

团体标准

T/CSTM 00832—2023

金属材料 超高周疲劳 超声疲劳试验方法

Metallic materials—Very high cycle fatigue—Ultrasonic fatigue test method

2023-12-22 发布

2024-03-22 实施

中关村材料试验技术联盟

发布

目 次

前言.....II

引言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语和定义.....1

4 符号和说明.....1

5 原理.....2

6 试样.....3

7 试验装置.....6

8 试验步骤.....7

9 试验报告.....8

附录 A（资料性）超声疲劳试样的设计.....10

附录 B（资料性）不同形状超声疲劳试样的应力控制方法.....14

附录 C（资料性）超声疲劳试样损伤演化原位三维成像.....16

附录 D（资料性）起草单位和主要起草人.....17

参考文献.....17

前 言

本文件参照 GB/T 1.1—2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》，GB/T 20001.4 《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国材料与试验标准化委员会钢铁材料标准化领域委员会（CSTM/FC01）提出。

本文件由中国材料与试验标准化委员会钢铁材料标准化领域委员会（CSTM/FC01）归口。

引 言

随着工业技术的发展，一些工程中的部件，例如发动机部件、汽车承载部件、铁路轮轴和轨道、飞机、桥梁和特殊医疗设备等，承受高频低应力幅循环载荷，实际服役寿命都超过了 10^7 周次，甚至高达 10^9 周次。近年来，超高周次承载部件越来越多，材料超高周疲劳测试需求与日俱增，超声疲劳是完成超高周疲劳的有效手段。相比高周疲劳，超声疲劳由于试验频率大幅增加，试样尺寸设计、应力控制等都和高周疲劳不同，已不适宜采用高周疲劳试验标准。

本文件规定了金属材料超高周疲劳超声疲劳试验方法，适用于超声频率下的超高周次（例如 10^8 或 10^9 周次）疲劳试验。超声疲劳试验因其超高工作频率而具备以下特点：

1. 加速疲劳试验，大幅缩短疲劳试验周期。
2. 可以对承受高频低载的零部件/结构金属材料进行超高周次（例如 10^8 周次， 10^9 周次甚至 10^{10} 周次）疲劳试验。

金属材料 超高周疲劳 超声疲劳试验方法

1 范围

本文件规定了金属材料超高周疲劳超声疲劳试验方法的术语和定义、原理、试样、试验装置、试验步骤等内容。

本文件适用于金属材料圆形或矩形横截面试样，试验频率在 $2.00 \times 10^4 \text{ Hz} \pm 500 \text{ Hz}$ ，单端轴向受激振动，应力比 $R=-1$ 的超高周疲劳试验。本文件不包含缺口试样，但本文件中描述的疲劳试验过程可应用于缺口试样的超高周疲劳试验，也可应用于其他应力比或其他超声谐振频率的超高周疲劳试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法
- GB/T 17851 产品几何技术规范 几何公差 基准和基准体系
- GB/T 38897 无损检测 弹性模量和泊松比的超声测量方法

3 术语和定义

GB/T 3075界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超高周疲劳 **very high cycle fatigue**
循环周次大于 10^7 周次的疲劳。

3.2

超声疲劳试验 **ultrasonic fatigue test**
在超声谐振频率下施加循环应力的疲劳试验。

3.3

超声疲劳试样 **ultrasonic fatigue specimen**
满足超声频率谐振要求的疲劳试样。

4 符号和说明

表 1 中与试样尺寸及试验相关的符号及说明适用于本文件。

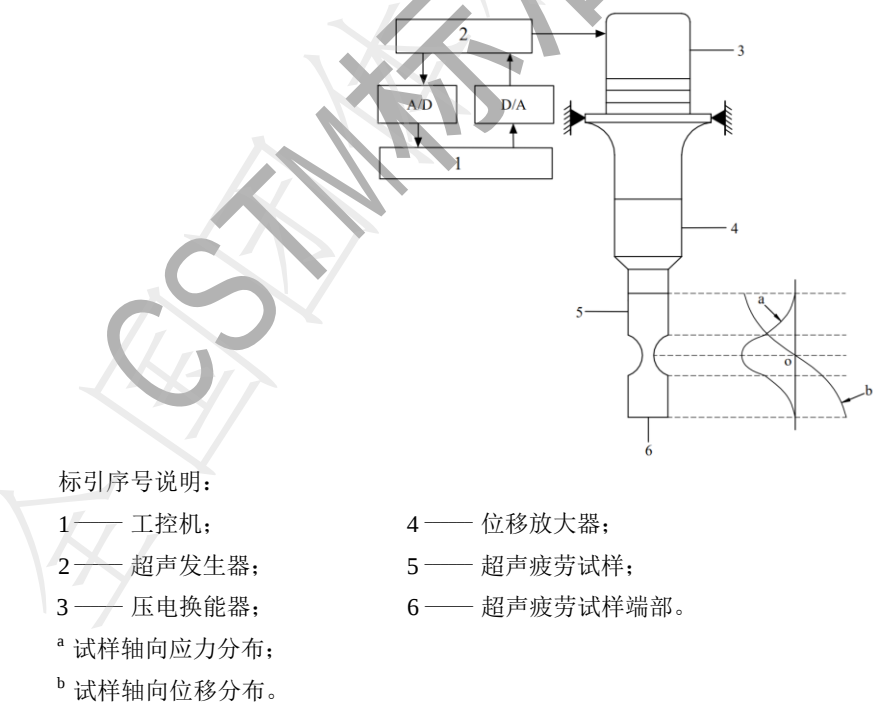
表 1 与试样尺寸及试验相关的符号及说明

符号	说明	单位
b_0	板状试样最小宽度（不含平行段）或平行段宽度	mm
b_1	板状试样端部的宽度	mm
c	谐振波在材料中的传播速度， $c=(E_d/\rho)^{1/2}$	km/s
D_0	圆形试样最小直径（不含平行段）或平行段直径	mm

D_1	圆形试样端部直径	mm
E_d	动态弹性模量，测量方法参见 GB/T 38897	GPa
f	谐振频率	Hz
L_b	试样的变截面段长度，试样具有不同测试直径或宽度的长度	mm
L_d	试样的端部长度	mm
L_p	试样的平行段长度，试样具有相同测试直径或宽度的长度	mm
L_z	试样有效长度	mm
l_b	试样变截面段长度的一半， $l_b=L_b/2$	mm
l_d	试样端部长度的一半， $l_d=L_d/2$	mm
l_p	试样平行段长度的一半， $l_p=L_p/2$	mm
l_z	试样有效长度的一半， $l_z=L_z/2$	mm
r	试样的过渡弧半径	mm
t	板状试样的厚度	mm
U_0	试样端部振动位移幅值	μm
σ_a	试样中间截面应力幅值	MPa
ρ	密度	g/cm^3
ω	角频率， $\omega=2\pi f$	Hz

5 原理

超声疲劳试验采用超声发生器产生 $2.0\times 10^4\text{ Hz}$ 的电信号，压电陶瓷换能器将电信号转换成相同频率的机械振动，经位移放大器放大后传递至试样，在试样中产生谐振波，使试样获得频率为 $2.0\times 10^4\text{ Hz}$ 按正弦波变化的轴向位移和应力，见图 1。



标引序号说明：

- 1 —— 工控机；

2 —— 超声发生器；

3 —— 压电换能器；

^a 试样轴向应力分布；

^b 试样轴向位移分布。
- 4 —— 位移放大器；

5 —— 超声疲劳试样；

6 —— 超声疲劳试样端部。

图 1 超声疲劳试验原理示意图

6 试样

6.1 试样尺寸设计

6.1.1 试样尺寸的理论设计

超声疲劳试验常用的试样类型有沙漏形、狗骨形和板状。设计超声疲劳试样尺寸时，尺寸组合需满足试验系统谐振频率为 2.0×10^4 Hz的谐振条件，否则试样将不能起振，试验无法进行。设计试样尺寸之前宜先根据GB/T 38897来确定材料的动态弹性模量，再根据材料的密度和不同形状试样的几何尺寸理论公式来计算满足试验谐振频率的端部长度值，见附录A。

为了保证设计的超声疲劳试样能起振，测得的动态弹性模量的准确度宜不超过1%量级。

在进行高温超声疲劳试验时，用对应温度下的动态弹性模量值和密度值来设计试样尺寸。

6.1.2 试样尺寸的有限元方法设计

除了利用理论公式设计试样尺寸，还可以采用有限元方法。根据试样的几何形状和尺寸建立有限元网格模型，通过调整试样尺寸进行模态计算，直至计算得到的试样谐振频率在 1.98×10^4 Hz~ 2.02×10^4 Hz范围内，计算流程如图2所示。

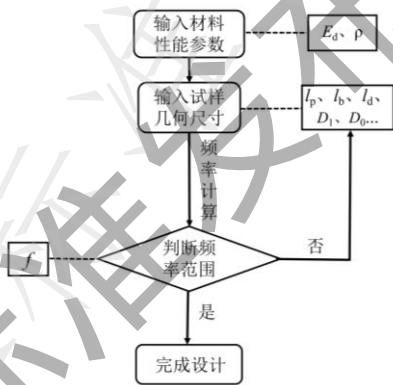
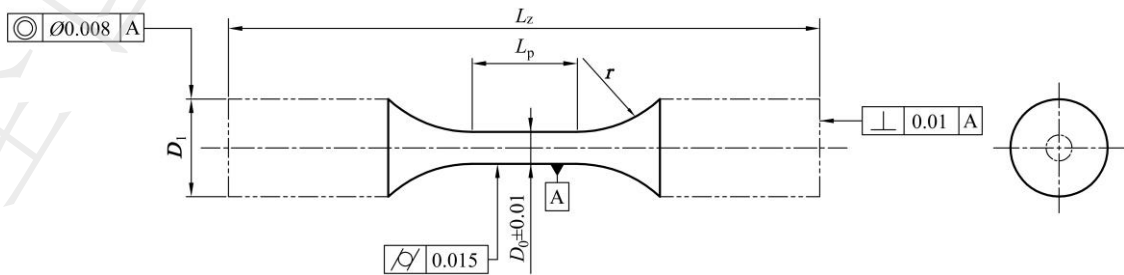


图2 基于有限元方法的超声疲劳试样设计

6.2 试样的形状和尺寸

6.2.1 狗骨形试样

狗骨形试样为中间含光滑平行段的圆形截面试样，如图3所示。狗骨形试样有一段等截面工作段，适用于含明显缺陷（如夹杂、缩孔）的金属材料，此外，还可应用于表面处理工艺对疲劳性能的影响研究。



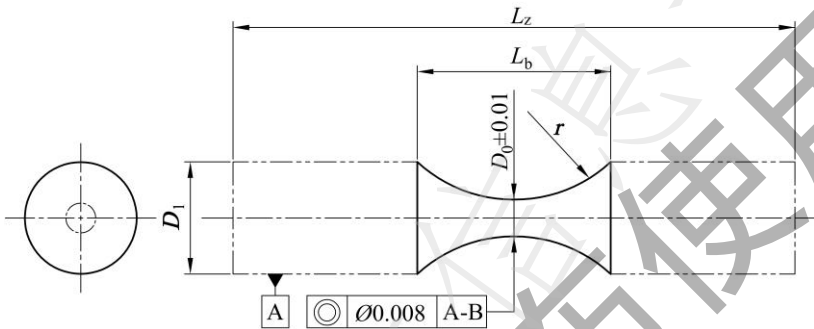
注1：尺寸公差符号的定义见GB/T 17851。
注2：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图3 狗骨形试样

6.2.2 沙漏形试样

沙漏形试样端部与其最小直径有一个连续的圆弧，如图4所示。一般而言，在相同端部位移条件下，沙漏形试样工作段能获得更大的应力幅值，因此，对于超高强钢（一般高于1600 MPa）或者其他高强度合金，一般采用沙漏形试样。

狗骨形试样在等截面区域近似承受等应力，而沙漏形试样在最小横截面附近的小体积区域受力。因此，沙漏形试样产生的疲劳结果可能不代表大块材料的响应^[1]，特别是在超高周疲劳状态下，夹杂物控制高硬度金属的行为，并且裂纹萌生从试样表面转到内部或次表面^[2]。由于沙漏形试样最大应力体积区域相对较小，其最大的微观不连续可能不在最大应力的平面截面上，得到的结果可能是非保守的^[3-4]。



注1：尺寸公差符号的定义见GB/T 17851。
注2：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图4 沙漏形试样

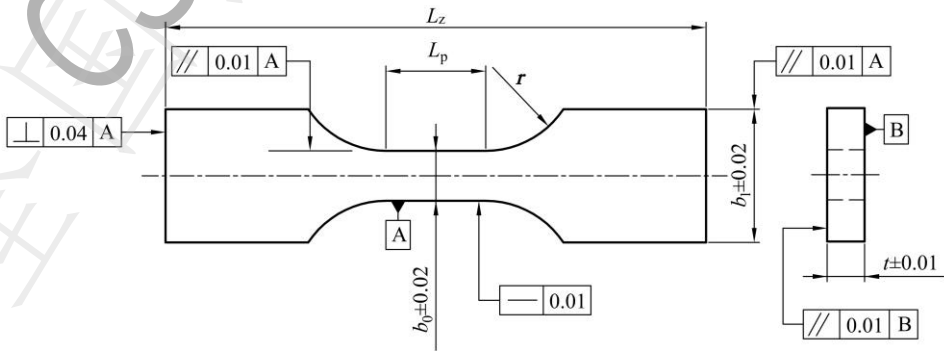
狗骨形试验和沙漏形试样统称圆形试样，推荐圆形试样的几何尺寸如表 2 所示。

表 2 圆形试样的尺寸

参数	尺寸
试样端部直径	$6\text{mm} \leq D_1 \leq 12\text{mm}$
试样小直径（不含平行段）或平行段直径	$2\text{mm} \leq D_0 \leq 5\text{mm}$
过渡弧半径	$r \geq D_0$
平行段长度	$L_p \geq 2D_0$

6.2.3 板状试样

板状试样如图 5 所示。坯料厚度为 2.5 mm~6 mm 时，可使用板状试样。对于厚度小于 2.5 mm 的板状试样，需要特定的夹具或方法^[5-6]，以保证试样和位移放大器之间的连接。



注1：尺寸公差符号的定义见GB/T 17851。
注2：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图 5 板状试样

6.2.4 S-N 曲线试样要求

完成 S-N 曲线试验所用的同一批试样应具有相同的形状、尺寸和表面状态。

6.2.5 试样尺寸和发热控制

在设计狗骨形试样和板状试样尺寸时，等截面段越长，则要达到相同应力幅值所需要的位移振幅越大，试样越容易发热。反之，等截面段越短，则要达到相同应力幅值所需要的位移振幅越小，有利于抑制试样发热。在设计狗骨形试样和板状试样尺寸时，可根据这一特性权衡考虑。

6.3 试样的制备

6.3.1 总则

在表征材料固有特性的疲劳试验程序中，试样的制备应遵循以下规则。

注：如果试验目的是为了确定与这些不符合的规定因素（如表面处理、氧化等）的影响，允许有一些偏离。任何情况下，这些偏离应在试验报告中注明。

6.3.2 取样和试样标识

取样时应了解取样部位的全部信息，并在试验报告中附上取样图，并宜清晰地标明：

- 每件试样的取样位置；
- 样坯的特征方向（轧制，挤压以及其他方向）；
- 每件试样的标识符。

试验前，应标记试样。标识符可以标记在不影响试验结果的表面上（例如试样的端部）。

6.3.3 试样加工程序

6.3.3.1 选择的加工程序可能会在试样表面产生残余应力，从而影响试验结果。这些残余应力可能是在机加工阶段的热梯度或材料的变形或微观结构的变化引起的。宜选择合适的机加工流程（特别是在最后的抛光阶段前）以减小残余应力。对于较硬材料，首选磨削，而不是车削或者铣削加工。

- 磨削：从离最终直径的 0.1 mm 开始，进刀量不超过 0.005 mm/次；
- 抛光：用逐次变细的砂纸处理掉最后的 0.025 mm。建议最后的抛光沿着试样的轴向；

6.3.3.2 材料微观结构的改变可能是由于温度升高和机加工中的应变硬化所导致，可以是组织中相的改变，更多的情况是样品表面发生再结晶。由于试验的材料不再是初始状态，上述微观结构改变将直接导致试验结果无效。因此，宜采取一切预防措施以避免这种风险。

6.3.3.3 部分元素和化合物会使特定材料的力学性能下降，例如氯和氢对钢和钛合金的影响。因此，在使用的原料（切削液、清洁液如醇、酸性化合物等）中宜避免包含这些元素。建议在存储试样前进行清洗和脱脂处理。

6.3.4 试样的表面状态

6.3.4.1 试样的表面状态对试验结果有影响。这类影响一般都和以下一个或者多个因素相关：

- 试样的表面粗糙度；
- 残余应力的存在；
- 材料微观结构改变；
- 杂质的引入。

6.3.4.2 为减少试样的表面状态对试验结果的影响，应按下列要求进行：

- 超声疲劳试样工作段表面粗糙度宜不大于 $R_a 0.2 \mu\text{m}$ ，其他位置表面粗糙度宜不大于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ ；

- 试样精加工后，宜采用酒精或丙酮溶液进行清洗、妥善保存，防止试样表面损伤或者腐蚀；
- 圆形试样的最后工序宜消除在车削工序中产生的圆周方向上划痕。特别建议在磨削之后进行纵向的抛光，抛光后再进行低倍（大约20倍）检查，试样工作段内不应有圆周方向的划痕。

6.3.4.3 如果试样在粗加工后要进行热处理，宜在热处理后进行最终的抛光处理。否则热处理宜在真空或惰性气体中进行，以防试样氧化。热处理不应改变所研究材料的微观结构特性。热处理条件和加工程序应在试验报告中记录。

6.3.5 尺寸检查

宜在最终机加工阶段用不改变试样表面状态的测量方法完成尺寸的测量，保证超声疲劳试样加工尺寸与设计尺寸一致。

6.3.6 试样的保存

制备好的试样宜妥善保存以避免任何损伤（接触划痕，氧化等）。推荐采用独立的包装盒或带封头的管保存试样。在某些情况下，应在真空容器或放有干燥剂的干燥器皿中保存试样。

7 试验装置

7.1 试样端部振动位移测量和校核

7.1.1 超声疲劳试验机通过控制试样端部位移幅值来实现对试样应力幅值的控制，因此，试验机的位移系统应当定期校核，以保证试样端面振动位移的准确性。推荐采用激光位移传感器来对试样的端面振动位移进行实时连续采集和监测，如图 6 所示，确认测得的位移幅值和理论值一致。

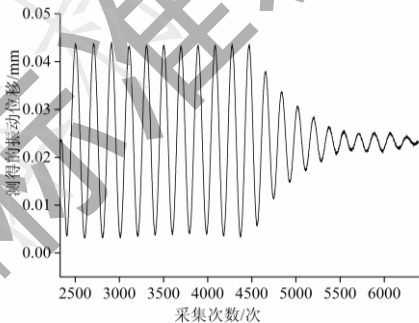
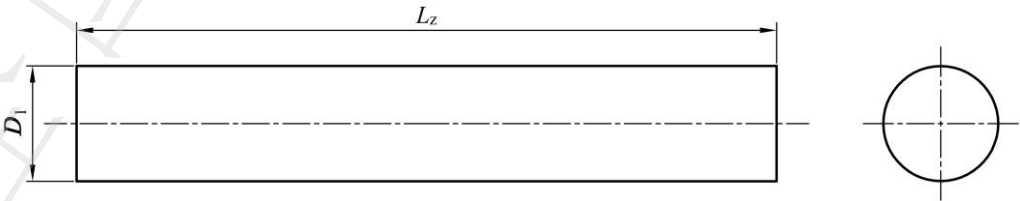


图 6 激光位移传感器采集到的试样端面振动位移

7.1.2 在进行端面位移标定时，推荐采用如图 7 所示的等截面圆柱试样。

注：满足等截面圆柱试样谐振频率的试样长度与其直径无关，仅与材料的动态弹性模量和密度相关，且等截面圆柱试样形状简单，加工尺寸精度易于控制。



注1：尺寸公差符号的定义见GB/T 17851。
注2：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图 7 等截面圆柱试样

7.2 动态应变测量和应力校核

7.2.1 概述

超声疲劳试样的尺寸、材料动态弹性模量、密度、系统谐振频率、端部振动位移等参数的实际值可能与设计值或者理论值存在偏差,例如试样的实际尺寸因为加工的原因,可能与设计尺寸存在偏差。不同参数的偏差累积在一起,即便试样振动位移准确,也会导致超声疲劳试样的实际应力幅值与预设的应力幅值产生偏差。这种情况下,对超声疲劳试样振动位移进行校核后,需要直接对超声疲劳试样的应力或应变进行测量和校核,来保证超声疲劳试验的准确性。

7.2.2 动态应变测量

对狗骨形和板状试样,可以在试样工作段粘贴应变片,通过高速动态应变仪来测量其动态应变,也可以采用高速 DIC (数字图像相关法, Digital Image Correlation) 系统来测量其动态应变。

沙漏形试样尺寸较小,且其工作段表面不平直,应力分布梯度较大,难以通过粘贴应变片的方法准确地得到其动态应变,因此,宜选择 DIC 方法,利用高速相机拍照和图片对比分析得到其超声疲劳动态应变幅值^[7]。

7.2.3 应力校核

超声疲劳试样的应力和应变通常很小,属于弹性变形区间。一般地,测得试样的应变幅值后,可以由胡克定律和材料的动态弹性模量计算得到对应的应力幅值。然后,将计算得到的应力幅值与预设应力幅值进行对比,判断二者是否一致。如果不一致,应按照两者的线性比值对试样的预设应力幅值进行校核。

7.3 试样的装夹

7.3.1 试样与位移放大器通过螺纹相连接,试样的中心线应与位移放大器轴线一致,试样的螺纹宜与位移放大器的内螺纹尺寸精确匹配,保证试样装夹牢固,在高速振动过程中不会脱落。

7.3.2 推荐试样使用外螺纹,对于某些特别脆的材料,试样宜使用内螺纹。特别脆的材料有可能在外螺纹起裂,内螺纹不适用于板状试样。

7.3.3 安装试样时不应使试样引入额外的应力,例如弯折、锤击等动作,也不应划伤试样表面。

7.3.4 试验装置的施力轴线应与试样中心线一致,试验装置的同轴度应符合 GB/T 3075 的规定。

8 试验步骤

8.1 试验的准备

试验前首先明确以下内容:

- a) 试样材料牌号、测试环境温度、动态弹性模量、密度等基本信息;
- b) 选择试样形状,并设计合适的试样尺寸;
- c) 试验时每个试样的预设应力幅值。

8.2 试样的应力施加

8.2.1 对于系统控制软件中已有的试样类型,可以在控制软件中直接输入所需施加的应力幅值。试验系统根据输入的应力幅值、材料动态弹性模量、密度和试样几何尺寸计算得到所需施加的位移幅值。

8.2.2 如果系统控制软件中的试样类型有限,例如仅有沙漏形试样,可以将其他形状试样的应力幅值转换成沙漏形试样的应力幅值,利用控制软件中已有的试样类型来实现狗骨形、板状等其他形状试样的应力幅控制。不同形状试样的应力幅转换方法见附录 B。

8.3 试样温度控制

8.3.1 试样的温度可使用接触试样表面的热电偶或者不接触试样表面的红外测量仪进行测量。

8.3.2 整个试验期间，测温装置在循环内任何给定时刻显示的温度不应超过当前室温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果试验过程中发生超出温度范围情况，例如在室温下试样表面出现发黑或发蓝，推荐采用下列 3 种方法控制试样的温度升高，温升情况和控制方法应在试验报告中注明。如果下列 3 种方法均无法控制试样的发热，则需停止试验。

- 在相同应力幅条件下，试样的位移幅值越小，发热量相应的也越小。可以通过改变试样的尺寸或形状来减小试样的位移振幅，从而减小试样的温升；
- 采用压缩冷却空气喷吹试样的中间发热部位，降低试样的温度到合理范围；
- 设计间歇加载，如图 8 所示，让试样振动一段时间后间歇一段时间来散热。对同一组试样，需采用相同的间歇条件。间歇条件确定以后，对正在进行试验的试样，试验由开始到终止，不能改变间歇条件。

间歇时长不参与循环周次计数。间歇加载有可能导致疲劳寿命变长。

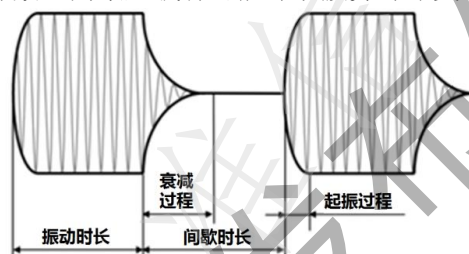


图 8 间歇加载示意图

8.4 试验终止

8.4.1 试样出现裂纹或损伤后，试样的工作频率会降低，当频率下降幅值超过 500 Hz 时，试验会自动停止，如果试样表面存在目视可见的大面积灼烧变色，则试验结果无效，应调整冷却方式重新试验。

8.4.2 试样的循环周次达到指定的循环周次（例如 10^8 或 10^9 ）时，无论试样是否破坏，应终止试验。

8.5 试验记录

8.5.1 在试验终止后，应记录该试样的相关试验信息，如试样标识符、试验频率、施加的最大应力、应力比、应力幅值、冷却方式（例如间歇加载条件）和试样端部振动位移幅值等内容。

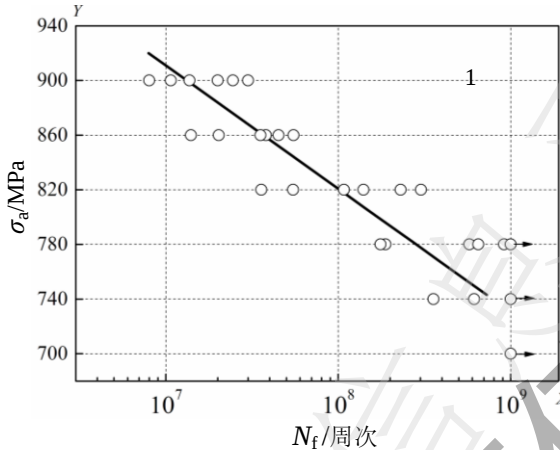
8.5.2 超高周疲劳更加倾向于从试样内部起裂。为了研究材料的超高周疲劳内部裂纹萌生和扩展机理，可以对试样的损伤演化过程进行监测，见附录 C。

9 试验报告

试验报告应至少包括以下内容：

- 本文件编号；
- 材料的牌号、规格、热处理工艺及动态弹性模量、密度和抗拉屈服强度等；
- 试样取样部位、几何形状、尺寸和表面状态；
- 试验机型号；
- 冷却方式（例如，风冷、间歇条件等）；
- 每个试样的标识符、施加的应力幅值、应力比、试样端部位移幅值、试验频率、断裂情况和疲劳寿命；试验结果可以图或表格的形式表示，如图 9 所示。

- g) 试验温度，如对试样加热（例如大于 35℃）；
- h) 试验结束的判据，试样失效、试样持续循环周次（例如， 10^8 周次、 10^9 周次或 10^{10} 周次）或其他判据；
- i) 试验过程中任何对本标准的偏差或其他情况。



标引符号说明：
1—— $R=-1$ ，室温。
→——试样在指定周次下未断。

图 9 超高周疲劳 S-N 曲线示意图

附 录 A
(资料性)
超声疲劳试样的设计

A.1 超声疲劳试样的理论公式设计

A.1.1 超声疲劳试样的设计宜满足试验系统谐振条件。根据连续系统振动理论, 结合试样横截面方程、边界条件和连续性条件, 可以得到等截面圆柱试样、沙漏形试样、狗骨形试样和板状试样的尺寸设计公式^[4,8]以及试样工作段应力幅值和端部位移幅值之间的关系式。

A.1.2 对于图 A.1 所示的等截面圆柱试样, 满足超声谐振频率的长度 L_z 解析解见公式(A.1):

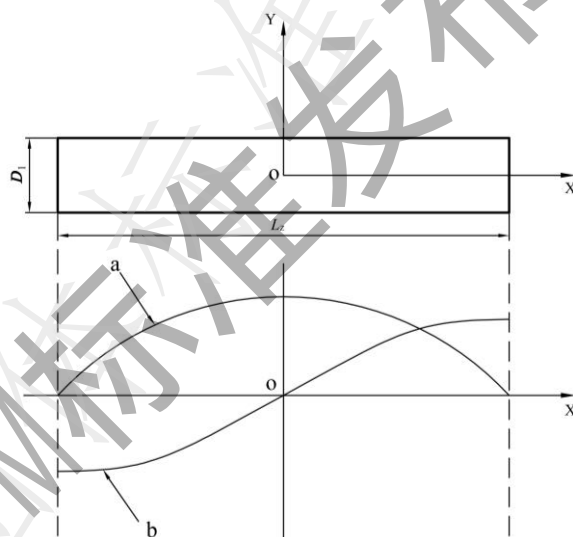
$$L_z = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

A.1.3 等截面圆柱试样最大应力在试样中间截面 ($x=0$) 处, 如图 A.1 所示。中间截面应力幅与端部位移幅之间的关系见公式(A.2):

$$\sigma_a = E_d k U_0 \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$$k = \frac{\omega}{c}。$$



标引符号说明:

^a 应力分布;

^b 位移分布。

图 A.1 等截面圆柱试样

A.1.4 图 A.2 所示为沙漏形试样, 满足超声谐振频率的沙漏形试样端部长度 l_d 见公式(A.3):

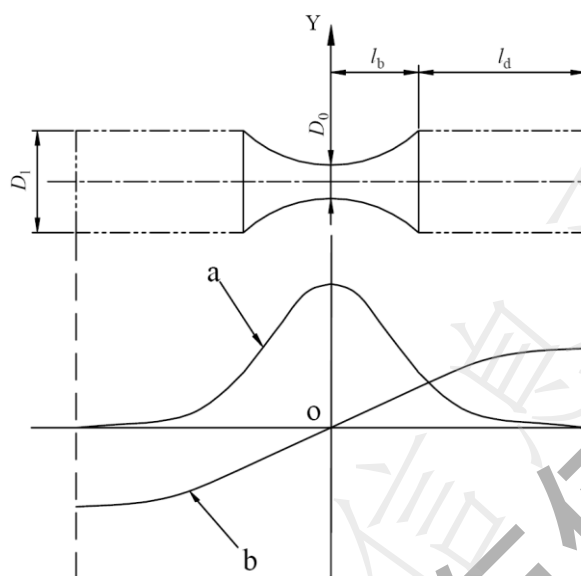
$$l_d = \frac{1}{k} \arctan \left\{ \frac{1}{k} \left[\frac{\beta}{\tanh(\beta l_b)} - \alpha \tanh(\alpha l_b) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2}, \quad \alpha = \frac{1}{l_b} \operatorname{arccosh}\left(\frac{D_1}{D_0}\right), \quad k = \frac{\omega}{c}。$$

A.1.5 沙漏形试样中间截面处的应力幅与端部位移幅的关系式见公式(A.4):

$$\sigma_a = E_d \frac{\partial U(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta E_d U_0 \varphi(l_b, l_d), \quad \varphi(l_b, l_d) = \frac{\cos(kl_d) \cosh(\alpha l_b)}{\sinh(\beta l_b)} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$



标引符号说明：

^a 应力分布；

^b 位移分布。

图 A.2 沙漏形试样

A.1.6 图 A.3 所示为狗骨形试样，满足超声谐振频率的狗骨形试样端部长度 l_d 的解析解见公式(A.5)：

$$l_d = \frac{1}{k} \arctan \left[\frac{1 + \frac{\beta_d}{k} \tan(kl_p) \tanh(\beta_d l_b)}{\tan(kl_p) + \frac{k}{\beta_d} \tanh(\beta_d l_b)} - \frac{\alpha}{k} \tanh(\alpha l_b) \right] \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

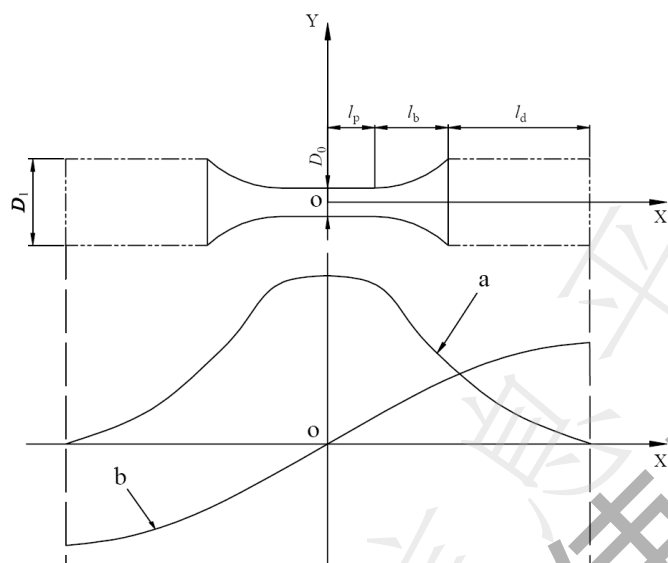
$$\alpha = \frac{1}{l_b} \operatorname{arccosh}\left(\frac{D_1}{D_0}\right), \quad \beta_d = \sqrt{\alpha^2 - k^2}, \quad k = \frac{\omega}{c}。$$

A.1.7 狗骨形试样中间截面处应力幅与端部位移幅的关系式见公式(A.6)：

$$\sigma_a = E_d \beta_d k \varphi(l_p, l_b, l_d) \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

$$\varphi(l_p, l_b, l_d) = \frac{\cos(kl_d) \cosh(\alpha l_b)}{\beta_d \sin(kl_p) \cosh(\beta_d l_b) + k \cos(kl_p) \sinh(\beta_d l_b)}。$$



标引符号说明：
a 应力分布；
b 位移分布。

图 A.3 狗骨形试样

A.1.8 当坯料厚度小于 6 mm 时，可使用板状试样，如图 A.4 所示。

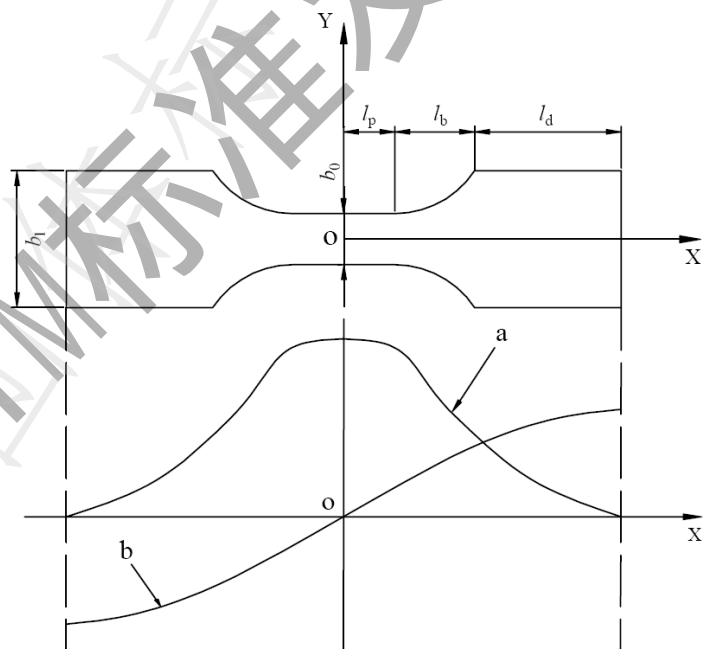


图 A.4 板状试样

标引符号说明：
a 应力分布；
b 位移分布。

A.1.9 对于图 A.4 所示的板状试样，满足超声谐振频率的板状试样端部长度 l_d 的解析解见公式(A.7)：

$$l_d = \frac{1}{k} \arctan \left\{ \frac{\cos(kl_p) [\beta_p \cosh(\beta_p l_b) - \alpha_p \sinh(\beta_p l_b)] - k \sin(kl_p) \sinh(\beta_p l_b)}{[\alpha_p \sin(kl_p) + k \cos(kl_p)] \sinh(\beta_p l_b) + \beta_p \sin(kl_p) \cosh(\beta_p l_b)} \right\} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

$$\alpha_p = \frac{1}{2l_b} \ln \left(\frac{b_1}{b_0} \right), \quad \beta_p = \sqrt{\alpha_p^2 - k^2}, \quad k = \frac{\omega}{c}$$

注：式中的板状试样 α 表达式和沙漏形、狗骨形试样不同，标识为 α_p 以示区别。

A.1.10 板状试样工作段应力幅与端部位移幅之间的关系见公式(A.8):

$$\sigma_a = E_d \beta_n \varphi_n(l_n, l_b, l_d) k U_0 \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

$$\varphi_p(l_p, l_b, l_d) = \frac{\cos(kl_d) \exp(\alpha_p l_b)}{[\alpha_p \sin(kl_p) + k \cos(kl_p)] \sinh(\beta_p l_b) + \beta_p \sin(kl_p) \cosh(\beta_p l_b)}$$

A.2 试样设计示例

A.2.1 根据公式(A.3)和公式(A.5)设计得到 GCr15 轴承钢(动态弹性模量:215 GPa,密度 7.813 g/cm³)沙漏形和狗骨形超声疲劳试样尺寸如图 A.5 所示。

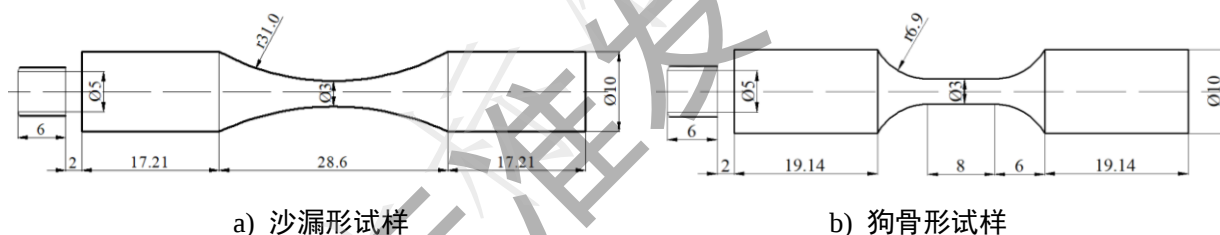


图 A.5 沙漏形和狗骨形超声疲劳试样尺寸

A.2.2 根据公式(A.3)和公式(A.5)设计得到 TC17 钛合金(动态弹性模量:119 GPa, 密度 4.659 g/cm³)沙漏形和狗骨形超声疲劳试样尺寸如图 A.6 所示。

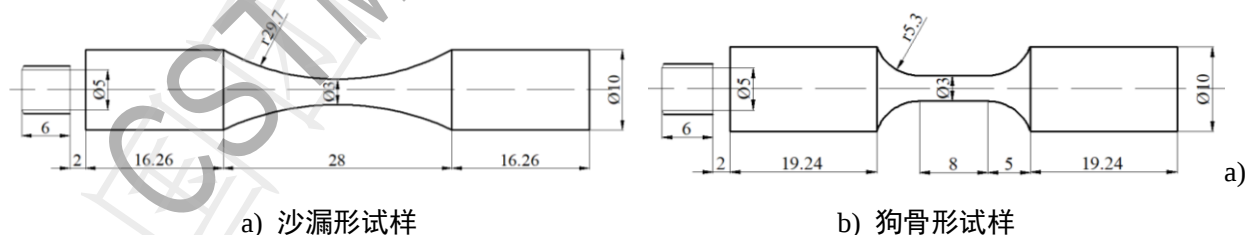


图 A.6 沙漏形和狗骨形超声疲劳试样尺寸

附录 B

(资料性)

不同形状超声疲劳试样的应力控制方法

B.1 如果系统控制软件试样类型有限,例如仅有沙漏形试样,可以将其他形状试样的应力幅值转换成沙漏形试样的应力幅值,利用控制软件上已有的试样类型来实现狗骨形、板状等其他形状试样的应力控制。

B.2 超声疲劳试验通过控制试样端部位移幅值,来实现控制试样应力幅值。因此,对预设应力幅值 σ_a 的试样,首先要确定其端部位移幅值 U_0 。通过附录 A 中公式(A.2)、公式(A.4)、公式(A.6)和公式(A.8)可以由预设应力幅值 σ_a 求得对应的 U_0 。

B.3 以狗骨形试样为例,根据附录 A 中的设计公式(A.5),设计其尺寸为 l_p , l_b , l_d , D_0 , D_1 , 预设狗骨形试样的应力幅值为 σ_a , 由公式(A.6)可以求得对应的位移幅值 U_0 见公式(B.1):

$$U_0 = \frac{\sigma_a}{E_d \beta_d k \varphi(l_p, l_b, l_d)} \quad \text{.....} \quad (\text{B.1})$$

B.4 图 A.2 所示的沙漏形试样,根据附录 A 中的设计公式(A.3),设计其尺寸为 D_1^0 , D_0^0 , l_b^0 , l_d^0 。由公式(A.4)和公式(B.1)可以求得沙漏形试样在与狗骨形试样相同的位移振幅 U_0 下对应的应力幅值 σ_a^0 , 见公式(B.2):

$$\sigma_a^0 = \beta \varphi(l_b^0, l_d^0) \frac{\sigma_a}{\beta_d \varphi(l_p, l_b, l_d) k} \quad \text{.....} \quad (\text{B.2})$$

式中:

σ_a ——狗骨形试样的应力幅值;

σ_a^0 ——相同位移幅值下对应的沙漏形试样应力幅值;

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad \alpha = \frac{1}{l_b^0} \operatorname{arccosh}\left(\frac{D_1^0}{D_0^0}\right), \quad \beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2}, \quad \varphi(l_b^0, l_d^0) = \frac{\cos(k l_d^0) \cosh(\alpha l_b^0)}{\sinh(\beta l_b^0)};$$

$$\alpha_d = \frac{1}{l_b} \operatorname{arccosh}\left(\frac{D_1}{D_0}\right), \quad \beta_d = \sqrt{\alpha_d^2 - k^2}, \quad \varphi(l_p, l_b, l_d) = \frac{\cos(k l_d) \cosh(\alpha_d l_b)}{\beta_d \sin(k l_p) \cosh(\beta_d l_b) + k \cos(k l_p) \sinh(\beta_d l_b)}。$$

B.5 对设计试样尺寸为 l_p , l_b , l_d , D_0 , D_1 的狗骨形试样,由公式(B.2)将狗骨形试样的应力幅值 σ_a 转换成相同位移幅值下,试样尺寸为 D_1^0 , D_0^0 , l_b^0 , l_d^0 的沙漏形试样所对应的应力幅值 σ_a^0 , 即可实现狗骨形试样的应力控制,狗骨形试样与沙漏形试样之间的应力转换如图 B.1 所示。相同地,板状试样和沙漏形试样之间的应力转换公式见公式(B.3):

$$\sigma_a^0 = \beta \varphi_0(l_b^0, l_d^0) \frac{\sigma_a}{\beta_p \varphi_p(l_p, l_b, l_d) k} \quad \text{.....} \quad (\text{B.3})$$

式中:

σ_a ——为板状试样的应力幅值;

σ_a^0 ——为相同位移幅值下沙漏形试样应力幅值。

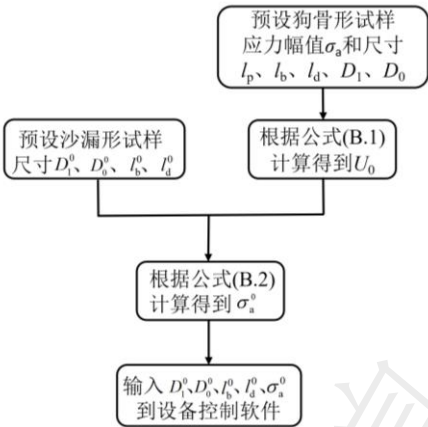


图 B.1 狗骨形试样和沙漏形试样之间的应力转换

B.6 根据 A.5、A.7 试样尺寸设计公式和 B.2、B.3 应力转换公式，可以编制不同形状试样尺寸设计及应力转换窗口小程序，将计算过程在窗口中完成，如图 B.2 所示。

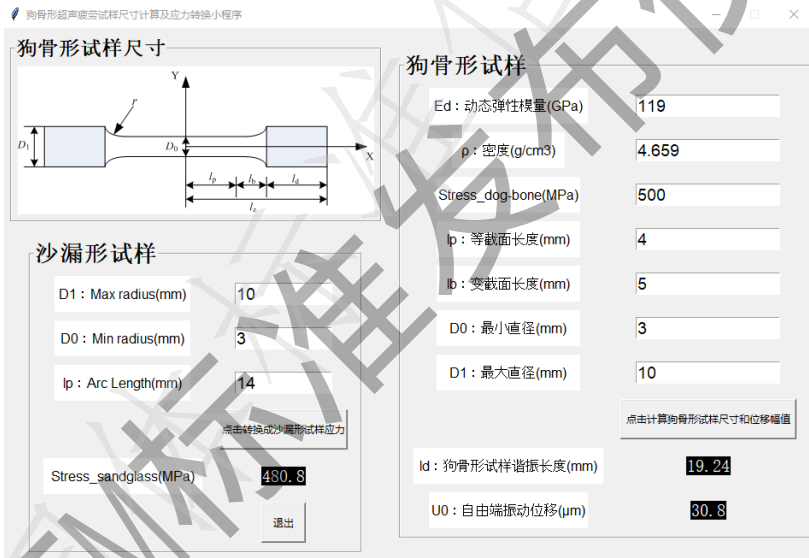


图 B.2 狗骨形试样尺寸设计及应力转换窗口小程序

附录 C
(资料性)

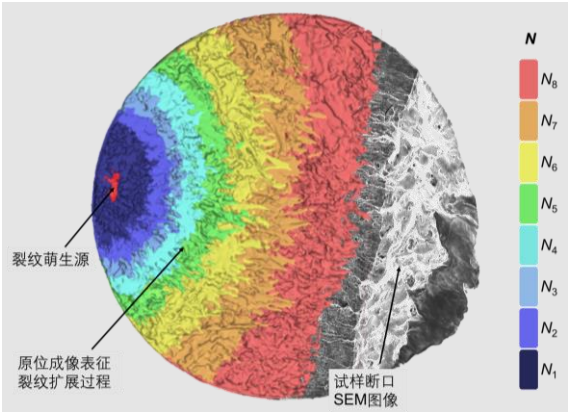
超声疲劳试样损伤演化原位三维成像

C.1 与低、高周疲劳不同，超高周疲劳更倾向于从试样次表面或者内部起裂。可以将超声疲劳试验机与先进光源（实验室光源、同步辐射光源等）原位成像系统相结合，借助基于 X 射线三维成像的原位超声疲劳试验机对超声疲劳试样内部的损伤演化进行原位监测和三维表征^[9-10]。

C.2 在进行超声疲劳试验时，结合实时的 X 射线成像结果，通过控制软件控制超声疲劳加载的启动与停止，对不同损伤状态下的试样结构进行高精度三维成像，捕捉多阶段裂纹扩展过程。在进行原位超声疲劳试验时，需要遵循以下原则：

- a) 首先根据 X 射线三维成像参数及试样的材料成分确定最佳试样尺寸（试样推荐采用附录 A 中图 A.2 所示的沙漏型试样或图 A.4 狗骨形试样；试样尺寸由材料成分、X 射线能量及所需成像精度共同决定，在特定成像参数下，材料的密度越大，X 射线穿透率越低，则试样尺寸越小）；
- b) 根据离线的超高周 S-N 曲线，确定原位超声疲劳加载参数（如加载应力水平、应力比等）；
- c) 根据离线的超高周 S-N 曲线，获取试样在上述加载条件下的疲劳寿命分布；
- d) 根据在相应加载条件下的疲劳寿命分布数据，确定 X 射线成像的时间间隔规划；
- e) 对未加载试样进行三维成像，以获取试样内部微结构初始状态；
- f) 开展原位超声疲劳测试，以捕捉微裂纹萌生为目标，根据间隔成像的时间规划及 X 射线实时二维投影图像进行损伤演化原位三维成像试验；
- g) 在开展 X 射线三维成像时需要停止超声疲劳测试，并采用试验机拉伸系统对试样进行拉伸加载（静载应力水平一般对应于超声疲劳加载峰值应力的 80%-90%），以保证试样内部出现损伤时，微裂纹处于张开状态，从而使得三维成像能够准确捕捉试样内部的微裂纹萌生和损伤状态；
- h) 在观察到初始裂纹萌生后，间隔成像时间需要进一步优化（通常需要在保证试样超声加载频率控制精度的情况下，尽量缩短超声加载时间，减少循环加载周次），进而保证可以在裂纹扩展直至失效过程中捕捉更全面的损伤演化过程信息。

C.3 原位成像试验完成后，需要采用三维可视化软件对同步辐射成像数据进行进一步重构和量化分析，准确提取试样在初始态、损伤状态及断裂状态时的内部微结构信息（如初始态试样内部的缺陷分布，试样在不同寿命阶段的裂纹尺寸、形貌等），获得试样在经历不同循环周次时试样内部损伤状态的量化表征结果。原位同步辐射成像表征结果如图 C.1 所示。



标引符号说明：

N_i ——第 i 次原位成像时裂纹所对应的循环周次。

图 C.1 超声疲劳试样裂纹扩展过程原位成像表征结果图

附 录 D

(资料性)

起草单位和主要起草人

本文件起草单位：宝山钢铁股份有限公司、中国科学院力学研究所、西南交通大学、冶金工业信息标准研究院、国家能源集团新能源技术研究院有限公司、湖北工业大学、四川大学、华东理工大学、大连海事大学、东莞材料基因高等理工研究院、苏州迈达检测科技有限公司、华中科技大学、浙大城市学院、成都美创途科技有限公司。

本文件主要起草人：彭文杰、孙成奇、吴圣川、刘冬、董莉、王清远、杜晋峰、方健、薛欢、朱明亮、刘永杰、王宠、侯慧宁、王金龙、李荣锋、周治东、张桢、彭周、李文凯、王甜甜、谢卿。

国家标准发布使用

参 考 文 献

- [1] C. Sun, X. Zhang, X. Liu and Y. Hong. Effects of specimen size on fatigue life of metallic materials in high-cycle and very-high-cycle fatigue regimes[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2016, 39: 770-779
- [2] Stanzl-Tchegg SE. Fracture mechanisms and fracture mechanics at ultrasonic frequencies[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999,22(7):567-579
- [3] Y. Furuya. Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high-strength steel[J]. *Materials Science and Engineering A*,2011,528:5234-5240
- [4] Peng W.J, Xue H, Ge R, Peng Z. The influential factors on very high cycle fatigue testing results[C]. *MATEC Web of Conferences* 2018; 165: 20002
- [5] H. Mayer, R. Schuller, et.al. Very high cycle fatigue of nitrided 18Ni maraging steel sheet[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014,64:140-146
- [6] S.Stille, J. Pöplau, et.al. Very high cycle fatigue behavior of riblet structured Alclad 2024 thin sheets. *International Journal of Fatigue*, 2014,63:183-190
- [7] 彭文杰, 吴圣川, 薛欢, 等. 超声疲劳试样动态应变测量及应力检定方法[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(2): 287-293
- [8] Matikas T E. Specimen design for fatigue testing at very high frequencies[J]. *Journal of Sound Vibration*,2001,247:673
- [9] WJ Qian, SC Wu, LM Lei, et al. Time lapse in situ X-ray imaging of failure in structural materials under loads and extreme environments [J].*Journal of Materials Science & Technology*
- [10] Louis Hebrard, Jean-Yves Buffiere, Thierry Palin-Luc, et al. Environment effect on internal fatigue crack propagation studied with in-situ X-ray microtomography [J].*Materials Science & Engineering A* 882 (2023) 145462
-