



中华人民共和国国家标准

GB/T 43896—2024

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

2024-04-25 发布

2024-11-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
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	7
8 试验步骤	9
9 试验报告	10
附录 A (资料性) 超声疲劳试样的设计	12
附录 B (资料性) 不同形状超声疲劳试样的应力控制方法	17
参考文献	19

前 言

本文件按照 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》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。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：宝山钢铁股份有限公司、四川大学、冶金工业信息标准研究院、钢铁研究总院有限公司、苏州迈达检测科技有限公司、中国科学院力学研究所、华东理工大学、国家能源集团新能源技术研究院有限公司、成都美创途科技有限公司、浙大城市学院、深圳信测标准技术服务股份有限公司、浙江省特种设备科学研究院、山东骏程金属科技有限公司、中国海洋大学、浙江吉森金属科技有限公司。

本文件主要起草人：彭文杰、孙成奇、王清远、吴圣川、刘冬、朱明亮、董莉、王宠、尉文超、周冶东、杜晋峰、谢卿、李荣锋、夏立、轩福贞、高怡斐、方健、侯慧宁、孙谱、崔洪芝、秦斌、杜丽影、武晓雷、温建锋、刘永杰、李文凯、乔湛、时捷、傅军平、李洪光、崔中雨。

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,金属材料超高周疲劳测试需求与日俱增,超声疲劳试验方法是完成超高周疲劳的有效手段之一。相比高周疲劳,超声疲劳由于试验频率大幅提高,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方法。

超声疲劳试验因其超高工作频率而具备以下特点:

- 加速疲劳试验,大幅缩短疲劳试验周期;
- 可对零部件/结构的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

本文件规定了室温下金属材料超高周疲劳超声疲劳试验方法的试样、试验装置、试验步骤及试验报告。

本文件适用于试验频率在 $20\,000\text{ Hz} \pm 500\text{ Hz}$ 、单端轴向受激振动、应力比 $R = -1$ 的超高周疲劳试验。

其他应力比或超声谐振频率的疲劳试验可参照本方法，相应的试样需要单独设计与验证。

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。

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 2614 镍铬-镍硅热电偶丝

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 38897 无损检测 弹性模量和泊松比的超声测量方法

JJF 1305 线位移传感器校准规范

JJG 623 电阻应变仪

JJG 856 工作用辐射温度计

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 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

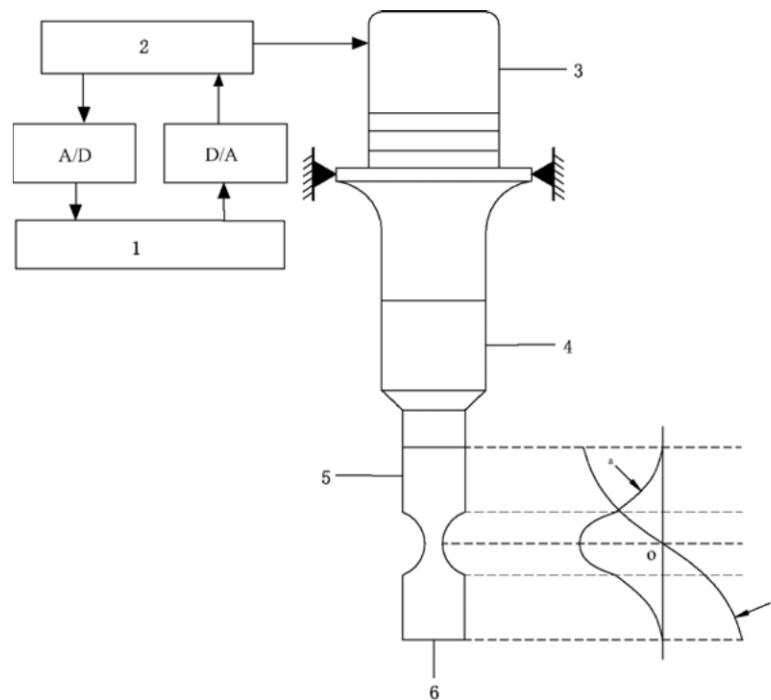
本文件使用的符号和相应的说明见表 1。

表 1 符号和说明

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 20 000 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, 使试样获得频率约为 20 000 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； | 4——位移放大器； |
| 2——超声发生器； | 5——超声疲劳试样； |
| 3——压电换能器； | 6——超声疲劳试样端部。 |
| ^a 试样轴向应力分布。 | |
| ^b 试样轴向位移分布。 | |

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漏斗形、等截面圆形和板状。设计超声疲劳试样尺寸时，尺寸组合应满足试验系统谐振频率为 20 000 Hz 的谐振条件，否则试样将不能起振，试验无法进行。设计试样尺寸之前应先根据 GB/T 38897 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计算满足试验谐振频率的端部长度值，见附录 A。

注 1：为了保证设计的超声疲劳试样能正常起振，动态弹性模量测试设备的准确度需优于 2 级。

注 2：在进行高温超声疲劳试验时，设计试样尺寸用对应温度下的动态弹性模量值和密度值进行计算。

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。

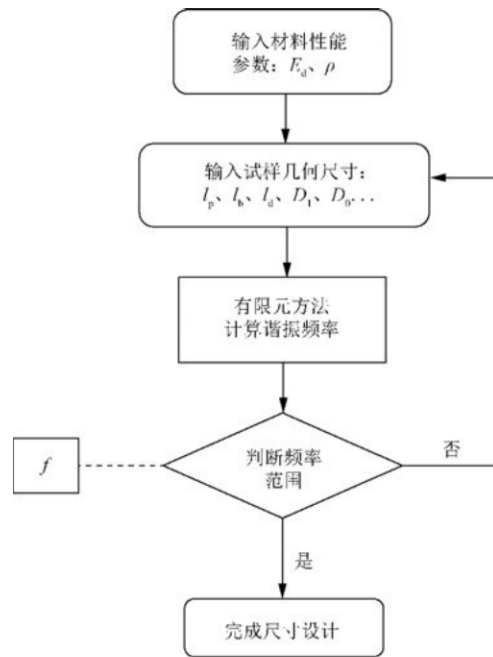


图 2 基于有限元方法的超声疲劳试样设计流程

6.2 试样的形状和尺寸

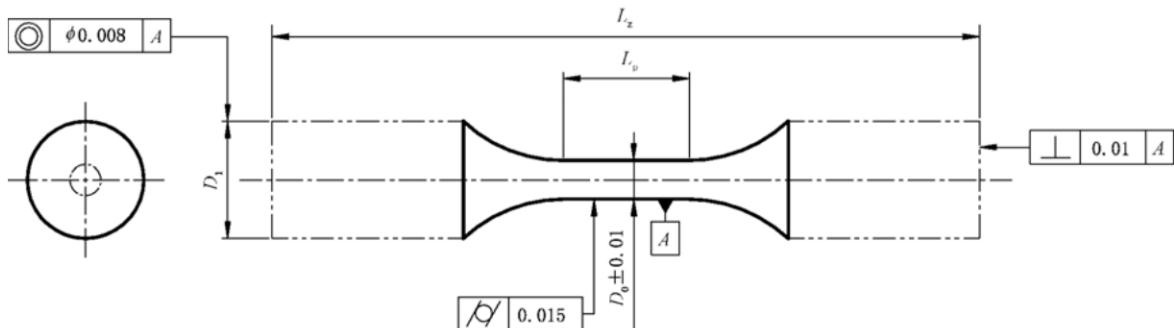
6.2.1 试样要求

试验所用同一批试样应具有相同的形状、尺寸和表面状态。试样类型包括等截面圆形试样、漏斗形试样和板状试样。

6.2.2 等截面圆形试样

等截面圆形试样为中间含光滑平行段的圆形截面试样,如图 3 所示。等截面圆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。

单位为毫米



注:垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图 3 等截面圆形试样

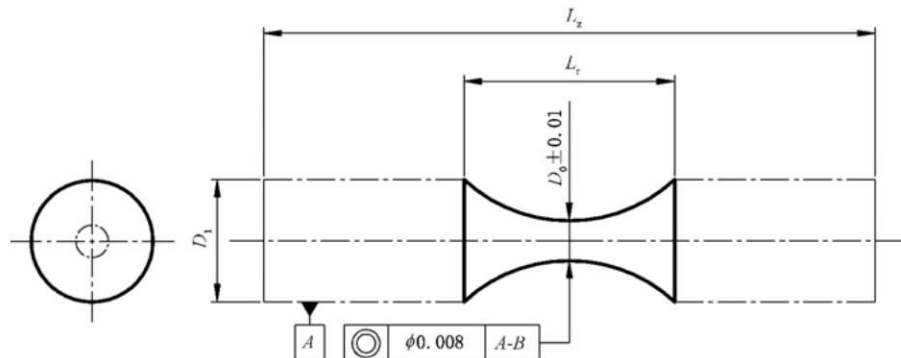
6.2.3 漏斗形试样

漏斗形试样如图 4 所示。等截面圆形试样和漏斗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。

注 1：等截面圆形试样或等截面板状试样在等截面区域近似承受等应力，而漏斗形试样在最小横截面附近的小体积区域受力。因此，产生的疲劳结果可能不代表大块材料的响应，见参考文献[3]，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，裂纹萌生从试样表面转到内部或次表面，见参考文献[4]。由于漏斗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，见参考文献[5]和[6]。

注 2：超高强钢或者其他高强度合金一般采用漏斗形试样。

单位为毫米



注：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

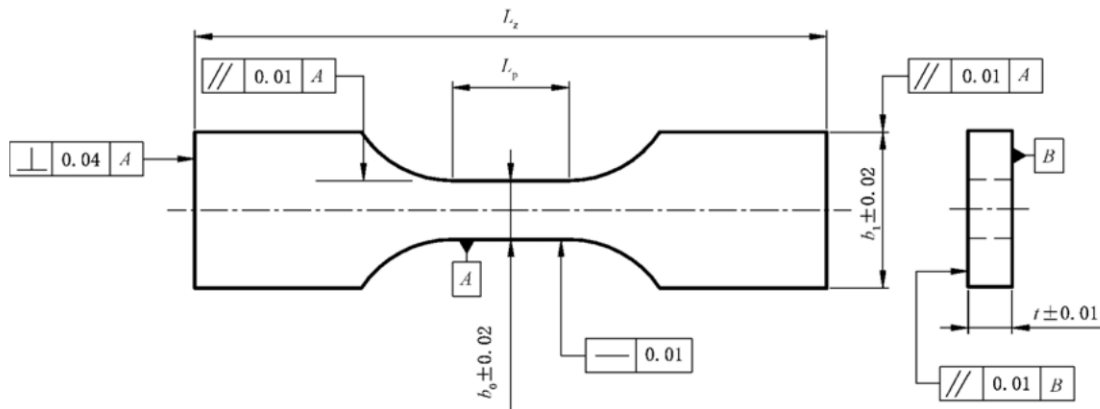
图 4 漏斗形试样

表 2 圆形试样的尺寸

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

6.2.4 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。



注：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图5 板状试样

6.3 试样的制备

6.3.1 一般要求

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。如果试验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（如轧制、挤压方向等）；
- 每件试样的标识符。

试验前，应标记试样。标识符可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

宜选择合适的机加工程序（特别是在最后的抛光阶段前）以减小残余应力。硬质材料宜选用磨削加工方式，而非车削或铣削加工。试验加工程序应符合以下要求：

- 磨削：从离最终直径的 0.1 mm 开始，每次进刀量不超过 0.005 mm。
- 抛光：用逐次变细的砂纸处理掉最后的 0.025 mm。宜沿试样轴向进行最后的抛光。

注：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、材料的变形或微观结构的变化引起的。在高温试验时，产生的残余应力可能部分或者全部释放，因此残余应力的影响很小。

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。

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

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。

以下建议可让上述影响减至最小：

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

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，防止试样氧化。热处理不应改变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）。宜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 试验机

试验应在通过压电陶瓷将 20 000 Hz 电信号转换成机械振动的超声疲劳试验机上进行。试样单端受激振动，试样端部与位移放大器通过螺纹连接，加载链应无间隙。试验机应配备测温仪、激光位移传感器、高速动态应变仪或高速数字图像相关法 (Digital Image Correlation, DIC) 等测量装置，用于测量试样的振动位移和动态应变。

7.2 试样端部振动位移测量和校核

7.2.1 超声疲劳试验通过控制试样端部位移幅值实现应力幅值的控制，因此，试验机的位移系统应定期校核，以保证试样端部振动位移的准确性。宜采用激光位移传感器对试样的端部振动位移进行实时连续采集，如图 6 所示，确认测得的位移幅值和理论值一致。激光位移传感器的误差、线性度和重复性等应按照 JJF 1305 进行校准。

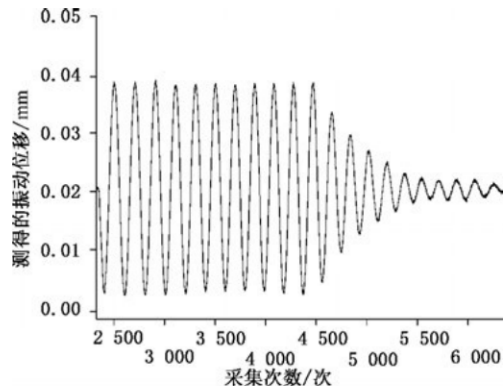
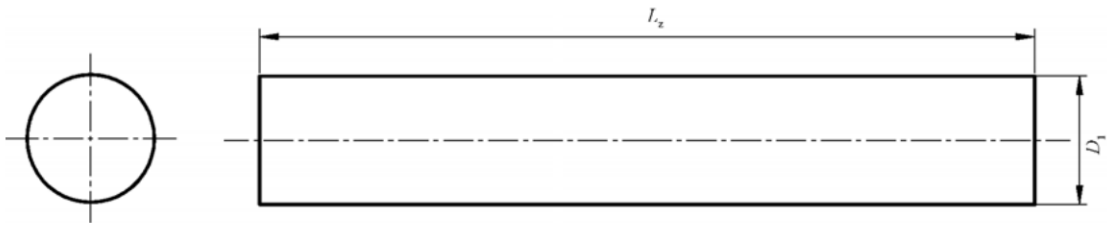


图 6 激光位移传感器测得的试样端部振动位移

7.2.2 位移校核宜采用如图 7 所示的直棒试样。

单位为毫米



注 1：满足超声谐振频率的直棒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，见附录 A。且直棒试样形状简单，尺寸加工精度易于控制。

注 2：垂直度要求适用于对中的夹持部分。

图 7 直棒试样

除了端部振动位移，还可直接对超声疲劳试样的应力或应变进行测量和校核，以保证应力幅值的准确性。

7.3 动态应变测量

在进行超声疲劳试样应变测量时，预设值不宜过大，应不大于弹性极限应变的 50%。

对等截面圆形和板状试样，可在试样工作段中间粘贴应变片，通过高速动态应变仪测量其动态应变，高速动态应变仪的应按照 JJG 623 进行动态校准，其准确度应为 1 级或优于 1 级。

漏斗形试样尺寸一般较小，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，宜选择数字图像相关法系统测量其动态应变，利用高速相机拍照和图片对比分析得到其动态应变幅值，DIC 设备在使用前应用校准标定板对图像测量系统进行全场标定。

7.4 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，确保测得的应力幅值与预设应力幅值相对偏差不超过 ±1%。如相对偏差超过 ±1%，应按照两者的线性比值对试样的预设应力幅值进行校核。

7.5 温度监测

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。温度监测用热电偶的电动势及允差应满足或优于 GB/T 2614 中 II 级要求,红外测温仪测量不确定度应满足 JJG 856 的要求。

7.6 试样的装夹

试样与位移放大器通过螺纹相连接,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应脱落。

一般情况下试样宜使用外螺纹,对于某些特别脆的材料,试样宜使用内螺纹。

注: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。

试样安装时不应引入额外的应力,例如弯折、锤击等动作,也不应划伤试样表面。

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

试验通常在室温(10℃~35℃)条件下进行,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 对于控制软件中已有的试样类型,可在控制软件中直接输入所需施加的应力幅值。控制软件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 如果控制软件中的试样类型有限,例如仅有漏斗形试样,可将其他形状试样的应力幅值转换成漏斗形试样的应力幅值,以实现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

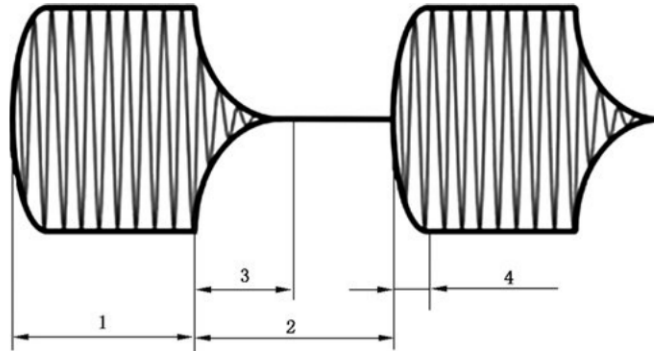
整个试验期间,测温装置在循环内任何给定时刻显示的温度不应超过当前室温 10℃。如果试验过程中发生超出温度范围情况,例如在室温下试样表面出现发黑或发蓝,宜采用下列 3 种方法控制试样的温升,温升情况和控制方法应在试验报告中注明。

- a) 可通过改变试样的尺寸和形状来减小试样的位移振幅,从而减小试样的温升;
- b) 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;
- c) 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散热。对同一组试样,应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,不应改变间歇条件。

注 1:间歇时长不参与循环周次计数。补充间歇加载对结果的影响。

注 2:间歇加载有可能导致疲劳寿命变长。

如果上述方法均无法控制试样的发热,则应停止试验。



- 标引序号说明：
- 1——振动过程；
 - 2——间歇过程；
 - 3——衰减过程；
 - 4——起振过程。

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,试验装置会因试样频率下降过大而停止试验。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 周次或 10^9 周次)时,无论试样是否破坏,应终止试验。

8.5 试验记录

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、施加的最大应力、应力比、应力幅值、试验频率、冷却方式(例如间歇加载条件)和试样端部位移幅值等内容。

注:超高周疲劳更加倾向于从试样内部起裂。参考文献[7]和[8]给出了对试样损伤演化过程的监测,以研究材料的超高周疲劳内部裂纹萌生和扩展机理。

9 试验报告

试验报告应包括以下内容:

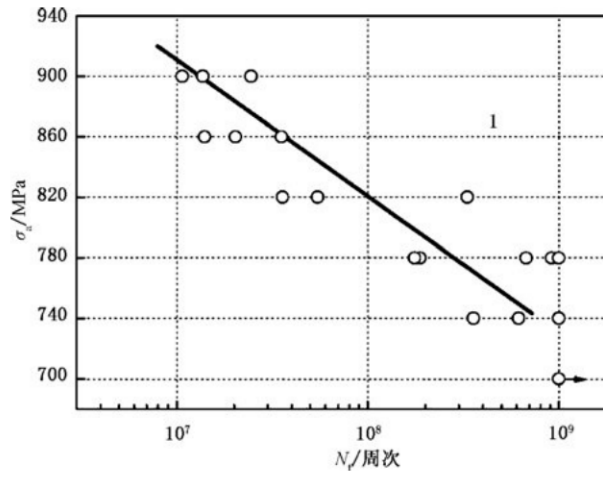
- a) 本文件编号;
- b) 材料的牌号、规格、热处理工艺、动态弹性模量、密度、抗拉强度和屈服强度等;
- c) 试样取样部位、几何形状、尺寸和表面状态;
- d) 试验机型号;
- e) 冷却方式(例如,风冷、间歇条件等);
- f) 每个试样的标识符、施加的应力幅值、应力比、端部位移幅值、振动频率、断裂情况和疲劳寿命;

注 1: 试验结果一般以图或表格的形式表示,如图 9 所示。

注 2: 超高周疲劳结果处理参考 GB/T 24176;或者参考 Z 参量寿命模型,见参考文献[9]和[10]。

- g) 试验温度,如对试样加热(例如大于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 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文件的偏差或其他情况。



标引符号说明：

1 —— $R = -1$, 室温。

→ —— 试样在指定周次下未断裂。

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

超声疲劳试样的尺寸组合宜满足试验系统谐振频率为 20 000 Hz 的谐振条件。由图 1 可看出,在试样的中间截面,位移为零、应力幅值最大;试样端部位移幅值最大、应力为零。为了能够得到解析解,试样过渡弧轮廓线采用悬链线。根据连续系统振动理论,结合试样轮廓线方程、边界条件和连续性条件,可得到等截面圆形、漏斗形、板状和直棒试样的尺寸设计公式、轴向位移分布以及试样工作段中间截面应力幅值和端部位移幅值之间的关系式。

注 1: 为了便于加工,一般采用相切的圆弧代替悬链线,圆弧代替悬链线引入的偏差,见参考文献[11]。

图 A.1 为等截面圆形试样,满足超声谐振频率的等截面圆形试样端部长度 l_d 的解析解见公式(A.1)。

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

式中: $\alpha = \frac{1}{l_b} \operatorname{arccosh} \left(\frac{D_1}{D_0} \right)$

$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2}$

$k = \frac{\omega}{c}$ 。

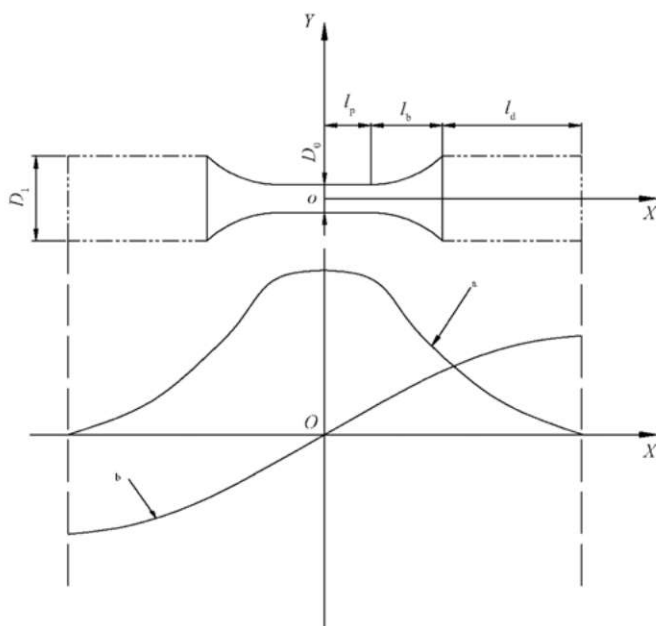
图 A.2 中等截面圆形试样轴向位移分布见公式(A.2)。

$$\begin{cases} U(x) = U_0 \beta \varphi_d \sin(kx) & |x| \leq l_p \\ U(x) = U_0 \varphi_d \frac{\beta \sin(kl_p) \cosh[\beta(x - l_p)] + k \cos(kl_p) \sinh[\beta(x - l_p)]}{\cosh[\alpha(x - l_p)]} & l_p < |x| \leq l_p + l_b \\ U(x) = U_0 \cos([k(l_z - x)]) & l_p + l_b < |x| \leq l_z \end{cases} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中: $\varphi_d = \frac{\cos(kl_d) \cosh(\alpha l_b)}{\beta \sin(kl_p) \cosh(\beta l_b) + k \cos(kl_p) \sinh(\beta l_b)}$

对公式(A.2)中的位移求导计算可得到等截面圆形试样轴向应力分布,如图 A.1 所示。等截面圆形试样最大应力幅值在中间截面处,与端部位移幅的关系见公式(A.3)。

$$\sigma_a = E_d \frac{\partial U(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = E_d \beta k \varphi_d U_0 \dots\dots\dots (A.3)$$



a 试样轴向应力分布；
b 试样轴向位移分布。

图 A.1 等截面圆形试样

图 A.2 为漏斗形试样，满足超声谐振频率的漏斗形试样端部长度 l_d 见公式(A.4)。

$$l_d = \frac{1}{k} \arctan \left\{ \frac{1}{k} \left[\frac{\beta}{\tanh(\beta l_b)} - \alpha \tanh(\alpha l_b) \right] \right\} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$$\alpha = \frac{1}{l_b} \operatorname{arccosh} \left(\frac{D_1}{D_0} \right)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2}$$

$$k = \frac{\omega}{c}。$$

图 A.2 中漏斗形试样轴向位移分布见公式(A.5)。

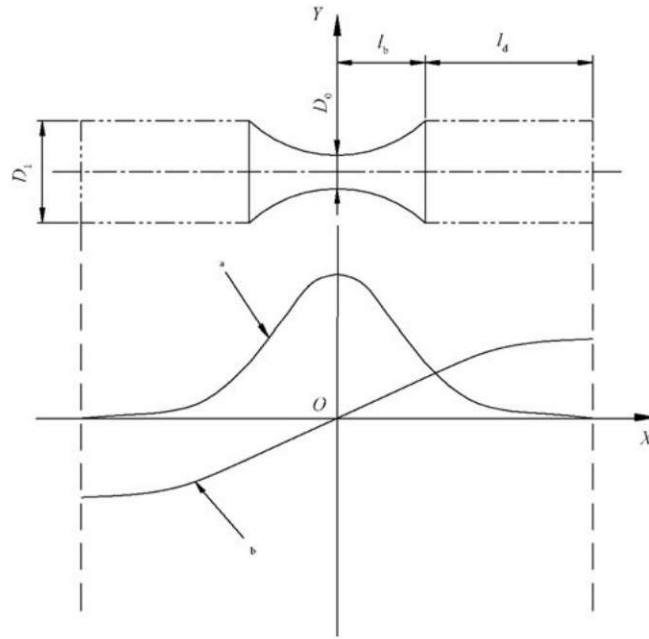
$$\begin{cases} U(x) = U_0 \varphi \frac{\sinh(\beta x)}{\cosh(\alpha x)} & |x| \leq l_b \\ U(x) = U_0 \cos[k(l_b + l_d - x)] & l_b < |x| \leq l_b + l_d \end{cases} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$$\varphi = \frac{\cos(k l_d) \cosh(\alpha l_b)}{\sinh(\beta l_b)}$$

对公式(A.5)中的位移求导计算可得到漏斗形试样轴向应力分布，如图 A.2 所示。漏斗形试样最大应力幅值在中间截面处，与端部位移幅的关系见公式(A.6)。

$$\sigma_a = E_d \left. \frac{\partial U(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = E_d \beta \varphi U_0 \dots\dots\dots (A.6)$$



- a 试样轴向应力分布；
- b 试样轴向位移分布。

图 A.2 漏斗形试样

图 A.3 为板状试样，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：

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

注 2：式中的板状试样 α 和 β 表达式和等截面圆形、漏斗形试样不同，标识为 α_p 和 β_p 以示区别。

图 A.3 中板状试样轴向位移分布见公式(A.8)。

$$\begin{cases} U(x) = C_1 \sin(kx) & |x| \leq l_p \\ U(x) = C_2 \exp[(\beta_p - \alpha_p)(x - l_p)] + C_3 \exp[-(\alpha_p + \beta_p)(x - l_p)] & l_p < |x| \leq l_p + l_b \\ U(x) = U_0 \cos[k(L_z - x)] & l_p + l_b < |x| \leq L_z \end{cases} \dots\dots\dots (A.8)$$

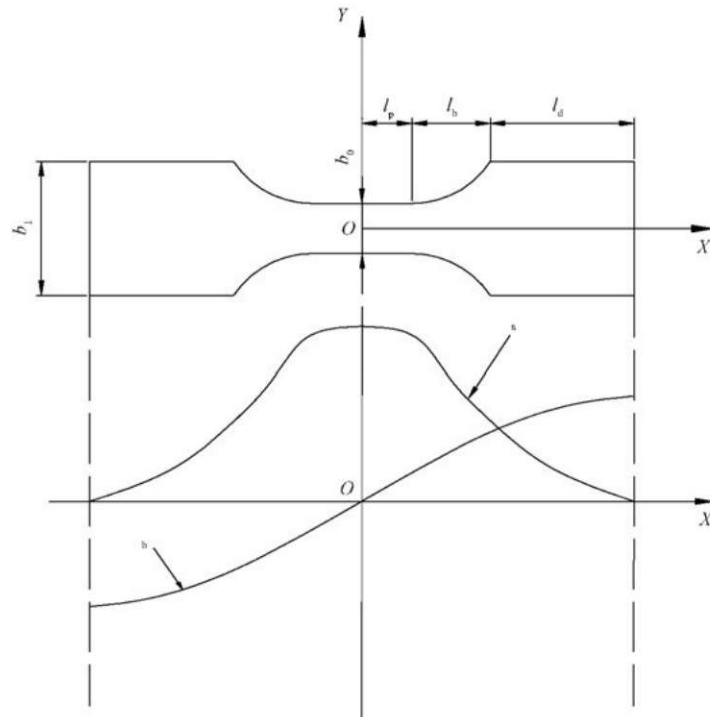
式中：

$$\begin{cases} C_1 = U_0 \beta_p \varphi_p \\ C_2 = \frac{U_0}{2} \varphi_p [\sin(kl_p)(\alpha_p + \beta_p) + k \cos(kl_p)] \\ C_3 = \frac{U_0}{2} \varphi_p [\sin(kl_p)(\beta_p - \alpha_p) - k \cos(kl_p)] \end{cases}$$

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

对公式(A.8)中的位移求导计算可得到板状试样轴向应力分布，如图 A.3 所示。板状试样最大应力幅值在中间截面处，与端部位移幅的关系见公式(A.9)。

$$\sigma_a = E_d \frac{\partial U(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = E_d \beta_p \varphi_p k U_0 \quad \dots\dots\dots (A.9)$$



- a 试样轴向应力分布；
- b 试样轴向位移分布。

图 A.3 板状试样

图 A.4 为直棒试样，满足超声谐振频率的长度 L_z 解析解见公式(A.10)。

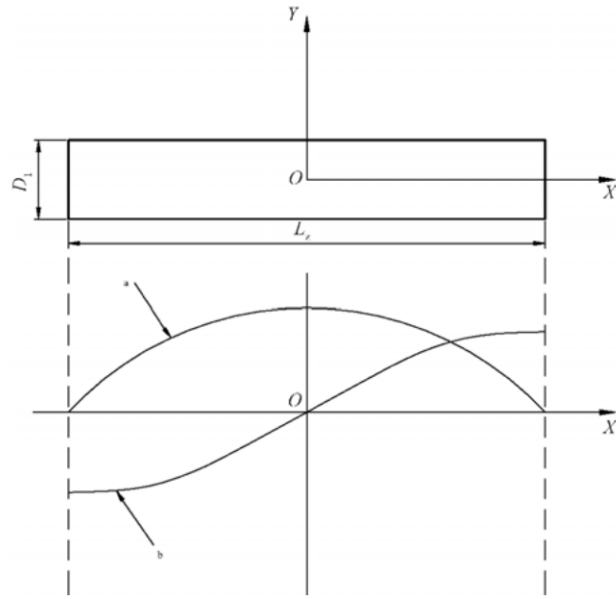
$$L_z = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

直棒试样的最大应力幅在试样中间截面($x=0$)处，如图 A.4 所示。中间截面应力幅与端部位移幅之间的关系见公式(A.11)。

$$\sigma_a = E_d k U_0 \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

$$k = \frac{\omega}{c}。$$



- a 试样轴向应力分布；
- b 试样轴向位移分布。

图 A.4 直棒试样

A.2 试样设计示例

对于 GCr15 轴承钢,其动态弹性模量为 215 GPa,密度为 7.813 g/cm³。根据公式(A.1)和公式(A.4)设计得到 GCr15 等截面圆形和漏斗形超声疲劳试样尺寸,如图 A.5 所示。

单位为毫米

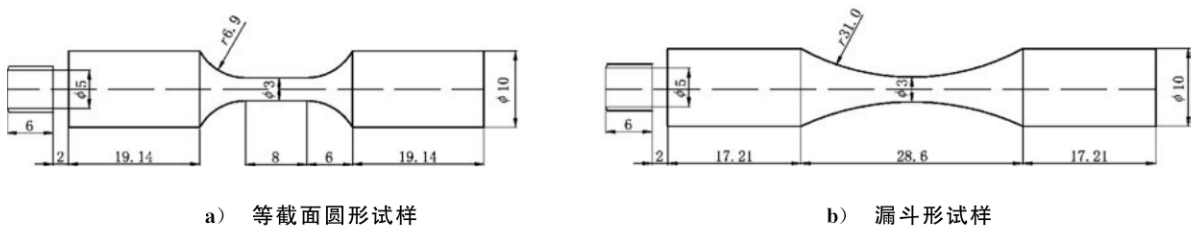


图 A.5 GCr15 等截面圆形试样和漏斗形超声疲劳试样尺寸

对于 TC17 钛合金,其动态弹性模量为 119 GPa,密度为 4.659 g/cm³。根据公式(A.1)和公式(A.4)设计得到 TC17 钛合金等截面圆形和漏斗形超声疲劳试样尺寸,如图 A.6 所示。

单位为毫米

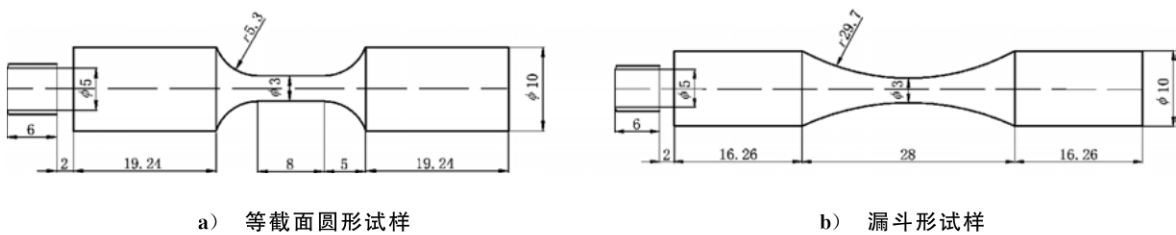


图 A.6 TC17 等截面圆形和漏斗形超声疲劳试样尺寸

附录 B

(资料性)

不同形状超声疲劳试样的应力控制方法

如果系统控制软件试样类型有限,例如仅有漏斗形试样,可通过将其他形状试样的应力幅值转换成漏斗形试样的应力幅值,以实现其他形状试样的应力控制。

超声疲劳试验通过控制试样端部位移幅值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 。通过公式(A.3)、公式(A.6)、公式(A.9)和公式(A.11)可由预设应力幅值 σ_a 求得对应的 U_0 。

以等截面圆形试样为例,根据公式(A.1),设计其尺寸为 l_p, l_b, l_d, D_0, D_1 ,预设等截面圆形试样的应力幅值为 σ_a ,由公式(A.3)可求得对应的位移幅值 U_0 ,见公式(B.1)。

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

图 A.2 所示的漏斗形试样,根据公式(A.4),设计其尺寸为 $D_1^0, D_0^0, l_b^0, l_d^0$ 。由公式(A.6)和公式(B.1)可求得漏斗形试样在与等截面圆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)。

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

式中:

σ_a ——等截面圆形试样应力幅值;

σ_a^0 ——相同位移幅值下对应的漏斗形试样应力幅值;

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

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

对设计尺寸为 l_p, l_b, l_d, D_0, D_1 的等截面圆形试样,由公式(B.2)将等截面圆形试样的应力幅值 σ_a 转换成相同位移幅值下,尺寸为 $D_1^0, D_0^0, l_b^0, l_d^0$ 的漏斗形试样所对应的应力幅值 σ_a^0 ,即可实现等截面圆形试样的应力控制。等截面圆形试样与漏斗形试样之间的应力转换如图 B.1 所示,图 B.1 中的计算过程可通过编制程序完成。

相同地,板状试样和漏斗形试样之间的应力转换公式见公式(B.3)。

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

式中:

σ_a ——板状试样应力幅值;

σ_a^0 ——相同位移幅值下漏斗形试样应力幅值。

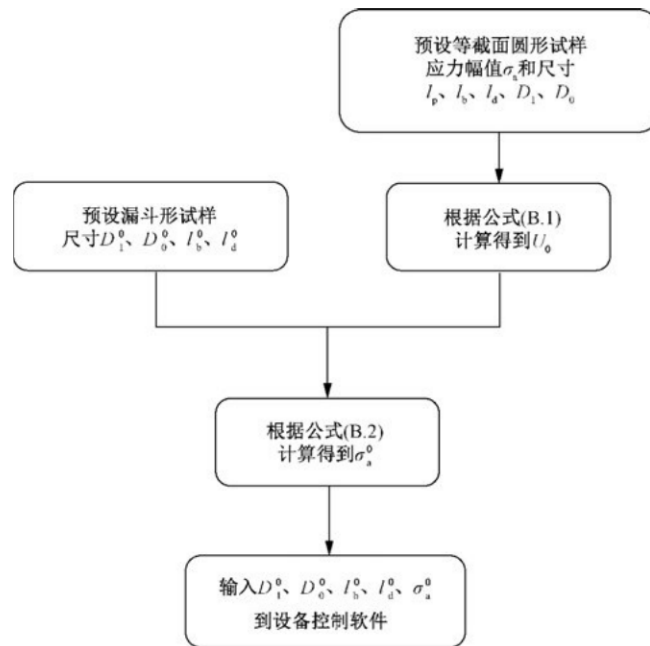


图 B.1 等截面圆形试样和漏斗形试样之间的应力转换

参 考 文 献

- [1] GB/T 24176—2009 金属材料 疲劳试验 数据统计方案和分析方法.
- [2] 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.
- [3] Sun CQ,Zhang XL, Liu XL,Hong YS. 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.
- [4] Stanzl-Tchegg SE. Fracture mechanisms and fracture mechanics at ultrasonic frequencies [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1999, 22(7): 567-579.
- [5] 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.
- [6] Peng WJ,Xue H,Ge R,Peng Z. The influential factors on very high cycle fatigue testing results[C]. MATEC Web of Conferences 2018; 165: 20002.
- [7] Qian WJ, Wu SC,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, 2024, 175: 80-103.
- [8] 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, 2023, 882: 145462.
- [9] Zhu ML,Jin L,Xuan FZ. Fatigue life and mechanistic modeling of interior micro-defect induced cracking in high cycle and very high cycle regimes[J]. Acta Materialia, 2018, 157: 259-275.
- [10] Zhu ML,Xuan FZ,Du YN,Tu ST. Very high cycle fatigue behavior of a low strength welded joint at moderate temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 40: 74-83.
- [11] Bathias C,Paris PC. Gigacycle fatigue in mechanical practice [M]. CRC Press; 2004.
-

中华人民共和国
国家标准
金属材料 超高周疲劳
超声疲劳试验方法
GB/T 43896—2024

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.net.cn

服务热线: 400-168-0010

2024年4月第一版

*

书号: 155066·1-75907

版权专有 侵权必究



GB/T 43896-2024