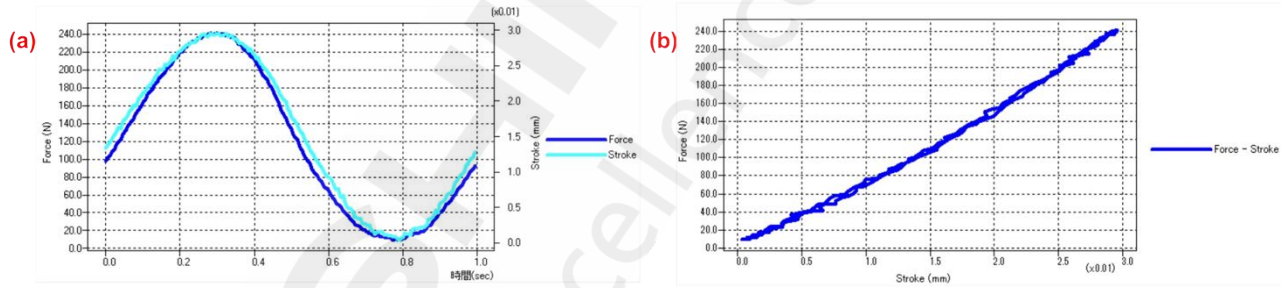


图6 试样A在10000次循环下的波形(a)试验力、行程-时间图；(b)试验力-行程图

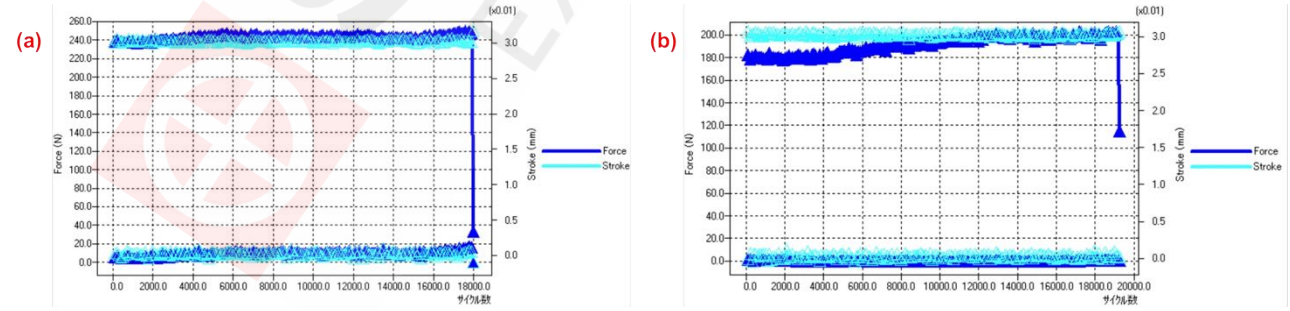


图7 耐久试验结果(a)试样A峰值特征值图；(b)试样B峰值特征值图

5.通过X射线CT进行断裂观察

图8为耐久试验后试样的照片。在试样A中，芯片右上区域部分出现裂纹，芯片背面的部分烧结芯片贴装材料发生了分层。在试样B中，整个芯片严重损坏。使用X射线CT对各试样进行了无损观察。图9为试样A

的X射线CT图像。从图9(a)可以看出，在目视观察到的SiC芯片损伤正下方的Ag烧结连接层中也发生了损伤。由图9(b)可知，Ag烧结连接层中的裂纹已延伸至铜基板。在图9(c)中，虽然Ag烧结连接层已损坏，但SiC芯片本身几乎未受损，同时观察到SiC芯片下方的Ag烧结连接层出现了分层。

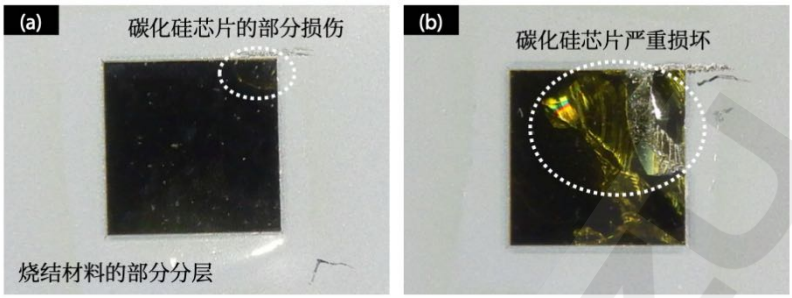
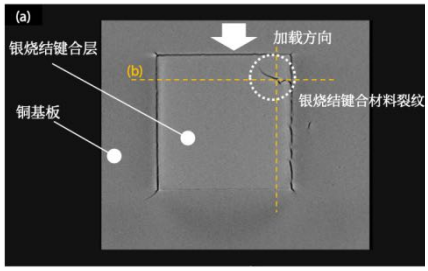
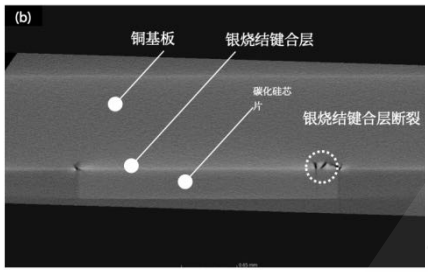


图8 耐久试验后试样的外观(a)试样A；(b)试样B





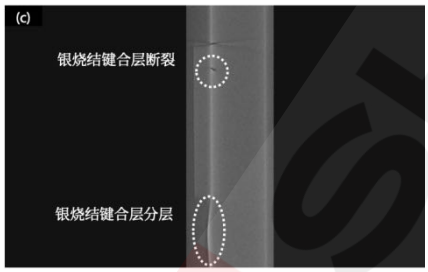
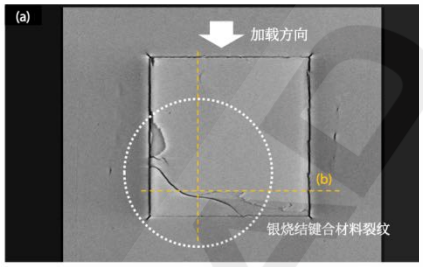
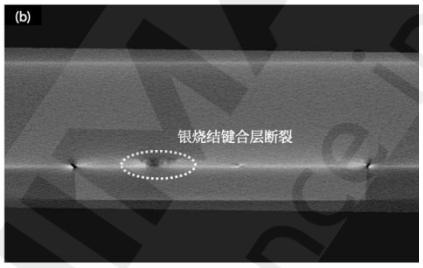


图9试样A的X射线CT图像(a)碳化硅芯片表面上方银烧结键合层的横截面图像(b)碳化硅芯片侧面横截面图像（水平）(c)碳化硅芯片侧面横截面图像（垂直）。





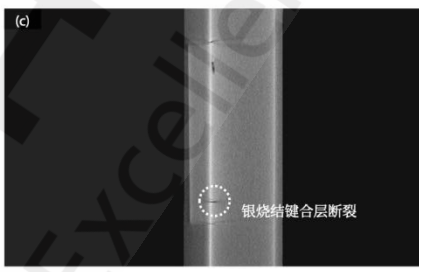
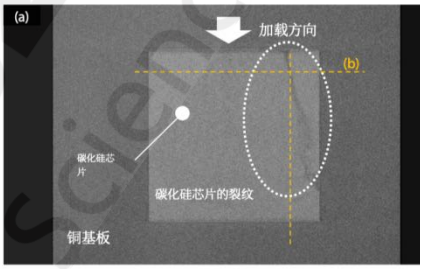
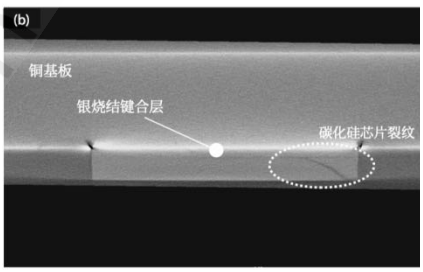


图10试样B的X射线CT图像(a)碳化硅芯片表面上方银烧结键合层的横截面图像(b)碳化硅芯片侧面横截面图像（水平）(c)碳化硅芯片侧面横截面图像（垂直）。





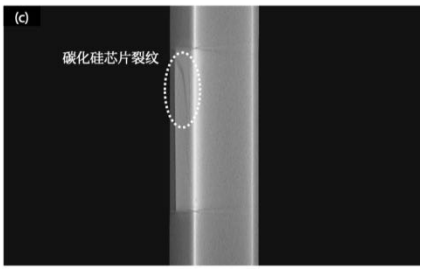


图11试样B的X射线CT图像(a)碳化硅芯片表面的俯视横截面图像(b)碳化硅芯片侧面的横截面图像（水平）(c)碳化硅芯片侧面的横截面图像（垂直）

6.结论

使用Servopulser动态疲劳测试系统对SiC芯片进行了耐久试验。通过使用带微调机制的SiC芯片夹具，成功完成了测试。借助X射线CT，可以详细观察SiC芯片的断裂情况。

骨内牙种植体的动态疲劳试验

1.引言

骨内牙种植体由牙根部分（种植体）、安装在种植体上的基台以及人工牙构成，并植入于缺牙处的颌骨中。种植体通常使用钛螺钉。尽管JIST6005:2020中规定了骨内牙种植体的疲劳试验方法，但该方法并非针对骨内牙种植体构成材料的疲劳特性，而是描述了用于比较不同设计或尺寸的种植体的有效方法。

本文介绍了使用符合JIST6005:2020标准的拉伸试验夹具进行测试的实例。

2.测量设备

此处使用的试验材料是由铝合金制成的模拟试片。图1展示了试验状态。JIST6005:2020规定，在加载过程中不得对试片在横向方向上进行约束。因此，必须使用带轴承的推力板。表1列出了仪器配置。

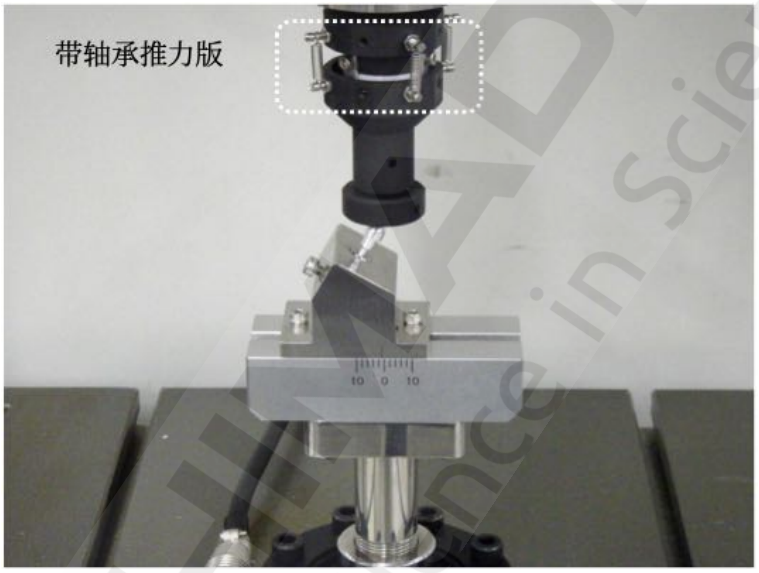


图1 试验状态

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	ServopulserEHF-LV
载荷传感器	5kN
控制单元	ServoController4830控制器
软件	Windows®Softwarefor4830
测试夹具	种植体测试夹具

3.静态测试

首先，为了设定疲劳试验的载荷条件，进行了静态试验。JIST6005:2020规定，作为标准，试验条件应设定为静态试验中发生破坏时载荷的80%。图2显示了静态试验的结果。试验速度设定为5mm/min。静态试验的结果是，最大试验力的平均值为377N。因此，以此值为基准，将疲劳试验中的载荷条件设定为如表2所示。

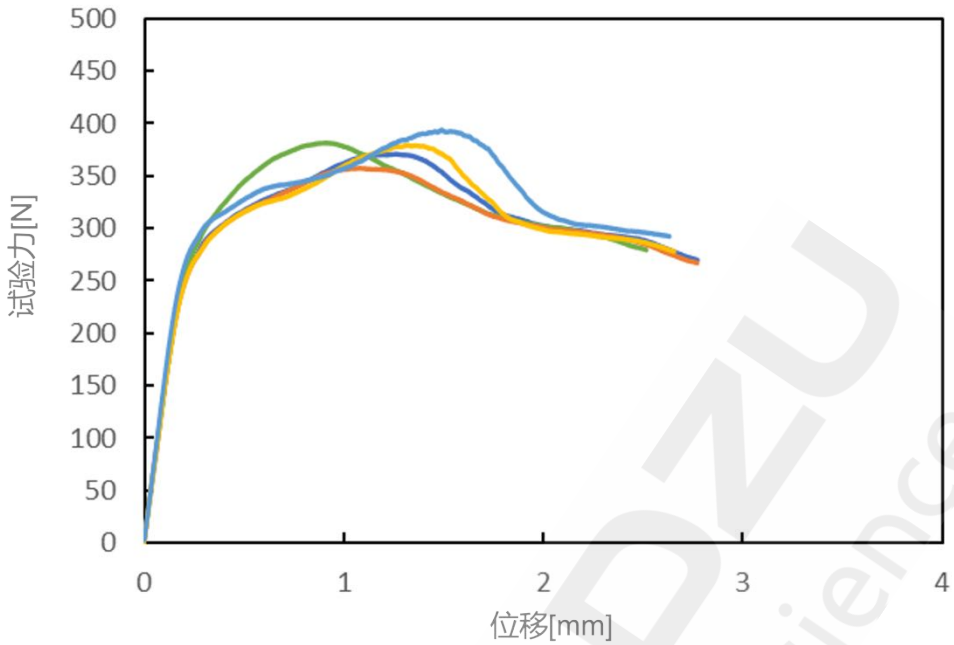


图2 试验力-位移曲线

表2 疲劳试验载荷条件

静态测试中失效时的载荷百分比[%]	疲劳测试中的最大载荷试验力[N]
80	302
70	264
60	226
50	188
40	151

4.疲劳测试

疲劳试验中的最大失效循环次数根据设定的频率而不同。例如，当以2Hz进行试验时，最大失效循环次数为2×10^6；但当频率超过2Hz时，循环次数则增加至5×10^6。尽管JIS标准规定每个载荷条件下的试验次数至少为2次，最好为3次，但本实验中仅进行了n=1次试验。表3显示了疲劳试验的条件。作为疲劳试验中波形的示例，图3给出了最大试验载荷为226N的试验中第1000次循环时的时间-试验力/行程曲线；图4则为循环次数-试验力/行程曲线。如图4所示，试验力和行程在试验开始后的一段时间（循环次数）内均保持恒定值，但随着试片损伤的增加，行程逐渐增大，最终导致破坏。图5为最终得到的试验力-失效循环次数图。

表3 疲劳试验条件

参数	参数设定
最大载荷试验力[N]	302,264,226,188,151
应力比	0.1
测试频率	1Hz
最大循环次数	2×10^6
试验停止条件	行程限值（3mm）

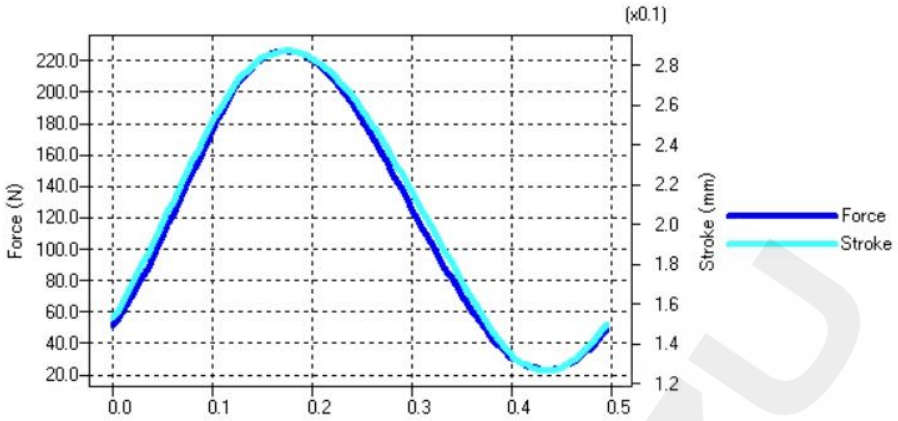


图3 试验时间-试验力示/行程曲线(最大载荷试验力：226N,1000th循环)

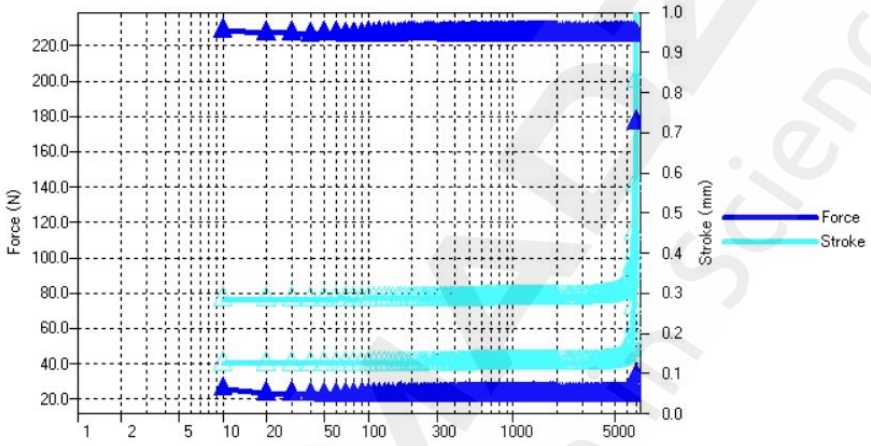


图4 循环次数-试验力/行程曲线示例（最大载荷试验力：226N）

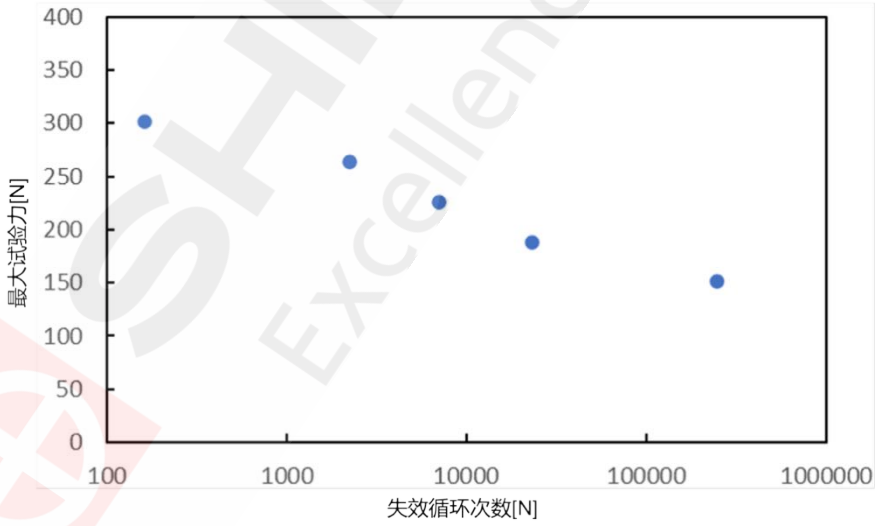


图5 S-N曲线图

5.结论

本实验采用模拟试件，按照JIST6005：2020规定的试验方法对骨内牙种植体开展动态疲劳试验。实验证实，采用本次所用的仪器配置可完成骨内牙种植体的动态疲劳试验。

焊点试样的低周疲劳试验

1.引言

“焊料”是用于连接构成电子电路的元器件与基板的“焊接”工艺中不可或缺的合金，由于其机械性能与生产性能均十分优异，过去主要以铅和锡为主要成分的焊料被广泛使用。然而，铅不仅对人体有害，也是对自然环境产生负面影响的有害物质，因此近年来避免使用铅的呼声日益高涨，作为有铅焊料的替代品，不含铅的“无铅（铅-free）焊料”的开发与普及正在不断推进。

然而，一般而言，无铅焊料相比有铅焊料存在如性能较脆等弱点，改善这一问题是当前的课题之一。基于这样的背景，为了开发机械性能更优越的无铅焊料，进行强度评估变得愈发必要。本次将介绍使用油压式疲劳强度测试系统EHF-LM020k1-010，针对有铅焊料和无铅焊料两种类型的焊料接合试样进行的低周疲劳试验案例。

2.测量设备

本实验所用试验装置、试样安装治具及位移计（引伸计）的主要规格如下（见图1）。



图1 试验夹具与引伸计

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	ServopulserEHF-LV
载荷传感器	±20kN
作动器行程	±25mm
测试夹具	内置加热器夹具
引伸计	标距5mm，分辨率10μm

3.试样加载与测试条件

如图2所示，焊料制成的接合试样被焊接材料为铜，焊料接合层厚度1mm，试样全长90mm，平行部直径为8mm的圆棒光滑试样。

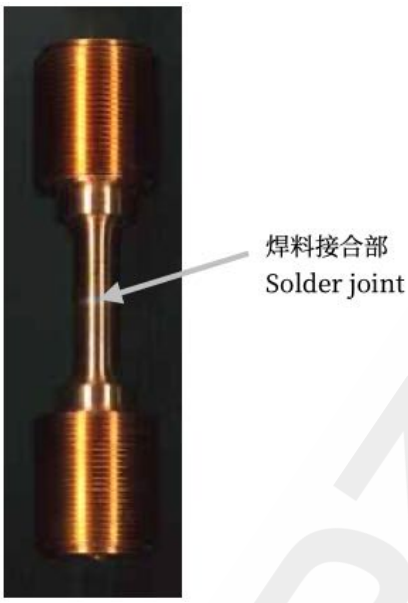


图2 试样

表2 疲劳试验条件

参数	参数设定
试样	Sn-37Pb(有铅),Sn-3.5Ag(无铅)
试验温度	40°C(使用加热器进行温度控制)
控制方法	恒定应变速率， 对包含焊料接合层的标距(GL=5mm)进行应变控制
最大循环次数	2×10^6
波形	完全对称三角波(应变速率恒定)

表 3 应变控制条件

应变范围 $\Delta\varepsilon_t$(%)	标距(GL=5mm)的位移 Δx(mm)	应变速率 (%/s)
0.05	0.0025	0.1
0.1	0.005	
0.2	0.01	
0.5	0.025	

4.测试结果

Sn-3.5Ag（无铅焊料）试样在公称应变范围为0.05%时，第一个加载循环的应力（蓝色）和应变（淡青色）的时序测量值如图3所示，其应力-应变曲线如图4所示。公称应变范围0.05%是指对应于GL5mm的应变振幅为±0.025%（+/-表示拉伸/压缩），换算成位移则为0.0025mm（±1.25μm）。从这些图表可以看出，在0.1%/s（1Hz三角波）这样相对较快的速度下，微幅载荷控制得以精确执行。

此外，本次评估的有铅、无铅焊料试样对应的低周疲劳试验结果（公称应变范围与疲劳破坏循环次数的关系图。即所谓的以应变振幅表示的S-N曲线）如图5所示。根据该结果可知，在应变范围大致低于0.5%的情况下，无铅焊料的疲劳寿命相对较长。

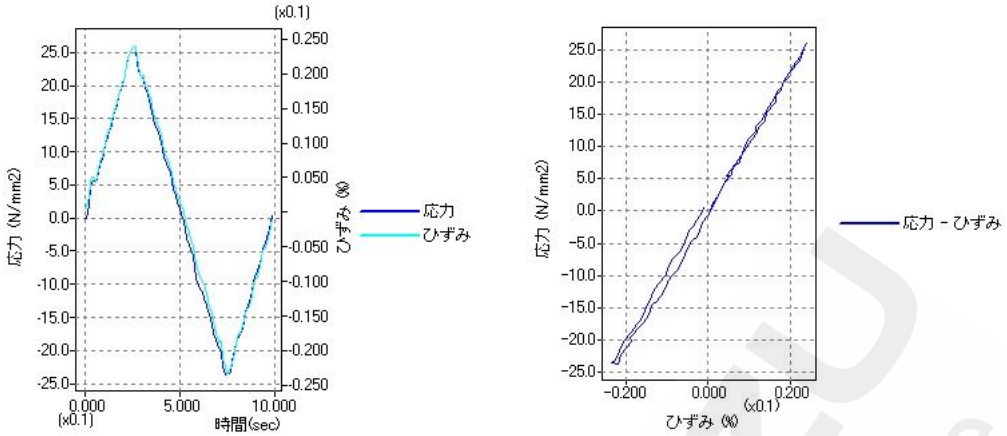


图3 应力-应变-时间图

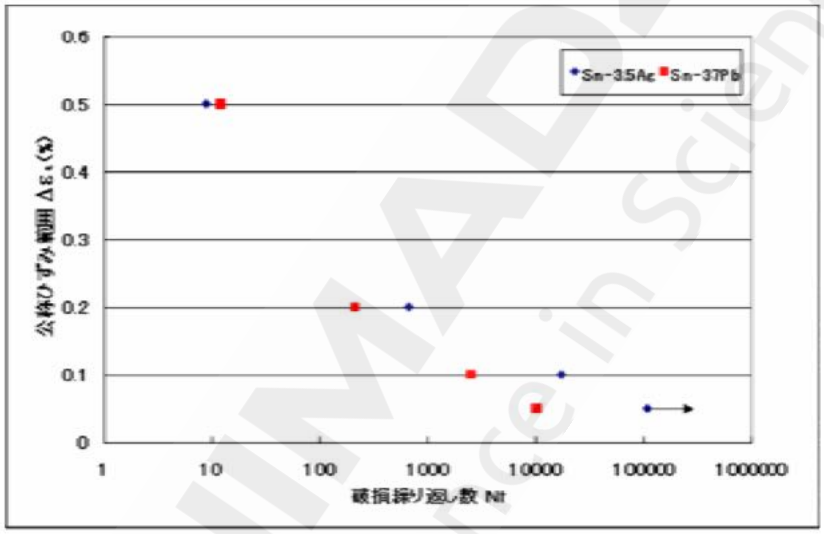


图4 应变幅-疲劳寿命图

5.结论

液压式疲劳强度试验机是能够进行微应变控制和应力控制，并可应对各种精密反复载荷试验的系统。

L605 钴基合金室温低周疲劳测试

摘要：本文依据《ASTME606-2021应变控制疲劳试验方法》标准，采用岛津EHF系列电液伺服疲劳试验系统，在室温条件下对L605钴基合金开展了不同应变幅的低周疲劳测试。结果表明，岛津EHF系列试验机具备高精度的应力与应变控制能力，适用于复杂加载条件下的高精度重复加载试验。该合金在循环加载下呈现先硬化后软化的典型循环应力响应特征。通过获取应变-寿命曲线，为更好揭示材料在塑性应变控制下的裂纹萌生与扩展行为，为实际工况下部件的寿命预测提供了基础数据。

关键词：L605合金低周疲劳性能应变控制

L605钴基合金（固溶强化型高温合金）因其优异的高温强度、抗氧化性及良好的生物相容性，广泛应用于航空发动机燃烧室、燃气轮机热端部件及心血管支架等关键领域。这些应用场景普遍面临复杂的热-力耦合服役环境，部件在频繁启停、热循环或脉动载荷作用下，往往承受高于弹性极限的交变应变，导致材料在相对较低的循环周次内发生失效—即典型的低周疲劳行为。因此，系统开展L605合金的低周疲劳测试，不仅是评估其工程可靠性的必要手段，更是支撑部件寿命预测与结构优化的核心基础。

低周疲劳测试的核心在于模拟部件在真实工况下的塑性应变主导失效过程。通过控制应变幅、温度及加载波形等参数，能够获取材料的循环应力响应、Manson-Coffin寿命曲线及裂纹萌生与扩展机制。对于L605合金而言，其微观组织中的碳化物分布、晶粒尺寸及固溶强化元素的均匀性，均对疲劳性能产生显著影响。测试结果可揭示合金在循环加载下的软化/硬化行为、氧化与疲劳的交互作用，以及微观结构损伤演化规律，为热处理工艺优化、加工参数调整及失效预防提供直接依据。

在工程应用层面，低周疲劳测试数据是建立材料本构模型和疲劳寿命预测方法的关键输入。对于航空发动机热端部件，测试结果有助于确定安全检修周期与设计许用应变水平；对于心血管支架等微型器件，低周疲劳测试则用于评估其在数亿次脉动循环下的结构完整性，是产品通过临床认证的重要依据。因此，围绕L605合金开展系统的低周疲劳测试，兼具理论研究价值与工程应用意义。

本报告围绕L605合金在室温条件下的低周疲劳行为展开研究，系统分析其循环变形特性、寿命规律及微观损伤机制，为该合金在高端装备与医疗器件中的可靠应用提供数据支撑与理论参考。

1.实验部分

1.1仪器

EHF-UV050K2A（配有 4830 伺服控制器）

1.2 分析条件

试验类型：疲劳/耐久测试

试验力精度：0.5 级

引伸计标距：12mm

传感器容量：±50kN

作动器行程：±50mm

引伸计线性度：≤满量程的0.15%

2.试验介绍

本研究遵循《ASTME606-2021应变控制疲劳试验方法》标准，开展室温条件下应变控制的低周疲劳试验。试验采用轴向对称应变控制方式，加载波形选用三角波（应变速率一定），在应变比R=-1条件下进行拉-压疲劳加载，设置应变幅Δε/2分别为±0.4%、±0.6%、±0.8%和±1.0%。疲劳试验过程中，采用标距为12mm的轴向引伸计实时监测试样应变，并利用疲劳测试系统中的测压元件同步采集应力响为确保试验结果的可

靠性，各试验条件下均测试2根试样，低周疲劳试验应在20000次循环之前停止。图1为EHF-U电液伺服疲劳试验机和4830伺服控制器，图2为低周疲劳样品尺寸和形状图，图3为带有引伸计夹持的测试样品图，表1为试验条件，表2为应变幅值、位移值和应变速率。



图1 EHF-U电液伺服疲劳试验机和4830伺服控制器

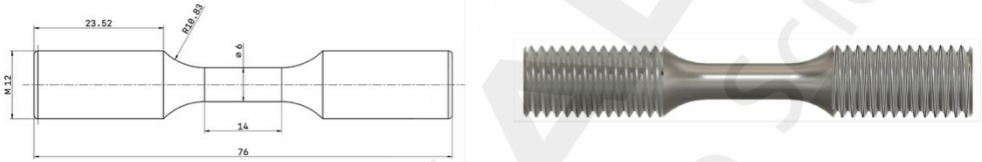


图2 低周疲劳样品尺寸和形状图

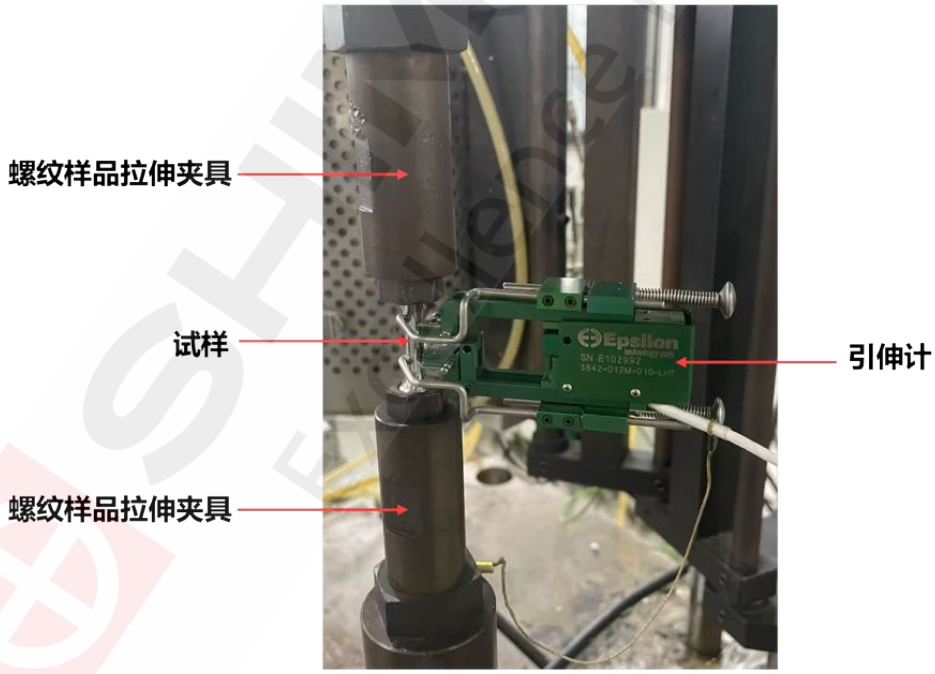


图3 试验测试过程图

表1 试验条件

参数	参数设定
试验类型	疲劳/耐久测试
仪器	EHF-UV050疲劳试验机
控制器	4830控制器
载荷传感器	±50kN

波形	三角波（应变速率一定）
应变比R	-1
应变幅Δε/2	±0.4%、±0.6%、±0.8%、1.0%

表2 应变幅值、位移值和应变速率

应变幅 Δε/2（%）	标距(GL=12mm) 位移（mm）	应变速率 (S^{-1})
±0.4	±0.048	0.007854
±0.6	±0.072	
±0.8	±0.096	
±1.0	±0.120	

3.试验结果

图4显示室温条件下低周疲劳不同应变水平循环应力响应曲线。应变幅值随疲劳寿命的演化曲线可描述材料的循环软化或循环硬化行为，循环应力响应曲线在应变幅Δε/2为±0.6%、±0.8%、1.0%时具有相似的特征，即从第1个到第10个循环应力明显增加，合金呈现出循环硬化特征；第10个至第200个循环应力出现下降趋势，呈现出循环软化特征，此后应力缓慢下降直至断裂。

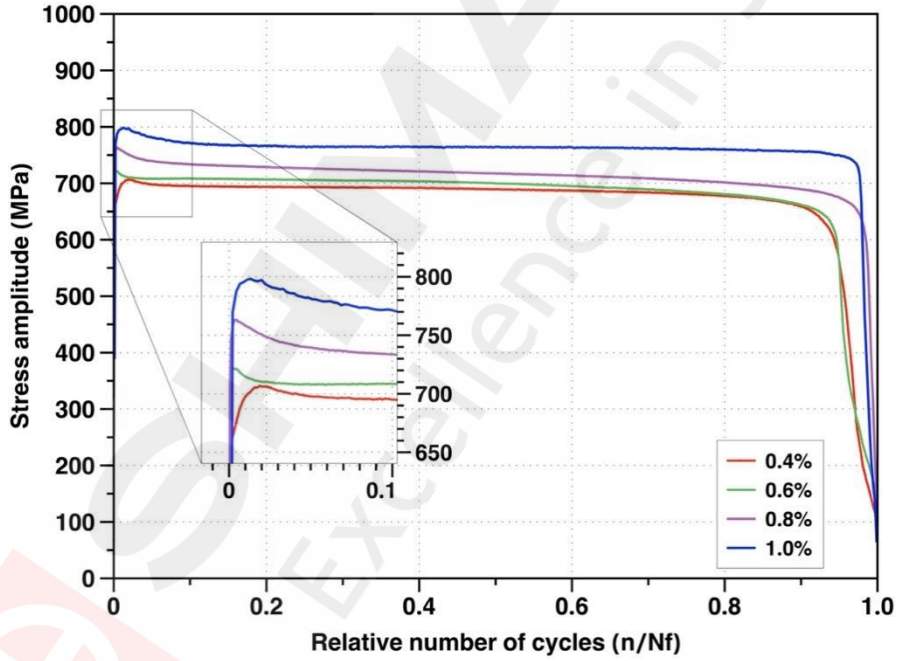


图4 循环应力应变响应图

图5为室温条件下不同应变幅值下的半寿命循环应力-应变滞回曲线。滞回曲线反映了在一个循环周期内应力随应变的变化规律。滞回环的宽度表征塑性应变幅$\Delta_{\varepsilon p}$，其高度即为应力幅。由图可知，滞回环的宽度与应力幅均随应变幅值的增加而增大，表现出一致的变化趋势。循环应力-应变滞回曲线表明，材料在疲劳过程中同时发生弹性变形与塑性变形；滞回环所围面积可用于衡量材料在单个循环中所耗散的塑性应变能。可以看出，随着应变幅值的增大，滞回环包围的面积逐渐增加，材料的塑性应变能相应提高。结合疲劳寿命曲线可知，塑性变形对疲劳寿命的影响程度随应变幅值的增大而增强。图6为室温条件下不同应变幅值-疲劳寿命关系图。可知随着应变幅值的增加，疲劳寿命呈现明显降低趋势。

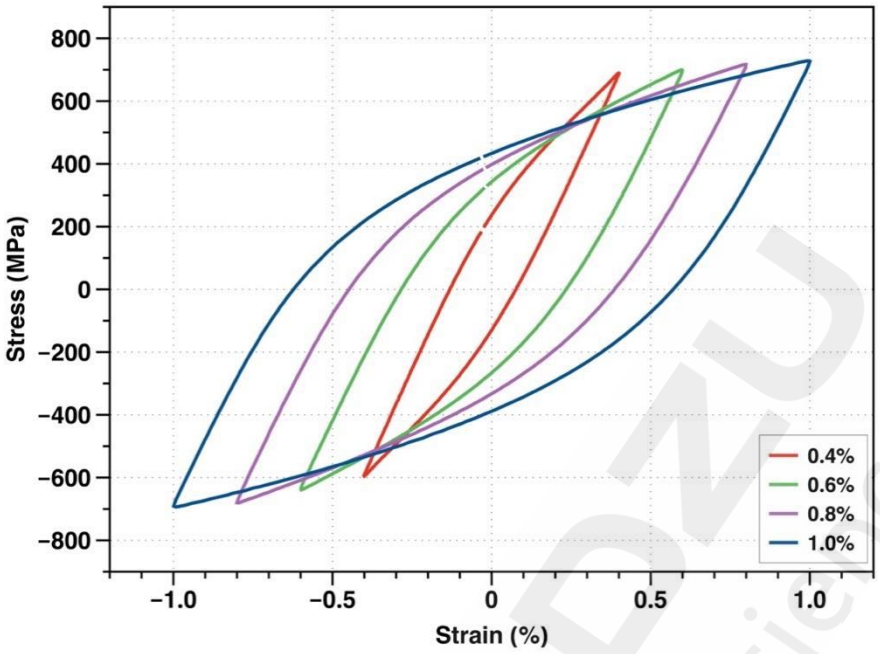


图5 不同应变幅值半寿命滞回曲线

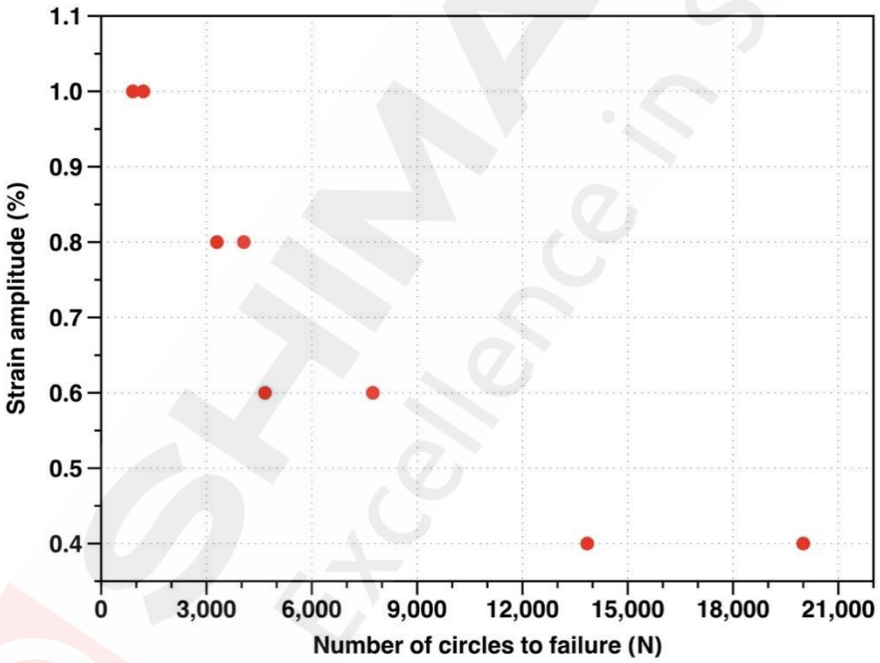


图6 应变幅—疲劳寿命关系图

4.结论

本研究系统开展了L605合金在室温条件下的低周疲劳性能测试，明确了其在不同应变幅下的循环应力响应规律，表现为先循环硬化后循环软化的典型特征。试验数据成功构建了应变-寿命曲线，揭示了材料在塑性应变控制下的疲劳损伤演化过程。岛津EHF系列疲劳试验机凭借其高精度的应力与应变控制能力，有效支撑了复杂加载条件下重复加载试验的稳定执行。该工作为L605合金在热端部件及医疗植入物等领域的工程应用提供了可靠的疲劳性能基础数据，并为其服役寿命评估与结构设计优化奠定了试验基础。

尼龙 66 材料单一应力水平疲劳测试

摘要：本文基于《GB/T35465.1-2017聚合物基复合材料疲劳性能测试方法》标准，采用岛津EHF-L电液伺服疲劳试验系统，对尼龙66材料进行了疲劳性能测试研究。该系统配合4830控制器与手动定位型平板夹具，能够稳定、精确地施加设定的循环载荷。测试结果表明，整个系统运行稳定，通过Gluon4830Test软件可获取稳定的动态测试数据。本研究验证了该试验方法在精确评估尼龙66材料疲劳性能方面的有效性，为其在产品研发与设计应用中的寿命预测与可靠性提供了数据支撑。

关键词：尼龙66材料疲劳性能测试岛津EHF-L

尼龙66，是一种性能卓越的半结晶性热塑性工程塑料。由含有6个碳原子的己二胺和6个碳原子的己二酸缩聚而成。这种规整的分子结构使其链段间能形成强大的氢键，从而赋予了材料高强度、高刚性、出色的耐磨性、良好的耐热性 (熔点约260℃) 以及耐化学溶剂性。凭借优异的综合性能，使尼龙66成为替代金属、实现零部件轻量化的关键材料之一。

尼龙66被广泛应用于对性能要求苛刻的很多领域。在汽车工业中，它用于制造发动机周边的进气歧管、冷却风扇、机油盖等，这些部件不仅环境温度高，还持续承受着发动机的振动。在机械工业中，它是制造齿轮、轴承、凸轮和滑轮等运动部件的理想选择，这些部件在运转中面临持续的摩擦和循环应力。

然而，许多上述应用中的尼龙66部件并非在静态载荷下工作，而是在远低于其极限强度的应力下，承受着成千上万次甚至数百万次的循环加载。因此，对尼龙66样品进行疲劳性能测试，具有至关重要的工程意义和安全价值，是将材料的固有属性转化为产品在实际工况下可靠性能的桥梁。其核心重要性体现在以下几个方面：预测产品寿命与确保安全可靠性、为精准设计和材料选择提供依据、评估改性效果与质量控制、揭示失效机理与指导改进。

本文研究中，基于《GB/T35465.1-2017聚合物基复合材料疲劳性能测试方法》标准，使用岛津EHF-L系列电液伺服疲劳试验机尼龙66材料进行单一应力水平疲劳测试。

1.实验部分

1.1仪器

EHF-LV020K2A（配有4830伺服控制器）Gluon4830Test/Dataprocessing软件

1.2 分析条件

试验类型：疲劳/耐久测试　　传感器容量：±20kN

试验力精度：0.5 级　　作动器行程：±50mm

2.试验介绍

本研究首先依据《GB/T1447-2005纤维增强塑料拉伸性能试验方法》开展静态拉伸试验，以测定尼龙66样品的拉伸强度，试验采用2mm/min的加载速度，测得样品拉断破坏时的载荷为8kN。随后，据此计算该破坏载荷的80%作为应力水平，并基于《GB/T35465.1-2017聚合物基复合材料疲劳性能测试方法》进行单一应力水平的疲劳性能测试。图1展示了实验所用的岛津EHF-L电液伺服疲劳试验机及多功能4830伺服控制器，图2为试验测试过程图，样品信息与试验条件分别详见表1与表2。



图1 EHF-L电液伺服疲劳试验机和4830伺服控制器

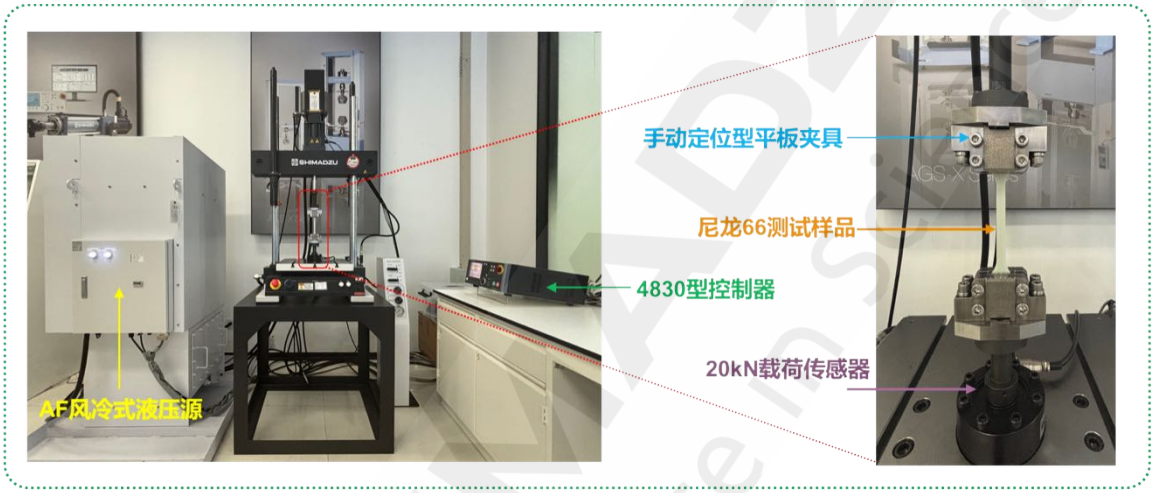


图2 试验测试过程图

表1 样品信息

材料牌号	样品编号	宽度（mm）	厚度（mm）
尼龙66	1#	9.89	3.98
尼龙66	2#	9.88	3.97
尼龙66	3#	9.88	3.98

表2 试验条件

参数	参数设定
试验类型	疲劳/耐久测试
仪器	EHF-LV020K2A疲劳试验机
控制器	4830控制器
载荷传感器	±20kN
波形	正弦波
最大负载试验力	6.4kN
应力比R	0.1
频率	5Hz

3.试验结果

图 3 展示了试验的载荷-行程随周期数的变化曲线。为评估试验系统的稳定性，图 4 提供了 1#样品在

不同循环次数（第 20、500、999、1170 周次）下的载荷/行程-时间曲线，可以看出，系统约在第 20 个循环后即可精确复现设定波形，表明其控制稳定、动态响应迅速。图 5 为 1#样品相应周次的载荷-行程曲线，随着循环周期增加，曲线形成的环形面积显著增大，这反映了材料在循环载荷下的能量耗散增加，直观证明了其内部损伤的累积过程。表 3 的试验结果数据表明，三个样品（1#、2#、3#）在负载 6.4kN 试验条件下的疲劳寿命分别为 1173、1087 和 1105 次循环。图 6 为样品试验前后图。

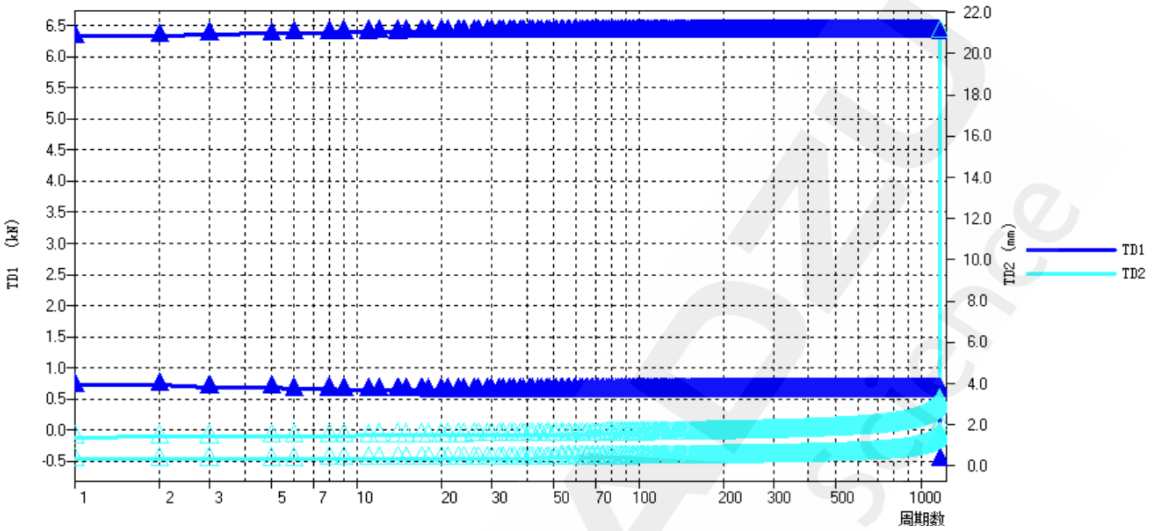


图 3 试验载荷/行程—周期数曲线图

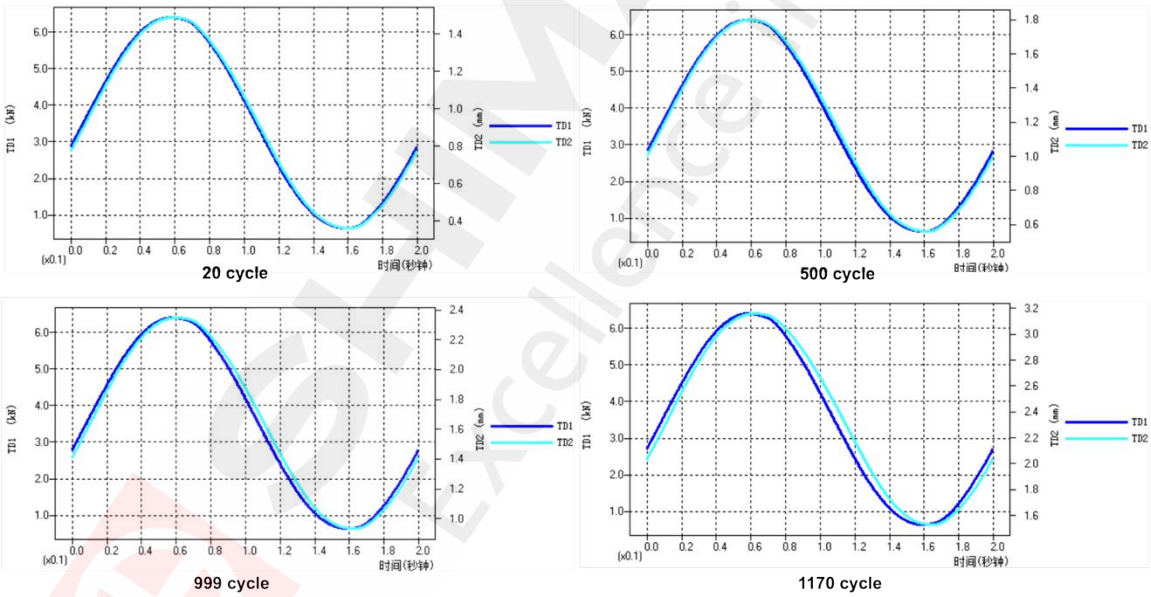


图 4 试验载荷/行程—时间曲线图

（1#样品为例-20cycle、500cycle、999cycle、1170cycle）

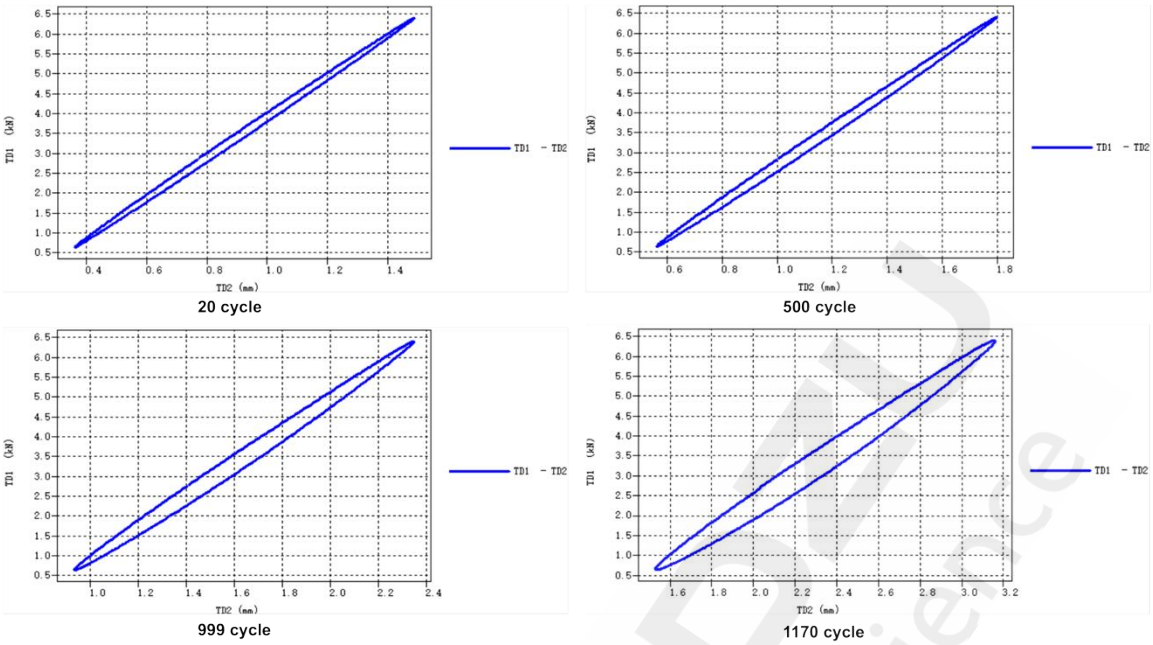
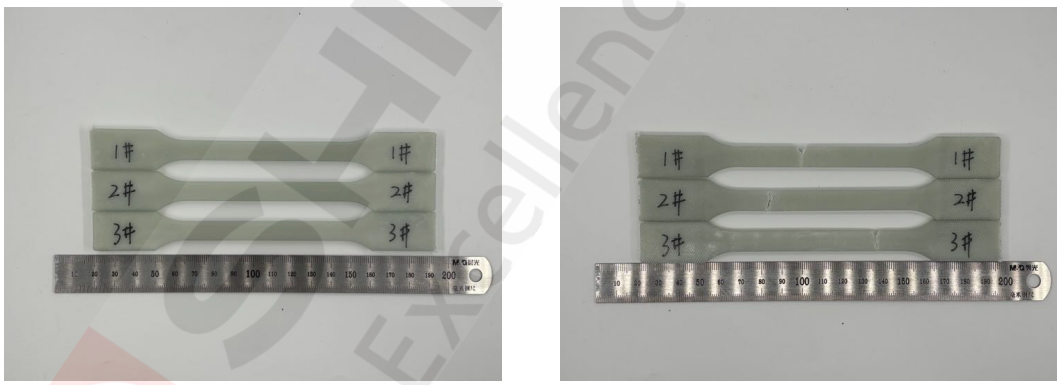


图 5 试验载荷/行程图

（1#样品为例-20cycle、500cycle、999cycle、1170cycle）

表3 试验结果

样品编号	Fmax（kN）	应力比 R	试验频率（Hz）	断裂时循环次数（cycle）
1#	6.4	0.1	5	1173
2#	6.4	0.1	5	1087
3#	6.4	0.1	5	1105



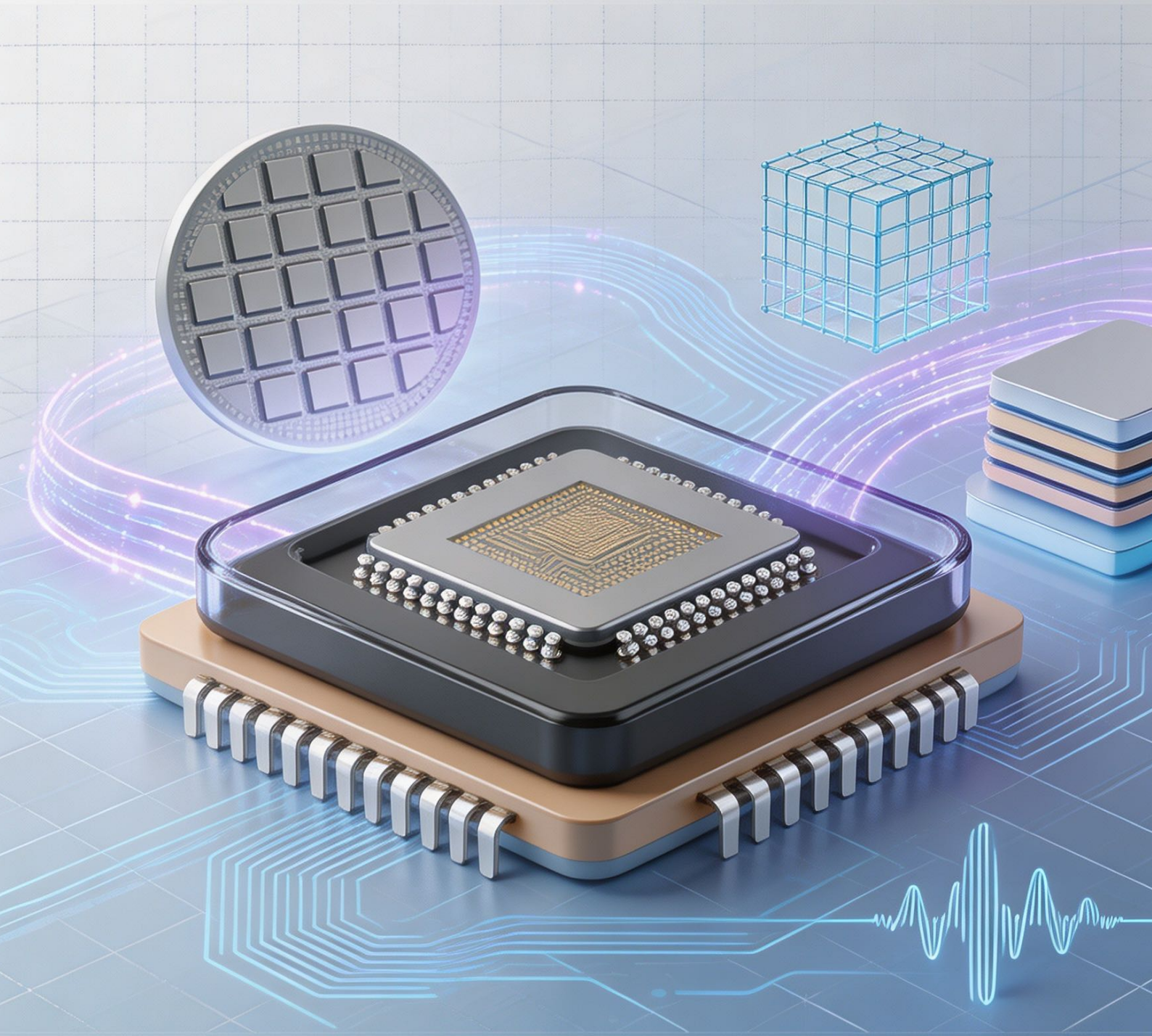
测试前　　测试后

图 6 试验前后图

4.结论

综上所述，本文测试依据《GB/T35465.1-2017 聚合物基复合材料疲劳性能测试方法》标准，以岛津 EHF-L 电液伺服疲劳试验机与 4830 伺服控制器为核心的测试系统，可以精准对尼龙 66 材料进行了某一应力水平的疲劳性能研究。该系统运行稳定，配套的 Gluon4830 软件界面直观，数据处理高效便捷。本研究有效验证了该标准化测试方法在精确评估尼龙 66 疲劳性能方面的可靠性，为其在产品研发阶段的寿命预测与可靠性设计提供了坚实的数据支撑。

第 6 章 EMT/MMT 电磁疲劳试验机应用方案



豆包AI生成

电动汽车母线排耐久性测试

1.引言

母线排是用于在配电盘和控制盘中连接和分配电力的棒状或板状导体。作为电力电子元件，它们非常有用，因为它们能够传导大电流。它们能够传导大电流，是因为相比传统电缆具有以下优势。

- 通过观察断裂表面，可以判断载荷是从哪个方向施加的。
- 由于母线排表面积大，其散热效率比电缆更高。

得益于这些优势，近年来，随着电动汽车的引入，母线排不仅广泛应用于配电盘和控制盘，也用于连接汽车电池、电机、逆变器等。当母线排安装在汽车中时，与配电盘和控制盘不同，它们可能会因振动或冲击而承受外部载荷。评估它们在这种条件下的耐久性非常重要。本文对不同载荷方向下的母线排进行了耐久性测试，以评估其耐久性。

2.样品信息

在电动汽车中，电机由交流电驱动，但电池输出直流电。因此，逆变器对于将直流电转换为交流电至关重要。由于电流较大，通常使用母线排来连接逆变器与电机。图1展示了用于连接逆变器与电机的母线示意图。预计母线排将因道路条件和电机振动而承受来自各个方向的载荷。

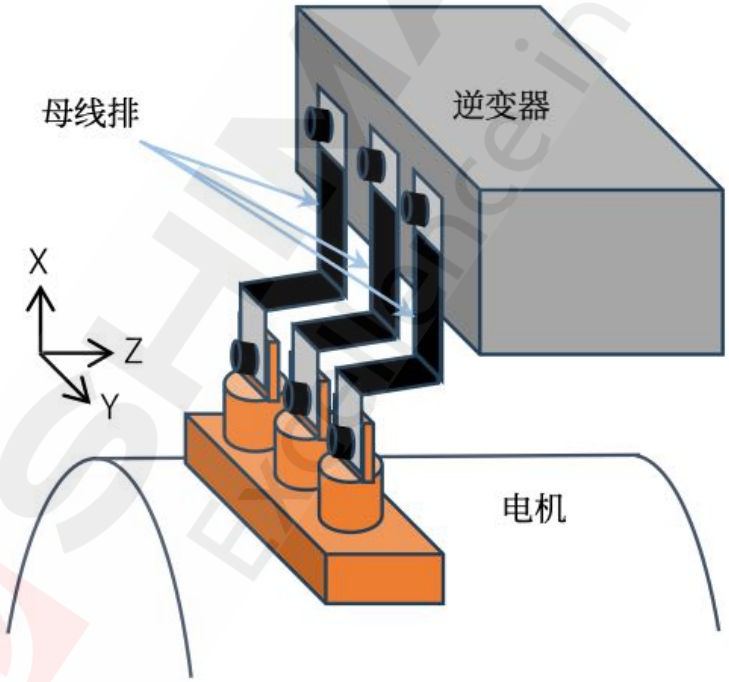


图1 用于连接逆变器与电机的母线示意图

按照图1所示连接方式设计的母线排被制作为试样。图2展示了试样的照片，表1列出了样品信息。其形状通过弯曲成型。材料为导电性能优异的韧铜。表面镀镍以防锈，并涂覆尼龙以绝缘。

真实的电动汽车输出功率可达100至150kW，电流高达约500A，因此需要大型母线排。本例假设采用类似电动摩托车所用的较小输出功率（数kW级别），尺寸设定为宽9mm、厚2mm，额定电流为50A。



图2 样品图片

表1 样品信息

参数	名称
材料	韧铜
尺寸	宽9mm、厚2mm
镀层	镀镍
覆盖层	尼龙覆盖

3.测试设备

测试使用了EMT-1kNV-50电磁动态疲劳试验机。图3展示了该试验机的照片。具有极高频率响应的电磁作动器可实现高精度动态测试。在这些测试中，最大测试频率为50Hz。EMT系列非常适合此类高频测试。制造了专用夹具，用于对试样施加面内和面外载荷。测试力传输部分设有耳轴机构，以适应试样的偏转角。



图3 测试设备

表2 测试设备信息

参数	参数设定
试验机主体类型	EMT-1kNV-50
载荷传感器	1kN
软件	Windows®Softwarefor4830
测试夹具	专用夹具

4.耐久测试

耐久性测试采用两种不同的载荷方向：一种是面内测试，在图1所示的Z轴方向施加线性循环载荷；另一种是面外测试，在Y轴方向施加线性循环载荷。载荷在正负之间往复变化，以0为平均值。控制模式为测试力，所施加的测试力基于逆变器的重量。假设约5kW逆变器的重量约为3kg（30N）。

表3和表4分别展示了面内和面外测试条件。在面内测试中，由于载荷作用于试样的厚度方向，疲劳强度预期较低，因此测试振幅设定为10N（逆变器重量的1/3）和30N。测试频率起始为10Hz，在100万次循环后逐渐调整为20Hz。在面外测试中，由于载荷施加在试样的宽度方向，其疲劳强度预计会高于面内测试。测试振幅为30N以及逆变器重量的两倍，即60N。测试频率从20Hz开始，在100万次循环后逐渐调整为50Hz。

图4展示了面内及面外测试照片。

表3 面内测试条件

参数	参数设定
载荷方向	面内（Z轴）
波形	正弦波
控制模式	试验力
幅值	10N、30N
平均值	0N
应力比	0.1
测试频率	10Hz~20Hz

表4 面外测试条件

参数	参数设定
载荷方向	面外（Z轴）
波形	正弦波
控制模式	试验力
幅值	30N、60N
平均值	0N
应力比	0.1
测试频率	20Hz~50Hz

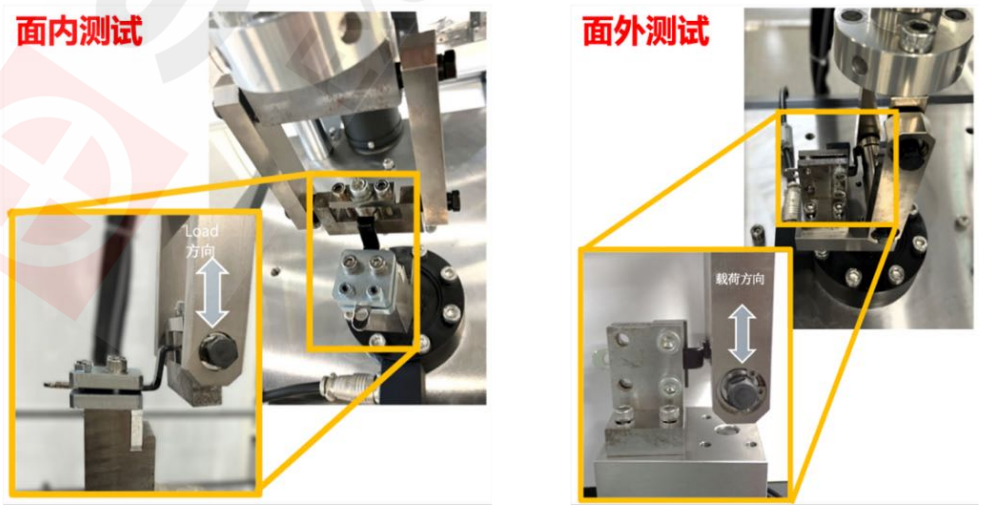


图4 面内、面外测试

5.测试结果

图5展示了面内30N(20Hz)和面外30N(50Hz)的时间波形图。在面内30N测试振幅和20Hz测试频率的测试条件下，经过110万次循环后的测试力和位移的时域波形。位移是通过试验机作动器行程测量的。正弦波形良好，可以清楚地看到实现了无干扰的稳定控制。在面外30N测试振幅和50Hz测试频率下，经过1000万次循环期间的测试力和位移时域波形。与面内测试类似，面外测试中的正弦波成形良好，实现了无干扰的稳定控制。

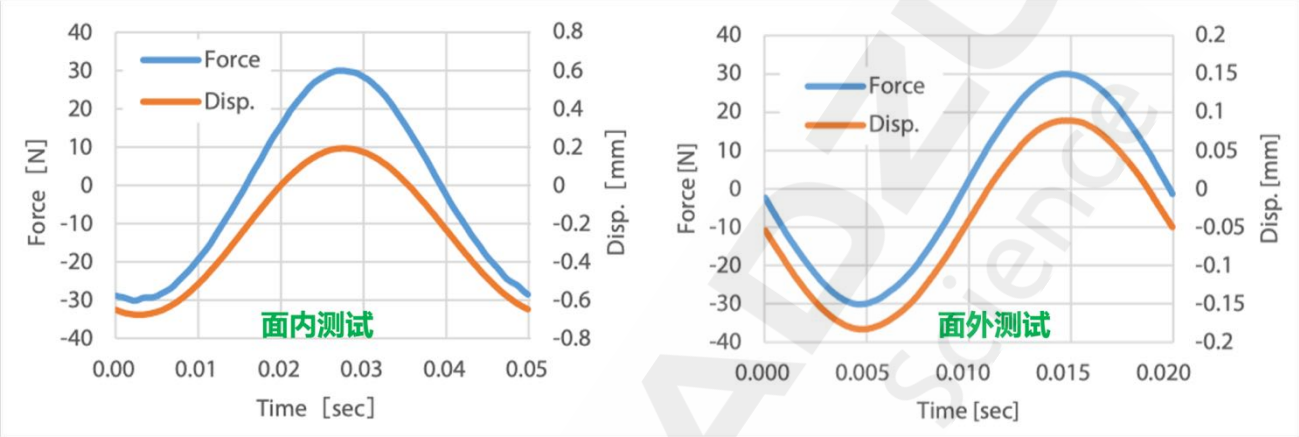


图5 面内30N(20Hz)和面外30N(50Hz)的时间-波形图

图6展示了面内30N(20Hz)和面外30N(50Hz)的力-位移图。在面内测试条件为30N测试振幅和20Hz测试频率下，经过110万次循环期间的测试力-位移图，可以看出，即使在零点交叉处也没有干扰。在面外以30N的测试振幅和50Hz的测试频率进行1000万次循环的测试力-位移图，可以看出，即使在零点交叉处也没有扰动。因此，EMT系列即使在50Hz的频率下也表现出优异的响应。如果在高频下进行测试，可以缩短测试时间并高效推进测试。

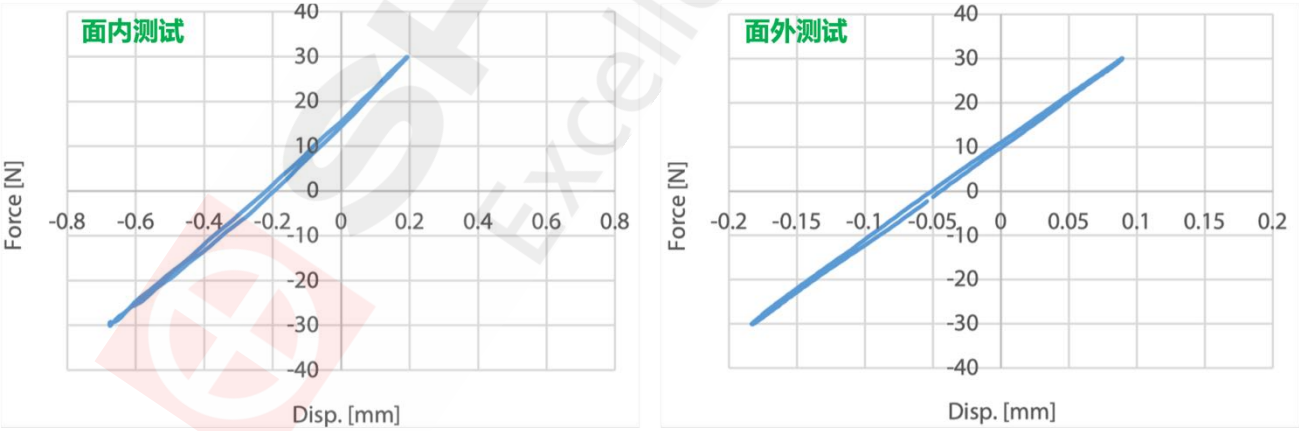


图6 面内30N(20Hz)和面外30N(50Hz)的力-位移图

图7展示了位移峰值与循环次数关系图。10N的面内测试和30N的面外测试被停止，因为试样分别在250万次和1000万次循环后仍未断裂。10N面内测试的位移峰值变化趋势与30N面外测试几乎相同。

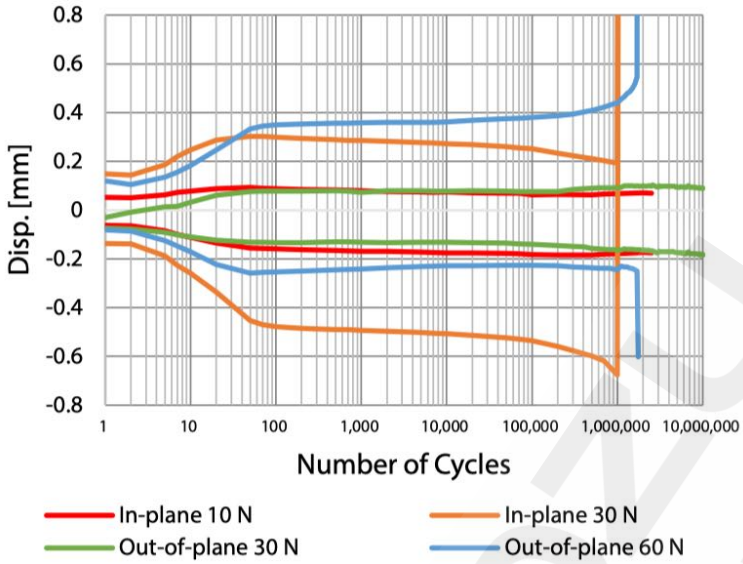


图7 位移峰值-循环次数图

图8展示了测试力-断裂循环图。当测试力为30N（相当于逆变器的重量）时，在面内测试中，断裂发生在大约140万次循环后；而在面外测试中，即使经过1000万次循环，断裂也并未发生。当测试力为60N（相当于逆变器重量的两倍）时，在面外测试中，断裂发生在大约170万次循环后，并且其疲劳强度被发现是面内测试的两倍。

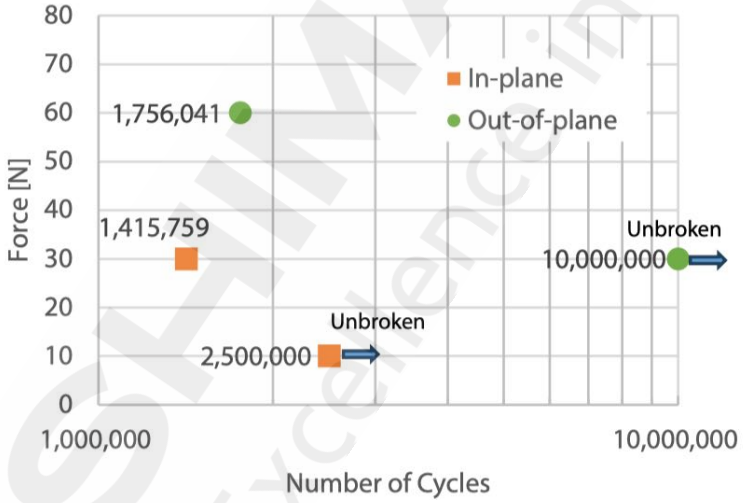


图8 断裂力-循环次数图

6.试样断裂面对比

图9展示了面内30N试验和面外60N试验试样的断裂面照片。在两种情况下，失效位置均位于同一弯曲处。在面内测试的断裂面上，可以观察到裂纹沿面内方向扩展时形成的海滩纹。另一方面，在面外测试的断裂面上，可以看到海滩纹，裂纹的扩展方式仿佛从两侧发生扭转。

在图7所示的位移峰值-循环次数图中，面内30N曲线的峰值宽度恒定，且平均值逐渐变化。这可能是因为裂纹在单一方向上扩展。另一方面，面外60N曲线的峰值宽度逐渐变宽。这可能是因为裂纹在两个方向上持续均匀扩展，并在中心处断裂。



图9 面内30N和面外60N试验力下试验断裂表面照片

7.结论

使用疲劳试验机测试了小型母线排在两个不同方向上的耐久性。结果，明确了每个载荷方向的疲劳强度。此外，在观察每个载荷方向的试样断裂面时，确认了指示裂纹扩展方向的海滩纹。根据选项组合，该疲劳试验机可以测试实际试样的耐久性。如果与恒温槽结合使用，则可以在与电流产生焦耳热时相同的温度下测试母线排。通过使用测试能力更大的试验机，可以测试更大电动汽车的全尺寸母线排。这对于各种零部件的开发和质量控制非常有用。

使用气体轴承改进承受水平载荷的疲劳试验机的测试控制

1.引言

在疲劳试验中，样品会以不同的模式、方向、频率和幅度进行循环加载，以模拟机械部件的实际使用条件。在某些测试中，会根据需要施加垂直于执行器运动方向的载荷（水平力）。在此类条件下，作动器内部轴承会产生摩擦力，实现平滑的试验控制变得困难。

采用了新开发的气体轴承替代传统的标准轴承，从而实现了更平滑的试验控制。本文中，对一台电磁疲劳试验机施加了水平载荷，并比较了使用标准轴承和气体轴承获得的输出波形，以评估控制精度。。

2.测试设备

试验使用电磁式疲劳试验机进行。这类试验机配备了具有极高频率响应的电磁作动器，可实现高精度的疲劳试验（4830控制器）。试验机配备了标准（无油）轴承和气体轴承。在气体轴承中，加压空气在执行器与轴承之间形成薄气体层，减少了侧向力引起的摩擦，从而改善了试验控制精度。



图1 疲劳试验机

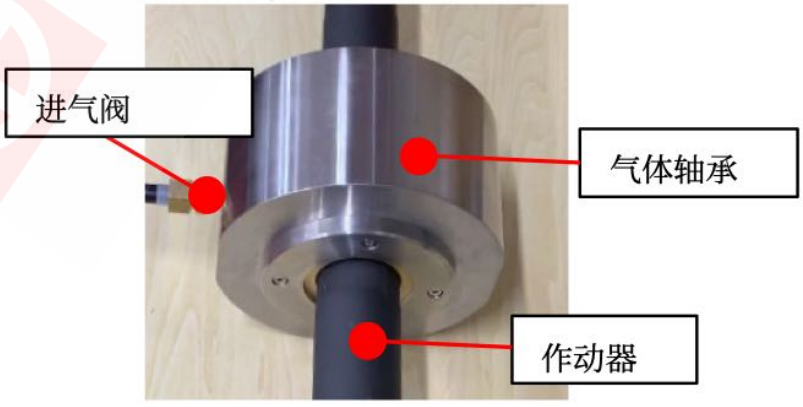


图2 气体轴承

3.实验步骤

为评估气体轴承对控制精度的影响，采用表1所示条件进行了测试。如图3所示，通过配重砝码和滑轮向作动器施加了100N的水平力。测试采用正弦载荷路径进行行程控制。测试细节见表1，行程-时间测试结果见图4。尽管最大和最小设定值均正确施加，但使用标准轴承时，作动器的返回运动存在延迟。在使用0.5MPa加压空气加载的气体轴承情况下，作动器的运动显得更为平滑。当气压增至0.65MPa时，行程信号呈现出接近理想正弦波的形状。

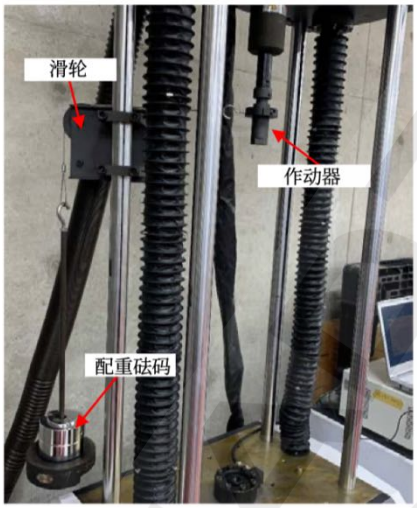


图3 水平载荷施加于试验机

表1 气体轴承评估测试条件

参数	参数设定
波形	正弦波
控制模式	作动器行程
最大行程	1mm
最小行程	-1mm
测试频率	1Hz
水平载荷	100N
轴承	标准轴承 气体轴承(0.5MPa,0.65MPa)

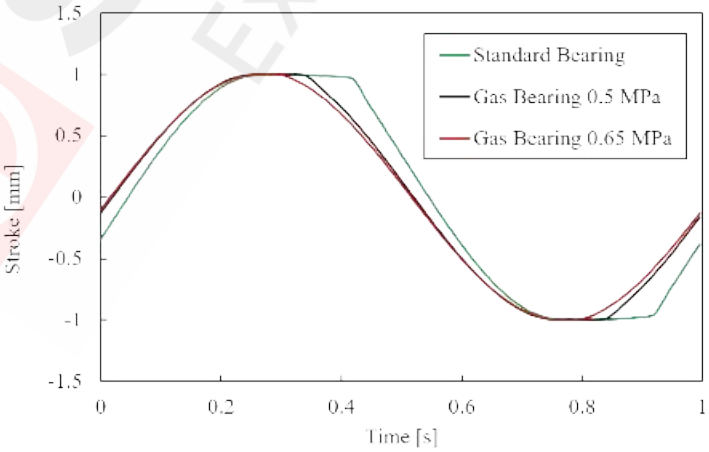


图4 行程-时间图

4.ASTMF384压缩弯曲试验

根据ASTMF384标准，使用骨科骨折固定装置的夹具进行了测试。所用设备的照片如图5所示。在ASTMF384测试中，试样被倾斜放置，作动器同时承受力的垂直分量和水平分量。进行了最大力为50N、应力比为0.1的测试。测试详情见表2。如图6所示，使用加载了0.65MPa的气体轴承获得的波形最接近理想的正弦波形，与图4所示的先前测试数据相似。

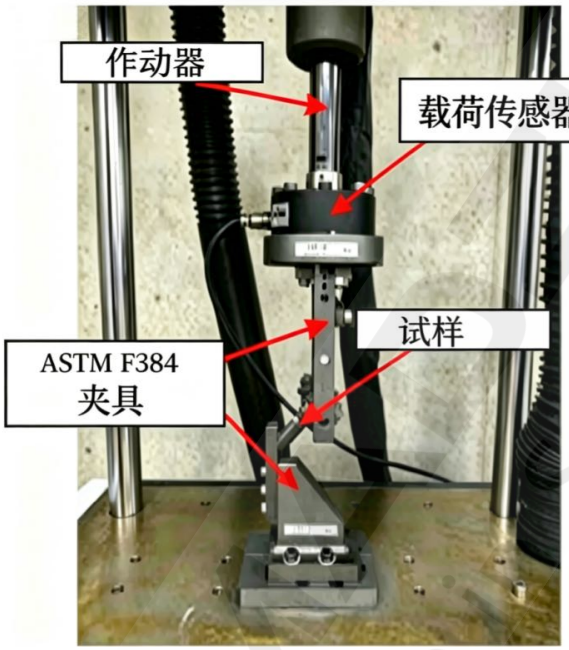


图5 ASTMF384弯曲压缩试验

表2 ASTMF384弯曲压缩试验的测试条件

参数	参数设定
波形	正弦波
控制模式	试验力
最大加载试验力	50N
应力比	0.1
测试频率	1Hz
轴承	标准轴承 气体轴承(0.5MPa,0.65MPa)

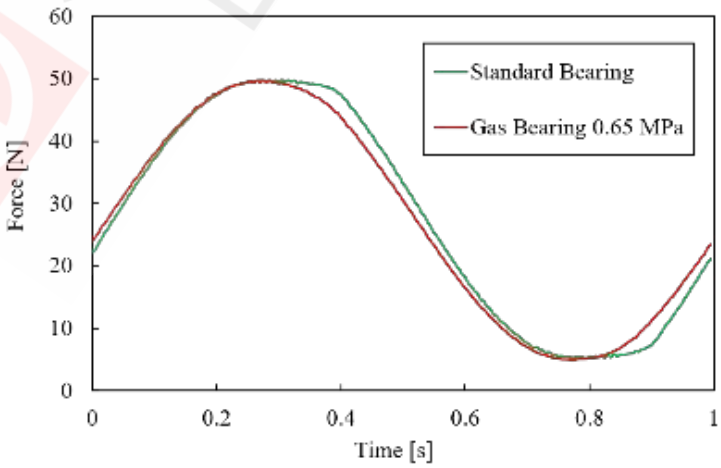


图6 试验力-时间图

5.结论

这些测试比较了测试机在承受水平载荷时，使用标准轴承和空气轴承的输出波形（行程和力）。在使用标准轴承以及使用0.5MPa加压空气加载的气体轴承的情况下，由于侧向力引起的摩擦，作动器的运动并不平滑。然而，当空气压力提高到0.65MPa时，输出波形呈现为理想的正弦波。因此，在进行会产生水平力的测试（例如ASTMF384）时，使用气体轴承可以进行精确控制的测试。

SHIMADZU
Excellence in Science

通过组合试验软件对橡胶隔振器进行耐久性试验前后静态弹簧常数与动态特性的连续自动测量

1.引言

橡胶隔振器是一种旨在防止或减轻振动和冲击传递的产品。它广泛应用于交通运输设备、建筑和工业机械等多个领域。

JISK6385《橡胶隔振器-试验方法》定义了几种用于评估橡胶隔振器性能的试验方法和术语。为了估算橡胶隔振器的疲劳寿命，标准中规定了一种耐久性试验方法，该方法通过对橡胶隔振器施加重复载荷，以评估其是否存在失效、裂纹或性能变化。评估橡胶隔振器的耐久性极其重要，因为其性能劣化可能导致噪音和不稳定。

岛津的疲劳耐久试验机Servopulser的4830用Windows软件具备一项称为组合试验的功能，可自动组合多项测试并连续执行。本文通过组合试验，介绍了在耐久性试验前后对橡胶隔振器的静态弹簧特性与动态特性进行连续自动测量的示例。

2.样品信息

所使用的试样为市场上常见的块状圆形隔振器。图1展示了试样的照片，表1则列出了试样信息。



图1 样品图

表1 样品信息

参数	名称
材料	天然橡胶
直径	20mm
厚度	15mm
持续载荷	160N
负载载荷	280N

3.测试设备

在这些测试中使用了EMT-1kNV-50电磁疲劳耐久试验机。图2展示了该测试设备的照片。具有极高频率响应的电磁作动器可实现高精度动态测试。在这些测试中，最大测试频率为100Hz。EMT系列最适合在

此类高频下进行测试。



图2 电磁疲劳试验机EMT-1kNV-50

表2 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	EMT-1kNV-50
测试夹具	10kN手动防滑型平板夹具
载荷传感器	1kN
作动器行程	±50mm
控制器	4830控制器
软件	Windows®Softwarefor4830

4.测试方法

本次测试由三项试验组合而成：静态弹簧特性试验、动态特性试验和耐久性测试。各项试验均使用独立的软件执行，并由组合试验软件实现持续自动化。所有测试均在室温（24°C）下进行。

表3显示了静态弹簧特性试验的测试条件。使用了静态弹簧特性测试软件。该软件作为4830用Windows软件的标准配置提供，可依据JISK6385进行测试。由于试样是用于压缩用途的橡胶隔振器，测试方法为往复式。载荷量为试样的允许载荷，计算范围由试验力的范围指定，不包括曲率变化的部分。

表3 面内测试条件

参数	参数设定
测试模式	静态特性测试
控制TD	试验力
方法	往返法
载荷	280N
计算范围	100N~200N
测试速度	8N/s
预加载	5N

动态特性测试使用了疲劳/耐久测试软件，该软件同样作为4830用Windows软件的标准配置包含在内。此测试对应于JISK6385中动态特性测试的非共振法。

关于测试条件，平均值定义为实际力或实际挠度。在本例中，试样的持续载荷被用作平均值。

振幅和激励频率有两种类型。测试在振幅为±0.5mm、激励频率为15Hz的条件下进行，或在振幅为±0.05mm、激励频率为100Hz的条件下进行。本次测试在两种条件下均进行了。EMT系列具有高响应性，因此可以进行100Hz的高频激励。此外，利用4830控制器的位移控制和试验力监测功能，可以将平均值设为试验力，振幅设为位移。获得的特性值包括绝对弹簧常数、储能弹簧常数、损耗弹簧常数、阻尼系数、损耗因子和能量。

表4 动态特性测试1的测试条件

参数	参数设定
测试模式	疲劳/耐久测试
控制TD	位移
波形	正弦波
测试频率	15Hz
振幅	±0.5mm
平均值	160N

表5 动态特性测试2的测试条件

参数	参数设定
测试模式	疲劳/耐久测试
控制TD	位移
波形	正弦波
测试频率	100Hz
振幅	±0.5mm
平均值	160N

耐久性试验是使用疲劳/耐久测试软件进行的。JISK6385规定了两种类型的耐久性试验：恒定位移耐久性试验和恒力（恒定载荷）耐久性试验。由于恒力（恒定载荷）耐久性试验被认为在实际应用中更可取，因此进行了恒力（恒定载荷）耐久性测试[2)]。测试条件规定为1W±2W[W：平均力（平均载荷）]，频率为2Hz。考虑到实际应用，平均力W被设定为试样的持续载荷，循环次数为100,000次。

表6 动态特性测试2的测试条件

参数	参数设定
测试模式	疲劳/耐久测试
控制TD	试验力
波形	正弦波
测试频率	2Hz
振幅	±320N
平均值	160N
循环次数	100,000

已为上述四项测试条件创建了文件，并将组合试验软件设置为按此顺序执行静态弹簧特性试验、动态特性试验1、动态特性试验2、耐久性测试、静态弹簧特性试验、动态特性试验1和动态特性试验2。图3显示了组合试验软件的条件设置界面。测试如图4所示，试样的螺纹部分使用手动防滑型平板夹具夹持。

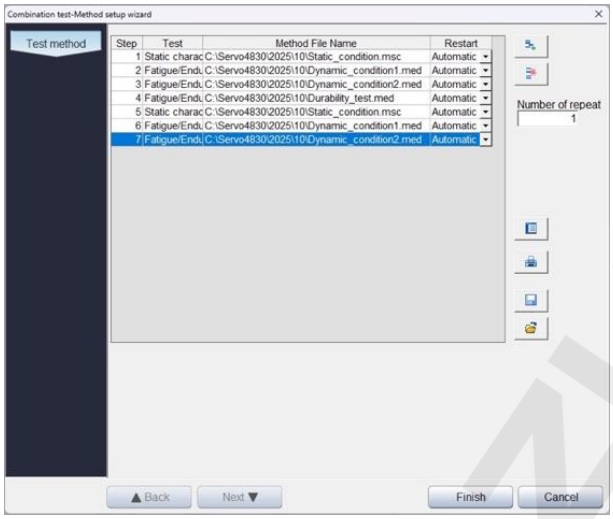


图3 组合试验软件界面

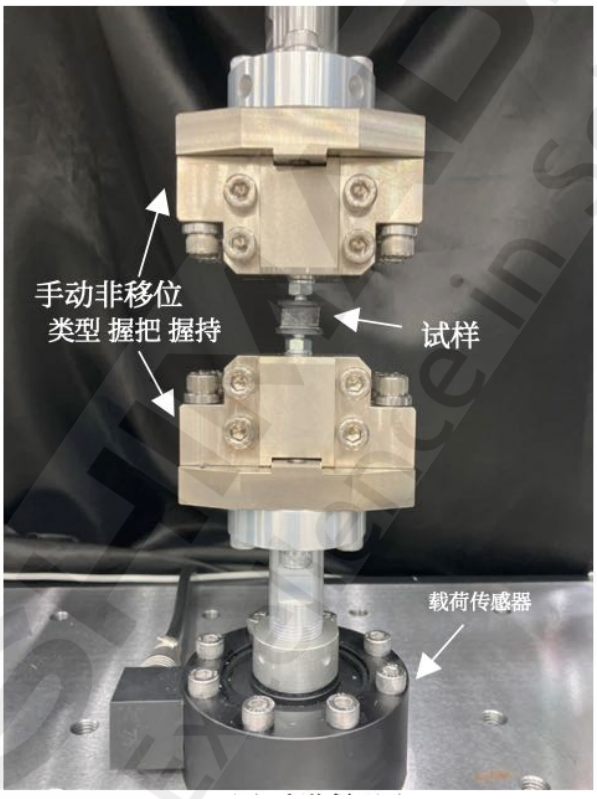


图4 测试视图

5.测试结果

图5显示了耐久性测试的循环峰值图，图6显示了时间波形图。力以蓝色显，位移以浅蓝色显示。由于在测试条件下振幅大于平均值，因此同时施加了拉压载荷。然而，图6显示在零试验力时波形无异常抖动。因此，使用夹具固定试样的方法似乎没有问题。

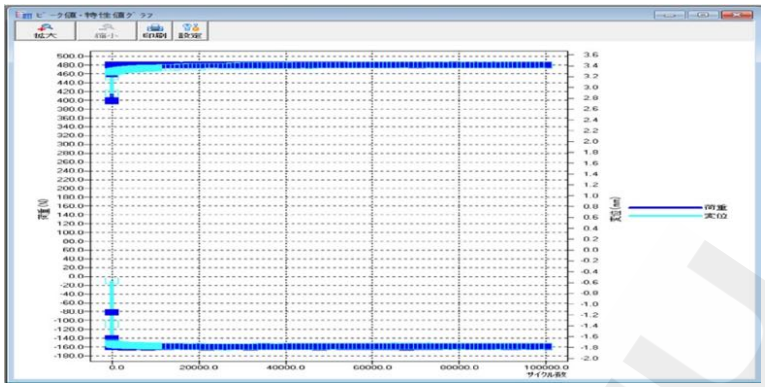


图5 耐久性测试的循环-峰值图

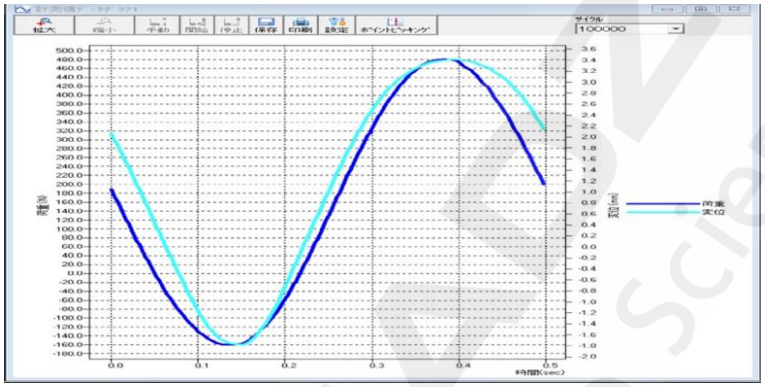


图6 耐久性测试时间波形图（100,000次循环时）

图7展示了耐久性测试循环次数与动态特性数值的关系图。可以看出，各数值在100,000次循环内保持稳定。根据JISK6385标准，试样应进行空气冷却以避免橡胶发热导致的温升。然而，本次测试并未安装冷却装置。根据图7的结果，即使没有冷却装置，估计也未发生因发热导致的温升。

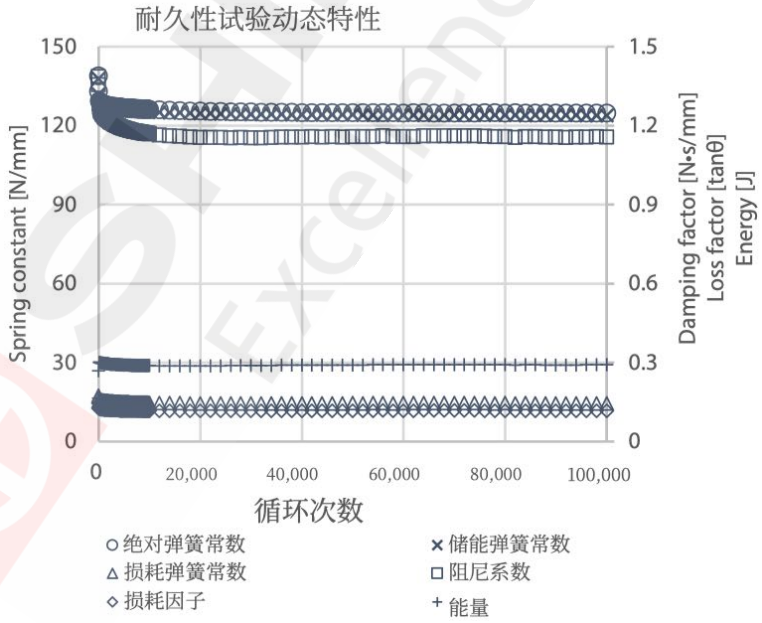


图7 耐久性测试的动态特性值-循环次数图

6.静态弹簧常数

图8显示了耐久性测试前后静态弹簧特性试验的位移与试验力图，表7显示了静态弹簧特性值。静态特性测试软件可以计算能量以及静态弹簧常数。

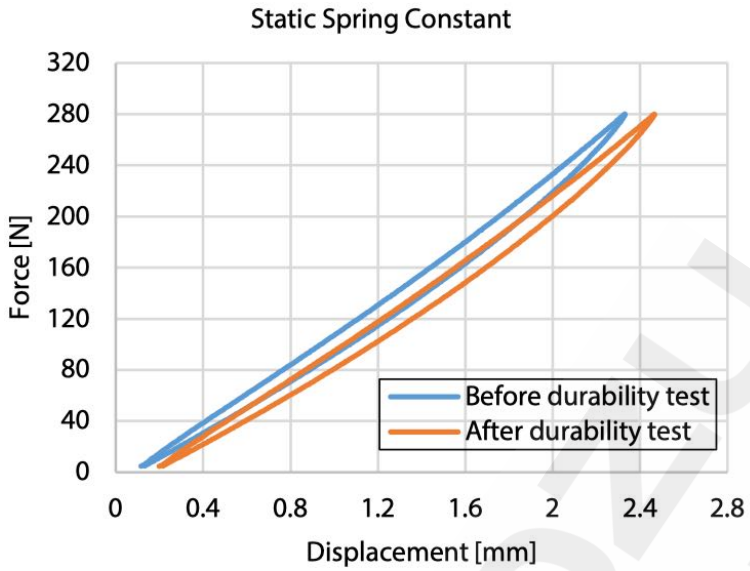


图8 静态弹簧特性试验的力-位移曲线

表7静态弹簧特性试验结果

参数	静态弹簧常数	能量
耐久性测试前	123.7N/mm	0.02828J
耐久性测试后	121.4N/mm	0.02886J

7.动态特性

图9和图10展示了耐久性测试前后的动态特性测试1结果。由于波形中无异常振动，负载似乎没有问题。图11展示了动态特性值-循环次数曲线图。耐久性测试后的所有数值均小于测试前。各特性的平均值是在200至1000次循环区间内获得的，该区间内数值保持稳定。平均值如表8所示。

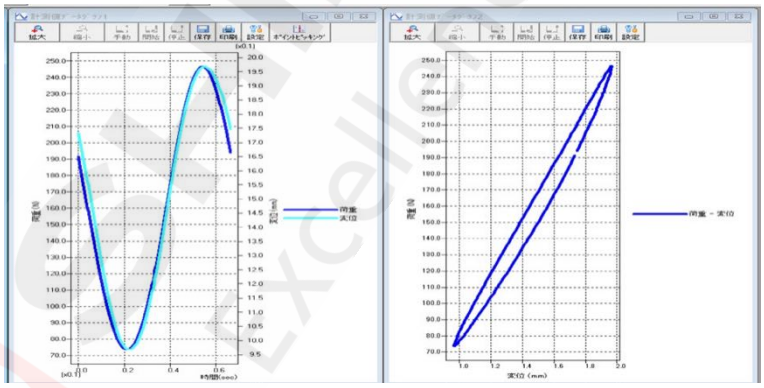


图9 耐久性测试前动态特性测试1的时间波形图（10,000次循环时）

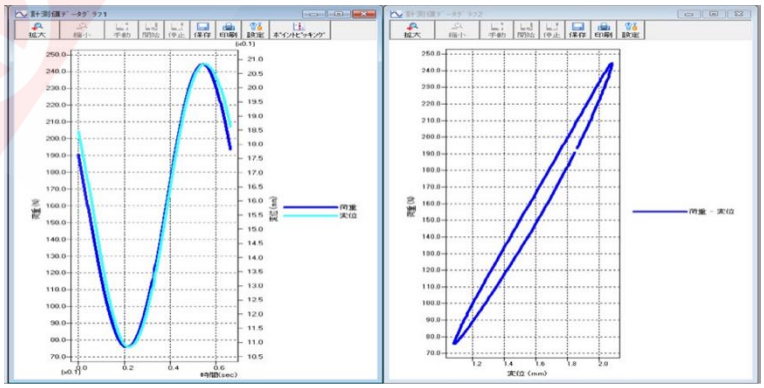


图10 耐久性测试后动态特性测试1的时间波形图（10,000次循环时）

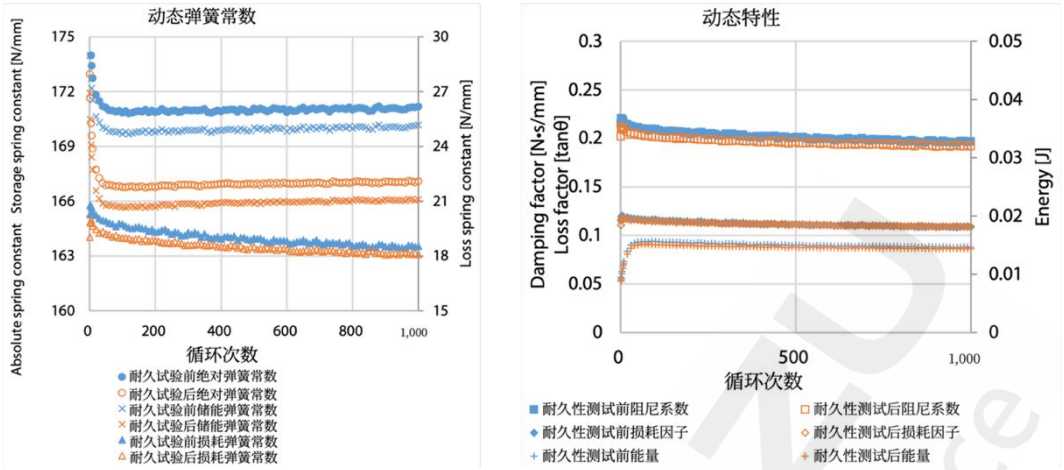


图11 动态特性测试1的动态特性值-循环次数曲线图

表8 动态特性测试1的动态特性值

参数	绝对弹簧常数	存储弹簧常数	损耗弹簧常数
耐久性测试前	171.0N/mm	170.0N/mm	18.84N/mm
耐久性测试后	167.0N/mm	165.9N/mm	18.38N/mm
参数	阻尼系数	损耗因子	能量
耐久性测试前	0.1999N•s/mm	0.1109	0.0149J
耐久性测试后	0.1950N•s/mm	0.1107	0.0146J

•基于200~1,000次循环的平均值

图12和图13展示了耐久性测试前后的动态特性测试2结果。尽管测试是在100赫兹的高频率下进行的，波形中并未出现抖动，因此负载似乎没有问题。图14展示了各特性值与循环次数的关系图。耐久性测试后的所有值均小于测试前的值。当数值稳定时，各特性的平均值是在2,000至10,000次循环范围内计算的。平均值如表9所示。

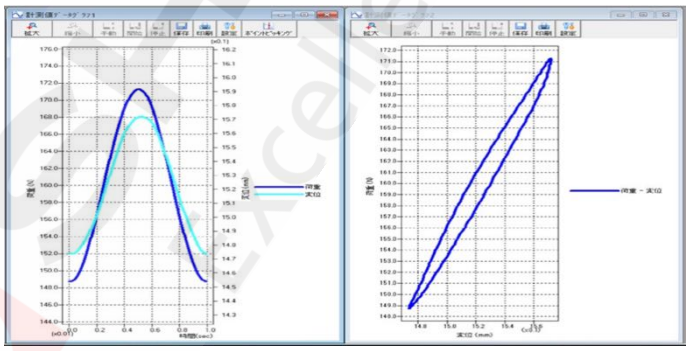


图12 耐久性测试前动态特性测试2的时间波形图（10,000次循环时）

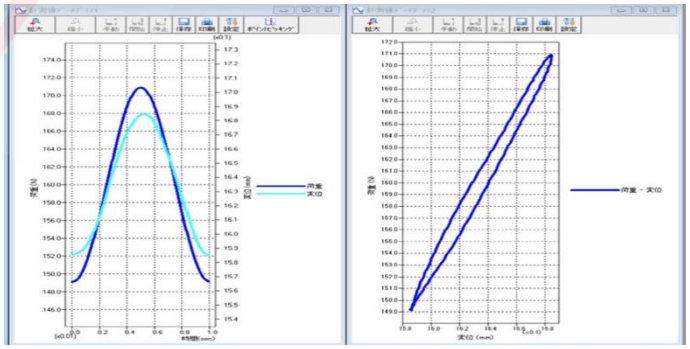


图13 耐久性测试后动态特性测试2的时间波形图（10,000次循环时）

表9 动态特性测试2的动态特性值

参数	绝对弹簧常数	存储弹簧常数	损耗弹簧常数
耐久性测试前	225.4N/mm	223.6N/mm	28.14N/mm
耐久性测试后	216.0N/mm	214.6N/mm	24.50N/mm
参数	阻尼系数	损耗因子	能量
耐久性测试前	0.0448N•s/mm	0.1258	0.22mJ
耐久性测试后	0.0390N•s/mm	0.1142	0.19mJ

•基于200~1,000次循环的平均值

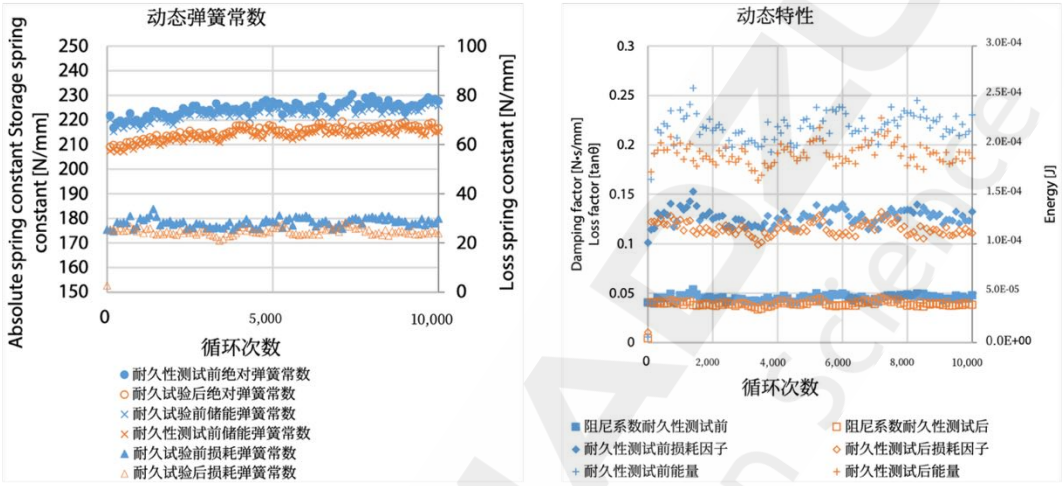


图14 动态特性测试2的动态特性值-循环次数图

8.结论

使用疲劳耐久试验机，基于JISK6385标准，对比了橡胶隔振器在耐久性测试前后的静态弹簧特性与动态特性。组合测试软件能够连续自动执行各项试验，从而减少工作时间。高响应性的EMT系列还能实现振幅0.05mm、100Hz的高频测试。

悬架支柱的阻尼力特性试验[JASOC611]

1.引言

在实现车辆舒适驾乘体验方面，各种部件发挥着重要作用。其中，悬架系统中使用的悬架支柱是一个关键部件，它通过缓解不平整路面引起的冲击来稳定车身。

“JASOC611汽车悬架减振器”是由日本汽车工程学会（JSAE）制定的日本汽车标准组织（JASO）标准，规定了悬架支柱的定义、质量和试验方法。目前尚无与JASOC611等效的国际标准。为了提高悬架支柱的性能，需要通过改变激励速度来测量阻尼力与速度的关系。通过测量响应，例如速度与阻尼力的关系以及Lissajous波形，可以确认悬架支柱的性能。

本文介绍了依据日本汽车标准组织JASOC611标准中规定的“阻尼力特性试验”测试方法，在岛津EMT系列电磁疲劳试验机上进行的应用示例。

2.测试设备

本次测试使用了EMT-1kNV-50电磁动态疲劳试验机。图1展示了该试验机的照片。其电磁作动器具有极高的频率响应，可实现高精度的动态测试。本次测试中，最大测试速度为0.6m/s。EMT系列非常适用于此类高频测试。



图1 电磁疲劳试验机EMT-1kNV-50

表1 测试设备

参数	参数设定
试验机主体类型	EMT-1kNV-50
测试夹具	减振支柱专用夹具
载荷传感器	1kN
作动器行程	±50mm
控制器	4830控制器
软件	Windows®Softwarefor4830

表1显示了设备信息，图2显示了试样在测试机上的安装方式。所使用的夹具是悬架支柱夹具。试样是一个市售的四轮前悬架支柱。



图2 电磁疲劳试验机EMT-1kNV-50

3.测试方法

试验通过在不同激励速度下组合多项疲劳与耐久测试进行。每项测试均使用独立的测试条件文件执行，并通过组合测试软件实现自动化。所有测试均在室温（24°C）下进行。

测试条件如表2所示。0.1mJASOC611标准规定了0.05m/s、0.1m/s、0.3m/s、0.6m/s和1.0m/s的激励速度。EMT-1kNV设备的速度能力为1.0m/s，但本次未进行该速度测试，因为1.0m/s下的阻尼力超过了试验机的测试力容量。其他条件参数均依据标准设定。由于标准中规定重复次数为数次，测试时间设定为约1分钟。

在4830用Windows软件中，除了激励频率外，还可以使用激励速度来设置测试条件。此功能通过从激励速度计算出激励频率，省去了手动设置激励频率的麻烦。图3显示了4830用Windows软件的测试条件设置界面。

表2 测试条件

参数	参数设定
测试模式	疲劳/耐久测试
控制TD	位移
波形	正弦波
测试速度	0.05m/s、0.1m/s、0.3m/s、0.6m/s
振幅	±50mm
均值	0mm
重复次数	10,20,60,100
温度	室温24℃



图3 疲劳/耐久测试条件设置向导

针对不同的激励速度创建了测试条件文件，并设置为由组合测试软件顺序执行。图4展示了该组合测试软件的条件设置界面。

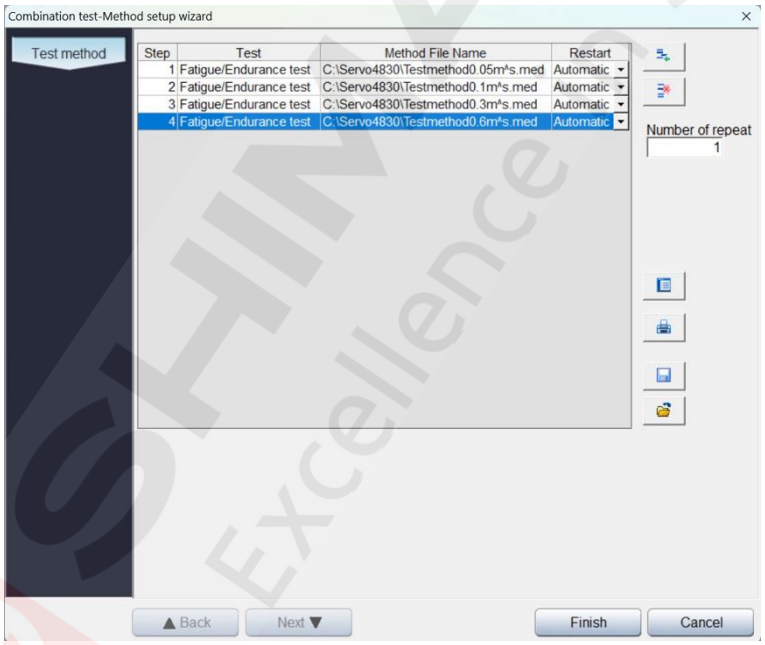


图4 组合测试条件设置向导

图5至图8展示了各测试条件下的时域波形图和循环峰值图。蓝色表示测试力，浅蓝色表示活塞位移。测试力对应阻尼力，活塞位移对应行程。

在所有时域波形图中，零测试力下波形均无异响，因此使用夹具固定试样的方法似乎没有问题。此外，循环峰值图中的测试力未出现极端变化，表明试样中未受发热影响。

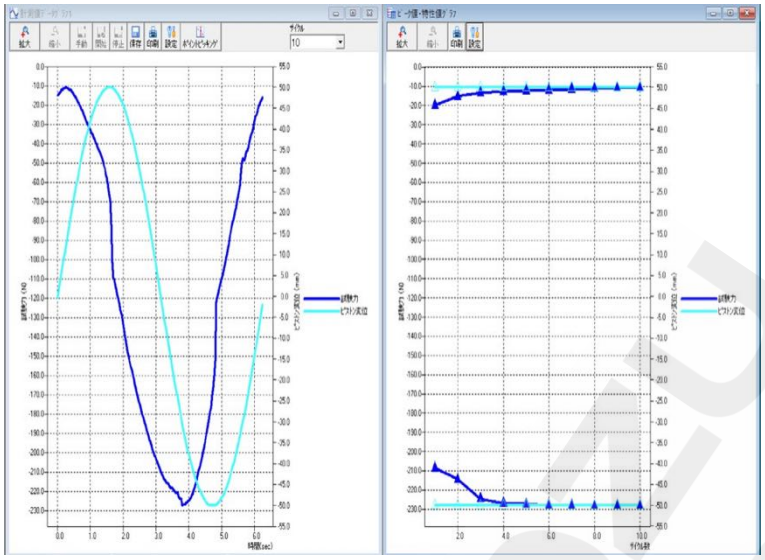


图5 0.05m/s测试结果（10循环时）

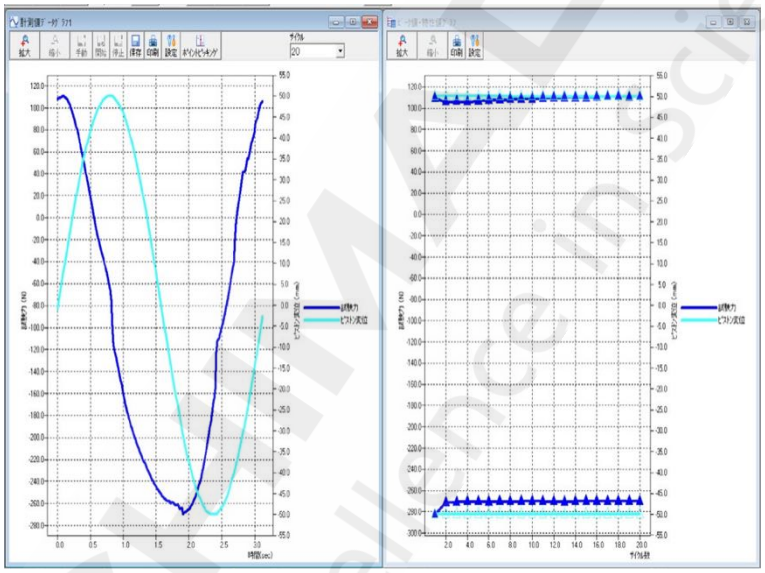


图6 0.1m/s测试结果（在20循环时）

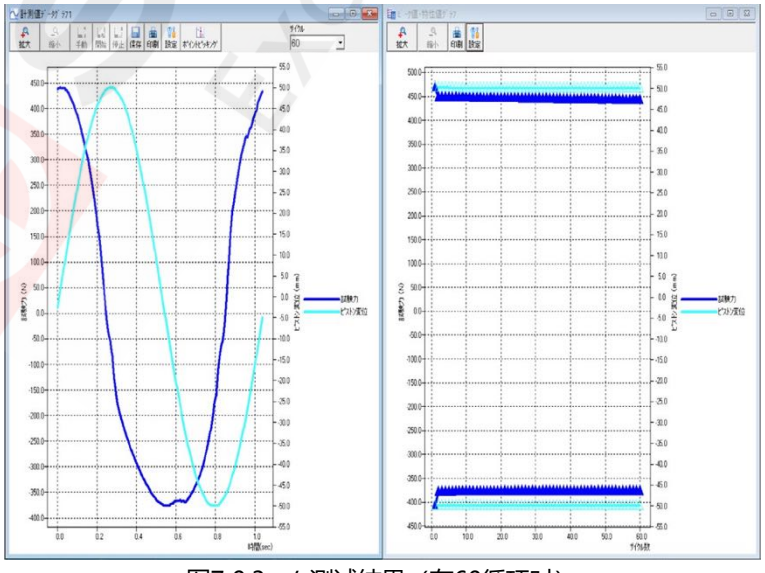


图7 0.3m/s测试结果（在60循环时）

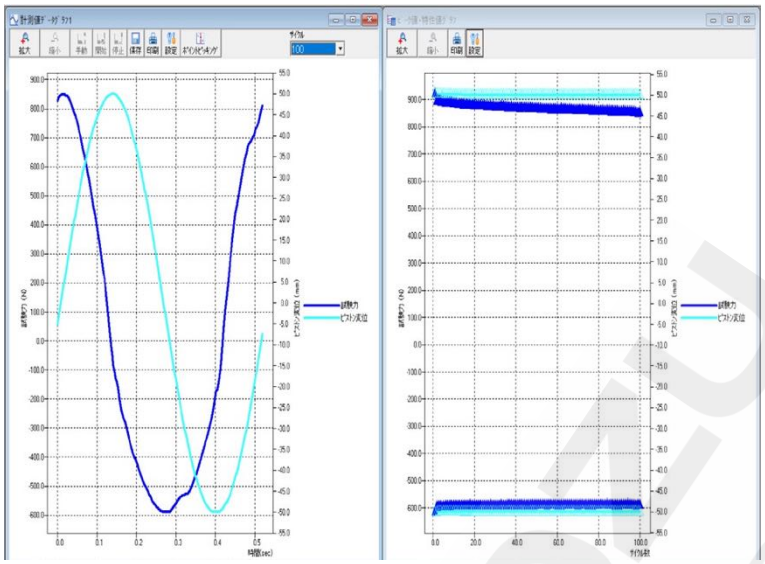


图8 0.6m/s测试结果（在100循环时）

4.阻尼力特性

测试结果已转换为文本文件，并对阻尼力特性进行了分析。图9展示了各激励速度下的阻尼力与行程结果。可以看出，阻尼力随着激励速度的增加而增大。图10显示了各激励速度下的阻尼力与速度结果。速度通过对行程进行时间微分获得。通过关注各激励速度下图形的左右边缘，可以看出激励速度已达到设定值，且控制具有高精度。

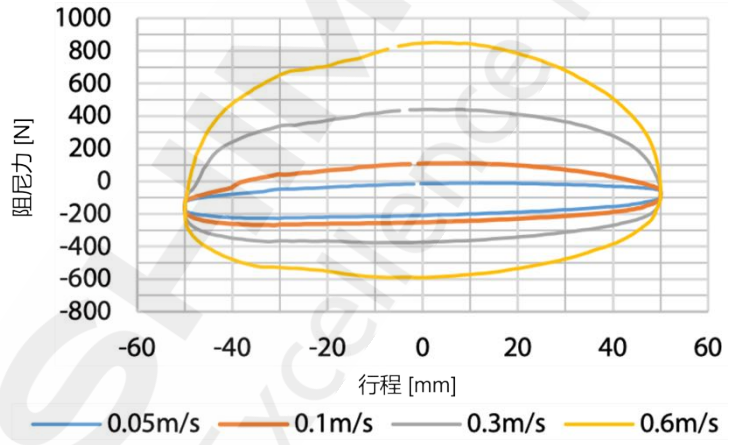


图9 阻尼力-行程曲线图

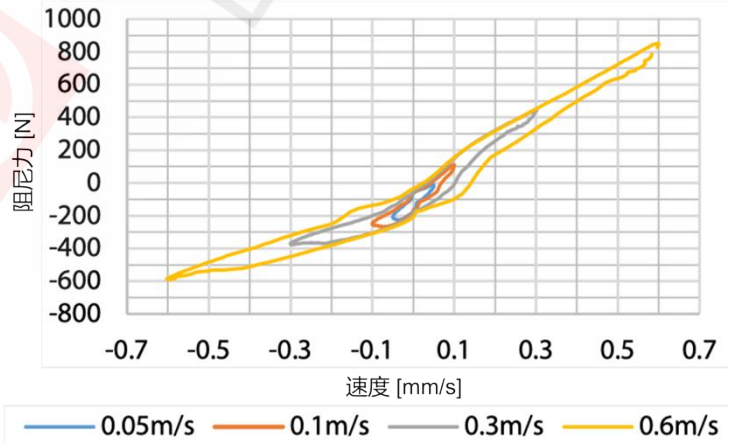


图10 阻尼力-速度曲线图

阻尼力-速度特性曲线图显示了各激励速度下的垂直阻尼力峰值绘制于阻尼力-速度关系图中。蓝色代表拉伸侧，橙色代表压缩侧。图11展示了该阻尼力-速度特性曲线图。悬架支柱的阻尼力特性即通过此阻尼力-速度特性曲线图进行评估。

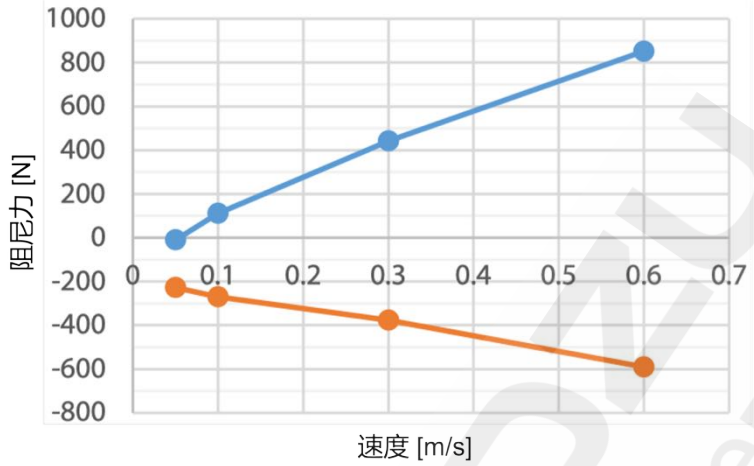


图11 阻尼力-速度特性曲线图

5.结论

使用EMT系列电磁疲劳试验机和4830用Windows软件，基于JASOC611对悬架支柱进行了阻尼力特性试验。试验条件通过激励速度设定，并确认试验能按设定被精确控制。本次参考的标准“JASOC611汽车悬架减振器”源自“JASOC602汽车零部件-悬架系统用伸缩式减振器”[2)]。虽然C602也规定了阻尼力特性试验，但其与C611几乎等效，只需更换夹具即可使用相同的试验机配置。

6.其他测试设备系列

由于本次测试使用了EMT-1kNV-50，在激励速度达到1m/s时超出了其测试力容量，因此该速度下的测试无法进行。不过，如图12（1）所示，岛津的产品线中还有容量为5kN的EMT-5kNV可供选。EMT-5kNV能够应对更多种类的试样测试。还如图12（2）所示，拥有一台减振器性能评估专用试验机，它是标准产品的定制版本。在该专用试验机中，一个条件文件最多可设置10个级别的激励速度测试条件，并且可以从软件中输出阻尼力-速度特性曲线图。当配备横向载荷加载机构时，即可按照JASOC602和C611标准进行“滑动阻力测试”。

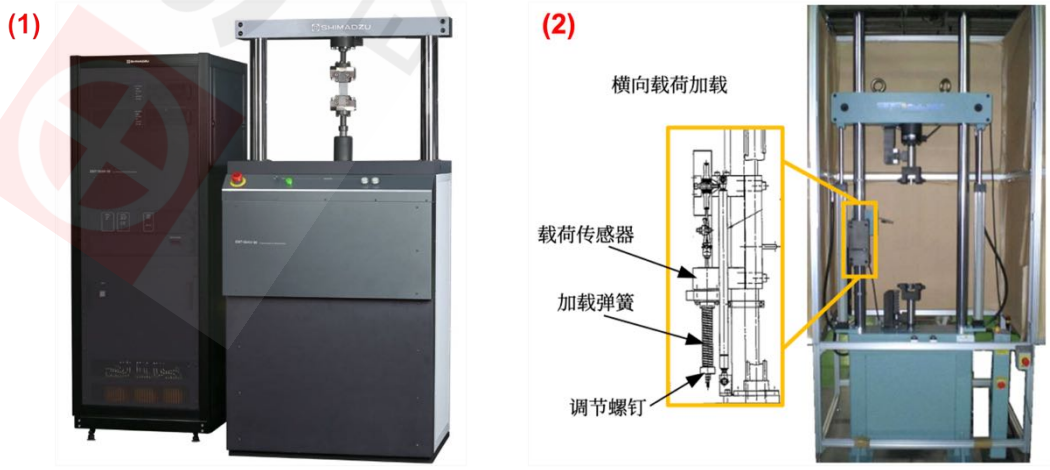


图12 (1)EMT-5kNV疲劳试验机
(2)减振器性能评估专用试验机用于减震器性能评估

牙科矫正种植体的疲劳试验

1.引言

牙科种植体，通常是指在颌骨中植入钛制人工牙根（种植体），固定人工牙齿，恢复牙齿原有功能和外观的治疗方法。将这种“在骨骼中固定人造物”的种植体技术应用于牙科矫正的方法，即为种植体矫正。利用种植体进行的矫正治疗，通过在骨骼中植入人造物，可以获得更坚固的固定源，从而带来诸如扩大牙齿移动范围、扩大非拔牙治疗的可能性以及扩大非外科矫正治疗范围等优点。然而，作为漱口水使用的氟化物溶液，可能对钛制种植体的耐久性产生负面影响。为了明确这种影响并开发耐久性优异的牙科矫正种植体，有必要在液体中对牙科矫正种植体进行疲劳试验。本次，我们在37℃的纯水中进行了牙科矫正种植体的疲劳试验，现将结果介绍如下。

2.测量系统

试验使用了电磁力式微小试验机MicroServoMMT-101NV-10。同时，使用恒温水浸试验装置在37°C的纯水中进行了试验。试验情况如图1所示，所使用的试验装置列于表1。

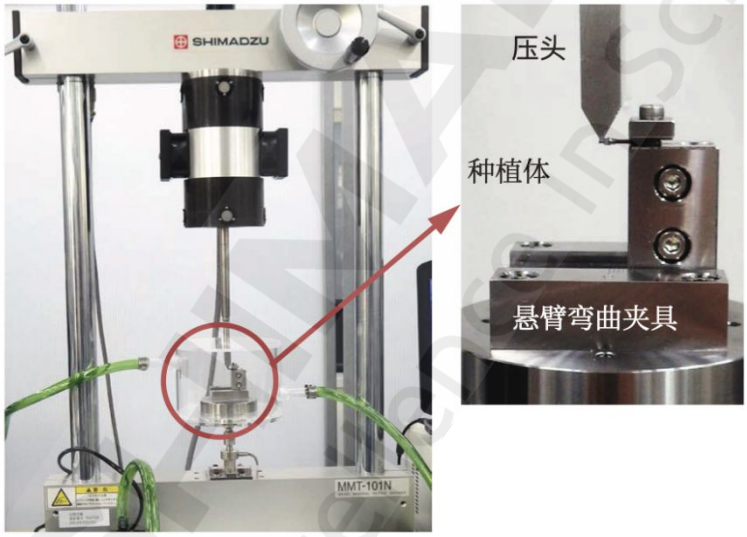


图1 测试样品

表1 试验装置

参数	名称
试验机	MMT-101NV-10
载荷传感器	100N
夹具	种植体悬臂弯曲夹具
水槽	恒温水浸试验装置

3.静态试验结果

为确定疲劳试验中的载荷水平，首先在室温大气环境中进行了静态试验。试验条件见表2，静态试验结果见图2。根据静态试验结果，最大强度的平均值为35.4N。

表2 静态试验条件

参数	名称
试验速度	5mm/min
试验数	n=5

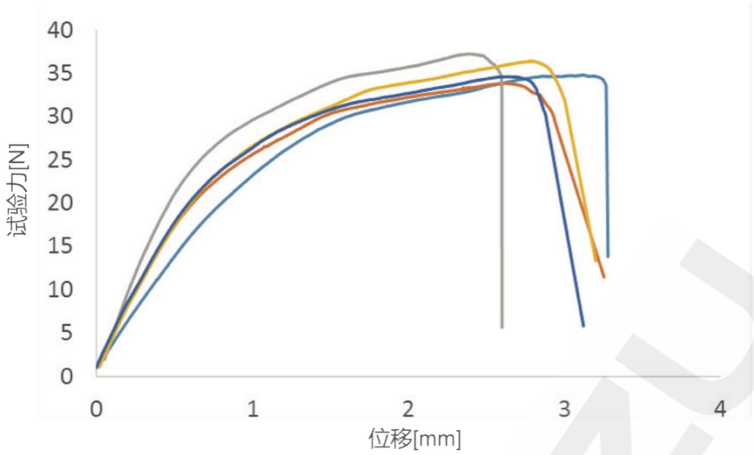


图2 试验力-位移曲线

4.疲劳试验结果

根据静态试验的结果，确定了疲劳试验中的载荷水平。疲劳试验的试验条件如表3所示。

表3 疲劳试验条件

参数	名称
最大负载试验力	30，25，20，15，12.5，11，10，9，8，7
应力比	0.1
测试频率	10Hz
试验环境	37℃，纯水中
最大循环次数	5,000,000
试验数	n=1

试验结果在图3中展示。根据图3，当最大负载试验力低于11N时，断裂循环次数在10,000次以内，断裂循环次数并未显著增加。在试验力低于10N的情况下，随着最大负载试验力的降低，断裂循环次数大幅增加，在最大负载试验力为7N时，断裂未发生在5,000,000次以内。

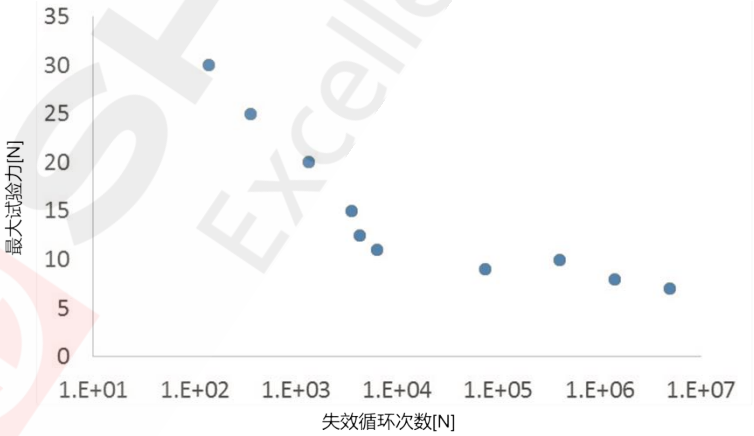


图3 S-N曲线

5.结论

本次，在37℃的纯水中进行了牙科矫正种植体的悬臂弯曲疲劳试验。结果表明，本次使用的牙科矫正种植体，在11N以上（静强度的31%）时断裂循环次数较小，而在10N以下（静强度的28%）时，断裂循环次数会增加。未来，计划在氟化物漱口液中实施疲劳试验。如此，通过使用本公司的试验系统，可以在液体环境中进行牙科矫正种植体的悬臂弯曲疲劳试验，从而有助于牙科矫正种植体的开发与评估。

小型金属试样疲劳试验

1.引言

疲劳试验是通过对材料施加反复载荷来评估其疲劳寿命的测试。由疲劳引发的破坏可能导致严重事故，因此在开发高可靠性产品时，疲劳试验是不可或缺的测试环节。

本文将介绍使用铝合金小型试样，并采用电磁力式微小试验机MicroServoMMT-250NV-10进行的疲劳试验。MMT系列装置的特点在于能够高速、高精度地控制微小的试验力和位移，是适用于小型试样疲劳试验的设备。

2.试样以及试验夹具

作为金属小型试样，我们准备了铝合金A1050的试样。试验使用了电磁力式微小试验机MicroServo。图1展示了试样尺寸，图2展示了试验场景。本次使用了经过改良、便于夹持小型试样的试制夹具。

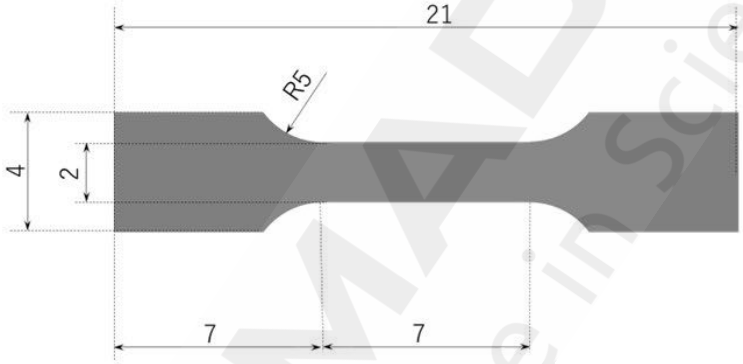


图1 试样尺寸(板厚0.5mm)



图2 疲劳试验样品

3.静态拉伸试验

为设定疲劳试验的条件，首先进行了静态拉伸试验。本次使用了精密万能试验机AGX™-10kNV2。表1、表2、图3展示了试验装置、试验条件、应力-位移曲线图。试验结果显示，抗拉强度的平均值为262MPa。

以此值为基准，设定了疲劳试验的条件。

表1 试验装置

参数	名称
试验机	AGX-10kNV2
载荷传感器	1kN
软件	TRAPEZIUM™X-V
夹具	小型试件用夹具

表2 静态试验条件

参数	名称
试验速度	1mm/min
试验数	n=3

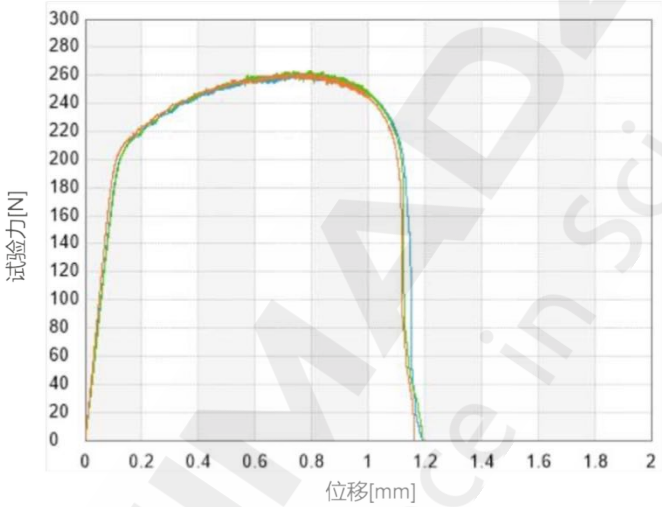


图3 试验力-位移曲线

4.疲劳试验结果

表3、表4列出试验装置与疲劳试验条件。将疲劳试验的最大加载应力设定为静态拉伸试验抗拉强度的70～90%，共设置6组工况。作为疲劳试验试验波形的示例，图4给出最大加载应力236MPa下第1000次循环的波形。由图4可见，波形为稳定正弦波，控制效果良好。图5为S-N曲线。

表3 试验装置

参数	名称
试验机	MMT-250-NV-10
载荷传感器	250N
控制器	ServoController4830
软件	Windows®Softwarefor4830
夹具	小型试件用夹具

表4 疲劳试验条件

参数	名称
最大负载试验力	相对于抗拉强度的70、73、75、80、85、90%（183～236MPa）
应力比	0.1
测试频率	30Hz

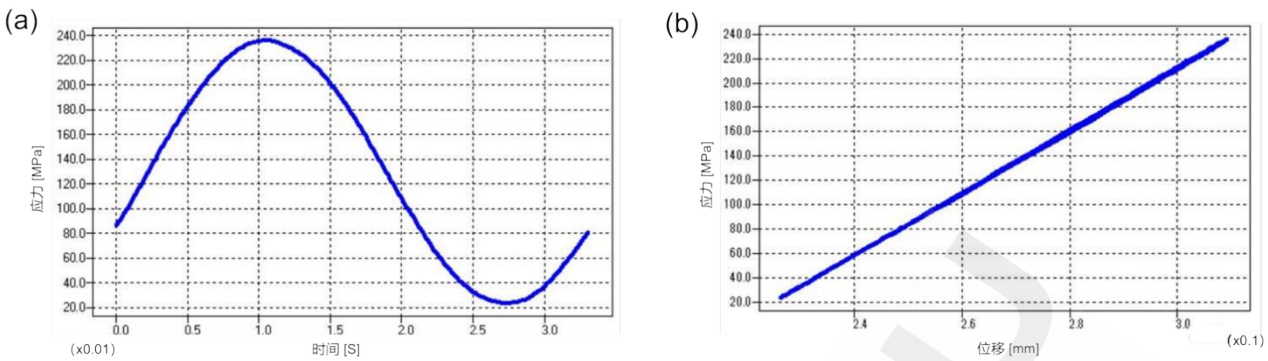


图4 (a)第1000次循环时的时间对应应力(b)第1000次循环时的行程对应应力

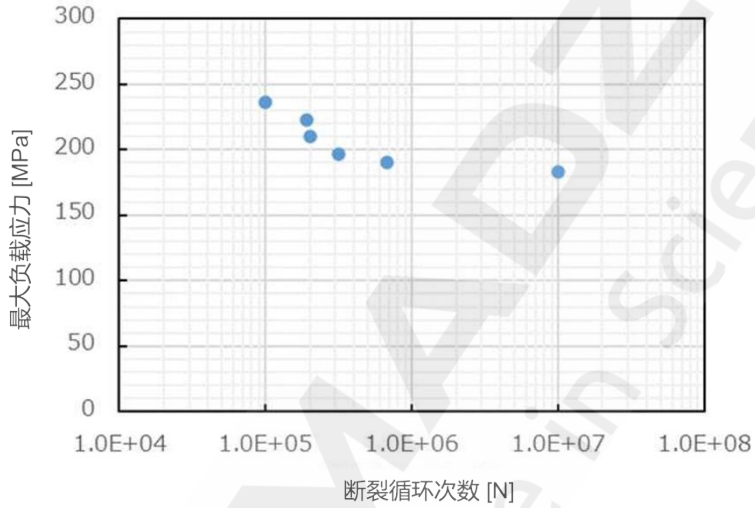


图5 S-N曲线

5.结论

本次，通过使用电磁式微小试验机微伺服以及小型试样夹具，以铝合金A1050作为金属小型试样开展了疲劳试验，实现了良好的可控性。

MMT-100N 对 EVA 薄膜的耐久性测试与动态粘弹性测量

1.引言

EVA（乙烯-醋酸乙烯酯）薄膜，具有高弹性且耐应力开裂，广泛用作太阳能电池的粘合薄膜。太阳能电池白天暴露在阳光下时会达到高温，夜间则会冷却。这就要求EVA薄膜具备足够的耐久性，以承受每日的热膨胀与热收缩变化范围。

EVA薄膜在白天持续暴露于紫外线，随着使用时间的延长也会逐渐劣化。本文介绍了EVA薄膜在紫外线照射前后的拉伸疲劳（耐久）试验与动态粘弹性测量示例。

2.EVA薄膜的耐久性测试

耐久试验使用了两种类型的EVA薄膜样品。一种类型是原始薄膜样品((1)、(2)、(3))，从未暴露于紫外线辐射；另一种类型是样品((4)、(5)、(6))，已暴露于紫外线辐射100小时。样品为EVA薄膜条，尺寸为40（L）×20（W）×0.5（T）mm。测试机和加载夹具（夹具）分别如图1所示。

耐久性测试中的载荷应力设定基于未受紫外线辐射样品的静态拉伸强度（TS=9MPa）。这些未辐照样品在应力等于静态拉伸强度20%（1.8MPa）时表现出100,000次循环的耐久性。另一方面，辐照100小时的样品在应力等于静态拉伸强度10%（0.9MPa）时表现出100,000次循环的耐久性，但在应力等于静态拉伸强度15%（1.4MPa）时，在达到100,000次循环之前断裂。结果总结于表1中。



图1 MMT-100N电磁疲劳试验机和测试样品夹具图

表1 EVA薄膜耐久试验结果

紫外线辐照条件	未辐照			辐照100h		
样品编号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
最大载荷应力（MPa）	1.8	1.4	0.9	1.8	1.4	0.9
最小载荷应力（MPa）	0.9	0.7	0.45	0.9	0.7	0.45
断裂前重复次数	100,000*	100,000*	100,000*	139	4883	100,000*

*表示样品未断裂。

利用样品(1)-(6)获得的耐久试验数据，以应力幅值为Y轴，以断裂前的循环重复次数为X轴，绘制了S-N曲线，如图2所示。基于这些数据可以得出结论，EVA薄膜的紫外线照射是导致其寿命随加载频率显著缩短的重要因素。因此，在评估将长期使用的太阳能电池产品的长期可靠性时，此类耐久性测试对于评估包括温

度效应（日常热胀冷缩范围）引起的应力以及所接收紫外线辐射量在内的参数至关重要。

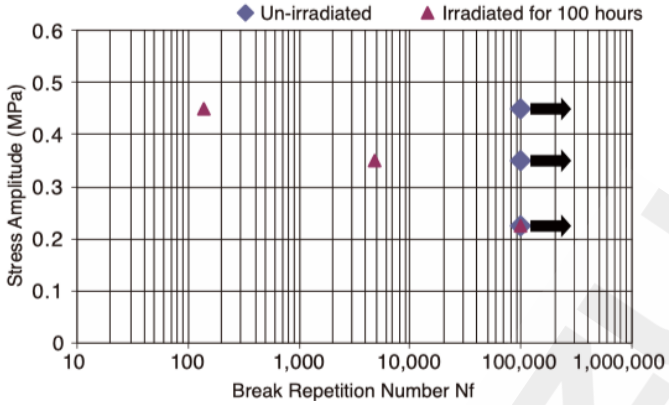


图2 EVA薄膜的S-N曲线

3.EVA薄膜的动态粘弹性测量

样品的动态粘弹性（以动态刚度、弹性刚度、阻尼刚度、阻尼因子和损耗因子表示）可使用Microservo耐久测试软件进行测量。此处，我们聚焦于从测试力和测试机器活塞位移（通过耐久试验中的循环次数测量）获得的储能模量与损耗模量，比较了这些常数在增加载荷循环重复次数时的变化。

图3展示了样品(2)和(5)从100th载荷循环开始的储能弹簧常数和损耗弹簧常数历史。在第100th次循环时，辐照100小时的样品(5)的储能弹簧常数比未辐照样品(2)小25%，随着循环次数增加，两者均呈现逐渐下降的趋势。此外，在早期载荷阶段，样品(5)的损耗弹簧常数略小于样品(2)，且样品(5)中损耗弹簧常数逐渐下降的程度更大。此外，样品(2)的储能弹簧常数和损耗弹簧常数在60,000次循环至100,000次循环之间趋于平稳，并呈现一个平台区域。

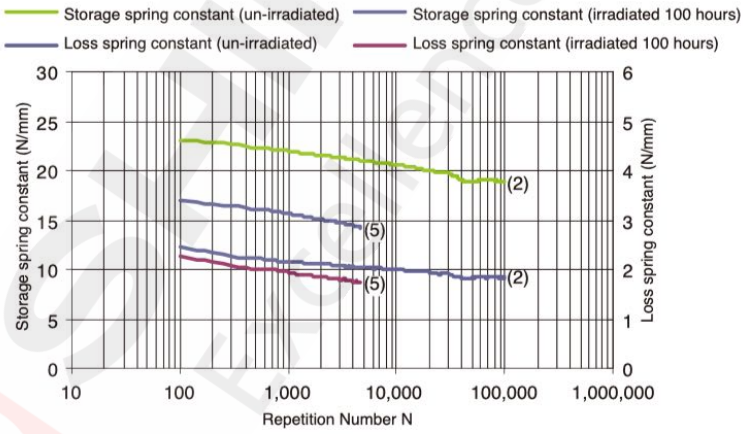


图3 EVA薄膜的储能与损耗弹簧常数

4.结论

Microservo是一种材料测试系统，可同时对样品进行耐久性测试和动态粘弹性测量。由于该系统采用电磁执行器，不仅测试在绿色环境中进行，但通过使用温度环境箱及其他可选附件，可以进行多种评估。

固体高分子燃料电池用电解质膜的耐久试验

1.引言

燃料电池不可或缺的电解质膜（固体高分子燃料电池用电解质膜），其含水率、透水性、化学稳定性等功能性的技术开发正活跃进行中。此外，在提升功能性的同时，考虑由电解液压力和温度变化所产生的外力影响，并对其机械特性进行评估，这一点也变得愈发重要。

岛津电磁式微小试验机微型伺服是一款可对高分子材料、电子部件等小型样品施加微小循环载荷的小型疲劳试验机，也是一款能在恒温恒湿环境下评估电解膜因外力作用而产生耐久性的试验装置。本次将介绍使用该装置，通过拉伸循环载荷试验对电解质膜进行耐久性评估。

2.样品信息以及试验夹具

图1为MMT-100N疲劳试验机和试验夹具，表1为疲劳试验机仪器信息，表2为测试样品信息。



图1 MMT-100N疲劳试验机和试验夹具

表1 仪器信息

参数	名称
试验机	MMT-100N
载荷传感器	100N
最大位移	20mm
最大测试频率	100Hz

表2 样品信息

参数	名称
材料	高分子电解质膜
样品尺寸	平行部5(W)x0.196(T)mm 哑铃形(样品通过模具冲压加工而成)

3.静态拉伸试验结果

在电解质膜的耐久试验之前，测量了其拉伸强度。其结果为，拉伸强度16.2MPa,断裂点位移13.8mm这一测量值被获得，并基于此测量值设定了耐久试验的条件。

4.疲劳试验结果

作为电解质膜耐久性评估方法之一，通过被动重复外力掌握其机械特性变化受到了关注。这实际上是针对车载燃料电池内的电解膜在电解液中因压力波动或温度变化而经历热膨胀等情形所设想的物性评价。

在本次耐久试验中，对未使用样本重复施加前述静态拉伸试验所得拉伸强度的95%、90%、85%应力（5Hz正弦波），当夹具间位移较初始值增加50%时，将此时的重复循环次数评估为疲劳寿命。

图2是对拉伸强度为16.2MPa的样本施加其95%应力（最大15.4MPa、最小0.4MPa、应力幅7.5MPa）时，第100,000个重复周期、单周期的应力测量值（时间历程）。将此加载应力换算为试验力，则最大为15.1N，最小为0.4N。

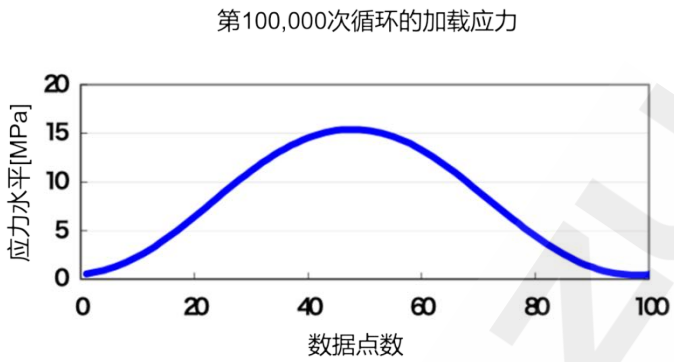


图2 应力负荷波形的测量时间历程

图3是电解质膜疲劳试验中的S-N曲线。纵轴是施加在样品上的循环应力最大值，横轴是样品夹具间变形达到初始150%（拉伸10mm状态）时的循环次数。（通常，S-N曲线的横轴应绘制样品的断裂循环次数，但在本次实验中，并非以样品断裂，而是以150%变形作为临界劣化的假定）。

本实验中准备了4个耐久试验样品并对其施加相当于拉伸强度98%(15.9MPa)、95%(15.4MPa)强度的98%(15.9MPa)95%(15.4MPa),分别在90%(14.6MPa)和90%(13.8MPa)的条件下进行了测试。从该实验结果来看，对于电解质膜的50%变形，虽然无法明确地推断其疲劳寿命，但通过提高负荷水平以及各负荷水平下的样本数量，可以明确电解膜的热膨胀及其力学特性在外部力作用下所导致的使用极限（耐久性）是可以被推断的。

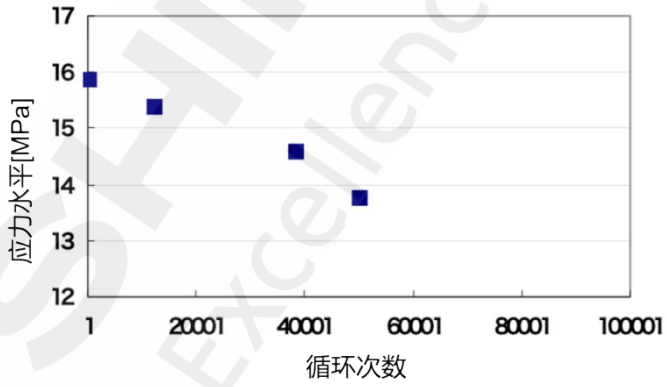
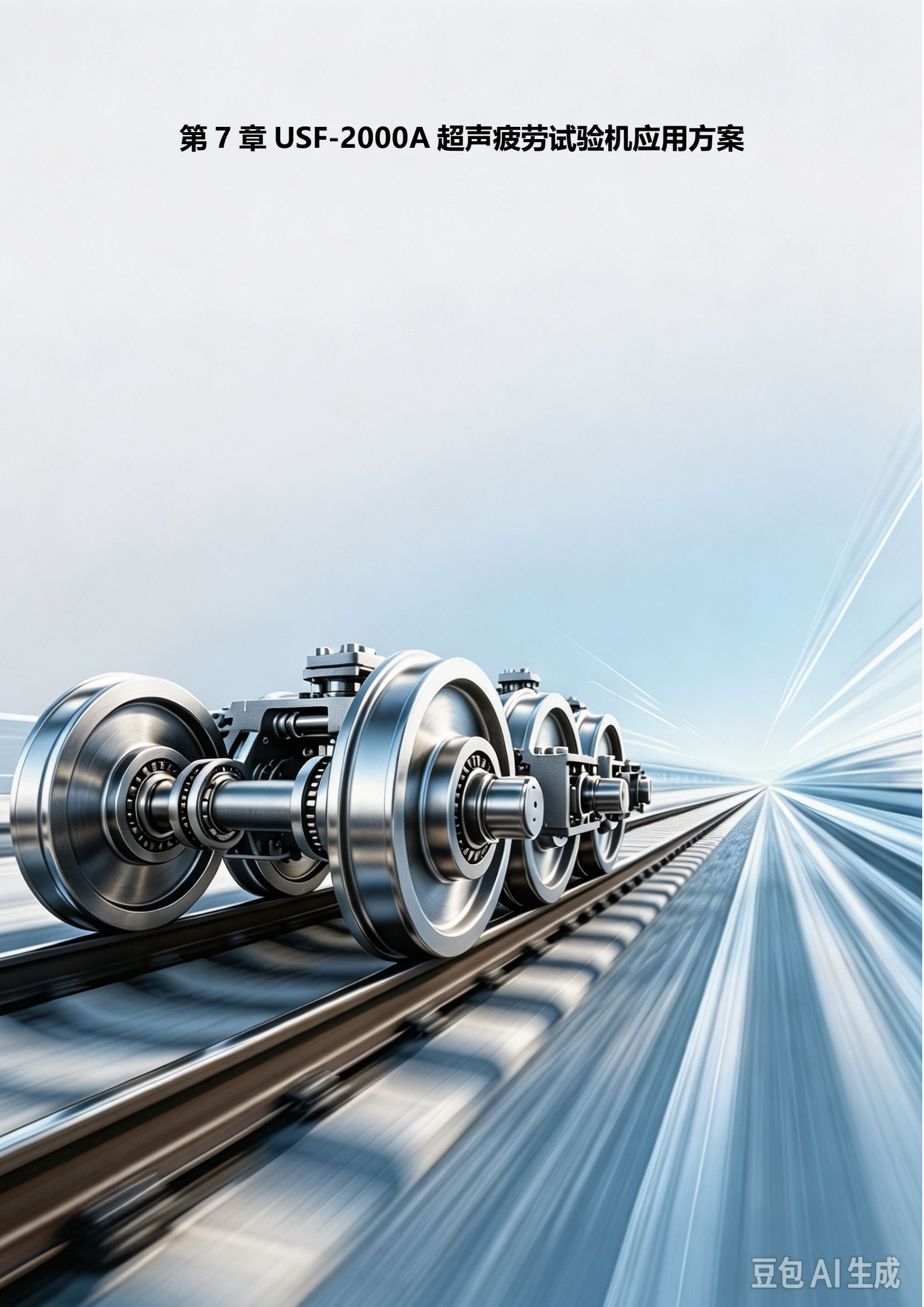


图3 S-N曲线图

5.结论

由此可见，岛津电磁式微小试验机·微伺服MMT-100N是一款在小载荷条件下，对树脂材料、金属合金箔、小型电子材料等具有极佳试验力与位移控制性能的疲劳试验装置。

第 7 章 USF-2000A 超声疲劳试验机应用方案



豆包 AI 生成

内部空洞对 3D 打印钛合金试样疲劳寿命的影响

1.引言

钛合金Ti6Al4V具有比强度高、耐腐蚀性好和生物相容性佳的特点，主要用于制造假体及航空工业相关部件。作为一种制造此类部件的替代技术，3D打印（或称增材制造，AM）正日益吸引更多关注。与传统制造技术（如机加工或锻造）相比，3D打印具有多种优势，例如部件形状自由度更高、制造时间更短等1)。在现有的3D打印技术中，金属材料最常用的是粉末床熔融技术。图1展示了使用电子束粉末床熔融技术进行制造过程的图像性。

与优势相对，3D打印材料往往表现出更多的内部空洞（气体残留或未熔合）。因此，为提升3D打印部件的可靠性，必须分析内部缺陷特征（分布、尺寸、位置等）与疲劳强度之间的关联。

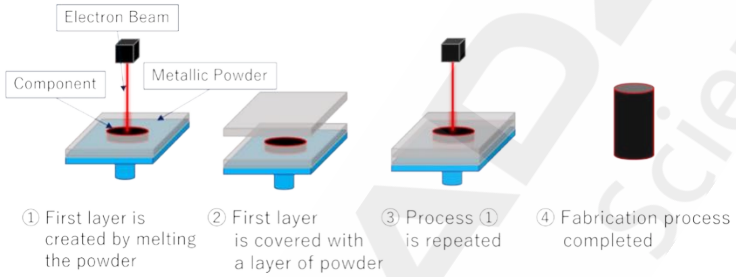


图1 电子束粉末床熔融3D打印工艺示意

本文介绍了使用三种不同仪器对通过电子束粉末床熔融技术制造的试样进行分析的结果。首先，对试样进行了CT扫描，以可视化并测量内部孔洞的尺寸。随后，使用超声波试验机分析了试样的疲劳强度。最后，使用电子探针显微分析仪对断口表面进行了观察，以检测裂纹萌生处。由此可以获得空洞位置与疲劳强度之间的关联。

2.样品信息

试样的尺寸与形状如图2所示。首先，使用电子束粉末床熔融技术制作了一个半径为10毫米的圆柱形样品，然后通过机加工获得最终形状。样品的形状是根据超声检测设备的具体要求确定的。本次分析共使用了6个试样。

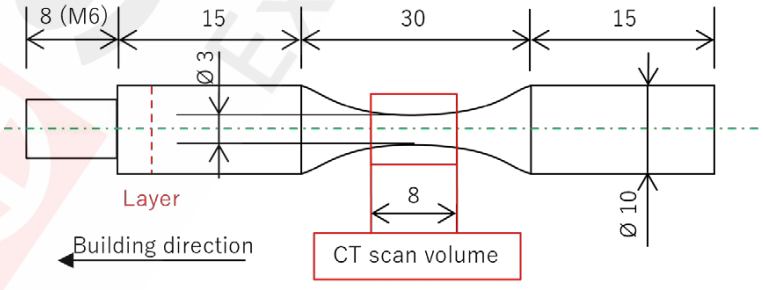


图2 试样形状与尺寸（单位：mm）

3.CT扫描结果

本次CT扫描对包含试样中心截面的体积进行，该截面位于距试样中心±4mm处（图2红色框）。选择中心截面进行CT扫描，是因为该区域是疲劳裂纹最可能萌生的体积。

试样的CT扫描使用X射线CT系统inspeXioSMX-225CTFPDHRPlus（图3）完成，该系统可用于无损分

析。内部孔隙尺寸与分布的分析使用了VGSTUDIOMAX图像处理软件。

计算机断层扫描分析结果的一个示例如图4所示。可以利用图像处理软件测量空洞的尺寸，并根据尺寸以不同颜色表示，如图片左侧的色条所示。内部孔洞的最大体积约为$1x10^{-3}mm^3$，且每个试样的孔隙分布相似。这种相似的孔隙分布表明3D打印制备工艺具有良好的可重复性。图5显示了包含一个内部孔洞的试样横截面的放大图。大多数孔洞呈球形，但也存在一些拉长的孔洞（裂纹状缺陷）。在试样内部和表面上均观察到了孔洞。

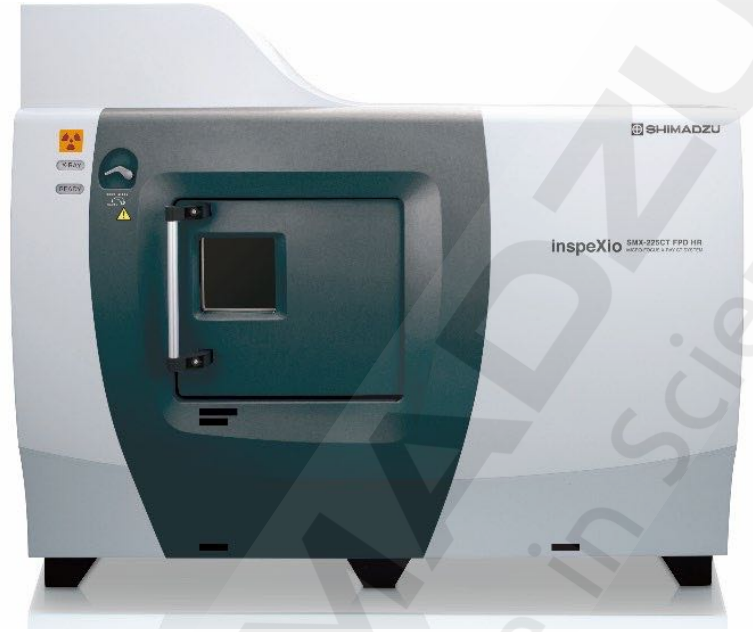


图3 inspeXio™SMX™-225CTFPDHRPlus



图4 试样1孔隙分布

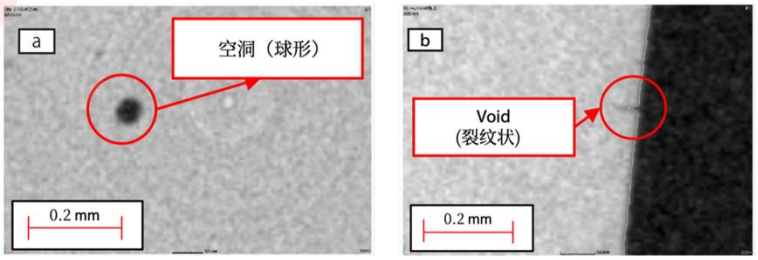


图5 含有空洞的试样横截面图像，(a)球形空洞(b)裂纹状空洞

4.疲劳试验与试验结果

疲劳试验是使用USF-2000A超声疲劳试验机进行的（如图6所示）。对于高达10^9次循环的试验，如果以10Hz的频率进行将耗时长达3年。然而，USF-2000A能够施加频率高达20kHz的载荷，从而将试验时间（在10^9次循环的情况下）从3年缩短至14小时。试验设置的图片如图7所示。试样连接到一个振动的Horn上以施加载荷。在处理极高频率的载荷时，存在试样温度急剧升高的风险，这可能影响试验结果并导致试样过早断裂。为防止这种情况，用空气对试样进行冷却，并使用温度传感器监测试样表面温度。日本焊接工程学会发布的关于超声疲劳试验的官方规程（JWES，规程号WES1112:2022金属材料超声疲劳试验方法）建议金属材料的温度应维持在30°C以下。



图6 USF-2000超声疲劳试验机

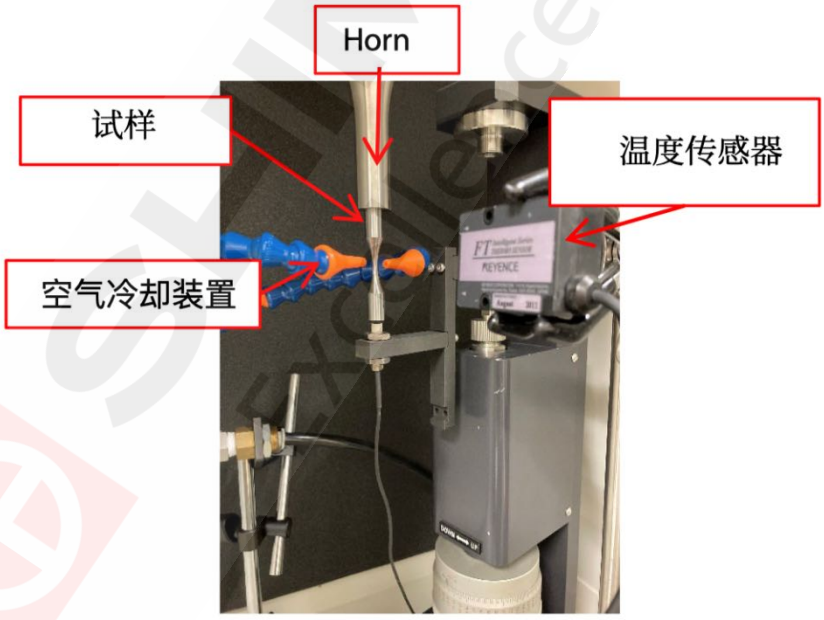


图7 测试装置

如表1所示，对试样施加了两种不同的载荷。各样本导致失效的循环次数如表1和图8所示。结果清楚地表明，失效循环次数可分为两个宏观区域：试样1、3和6为10^5~10^6次循环（高周疲劳），试样2、4和5为10^8~10^9次循环（甚高周疲劳）。结果表明，所施加的载荷与失效循环次数之间不存在相关性。图9展示了使用光学显微镜拍摄的断口表面照片。

表1 样品信息

样品编号	应力幅（MPa）	失效循环次数N
1	350	$6.42x10^5$
2	350	$4.50x10^8$
3	350	$6.65x10^5$
4	300	$1.19x10^8$
5	300	$3.56x10^9$
6	300	$3.50x10^5$

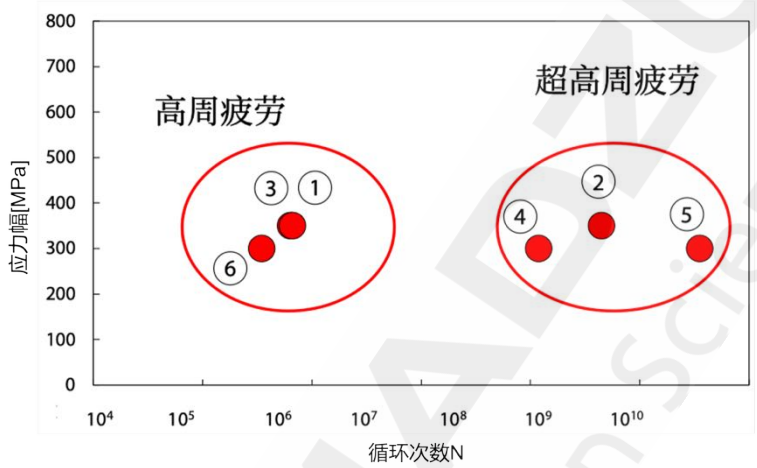


图8 S-N图

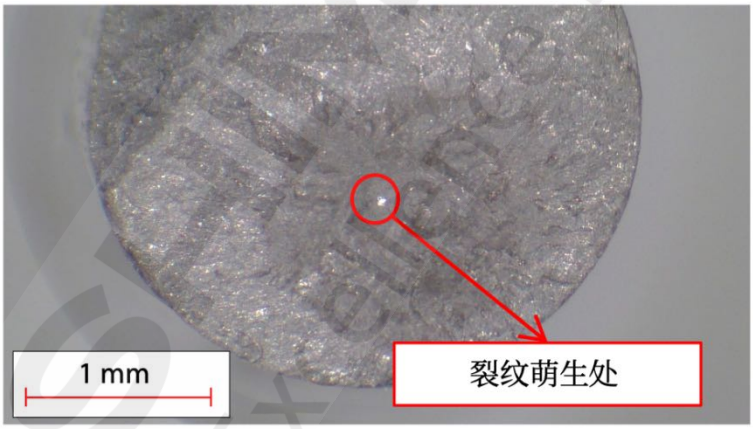


图9 断口形貌（试样2）

5.裂纹萌生处观察

为精确定位裂纹萌生处，对比了断口表面和通过CT扫描获取的横截面图像。使用电子探针显微分析仪EPMA-8050G对断口表面进行了观察（图10）。在高周疲劳区失效的试样（试样1和6）的断口分析结果如图11所示。从左开始，裂纹萌生处的空洞位置在试样上用红点表示（a部分）。中间部分（b）展示了每个试样裂纹萌生处的放大图像。最后，最右侧部分（c）显示了包含裂纹萌生处空洞的横截面的CT图像。在高周疲劳区失效的每个试样中，裂纹萌生处（空洞）都位于试样表面。在超高周疲劳区发生失效的试样（试样4和2）的结果如图12所示，形式与图11类似。在这种情况下，裂纹萌生处是一个内部孔洞。



图10 电子探针显微分析仪EPMA™-8050G

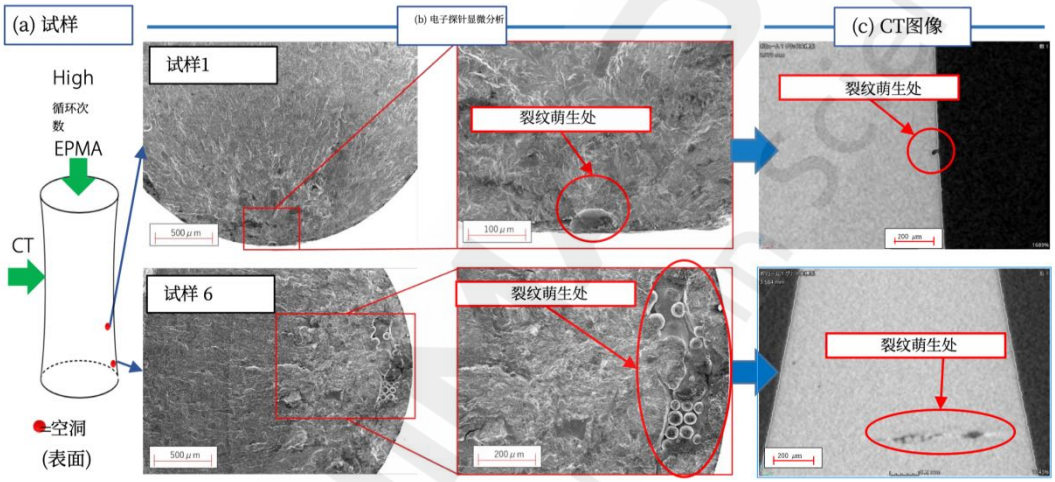


图11 高周疲劳区失效试样（1和6）的电子探针显微分析与CT扫描观察结果

(a)电子探针显微分析与CT扫描观察方向及裂纹萌生处位置(b)电子探针显微分析断口表面图像(c)裂纹萌生处横截面

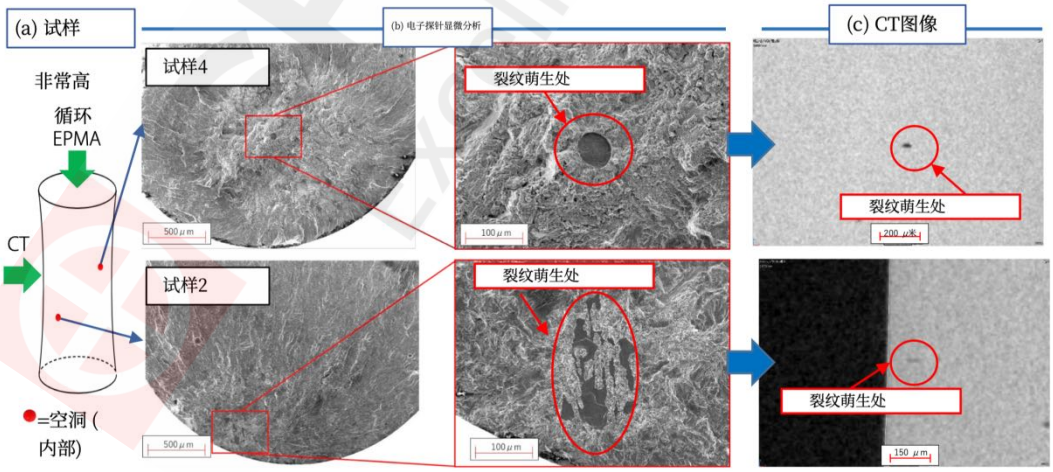


图12 高周疲劳区失效试样（4和2）的电子探针显微分析与CT扫描观察结果

(a) 电子探针显微分析与CT扫描观察方向及裂纹萌生处位置(b)电子探针显微分析断口表面图像(c)裂纹萌生处横截面

6.结论

根据CT扫描、疲劳测试以及断口分析的结果，可以得出结论：内部空洞的位置对3D打印钛试样的疲劳寿命有显著影响。然而，为了评估与空洞相关的其他参数（如尺寸和分布）的影响，还需进行其他测试。借

助此分析系统，可以开展研究以提升3D打印产品的可靠性。

参考文献：
1.P.Li,D.HWarner,A.Fatemi,N.Phan,“CriticalassessmentofthefatigueperformanceofadditivelymanufacturedTi6Al4Vandperspectiveforfutureresearch”[InternationalJournalofFatigue]Volume85,2016,Pages130-143BrookhavenNationalLaboratory,Upton,NY,USA,Tech.Rep.BNL-23103.Jan.1977.
2.J.Günther,D.Krewerth,T.Lippmann,S.Leuders,T.Tröster,A.Weidner,H.Biermann,T.Niendorf“Fatigue lifeofadditivelymanufacturedTi–6Al–4Vintheveryhighcyclefatigueregime”[InternationalJournalofFatigue]Volume94,Part2,2017,Pages236-245.

SHIMADZU Excellence in Science

超声疲劳试验系统对碳纤维增强塑料进行十亿周次三点弯曲疲劳试验

1.引言

碳纤维增强塑料（CFRP）被认为是一种具有高比强度/比刚度的材料，广泛应用于交通运输领域等各行各业。为了将CFRP用作结构材料，从长期可靠性和耐久性的角度来看，有必要评估其疲劳性能，因为疲劳是导致结构失效的主要原因。虽然使用常规疲劳试验机进行10^9次循环的疲劳试验需要数月时间，但岛津USF-2000A超声疲劳试验系统允许以20kHz的频率进行疲劳试验，使得10^9次循环的疲劳试验得以在大约14小时内完成。因此，使用USF-2000A是评估长期可靠性和耐久性的有效手段。

本文介绍了一个使用USF-2000A对碳纤维增强塑料进行三点弯曲超声疲劳试验的示例。

2.测量系统

图1显示了测量系统的外观。本次测试基于USF-2000A的平均应力加载机制，使用了一个三点弯曲压头和一个用于超声疲劳试验的三点弯曲夹具原型。为测试准备的试样是尺寸为（L）40mm×（W)7mm×（t）3.5mm的CFRP试样。由于超声疲劳试验要求试样在20千赫兹下共振，因此必须设置一个能在20kHz共振的跨距。在本实验中，测试在跨距设定为16.5mm的条件下进行。表1总结了仪器配置。

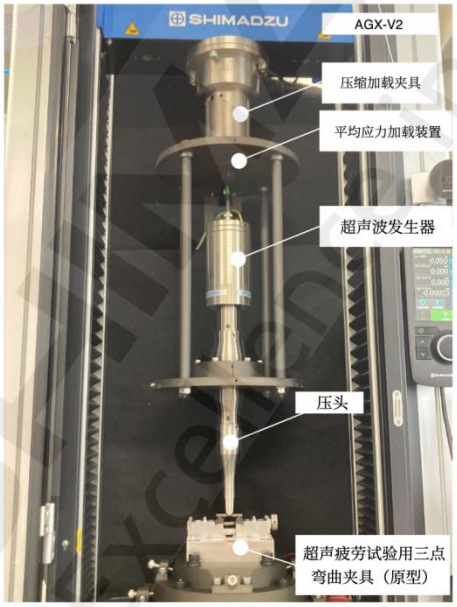


图1 测试系统

表1 仪器信息

参数	名称
超声疲劳测试系统	USF-2000A
精密万能试验机	AGX-V2
测试夹具	平均应力加载装置 压缩加载夹具压头(R5) 适用于超声的三点弯曲夹具
软件	SuperSonic
高速摄像机	HPV-X2
辐射温度计	：FT-H10（基恩士）

3.试验过程中试样观测

在开始实际的超声疲劳试验前，使用HPV-X2高速摄像机记录了试验过程中试样的行为。图2显示了高速录像的条件。试样上施加了用于数字图像相关分析的随机散斑图案，高速录像的帧率设置为1Mfps。图3显示了高速录像中捕获图像的示例。

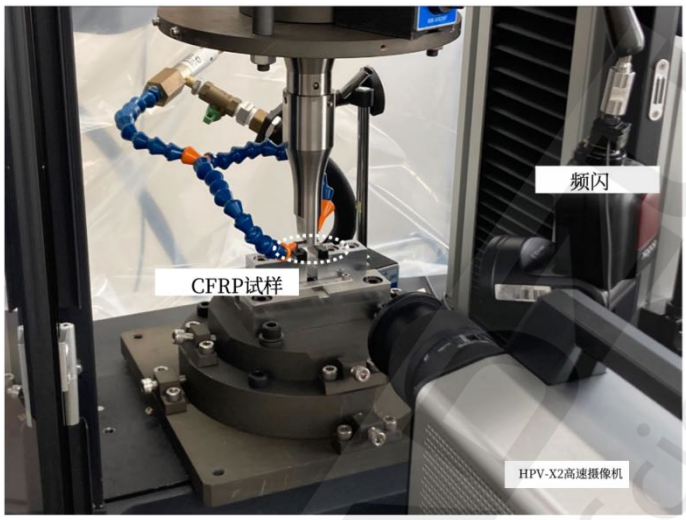


图2 高速录像条件

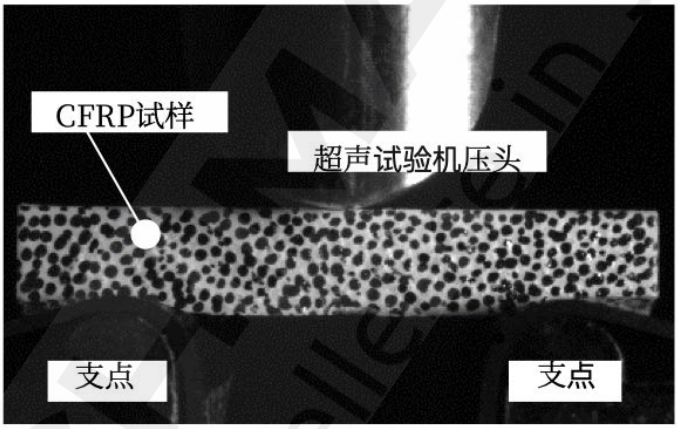


图3 高速录像捕捉的图像示例

图4展示了数字图像相关分析结果的一个示例。图4中的图表显示了超声压头正下方某点在试验轴向的位移。通过压头正下方的正弦波，确认了加载是令人满意的。

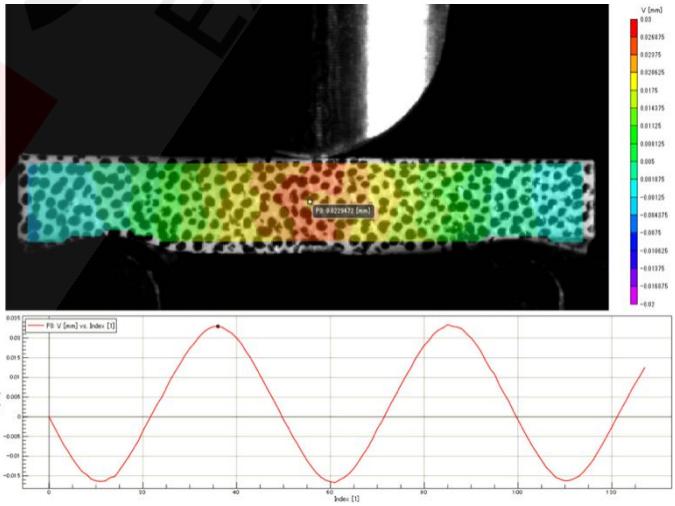


图 4 数字图像相关分析结果示例

4.静态三点弯曲试验结果

图5显示了静态三点弯曲试验的结果。本次测量中的最大试验力为3479N。

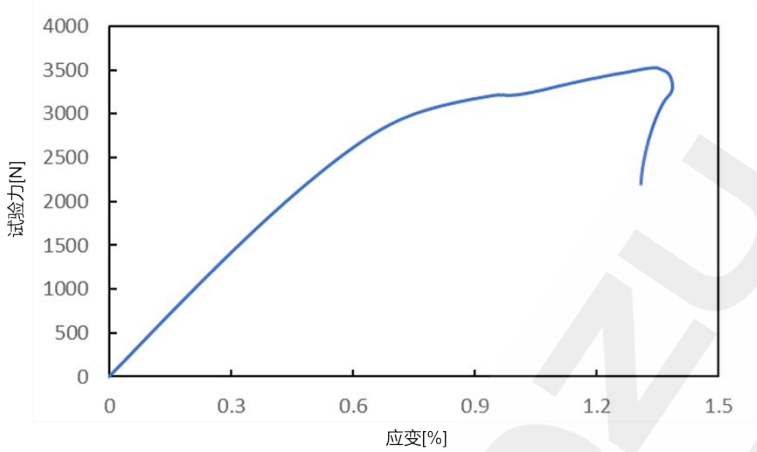


图5 试验力-应变图

5.三点弯曲超声疲劳试验结果

图6展示了三点弯曲超声疲劳试验的条件。为避免试样发热，采用了空气冷却器进行冷却，并采用间歇操作方式，即周期性启动和停止振荡。试样的表面温度使用辐射温度计进行监测。表2列出了试验条件。超声疲劳试验中施加的试验力相当于静态三点弯曲试验中最大试验力的65%至85%。此外，还在较大试验力条件下使用常规疲劳试验机进行了测量，这导致了更少的断裂循环次数。图7显示了这些结果以及使用USF-2000A进行的三点弯曲疲劳试验的结果。常规疲劳试验机与USF-2000A的结果大致吻合，这表明了该方法的有效性。

表2 试验条件

参数	名称
负载条件	静态弯曲强度的65%-85%
应力比	0.7
测试频率	20kHz
最大循环次数	1×10^9



图6 三点弯曲超声疲劳试验

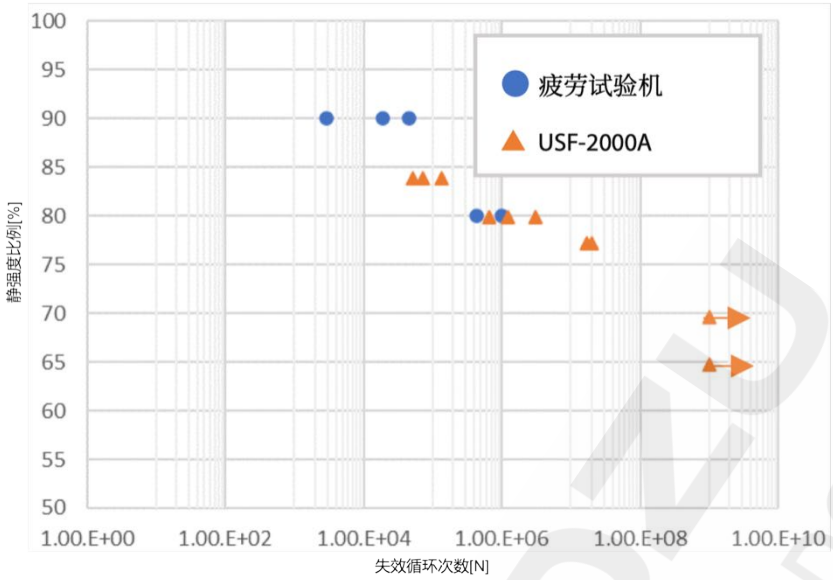


图7 S-N图

6.结论

使用USF-2000A超声疲劳测试系统进行了三点弯曲超声疲劳试验。测量结果与常规疲劳试验的结果基本吻合，表明USF-2000A可能适用于碳纤维增强塑料的三点弯曲疲劳试验。使用该系统可大幅缩短疲劳试验所需的时间。

Inconel718 高温合金超高周疲劳试验与断口元素分布测量

1.引言

Inconel718具有优异的特性，如耐热性、耐腐蚀性和高强度。由于它能够在高温环境下保持其机械性能，因此主要用于严苛的环境中，例如航空航天产业的喷气发动机、涡轮叶片，以及能源产业的燃气轮机、核电站部件等。在这些产业中，长期可靠性是至关重要的课题，而疲劳试验对此评估必不可少。特别是对于超过10^9次的超高周疲劳试验，使用常规的疲劳试验机在100Hz频率下进行测试需要3～4个月。然而，使用超声疲劳试验机USF-2000A，可以进行20kHz频率的测试，仅需大约14小时即可完成试验。

本次使用超声波疲劳试验机USF-2000A对Inconel718在600°C下进行了超高周疲劳试验。此外，使用电子探针显微分析仪EPMA（EPMA-8050G）进行了疲劳断口的观察与元素分布的测量。

2.测量系统

图1展示了试验情况。通过将超声振动发生器安装到平均应力加载机构上，对试样施加平均应力。为了防止超声发生部件受热，在试样的上下方安装了连杆。加热炉的温度控制通过辐射温度计进行。因此，在试样的温度测量部位预先涂覆了耐热黑体涂料。本次测量所用的装置配置如表1所示。

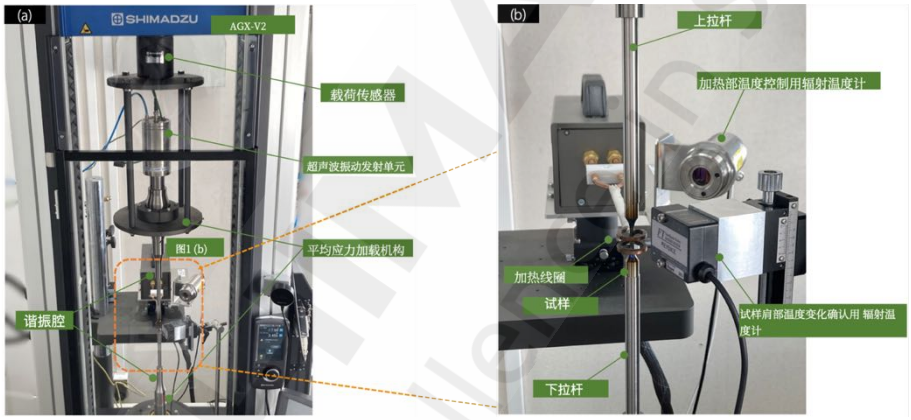


图1 测试系统

表1 仪器信息

参数	名称
超声疲劳测试系统	USF-2000A
精密万能试验机	AGX™-V2
测试夹具	平均应力加载装置
软件	SuperSonic
高频加热装置	EASYHEAT
辐射温度计	FT-H10（基恩士）
激光多普勒测振仪	VibroGo
电子探针显微分析仪	EPMA-8050G

3.温度分布的测量

在计算试样应力时，必须考虑温度分布引起的弹性模量分布，因此需要预先测量试样在测定温度条件下的温度分布。本次试验中，加热使试样中心部位的温度达到600°C。试样的温度分布通过热电偶进行测量。试样温度分布的测量结果如图2所示。

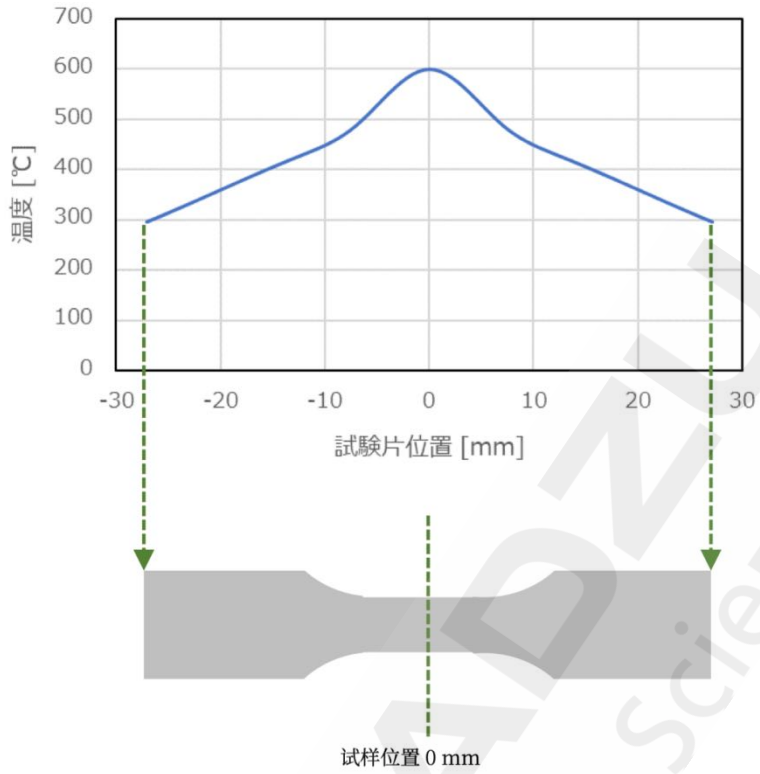


图2 试样的温度分布

4.试样长度的调整

试样需调整其长度，以与horn的共振频率相匹配。本次将调整试样肩部长度，使horn的共振频率达到20.02kHz。首先，准备三种肩部长度不同的试样，将它们分别安装在上下杆上，并进行加热，使其达到与测量时相同的温度分布。随后，测量每种试样的共振频率。图3展示了试样肩部长度与共振频率之间的关系。根据此结果，达到20.02kHz频率所需的试样肩部长度为10.9mm。

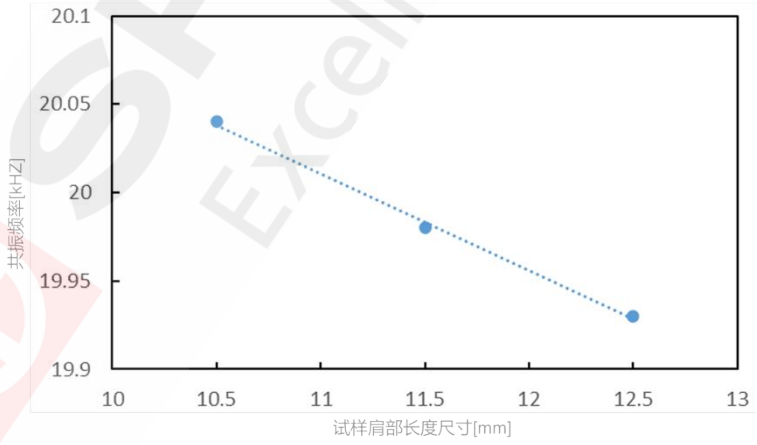


图 3 试样肩部长度与共振频率的关系

5.温度相关弹性模量分布与应力计算

如图2所示，由于测量中的试样因加热炉位置不同而导致温度不同，试样内的弹性模量也存在差异。由于必须在考虑弹性模量分布的情况下计算应力，因此需要分别计算室温下的弹性模量和600°C下的弹性模量。室温下的弹性模量是通过在试样上粘贴应变片，并使用AGX-V2进行拉伸试验求得的。图4展示了拉伸

试验的情况。600°C下的弹性模量，则是根据密度计测得的材料密度以及试样肩部长度为10.9mm这一条件计算得出的。图5展示了弹性模量与温度的关系。

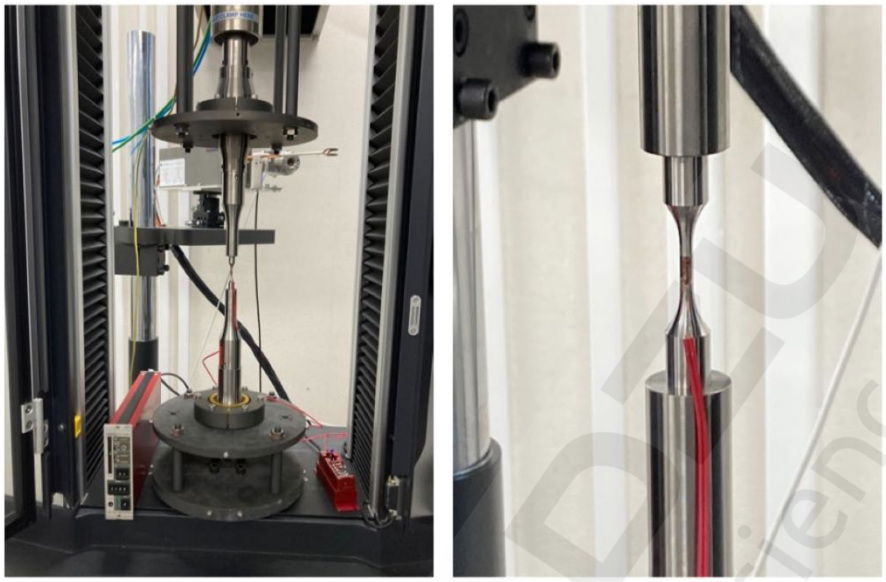


图4 拉伸测试

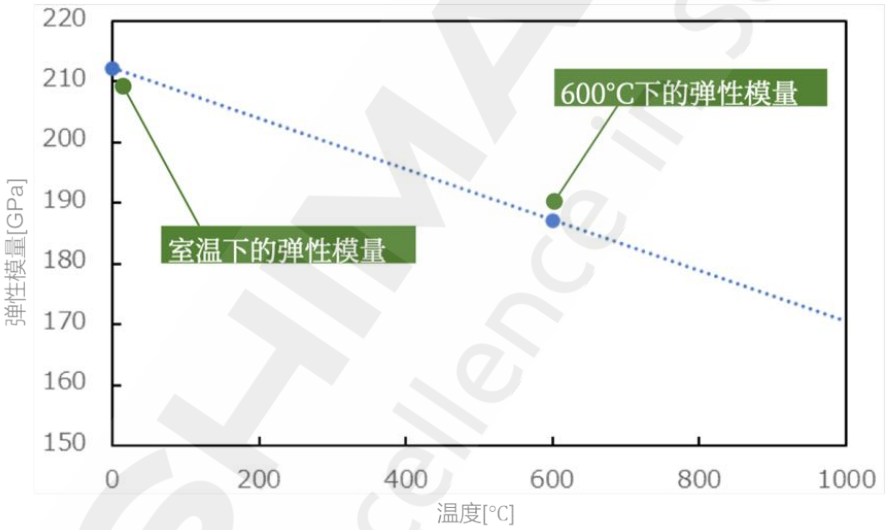


图5 弹性模量与温度的关系

6.Inconel718合金超声疲劳测试

表2中列出了试验条件。试验采用重复启动/停止的间歇运行方式，确保试验温度不超过606°C，且保持在设定温度的1%范围内。供参考，图6显示了采用间歇运行时试样的温度变化。图7展示了Inconel718在600°C下的S-N曲线。在本研究的加载条件下，确认试样在10^6～10^9次循环时发生断裂。图8显示了试样断裂时的状态。

表2 试验条件

参数	名称
负载应力（MPa）	500,550,570,610,650,700,750
试验温度（℃）	600
应力比	0
最大循环次数	1×10^9
运行方式	间歇加载

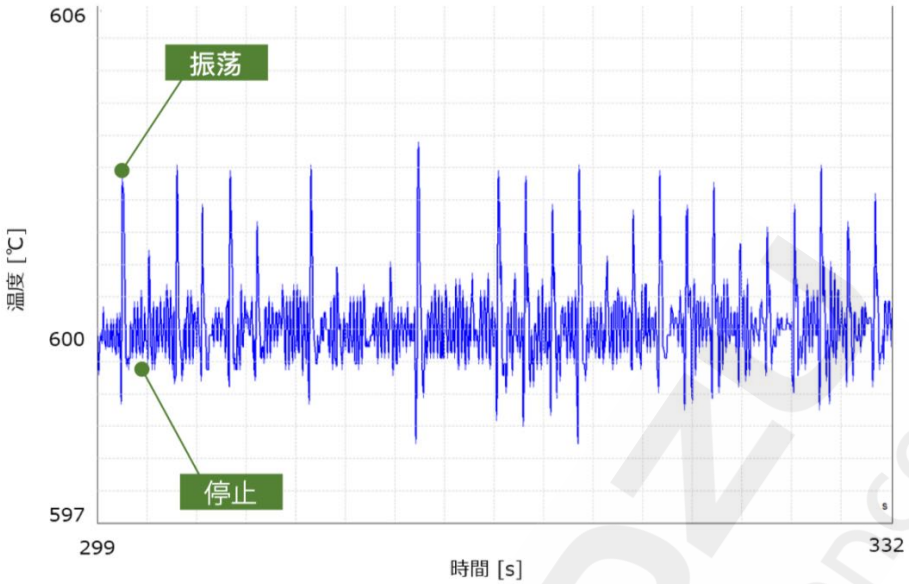


图6 间歇运行使用时的温度变化

(加载应力:750MPa,间歇运行:振荡110ms/停止1000ms)

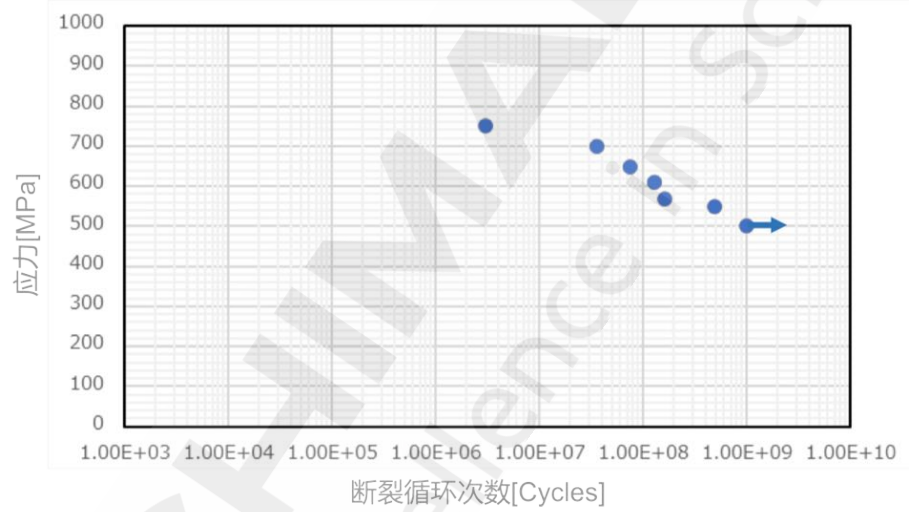


图7 S-N图



图8 试样断裂图

7.断口观察

图9展示了通过光学显微镜观察到的试验后试样的断口。根据本次试验结果，在加载应力为570、610、650MPa的条件下，观察到了起源于内部夹杂物的内部断裂。而在加载应力为550、700、750MPa的加载条件下，断裂起源于表面损伤等，形成了表面断裂。其中，针对加载应力570MPa和650MPa条件下的断口，使用EPMA-8050G获取了观察图像和元素映射图。

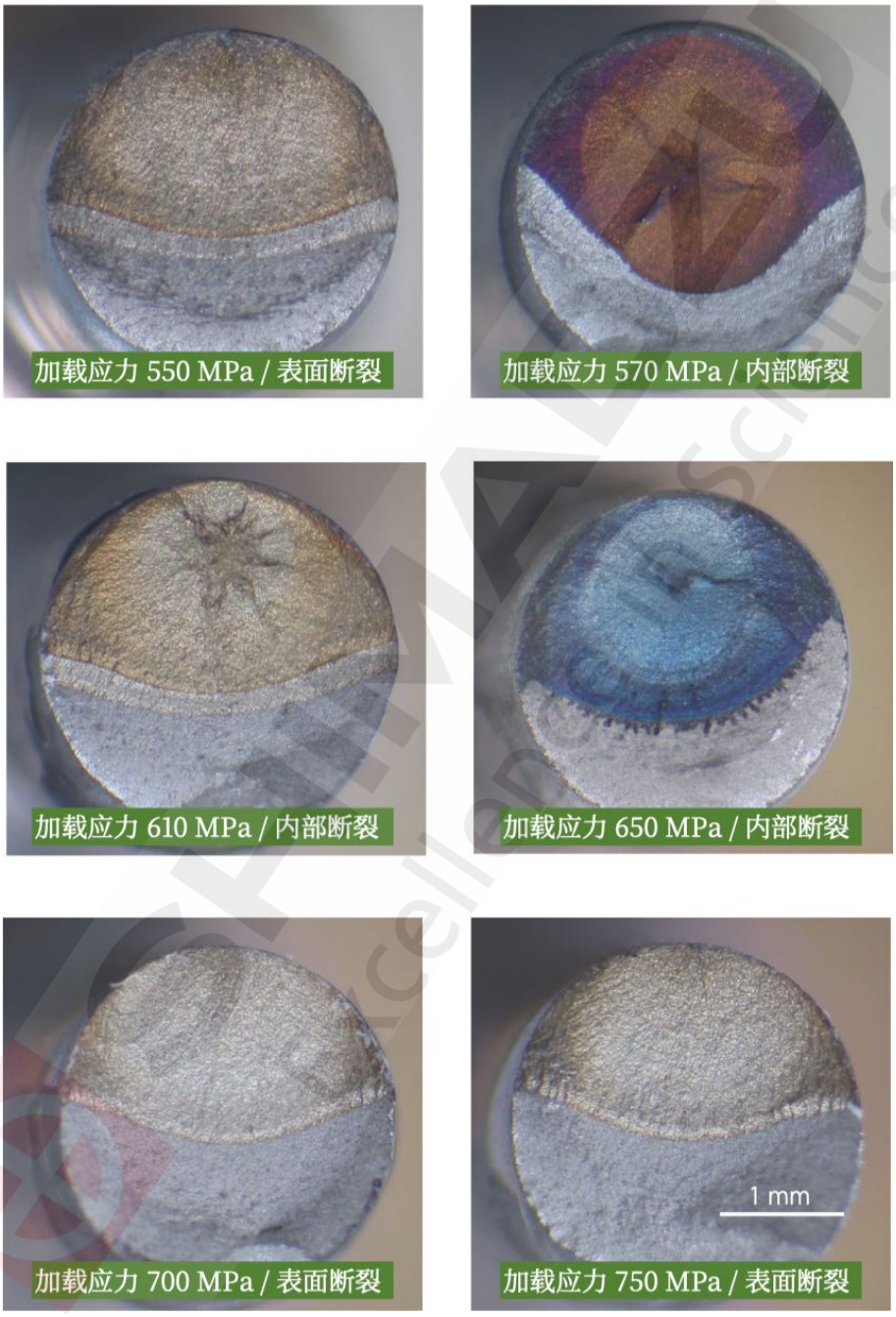


图9 断口形貌图

图10中展示了加载应力570MPa的断口观察结果。COMPO像是由背散射电子探测器获得的图像，主要呈现出平均原子序数的差异以及部分凹凸影响的明暗对比。TOPO像同样由背散射电子探测器获得，能特别清晰地反映凹凸状况。SE像由二次电子探测器获得，可显示表面的细微形貌。夹杂物的长度约为20μm。此外，根据元素面分布分析结果，引发断裂起点的夹杂物为含N和Ti的化合物。

图11显示了加载应力650MPa时的断口观察结果。夹杂物的长度大约为20μm。同样地，通过元素分布

分析，发现作为断裂起点的夹杂物是一种含有钛、铌、氧的化合物。

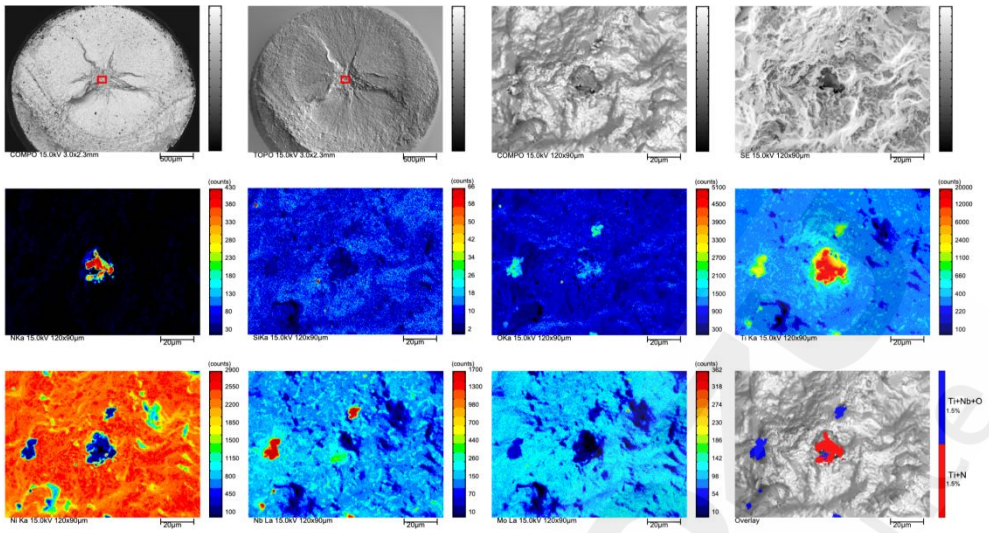


图10 加载应力570MPa的断口观察

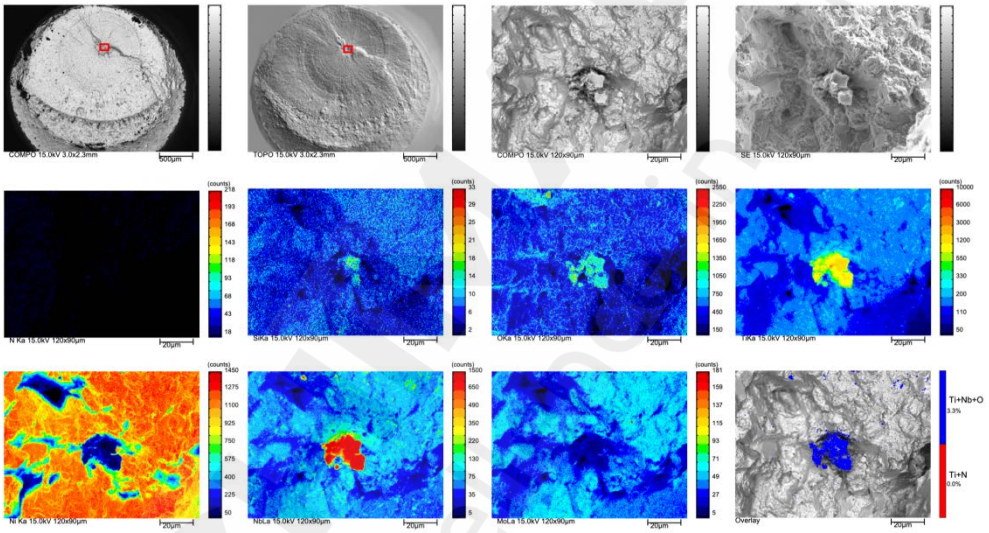


图11 加载应力650MPa的断口观察

8.结论

使用超声疲劳试验机USF-2000A，对Inconel718合金在600°C下进行了超高周疲劳试验。在每种载荷条件下，均获得了10^6～10^9次的断裂循环次数，取得了良好的结果。此外，使用电子探针显微分析仪EPMA-8050G，对以夹杂物为起点的破坏进行了元素面分布分析，明确了夹杂物的元素组成。

超声频率下金属板材弯曲疲劳试验观测

1.引言

疲劳失效是指部件在重复载荷循环作用下发生的断裂，其断裂载荷可能远小于静态断裂强度。同时，由于疲劳相关的失效往往是突然发生的，历史上曾因此导致涉及船舶和飞机的严重事故。因此，了解产品所用材料的疲劳特性至关重要。然而，确定疲劳特性通常需要耗时进行测试，其循环次数可达10^7次（根据JISZ2273《金属材料疲劳试验通则》的规定），若以10Hz的频率进行，完成测试约需12天。此外，由于设备效率和速度的提升，现在已有对超过10^7次循环的疲劳评估需求。为此，目前已经开始使用能够进行20kHz超声疲劳试验的超声试验机。然而，由于该仪器在测量过程中会产生非常快速的振动，无法目视确认试样的运动和变形。因此，我们使用高速摄像机来观察金属板在进行20kHz弯曲疲劳试验时的振动情况。以往，为了了解试样的整体运动情况，需要逐步调整位移计的位置；而使用高速摄像机后，通过单次观测过程即可评估试样的运动。此外，研究也证实了从采集图像中确定试样运动量的可能性。

2.测量系统

本实验使用了USF-2000超声疲劳试验系统和HPV-X2高速摄像机。表1列出了所有使用的仪器。测试期间的拍摄可在任何所需时刻进行。图1展示了试样的照片。对于弯曲振动，可以使用图2所示的振动模态，试样尺寸设计为可与每种振动模态产生共振。此处，准备了一个能提供二阶弯曲模态的试样。



图1 试样

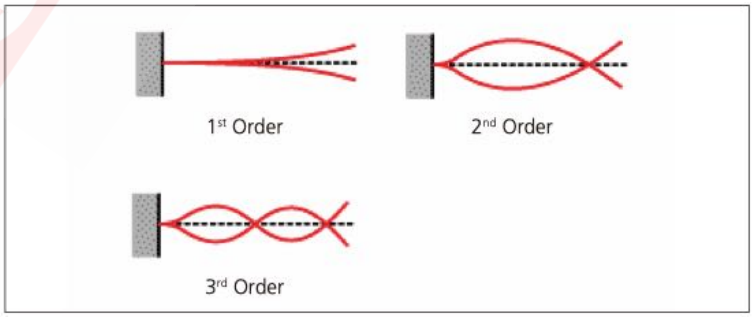


图2 弯曲模式示例

3.测量结果

图3显示了测试装置的概览和试样附近的特写视图。作动器产生的振动经号角放大，导致试样振动。表2列出了测量条件。为了在每个振动周期内获得超过100帧的图像数据，必须将拍摄速度设定为两百万帧/秒。图5展示了一系列采集图像。图5中贯穿图像的蓝线位于图像(1)中试样的中心位置。随着图像从(1)移动到(3)，试样的中心部分向下偏移。随后，试样中心部分向上移动，在图像(9)时达到最大值。从图像(9)开始，试样中心再次下降，在图像(11)时回到与图像(1)相同的位置。由此可确定试样的振动周期为20kHz。此外，从图5可见，尽管试样尖端移动不大，但由于试样中心的移动，可以判断试样处于二阶弯曲模态。对采集图像应用图像处理软件可以确定试样的移动范围。在此，我们测定了试样中心部分的移动量。图6显示了时间与试样中心移动量之间的关系。同时，由图4可知，弯曲试验中的振幅约为80μm，振动频率为20kHz。

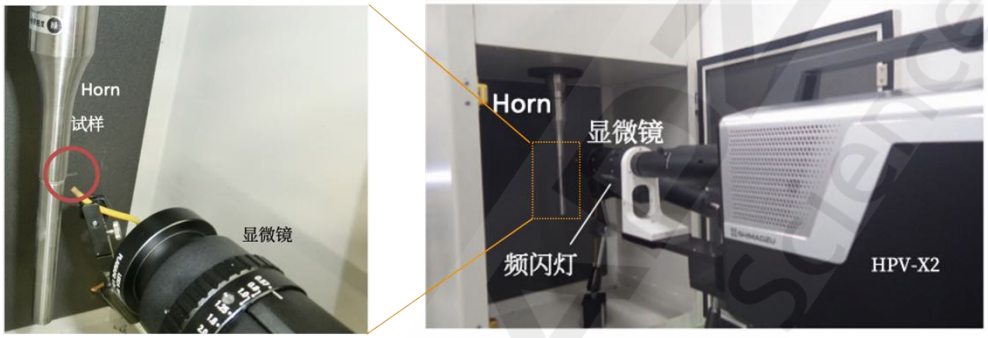


图3 测试装置

表1 成像仪器

参数	名称
高速摄像机	HPV-X2
显微镜	Z16APO
照明	频闪灯
测试仪器	USF-2000

表2 测试条件

参数	名称
测试速度	200万帧/s
测试频率	20kHz
试样尺寸	10.0×3.020×0.406mm

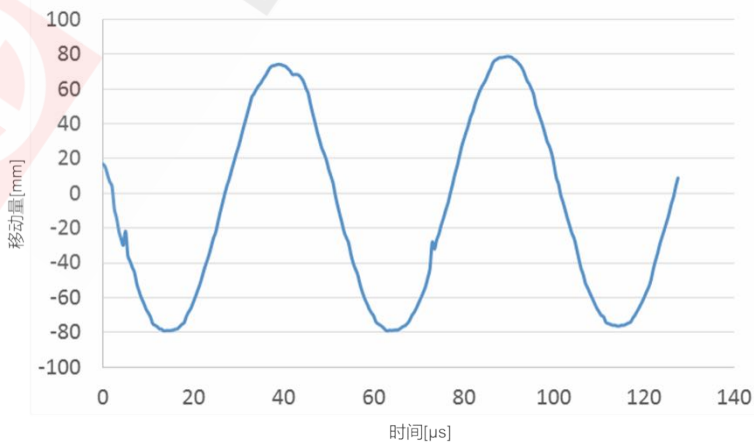


图4 样品移动位移量-时间图

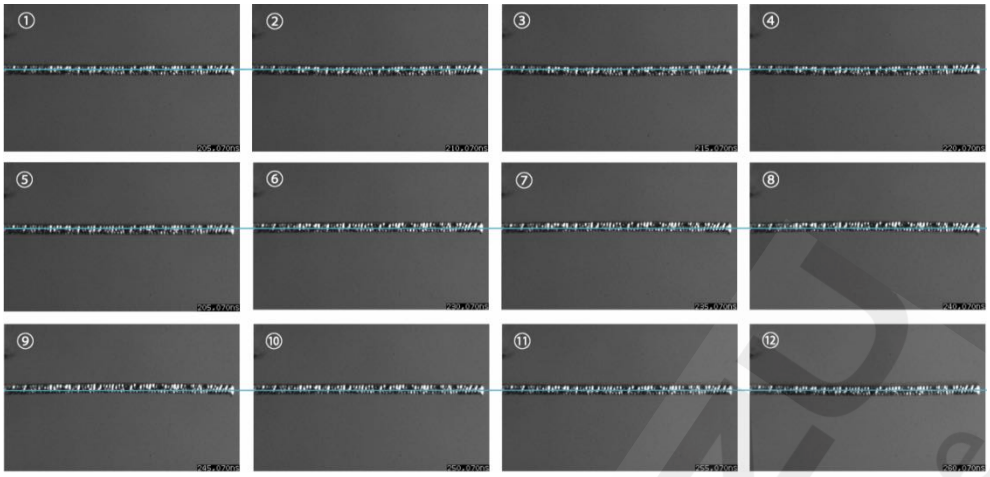


图5 高速图像（成像间隔：5μsec）

4.结论

使用超声波频率对目标部件进行的疲劳测试中，采用HPV-X2高速相机记录了测试过程，并确认了试样的运动特性。HPV-X2能够有效捕捉测试过程中产生的高速运动，而安装显微镜后，则可对这些微小运动进行可视化记录。除了能够在测试中确认试样的运动状态外，还可以从所采集的图像中测定试样实际运动幅度。USF-2000超声疲劳试验机通过振动幅度计算应力幅值，从而能够根据图像确定试样所承受的应力载荷。因此，在产品开发过程中极为重要的疲劳测试环节中，HPV-X2可发挥有效的辅助作用。

金属材料超声疲劳试验

1.引言

众所周知，大多数结构金属材料的疲劳强度会随着载荷施加次数增加而降低，直至达到106次后趋于稳定；而从10^7次起，将达到疲劳极限，此时不再发生疲劳断裂。然而，研究也表明，对于经过硬化或表面处理的高强度金属材料，内部夹杂物会成为疲劳断裂的起源，并可能在10^8至10^9循环次数时就引发断裂。另一方面，近年来，对工业产品的功能性和耐久性要求日益严苛；顺应这一趋势，构成工业产品的金属材料也必须满足更严格的要求。因此，传统的疲劳测试通常最多进行10^7次加载循环，现已显得不足，要求进行超过10^9次循环的疲劳测试。然而，此类测试将耗费大量时间。例如，在10Hz频率下进行10^9次循环的测试，理论上需要约3.2年。本实验所采用的超声疲劳试验系统，能够在20kHz频率下进行测试，实现约14小时内完成10^9次循环的试验。因此，对于超过10^9次循环的疲劳测试，本试验系统是一个极为有效的测量方案。在本实验中，根据日本焊接工程学会制定的WES1112:2017（金属材料超声疲劳试验方法），使用SNCM439和A6063两种金属试样进行测试。本文将介绍其结果。

2.测量系统

测量使用了USF-2000A超声疲劳试验系统。关于其测量原理，请参阅本系统的产品目录（动态/疲劳测试系统）。测试系统配置如表1所示，测试实况如图1所示。WES1112:2017中规定，必须测量试样上高应力部位的表面温度，以确定将温度保持在30°C或以下的条件，并推荐使用辐射温度计进行测量。当室温超过30°C时，上限温度应为“室温+5°C”。此外，建议采用强制风冷，用10°C或以下的空气冷却试样。

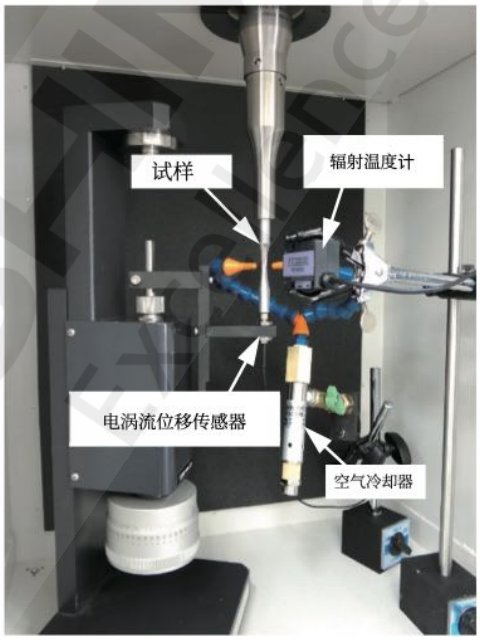


图1 测试系统

表1 仪器信息

参数	名称
测试系统	USF-2000A超声疲劳试验系统
温度计	辐射温度计
位移计	电涡流位移传感器

3.试样制备

超声疲劳测试系统以20kHz的频率使试样共振，从而在试样上产生应力。关于测试频率，WES1112:2017指出，低于15kHz的可听频率可能会引起噪音问题，而高于30kHz的高频则会给设计出能够共振的试样带来困难，因此建议在20±1kHz的频率下进行试验。为满足这一要求，必须制备能够在20kHz频率下共振的试样。我们制备了三种具有不同平行段长度（图2中的L）的试样，并计算了各自的共振频率，通过线性插值得出了在20kHz下的试样尺寸。例如，SNCM439试样的图纸如图2所示，共振频率与平行段长度之间的关系如图3所示。

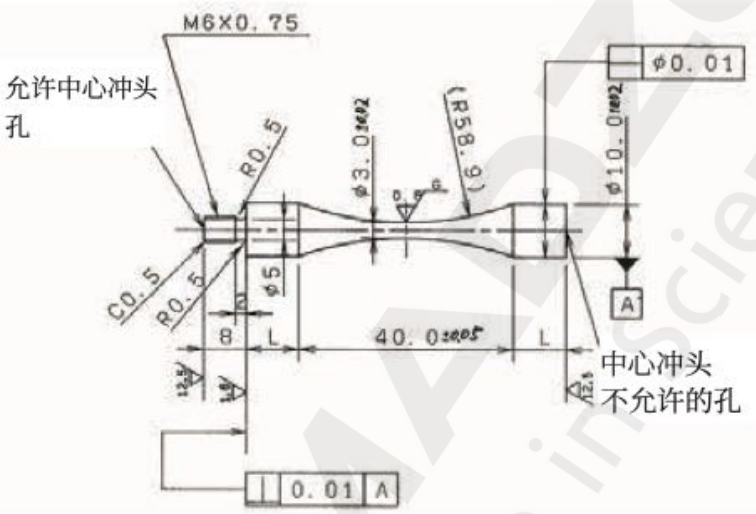


图2 SNCM439试样图纸

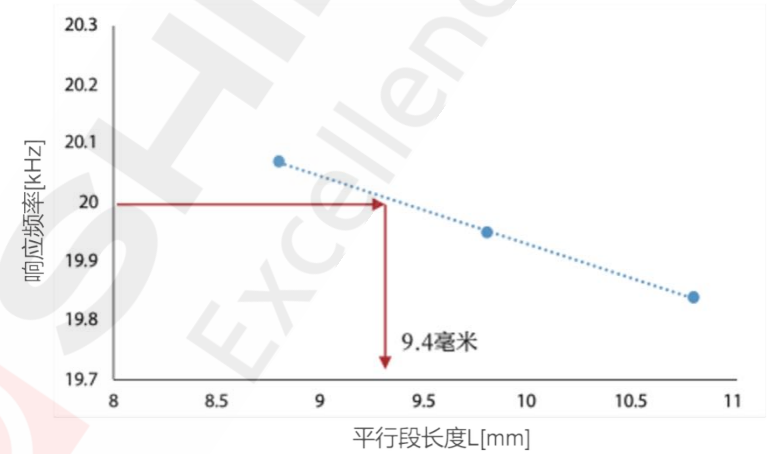


图3 SNCM439的共振频率与平行段长度之间的关系

4.测试条件

测试条件列于表2。通过在两种金属试样上设置如表2所示的六个应力幅等级进行测试。为防止试样发热，除了强制风冷外，还通过反复交替振动与非振动的方式进行了间歇运行。WES1112:2017指出，由于间歇运行对测试的影响可忽略，故可进行间歇运行。表3列出了间歇运行的条件。

表1 仪器信息

参数	名称
试样	SNCM439，A6063(T5)
应力幅	SNCM439（1100,1050,1000,950,900,850MPa） A6063（120,110,100,90,80,70MPa）
应力比	-1
最大循环次数	1×10^{10}
样品数	2
测试频率	20kHz

表2 间歇运行条件

试样	应力幅（MPa）	振荡时间（ms）	非振荡时间（ms）
SNCM439	1100	200	500
	950~1050	300	500
	850~900	300	200
A6063	120	200	500
	110	300	500
	70~100	300	100

5.测试结果

SNCM439和A6063的测试结果如图4所示。测试中使用的SNCM439和A6063试样分别经过低温回火和T5热处理，以获得高强度。这些试样在应力幅较小的情况下，于10^8至10^9次循环时出现疲劳断裂。当应力幅较大时，失效循环数的变化较小；当应力幅较小时，此变化较大。这表明，当应力幅较高时，断裂从试样表面开始；当应力幅较低时，断裂起源于内部夹杂物，且夹杂物的大小影响断裂的进程。

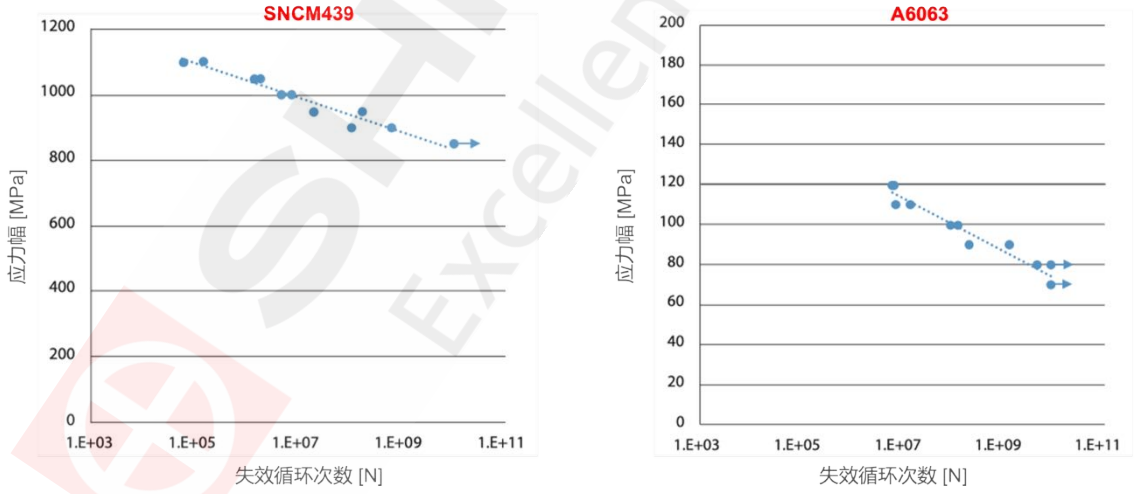


图4 S-N曲线

6.结论

本次实验中，对两种金属材料进行了超声疲劳试验。两种材料均在10^8至10^9次循环时出现疲劳断裂。因此，在需要更高耐久性的场合，测试需重复进行超过10^7次循环。本实验所用的超声疲劳测试系统可在20kHz频率下进行疲劳测试，适用于超过10^7次循环的测试。

超声波疲劳试验机对金属材料夹杂物的检测

1.引言

众所周知，一般而言，大多数结构用金属材料在循环次数达到10^6次之前，疲劳强度会随之下降，但在10^7次之后会出现疲劳极限，不再发生疲劳破坏。然而研究表明，对于经过淬火或表面处理的高强度金属材料，内部的夹杂物会成为疲劳破坏的起点，即使在10^8～10^9次循环下仍可能发生疲劳破坏。当破坏从内部萌生时，疲劳强度被认为取决于内部夹杂物的尺寸与种类。因此，在评估高强度金属材料的疲劳强度时，掌握金属材料中夹杂物的尺寸和种类至关重要。检测夹杂物的方法包括将样品抛光至镜面后进行观察等方法，但存在无法确定所观察到的夹杂物是否会引发疲劳破坏的问题。因此，为了可靠地检测出导致内部破坏的夹杂物，最有效的方法是实际开展疲劳试验[1])。然而，进行超过10^9次循环的疲劳试验时，若采用10Hz的试验频率，约需3.2年时间。本次使用的超声波疲劳试验机可在20kHz频率下进行试验，能够在大约14小时内完成10^9次循环的试验。也就是说，在实际通过疲劳试验检测夹杂物时，超声波疲劳试验机是非常有效的手段。本次使用超声波疲劳试验机USF-2000A对SNCM439材料进行了夹杂物检测，并采用电子探针显微分析仪（EPMA）对夹杂物进行了观察和元素鉴定。

2.通过超声波疲劳试验检测夹杂物

图1展示了试验概况，表1和表2分别列出了本试验所使用的装置及试验条件。诱发内部破坏的最大加载应力依据前期报告[2]）设定为900MPa。试验结果如表3所示，断裂循环次数在2.91×10^7至6.27×10^8之间，确认最大存在10倍以上的离散性。此外，所有断裂均以内部夹杂物为起点萌生。作为参考，图2示出了试样3断口的光学显微镜照片。以夹杂物为起点的破坏，可观察到以夹杂物为中心呈圆形扩展的断口，即所谓的“鱼眼”（fish-eye）3）断口形态。

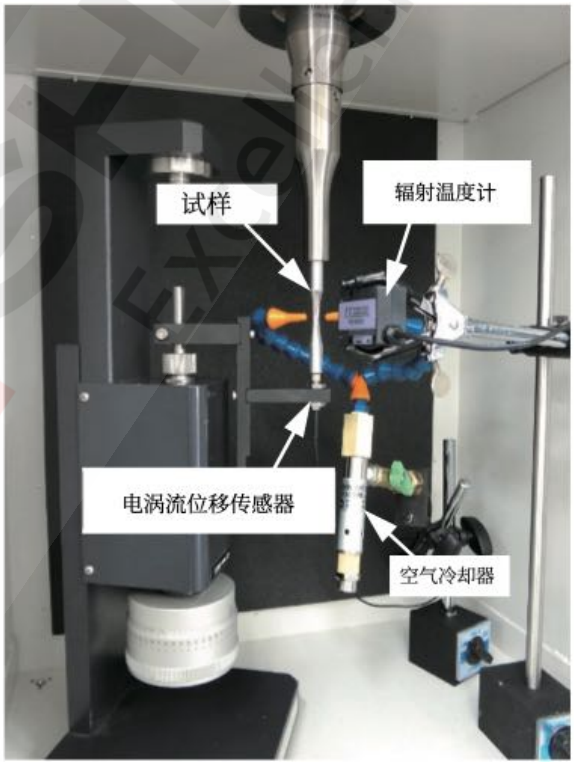


图1 测试系统

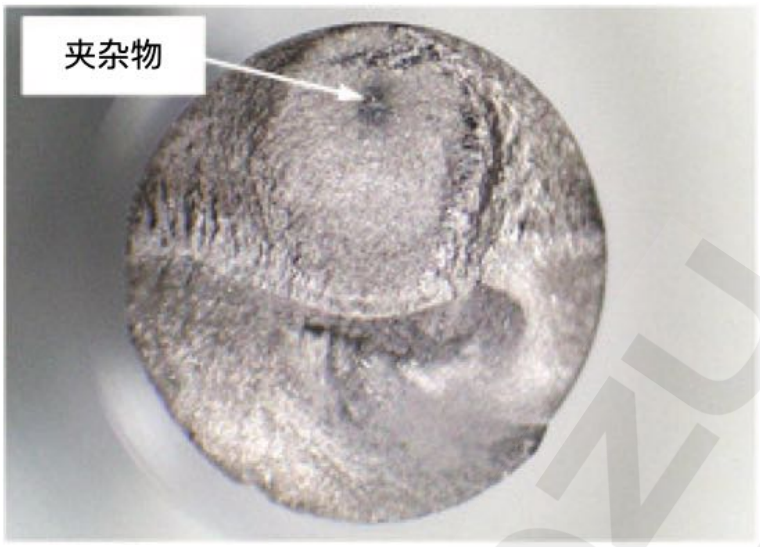


图2 断口的光学显微镜照片

表1 仪器信息

参数	名称
测试系统	USF-2000A超声疲劳试验系统
温度计	辐射温度计
位移计	电涡流位移传感器

表2 测试条件

参数	名称
试样	SNCM439
最大负载应力	900MPa
应力比	-1
最大循环次数	1×10^{10}
样品数	3
测试频率	20kHz
间歇运行	振荡时间300ms、停止时间200ms

表3 测试结果

试样编号	最大负载应力（MPa）	断裂前循环次数
1	900	6.27×10^{8}
2	900	1.06×10^{8}
3	900	2.91×10^{7}

3.电子探针显微分析仪（EPMA）对夹杂物进行观察与分析

为了研究疲劳试验后金属材料的断口状态以及夹杂物的尺寸与种类，使用了电子探针显微分析仪EPMA-8050G。试样1、2、3的断口状态及夹杂物观察图像（二次电子像）分别如图3、图4、图5所示。在所有试样中，断裂均从内部夹杂物处扩展，表明夹杂物是疲劳破坏的起点。根据观察图像求得的夹杂物尺寸（长径）汇总于表4。从表3和表4可以看出，夹杂物尺寸越大，断裂循环次数越小，暗示夹杂物尺寸可能影响疲劳强度。

为了研究各试样中夹杂物的组成元素，进行了面分布分析。试样1中夹杂物的面分布分析结果如图6所示。图6（a）为二次电子像，便于掌握夹杂物的形状；（b）为背散射电子像，平均原子序数越小的区域显

示越暗，越大的区域显示越亮，因此可以了解相对组成；（c）～（f）分别为O、Al、S、Mn的元素分布像，各元素均在夹杂物区域被大量检出。这些结果表明，夹杂物为氧化铝（Al_2O_3）和硫化锰（MnS）。此外，试样2和试样3中的夹杂物同样以氧化铝和硫化锰为主要成分。

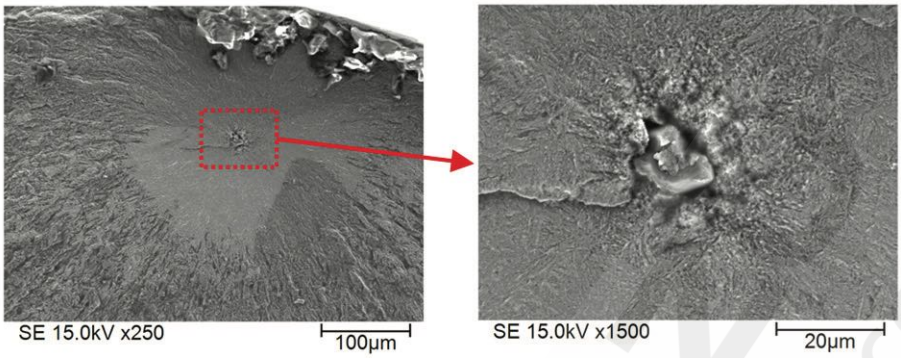


图3 试样1夹杂物的观察图像（2次电子图像）

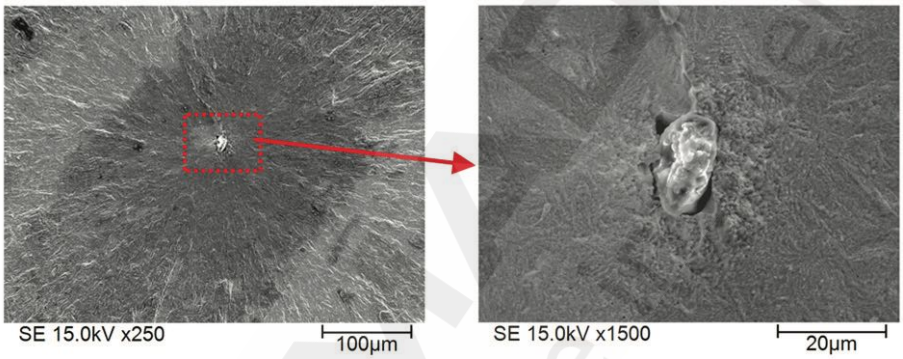


图4 试样2夹杂物的观察图像（2次电子图像）

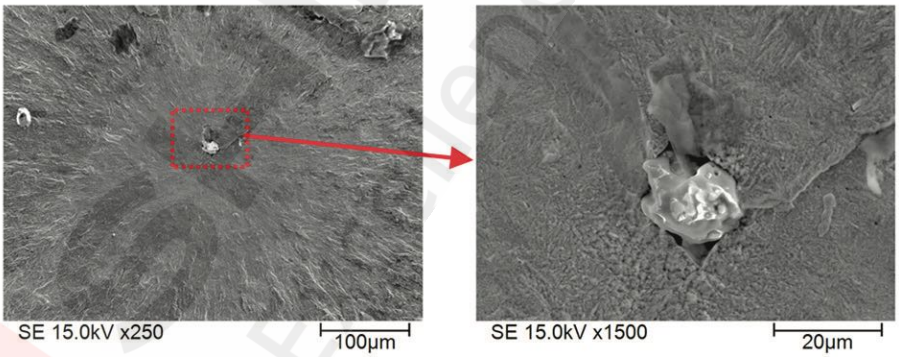


图5 试样3夹杂物的观察图像（2次电子图像）

表4 夹杂物尺寸

试样编号	夹杂物尺寸（长度）
试样1	16μm
试样2	20μm
试样3	22μm

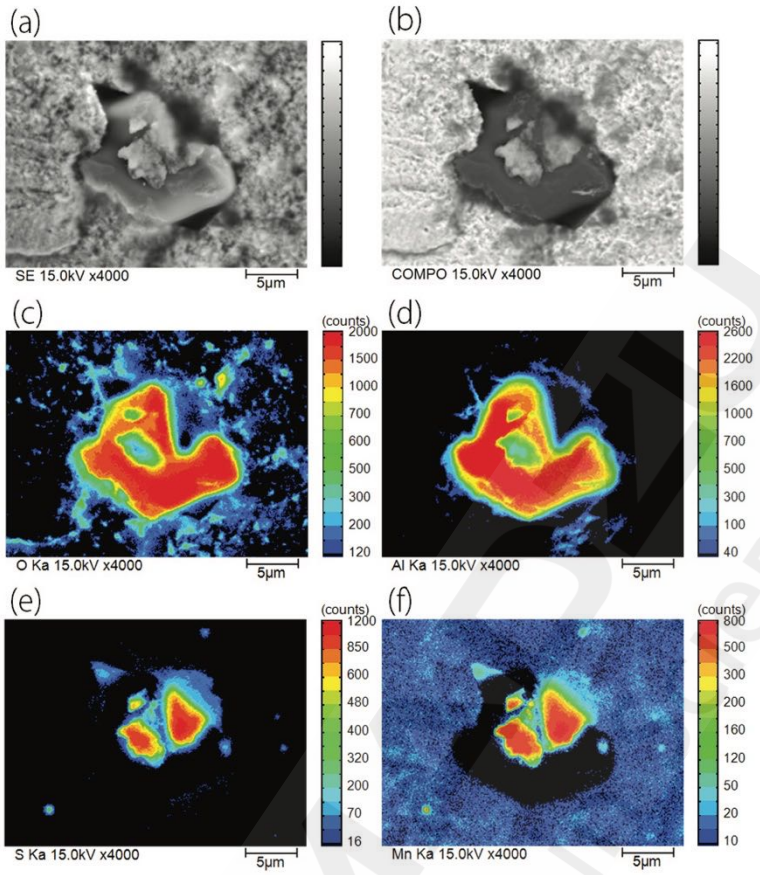


图6 试样1夹杂物的映射分析结果（a）二次电子像、（b）背散射电子（成分）像、（c）O元素分布图、（d）Al元素分布图、（e）S元素分布图、（f）Mn元素分布图

4.结论

本次使用超声波疲劳试验机对夹杂物进行了检测。要检测导致内部破坏的夹杂物，最有效的手段是实际进行疲劳试验，而超声波疲劳试验机能够大幅缩短试验时间，因此是一种行之有效的工具。此外，借助电子探针显微分析仪对夹杂物进行了分析，成功确定了夹杂物的尺寸与元素组成。结果表明，夹杂物尺寸可能是导致断裂循环次数产生离散性的影响因素，同时也证实了在超声波疲劳试验中，断口观察同样至关重要。

带平行段的金属沙漏形试样的超声疲劳试验

1.引言

疲劳是由于重复加载（即使在弹性区内）而导致的一种断裂现象。据统计，约70%的结构断裂现象是由金属疲劳引起的。对于大多数结构用钢而言，存在一个疲劳极限：当应力低于某一数值时，即使重复加载，也不会发生疲劳破坏，该循环次数约为10^6～10^7次。然而，在铬钼钢等高强度钢中，已知由于材料内部夹杂物的存在，在超过10^7次的10^8～10^9次超高周循环范围内仍会发生疲劳破坏。因此，以10^7次作为一般疲劳试验中最大循环次数的标准是不够的，需要进行10^9次以上的疲劳试验。另一方面，进行超过10^9次的疲劳试验时，若加载频率为10Hz，则需要3年以上的时间。本研究中使用的超声波疲劳试验机可进行20kHz的试验，能够在约14小时内完成10^9次循环的试验，是测量超高周疲劳的理想工具。

在先前的研究报告中，使用标准沙漏形试样进行了试验。2024年11月，《GB/T43896金属材料超高周疲劳超声疲劳试验方法》正式发布，因此岛津公司在其USF-2000A专用软件“SuperSonic”中新增了带平行段沙漏形试样的尺寸计算功能。

本文以SNCM439结构钢为例，介绍依据GB/T43896标准对带平行段沙漏形试样进行测量的一则实例。

2.试样

本次试验使用了USF-2000A。表1列出了试验设备，图1展示了试验装置布置。在超声疲劳试验中，由压电作动器产生的纵波振动使试样共振，从而对试样施加应力。循环应力并非使用载荷传感器测量，而是基于试样端面的位移计算得出。本次试验使用电涡流位移计来测量端面位移。

在超声疲劳试验中，由于高重复频率会导致试样内部发热。依据GB/T43896，需测量试样高应力区域的表面温度，并要求试验期间试样温度维持在室温+10°C以内。为了抑制试样的温升，采用了空气冷却器向受热区域吹送冷却空气，并如下所述进行间歇运行。



图1 (a)USF-2000A外观,(b)测试视图

表1 仪器信息

参数	名称
测试系统	USF-2000A超声疲劳试验系统
温度计	辐射温度计
位移计	电涡流位移传感器
软件	SuperSonic

3.试样

具有平行段的沙漏形试样是一种中心带有平行部分的试样。本次测试所用试样的形状如图2所示。由于平行段截面恒定，测试过程中应力均匀，因此适用于测试含有如夹杂物等明显缺陷的材料。

GB/T43896建议测试在20±0.5kHz的共振频率下进行。共振频率随试样长度变化，试样越长，共振频率越低。本次基于尺寸计算函数制作了三种不同试样肩部长度的试样。随后测量了每个试样的共振频率，并通过明确试样肩部长度与共振频率之间的关系，确定了在20kHz下共振的试样尺寸。图3显示了共振频率与试样肩部长度L之间的关系。根据图3，本次测试将试样肩部长度设定为16.4毫米进行。

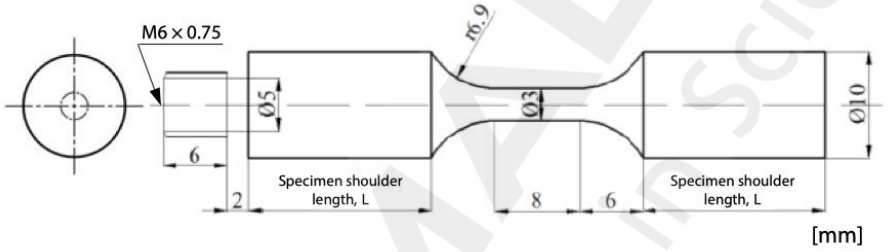


图2 带平行段的漏斗形试样

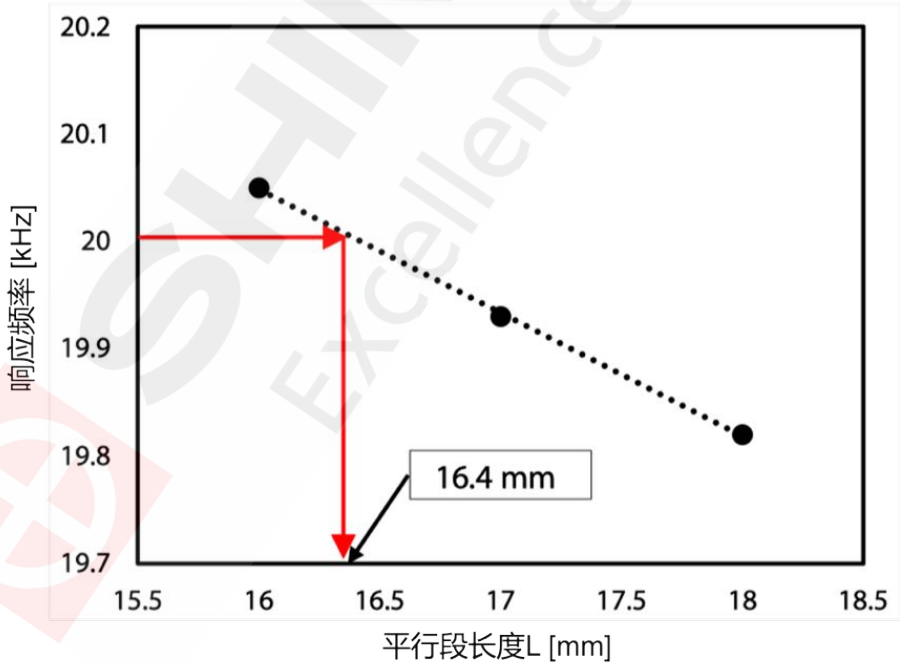


图3 共振频率与平行段长度之间的关系

4.试验条件

表2显示了测试条件。在这些测试中，最大施加应力被设定为5级。此外，为了防止试样发热，执行了间歇运行，即交替重复振荡时间和停止时间。间歇运行的条件通过使用辐射温度计测量试样表面温度来确定。

表3显示了间歇运行的条件。

表2 试验条件

参数	名称
试样	SNCM439
应力幅	(1100,1050,1000,950,900,850MPa)
应力比	-1
最大循环次数	1×109
样品数	2
测试频率	20kHz

表3 间歇运行条件

应力幅（MPa）	振荡时间（ms）	非振荡时间（ms）
1100	110	1200
1050	110	1000
1000	150	600
950	200	550
900	200	500

5.试验条件

测试结果如图4所示。本次测试的SNCM439材料经过热处理以提高其强度。从S-N曲线图中确认，在最大施加应力为950MPa或更高的条件下，10^7至10^8次循环时发生疲劳失效。此外，最大循环次数设定为10^9次，在900MPa下的测试中，确认样本测试直至最大循环次数均已完成且未发生失效。

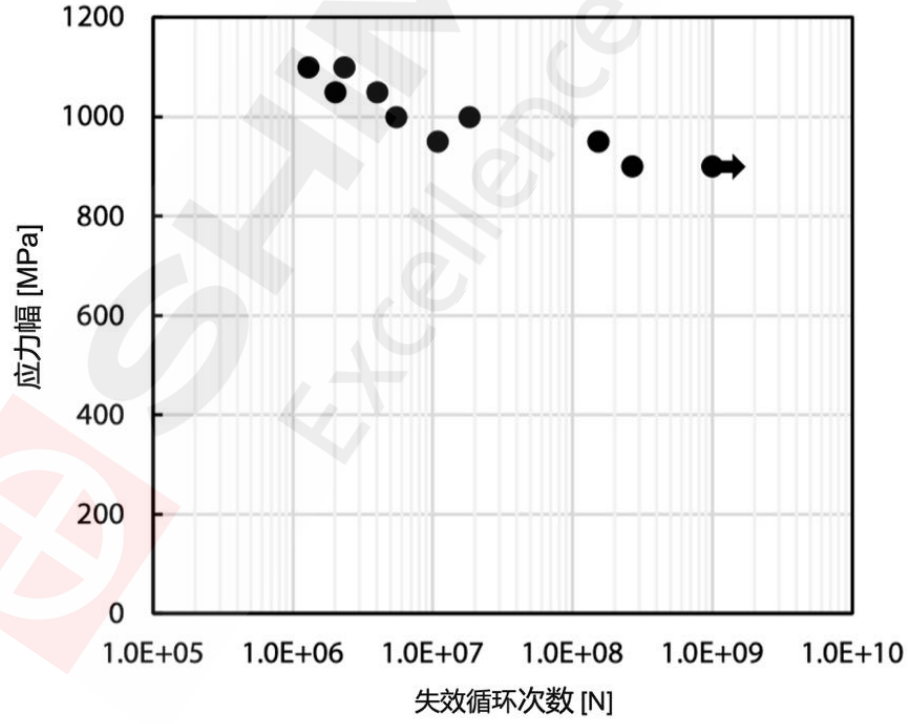
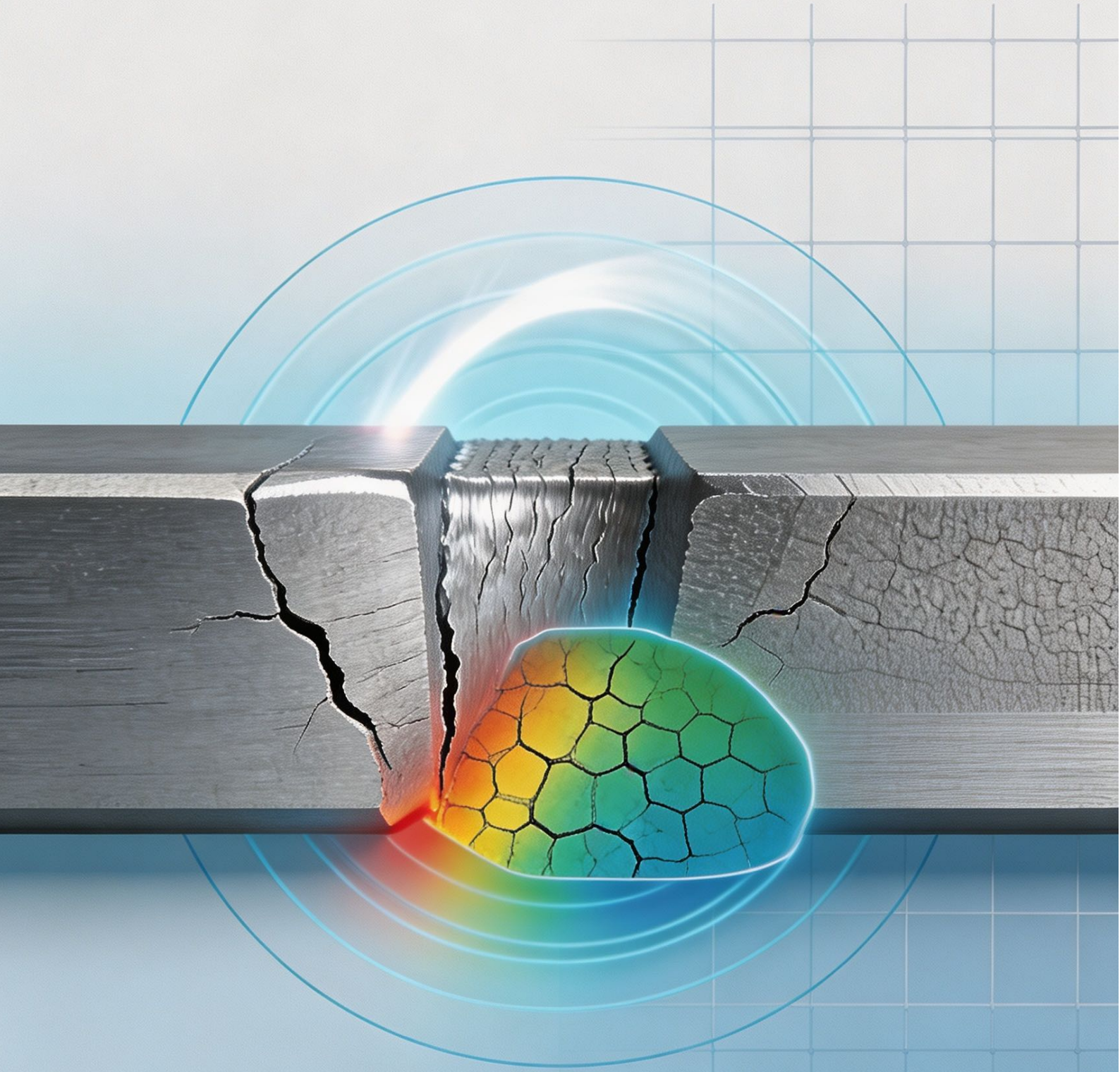


图4 S-N图

6.结论

在这些试验中，根据GB/T43896《金属材料超高周疲劳超声疲劳试验方法》，对SNCM439样品带平行段的沙漏形试样进行了超声疲劳试验，并获得了S-N图。

第8章SEM-Servo扫描电镜(高温)原位疲劳试验机应用方案



豆包AI生成

使用 SEM 伺服脉冲器进行焊接材料的三点弯曲疲劳试验

1.引言

焊接广泛应用于建筑业、汽车与航空产业等运输设备领域、电气电子产业等各行各业，已成为这些产业不可或缺的技术。由于焊接缺陷引发的事故，极有可能对生命安全和地球环境造成重大影响，因此长期可靠性和耐久性的评估被视为重要课题。

本次试验准备了两种铁材料在中央焊接而成的试样，使用台式动态疲劳试验机伺服脉冲器进行了三点弯曲疲劳试验。此外，对试验后的试样，使用电子探针显微分析仪进行了断口观察。还使用配备扫描电子显微镜的高温疲劳试验机SEM伺服脉冲器，观察了疲劳试验过程中裂纹扩展的情况。

2.试样信息与测量系统

试样信息、试样照片分别如表1、图1所示。试样分别为SUS304和SS400经TIG焊接而成，（L）18mm×（W）4mm×（t）3mm。此时焊接部位进行了C1倒角处理，并进行了全周焊接。

试验使用了台式动态疲劳试验机伺服脉冲器EHF-L、带扫描电子显微镜的高温疲劳试验机SEM伺服脉冲器以及电子探针显微分析仪EPMA。装置构成信息如表2所示。首先，使用EHF-L绘制了焊接试样的S-N曲线。随后，基于所得的S-N曲线，设定了SEM伺服脉冲器中的疲劳试验条件，并观察了裂纹。此外，还通过EPMA观察了试验后试样的断口。

表1 样品信息

参数	名称
测试样品	SUS304、SS400
焊接方法	TIG焊接(TG308Φ1.2毫米的焊条)
尺寸	（L）18mm×（W）4mm×（t）3mm

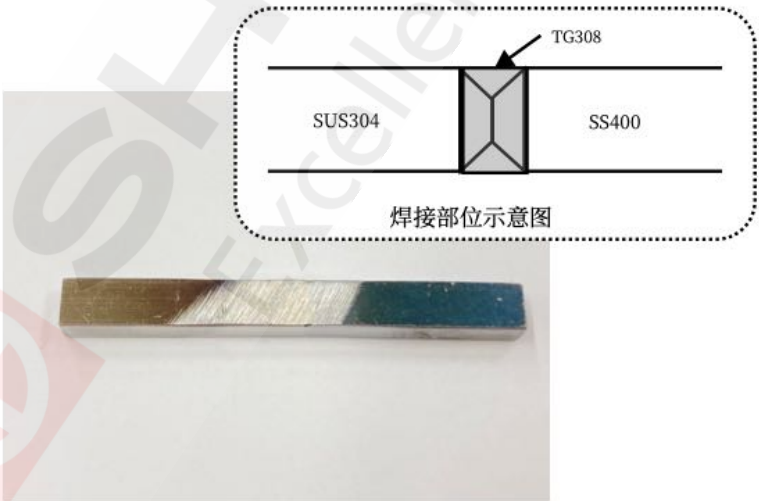


图1 试样照片

表2 装置构成信息

参数	名称
装置	EHF-L、SEM伺服脉冲器、EPMA-8050G
载荷传感器	10kN
测试夹具	三点弯曲试验夹具

3.静态3点弯曲试验结果

为了设定疲劳试验的条件，首先进行了静态三点弯曲试验。静态三点弯曲试验的试验条件如表3所示。图2展示了弯曲应力-行程曲线。静态三点弯曲试验中弯曲强度的平均值为881MPa（标准偏差63.8，离散7.2）。基于此值设定了疲劳试验的负荷条件。图3展示了试验情况。

表3 静态3点弯曲试验条件

参数	名称
试验速度	1mm/min
试验数	n=3

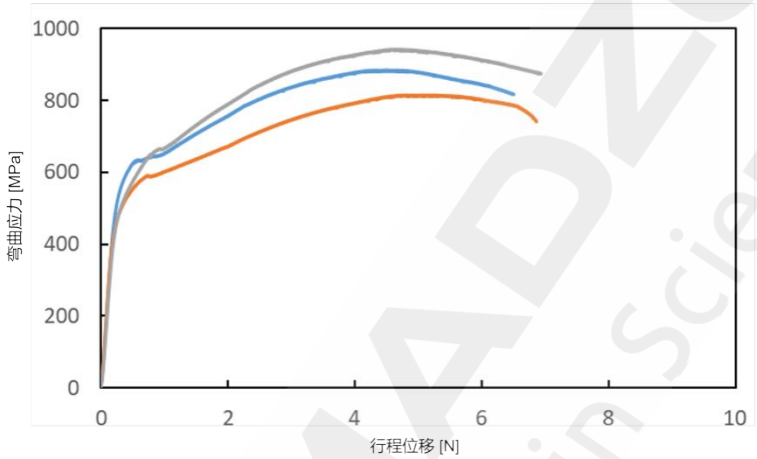


图2 弯曲应力-行程曲线图

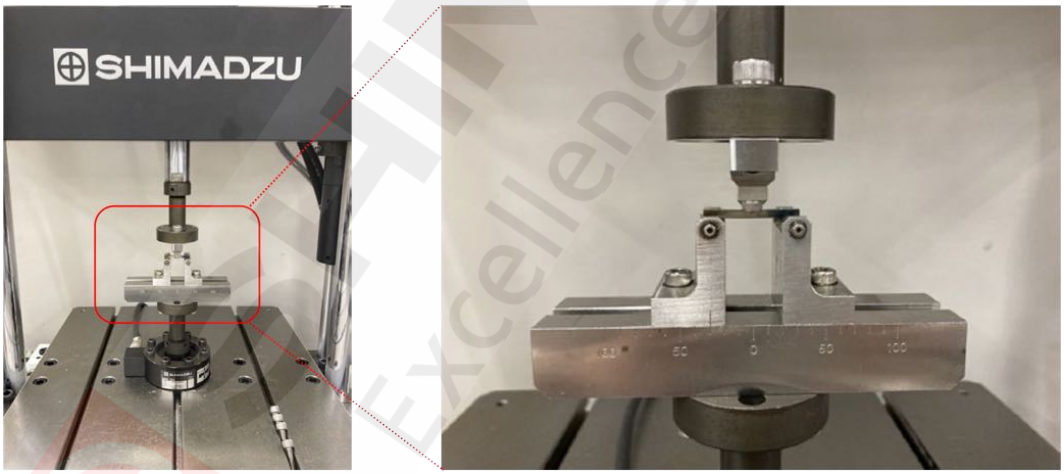


图3 测试情况

4.3点弯曲疲劳试验结果

将静态三点弯曲强度的46%～80%应力作为三点弯曲疲劳试验的加载条件。表4列出了三点弯曲疲劳试验的条件。图4显示了S-N曲线。由于仅在最大加载应力650MPa处确认了焊接部位与非焊接部位发生断裂，因此进行了两次试验（试样A、试样B）。关于此点的详细信息，将在下一节通过EPMA进行的观察和元素分析中介绍。

表4 三点弯曲疲劳试验条件

参数	名称
最大负载应力	405,418,499,546,593,650,700MPa (相对于静态弯曲强度的46～80%)
应力比	0.1
试验频率	20Hz
样品数	1(仅593MPa测试数为n=2)
支点间距	30mm
压头/支点	R2

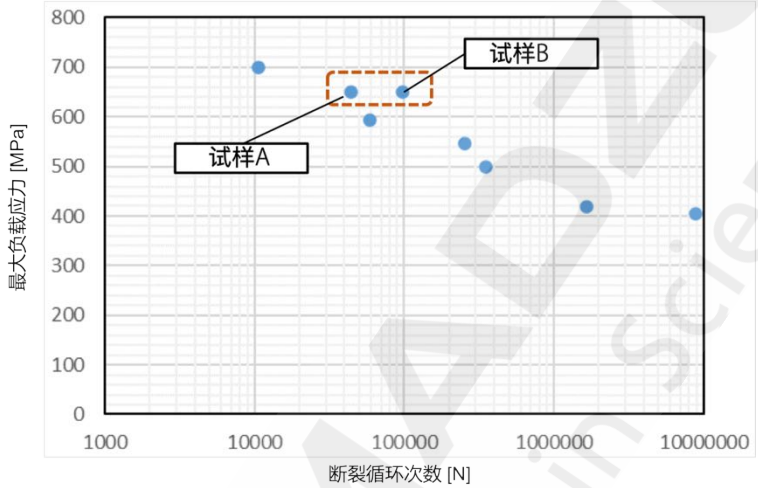


图4 S-N曲线

5.基于电子探针显微分析仪的观察与元素分析

首先，对疲劳试验前的试样进行了元素面分布分析。由于试样是使用TG308将SUS304与SS400在中央部位焊接而成，因此在镍、铬等元素上呈现出差异。图5展示了背散射电子像以及镍、铬的元素面分布分析图像。如图5(2)、(3)所示，可以清晰识别SUS304、TG308和SS400之间的边界。

随后，对三点弯曲疲劳试验中断裂位置不同的两种试样A、B的SS400侧，使用电子探针显微分析仪进行了元素面分析。图6显示了试验后试样A和试样B的照片。试样A大致在中央断裂，而试样B则在SS400侧断裂。图7展示了试样A的SS400侧断口在电子探针显微分析仪下的观察图像。图7（3）、（4）中试样中心部位的镍、铬含量较低，而其周边区域则检测到较多的镍、铬成分。这被认为是因为检测到了SS400的焊接面与焊接材料TG308的成分所致。

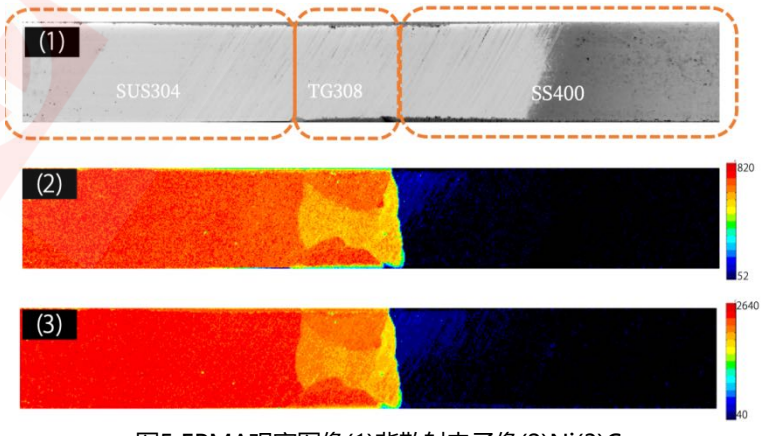


图5 EPMA观察图像(1)背散射电子像(2)Ni(3)Cr



图6 疲劳试验后的试样A以及B

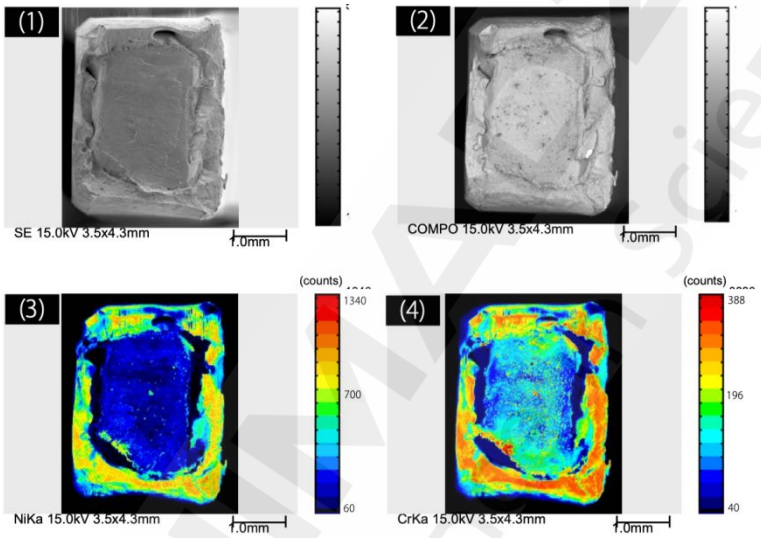


图7 EPMA观察的试样A断口图像(SS400侧)

(1)二次电子像(2)背散射电子像(3)Ni(4)Cr

另一方面，图8显示了通过EPMA观察试样BSS400侧断口获得的图像。根据图8(3)、(4)，Ni、铬几乎未被检测到，因此可以认为试样B是在SS400侧发生了疲劳破坏。由此可以推断，试样B的焊接部位强度较高，从而导致母材SS400发生疲劳破坏，其断裂循环次数比试样A更大。

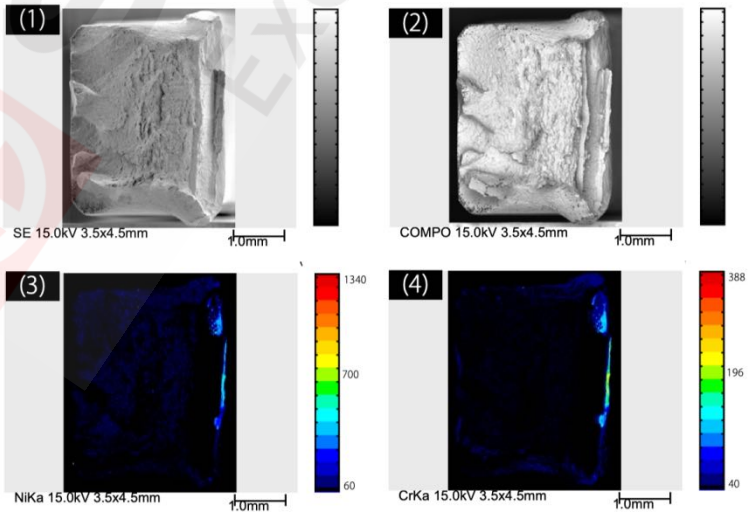


图8 EPMA观察的试样B断口图像(SS400侧)

(1)二次电子像(2)背散射电子像(3)Ni(4)Cr

6.SEM伺服脉冲器观察

SEM伺服脉冲器是将扫描电子显微镜(SEM)与疲劳试验机（伺服脉冲器）组合而成的装置，是一种能够在试验中详细观察裂纹扩展的装置。本次在最大加载应力700MPa下，使用SEM伺服脉冲器进行了观察。图9展示了SEM伺服脉冲器的照片。图10展示了通过SEM伺服脉冲器获得的观察图像。图10(1)是1000次循环时的压头与试样图像。从图10(1)可见，在试样中心略微偏右的位置观察到了裂纹。图10(2)是图10(1)中裂纹右侧区域以1000倍放大倍率观察的图像。如图所示中的白色箭头所示，可以确认从图10(1)中观察到的裂纹尖端处，裂纹有了进一步的扩展。图10(3)是8000次循环时裂纹状态以300倍放大倍率观察的图像。图10(4)是裂纹右侧以500倍放大倍率观察的图像。与图10(2)相比，可以确认裂纹有了更进一步的扩展。



图9 SEM伺服脉冲器™

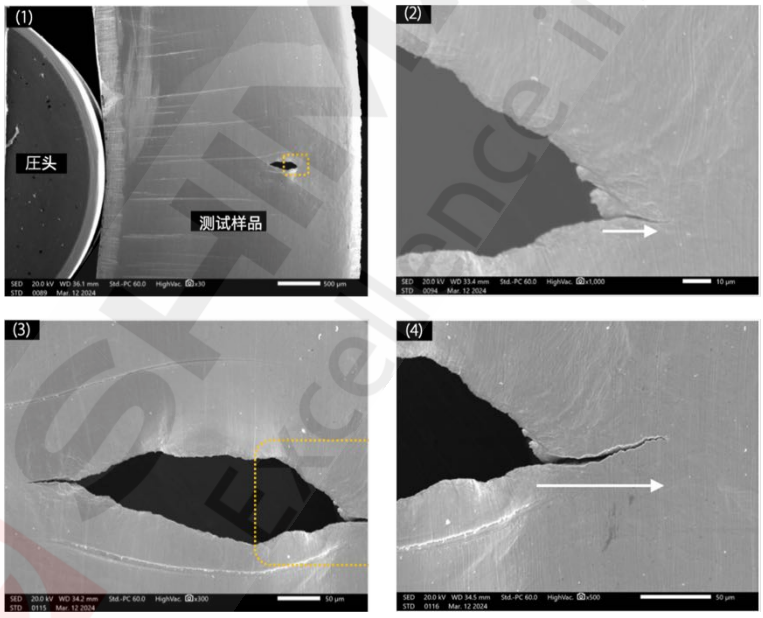


图10 SEM伺服脉冲器观察图像示例(1)1000次循环、×30倍
(2)1000次循环、×1000倍(3)8000次循环、×300倍(4)8000次循环、×500倍

7.结论

首先，使用伺服脉冲器对焊接材料进行了弯曲疲劳试验，并测得了S-N曲线。在此过程中，对两个具有不同断裂循环次数的试样，使用电子探针显微分析仪进行了元素分析。结果表明，断裂位置位于焊接部位与母材的差异是导致此现象的原因。随后，参考所得S-N曲线，设定了SEM伺服脉冲器中的条件，并观察了测量中试样的裂纹。通过改变SEM的放大倍率，可以详细观察试样的裂纹，并且能够观察到随着试验的进行，裂纹逐渐扩展的过程。如此，这些装置有助于评估焊接材料的疲劳特性。

使用 SEM 伺服脉冲器进行的碳纤维增强塑料的三点弯曲疲劳试验

1.引言

碳纤维增强塑料是一种以高比强度、高比刚度而闻名的材料，广泛应用于运输设备等领域。要将碳纤维增强塑料用作结构材料，从长期可靠性和耐久性的角度来看，必须对其作为结构物主要破坏原因的疲劳特性进行恰当评估。特别是碳纤维增强塑料由碳纤维和基体树脂两种材料组成，会表现出裂纹、层间剥离、纤维断裂等多种破坏模式共同作用的复杂行为。

本次，我们使用台式动态疲劳试验机伺服脉冲器EHF-L进行了碳纤维增强塑料的弯曲疲劳试验。此外，还使用了配备扫描电子显微镜的高温疲劳试验机SEM伺服脉冲器，观察了疲劳试验过程中裂纹扩展的情况。

2.试样信息与测量系统

试样信息列于表1。试验使用了EHF-L和SEM伺服脉冲器。装置构成列于表2。首先，使用EHF-L测试了碳纤维增强塑料试样的S-N曲线。随后，基于获得的S-N曲线，设定了SEM伺服脉冲器的疲劳试验条件，并观察了裂纹。

表1 样品信息

参数	名称
测试样品	CFRP
层叠方法	(0/90)/(45/-45)交替铺层
尺寸	（L）36mm×（W）5mm×（t）3mm

表2 装置构成信息

参数	名称
装置	EHF-L、SEM伺服脉冲器
载荷传感器	10kN
测试夹具	三点弯曲试验夹具
控制器	ServoController4830
软件	Windows®Softwarefor4830

3.静态3点弯曲试验结果

为了设定疲劳试验的条件，首先进行了静态三点弯曲试验。静态3点弯曲试验的试验条件如表3所示。图1展示了应力-位移曲线图。静态三点弯曲试验中弯曲强度的平均值为628MPa（标准偏差50.6，离散系数8.1）。基于此值，设定了疲劳试验的加载条件。图2展示了试验状态。

表3 静态3点弯曲试验的试验条件

参数	名称
试验速度	1mm/min
试验数	n=4
支点间距	30mm
压头/支点	R2
仪器装置	EHF-L

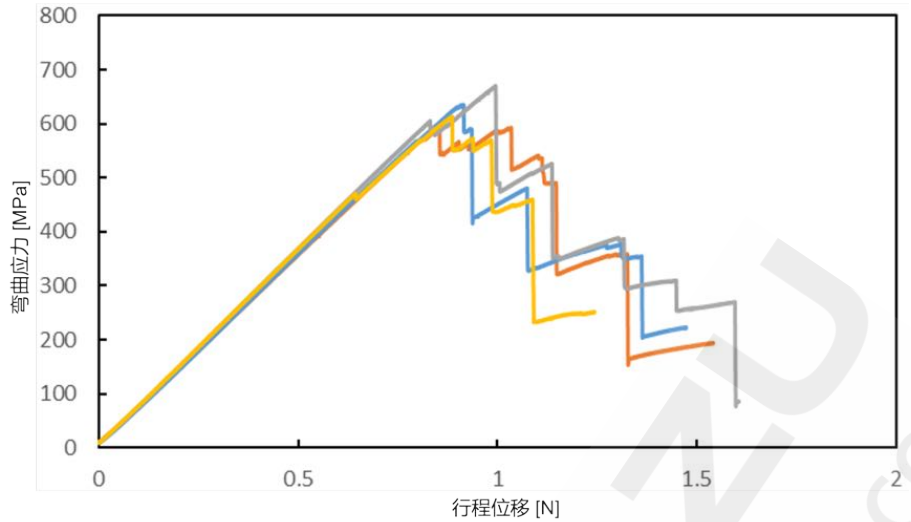


图1 弯曲应力-行程曲线图



图2 试验状态

4.3点弯曲疲劳试验结果

将静态三点弯曲强度的60～85%应力设定为三点弯曲疲劳试验的加载条件。表4展示了三点弯曲疲劳试验的条件。图3展示了S-N曲线。

表4 三点弯曲疲劳试验的条件

参数	名称
最大负载应力	377,409,440,472,503,535[MPa] (相对于静态弯曲强度为60～85%)
应力比	0.1
试验频率	20Hz
样品数	n=2
支点间距	30mm
压头/支点	R2
仪器装置	EHF-L

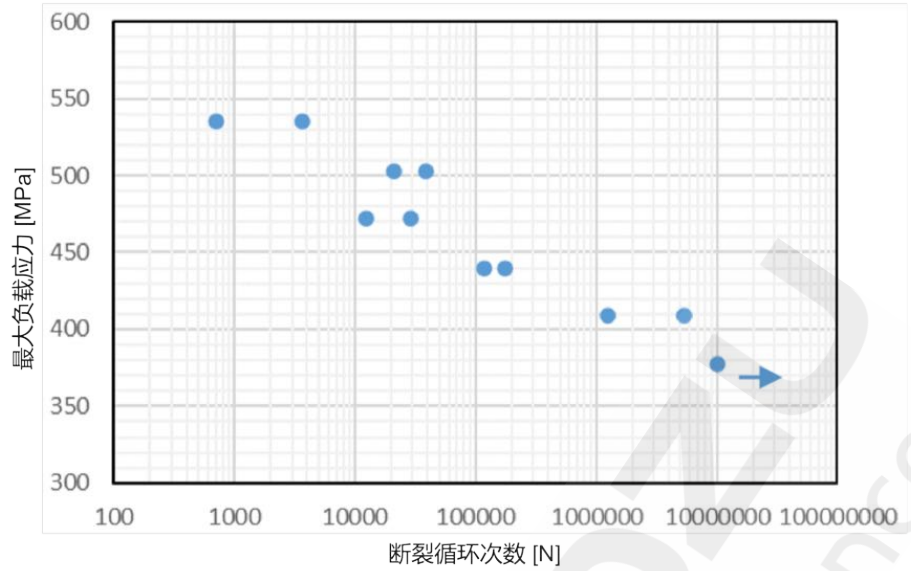


图4 S-N曲线

5.SEM伺服脉冲器观察

SEM伺服脉冲器是一种将扫描电子显微镜(SEM)与疲劳试验机（伺服脉冲器）相结合的装置，能够详细观察试验过程中裂纹扩展情况。根据图3的S-N曲线，本次在最大负载应力535MPa条件下使用SEM伺服脉冲器进行了观察。图4展示了试样与试验夹具的照片。试样预先进行了镀金处理，以便于SEM观察。图5展示了通过SEM伺服脉冲器获取的观察图像。图5(1)为试验前压头正下方试样的状态。图5(2)～(4)展示了719次循环时压头附近试样的状态。SEM的放大倍数分别为30倍、50倍和100倍。根据图5(2)～(4)，可观察到压头左侧存在包含纤维断裂的压缩破坏。图5(5)、(6)展示了5500次循环时试样的状态，放大倍数分别为13倍和100倍。由图5(5)可知，不仅压头侧，其对侧也产生了裂纹。在图5(6)中，可观察到图5(4)中未出现的新基体裂纹，表明损伤已进一步发展。

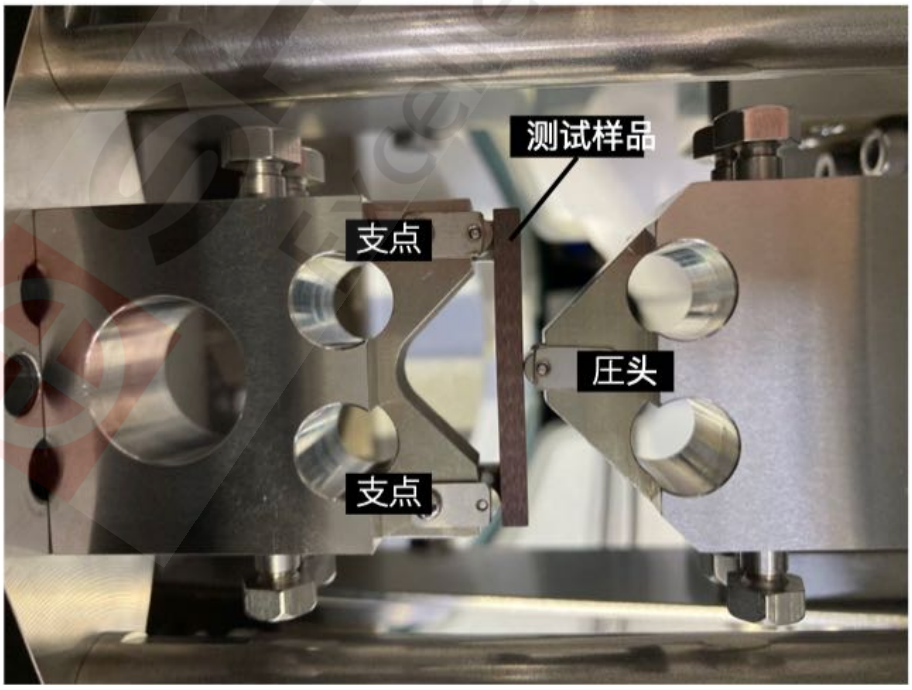


图4 试样与试验夹具

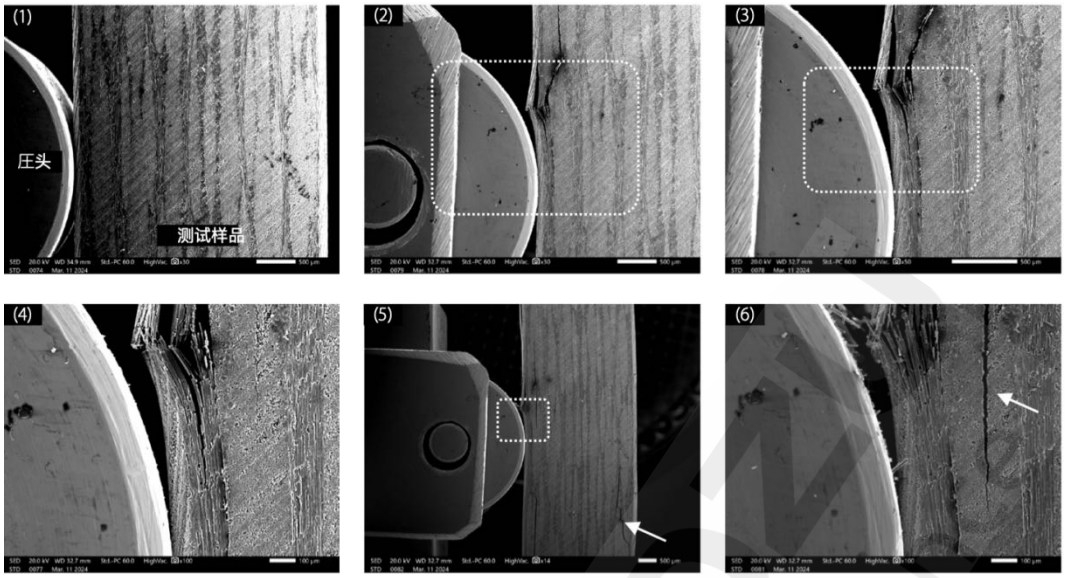


图5 使用SEM伺服脉冲器获取的观察图像示例

(1)试验前，(2)719次循环、×30倍，(3)719次循环、×50倍

(4)719次循环、×100倍，(5)5500次循环、×13倍，(6)5500次循环、×100倍

6.结论

使用疲劳试验机对碳纤维增强塑料进行了弯曲疲劳试验，并绘制了S-N曲线。随后，参考所得的S-N曲线，设定了SEM伺服脉冲器的试验条件，观察了测量过程中试样的损伤情况。通过改变SEM的放大倍数，能够详细观察试样的损伤部位，并且通过试验进程，可以明确损伤是如何发展的。由此可见，SEM伺服脉冲器可用于评估以碳纤维增强塑料为代表的复合材料的疲劳特性。

岛津企业管理(中国)有限公司 http://www.shimadzu.com.cn

岛津中国

客服热线电话: 800-810-0439 400-650-0439

本样本内容非商业广告，仅供专业人士参考。 印刷日期:

注：样本中关于产品性能、功能等信息的表述及对比范围，仅限于岛津自产和岛津合作的产品。本产品资料所宣传的内容，以本版本为准，资料中的试验数据除注明外均为本公司的试验数据（另有说明的除外）。本资料所有信息仅供参考，如有变动恕不另行通知。

北京
北京市朝阳区朝外大街16号中国人寿大厦14层
邮政编码：100020
电话：(010)8525-2310/2312 传真：(010)8525-2531

沈阳
沈阳市青年大街167号北方国际传媒中心11层
邮政编码：110016
电话：024-23255577 传真：(024)2325-5577

西安
西安市锦业一路56号研祥城市广场A座501
邮政编码：710065
电话：029-62737878 传真：(029) 6273-7879

乌鲁木齐
乌鲁木齐市中山路339号中泉广场14H座
邮政编码：830002
电话：(0991)230-6271/6272 传真：(0991)230-6273

郑州
郑州市中原路220号裕达国际贸易中心A座20层2011室
邮政编码：450007
电话：(0371)8663-2981/2983 传真：(0371)8663-2982

上海
上海市徐汇区宜州路180号华鑫慧享城B2栋
邮政编码：200233
电话：(021)3419-3888 传真：(021)3419-3666

成都
成都市锦江区创意产业商务区三色路38号博瑞·创意成都写字楼B座12层
邮政编码：610063
电话：(028)8619-8421/8422 传真：(028)8619-8420

南京
南京市鼓楼区汉中路2号亚太商务楼27层B座
邮政编码：210005
电话：(025)8689-0258 传真：(025)8689-0237

重庆
重庆市渝中区长滨路2号来福士A座601
邮政编码：400011
电话：(023)6380-6057 传真：(023)6380-6551

武汉
武汉市武昌区临江大道96号武汉万达中心31层3112室
邮政编码：430060
电话：(027) 5908-0488 传真：(027) 5908-0470

广州
广州市天河区高唐路230号广电智慧大厦
邮政编码：510656
电话：(020) 3718-3888 传真：(020) 3718-3804

昆明
昆明市青年路432号天恒大酒店 908室
邮政编码：650021
电话：(0871)6315-2986/2987 传真：(0871)6315-2991

深圳
深圳市南山区粤海街道高新南七道18号高新技术产业园区R3-B座一楼
邮政编码：518057
电话：(0755)8340-2852 传真：(0755)8389-3100

长沙
湖南省长沙市芙蓉区解放西路188号国金中心T1大楼3115室
邮政编码：410005

香港
香港九龙尖沙咀海洋中心1028室
SUITE 1028,OCEAN CENTRE,HARBOUR CITY,
TSIM SHA TSUI,KOWLOON,HONG KONG
电话：(00852)2375-4979 传真：(00852)2199-7438