



中华人民共和国国家标准

GB/T 26077—2021

代替 GB/T 26077—2010

金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法

Metallic materials—Fatigue testing—Axial-strain-controlled method

(ISO 12106:2017, MOD)

2021-04-30 发布

2021-11-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 Ⅲ

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 3

5 试验设备 5

6 试样 8

7 试验程序..... 14

8 高温应变控制蠕变-疲劳试验 18

9 结果表达..... 19

10 试验报告 21

附录 A（资料性） 测量不确定度 25

附录 B（资料性） 试验结果的绘图表述实例 26

参考文献 30

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。

本文件代替 GB/T 26077—2010《金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法》，与 GB/T 26077—2010 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了“工程应力”和“平行长度”的术语和定义(见第3章)；
- 更改了图1曲线和标注(见图1, 2010年版的图1)；
- 对同轴度检查的内容进行了修改和补充, 增加引用了 GB/T 34104《金属材料 试验机加载同轴度的检验》, 删除了图3(见 5.1.4, 2010年版的 5.1.4)；
- 更改了试验加工程序的要求(见 6.2.2, 2010年版的 6.2.2)；
- 更改了试验机控制的要求(见 7.2, 2010年版的 7.2)；
- 更改了试样安装的要求(见 7.3, 2010年版的 7.3)；
- 增加了应力-应变滞后回线及其说明(见 7.4 和图8)；
- 增加了预测量时高温下疲劳试验的建议(见 7.5.1)；
- 删除了弹性模量 $E_{1/4}$ 的测定(见 2010年版的 7.5.2)；
- 增加了意外试验中止, 恢复试验前应确认的三种情况(见 7.5.2, 2010年版的 7.5.3)；
- 增加了高温应变控制蠕变-疲劳试验要求(见第8章)；
- 增加了蠕变-疲劳试验结果分析(见 9.3)。

本文件修改采用 ISO 12106:2017《金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法》。

本文件与 ISO 12106:2017 相比存在技术性差异, 这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(⌋)进行了标示, 具体的技术性差异及其原因如下：

- 关于规范性引用文件, 本文件做了具有技术性差异的调整, 以适应我国技术条件, 调整的情况集中反映在第2章“规范性引用文件”中, 具体调整如下：
 - 用等同采用国际标准的 GB/T 12160 代替了 ISO 9513(见 5.2、5.5)；
 - 用等同采用国际标准的 GB/T 16825.1 代替了 ISO 7500-1(见 5.1.2、5.5)；
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 34104 代替了 ISO 23788(见 5.1.1、5.1.4)；
 - 增加引用了 GB/T 25917.1(见 5.5)、JJF 1637(见 5.5)、JJG 141(见 5.5)、JJG 556(见 5.1.2、5.5)、JJG 617(见 5.5)；
- 补充说明了“真应力”的术语定义(见 3.2), 与上一版国家标准统一, 便于读者理解；
- 更改了试验机的控制要求(见 7.2), 以适应我国技术条件。

本文件做了下列编辑性修改：

- 增加了表2、表3、表4的引导语(见 4.2.1、4.2.2 和 4.3)；
- 在图6中增加了 L_r 的标记(见图6)；
- 修改了公式(5)的写法, 以更加符合上下文逻辑(见 9.2.3)。

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：钢铁研究总院、力试(上海)科学仪器有限公司、中机试验装备股份有限公司、深圳万测试验设备有限公司、西南交通大学、冶金工业信息标准研究院、钢研纳克成都检测认证有限公司。

本文件主要起草人：高怡斐、刘涛、王斌、马双伟、吴圣川、董莉、黄星、张立新、侯慧宁。

本文件于 2010 年首次发布，本次为第一次修订。

引 言

材料及其微观结构在承受循环变形时可能会发生变化,其力学性能与例如单轴应力-应变的单调变形结果相比较可能会发生显著变化。在许多工业部门(如核电、航空、地面车辆、医疗设备等),承受疲劳载荷和循环变形的机械部件的设计要求了解材料在反向应变控制条件下的循环行为,也称低循环疲劳。

为了确保来自不同实验室的结果的可靠性和一致性,有必要使用符合若干关键点的测试方法收集所有数据。

本文件涉及在室温或高温下以固定应变比 R_e 生成此类应变控制疲劳数据,以及在应变比 R_e 为 -1 时确定的金属材料疲劳性能、应变-寿命行为和循环应力-应变响应的结果。由于应变控制高温试验与蠕变疲劳试验密切相关,因此也有一章节专门讨论蠕变疲劳试验方法。

本文件不涉及安全或健康问题,如果存在这样的问题,可能与其使用或应用有关。本文件的使用者全权负责建立任何适当的安全和健康意识,并确定与本文件的使用有关的任何国家或地方监管限制的适用性。

金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法

1 范围

本文件规定了金属材料疲劳试验轴向应变控制方法的试验设备、试样、试验程序、高温应变控制蠕变疲劳试验、结果表达和试验报告。

本文件适用于在恒温恒幅条件下应变控制且应变比 $R_e = -1$ 的单轴加载试样。本文件也可用于指导在其他应变比 R_e 下进行试验,以及在蠕变变形可能活跃的高温下进行的试验。

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 12160 金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定(GB/T 12160—2019,ISO 9513:2012, IDT)

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第1部分:拉力和(或)压力试验机测力系统的检验与校准(GB/T 16825.1—2008,ISO 7500-1:2004, IDT)

GB/T 25917.1 单轴疲劳试验系统 第1部分:动态力校准(GB/T 25917.1—2019,ISO 4965-1:2012, IDT)

GB/T 34104 金属材料 试验机加载同轴度的检验(GB/T 34104—2017,ISO 23788:2012, MOD)

JJF 1637 廉金属热电偶校准规范

JJG 141 工作用贵金属热电偶检定规程

JJG 556 轴向加力疲劳试验机检定规程

JJG 617 数字温度指示调节仪检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

工程应力 **engineering stress**

S

瞬时力除以标距内的初始横截面积。

$$S = F/A_0$$

式中:

S ——工程应力;

F ——瞬时力;

A_0 ——原始横截面积。

3.2

真应力 true stress σ

瞬时力除以标距内的瞬时横截面积。

$$\sigma = F/A \text{ 或 } \sigma = S(1+e)$$

式中：

S ——工程应力 F/A_0 ；

e ——工程应变 $\Delta L/L_0$ 。

注：在应变约为 10% 时，真实应力近似于工程应力 F/A_0 。同样重要的是，在应变约为 10% 时，工程应变是由引伸计实际测量的，并且是测试中的受控参数。

3.3

初始长度 initial length**标距 gauge length** L_0

试验温度下，引伸计测量点之间的初始长度。

3.4

平行长度 parallel length L_p

试样过渡半径之间的长度。

3.5

应变 strain

$$\text{工程应变 } e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0}$$

$$\text{真实总应变 } \epsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L}$$

式中：

L_i ——标距部分的瞬时长度；

L_0 ——初始长度或标距。

注：在真实应变值约为 10% 时， ϵ 近似于工程应变 $e = \Delta L/L$ 。同样重要的是，在应变约为 10% 的情况下，工程应变是引伸计和受控参数在应变控制疲劳试验中测量的量。

3.6

循环 cycle

应变-时间函数上周期重复的最小单元。

3.7

最大值 maximum

变量在一个循环内的最大代数值。

3.8

最小值 minimum

变量在一个循环内的最小代数值。

3.9

平均值 mean

变量最大值与最小值代数和的一半。

3.10

范围 range

变量最大值与最小值的代数差。

3.11

幅值 amplitude

变量范围的一半。

3.12

疲劳寿命 fatigue life N_f 达到失效的循环数 N 。

注：7.8 给出了对于失效判据定义的实例，所使用的失效判据宜与结果一起报告，并对一系列疲劳试验保持一致。

3.13

滞后回线 hysteresis loop

在一个循环内应力-应变的封闭曲线。

注：由于循环软化、循环硬化、循环应力松弛、应力“试用”或棘轮效应，测试序列中开始的几个滞后回线可能不会完全“闭合”，这是很常见的。

4 符号

4.1 试样

与试样相关的符号及说明见表 1。

表 1 与试样相关的符号及说明

试样类型	符号	说明	单位
通用	L_0	原始标距	mm
	L_i	瞬时标距	mm
	A_0	原始横截面积	mm ²
	A	瞬时横截面积($A = A_0 L_0 / L$)	mm ²
	A_f	失效处的最小横截面积	mm ²
	r	过渡弧半径(从试样平行工作部分到夹持端)	mm
	L_z	试样的总长	mm
圆形	d	平行工作部分截面直径	mm
	D	试样夹持端直径	mm
	L_r	试样截面减小区域长度	mm
板状	t	厚度	mm
	W	夹持端宽度	mm
	w	标距部分宽度	mm

4.2 疲劳试验

4.2.1 符号

与试验相关的符号及说明见表 2。

表 2 变量和性能的符号及说明

符号	说明	单位
E	弹性模量	GPa
E_T	峰值拉伸应力后的卸载模量(见图 1)	GPa
E_C	峰值压缩应力后的卸载模量(见图 1)	GPa
N_f	到达失效时的循环数	
t_f	到达失效时的总时间	s
σ	真应力	MPa
S	工程应力	MPa
e	工程应变	
$\dot{e} = \frac{de}{dt}$	应变速率	s^{-1}
ϵ	真应变	
Δ	参量的变化范围	
Ra	表面粗糙度	μm
R_e	应变比 $= (e_{min}/e_{max})$	

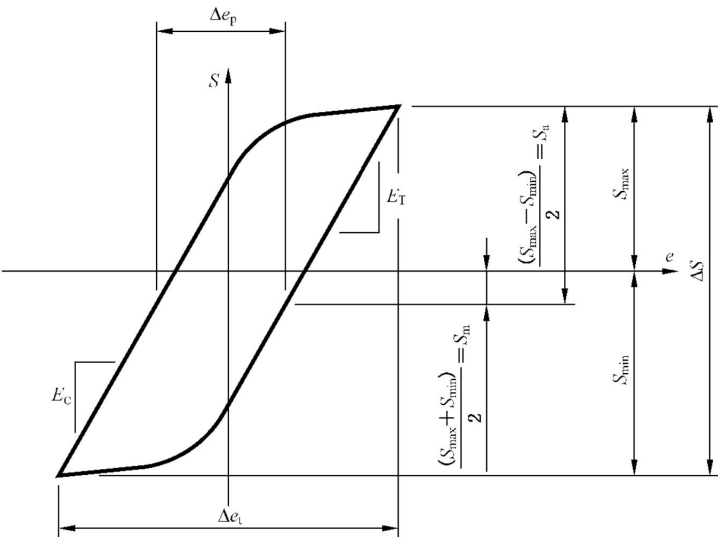


图 1 $R_e = -1$ 的应力-应变滞后回线

注：为了从稳定的应力-应变滞后回线中定义塑性应变，它是指应变控制下的稳态应力响应建立的平均应力 $(S_{max} + S_{min})/2$ 下的不可恢复应变。通常，它是零应力交叉处滞后回线的宽度，但在某些金属中可能不是。

4.2.2 下标注

与试验相关的下标注及其含义见表3。

表3 下标注及其含义

下标注	含义
t	总的
p	塑性的
e	弹性的
a	幅值
m	平均值
min	最小值
max	最大值

4.3 结果的表述

疲劳试验结果表述的符号和说明见表4。

表4 $R_e = -1$ 疲劳性能结果表述的符号及说明

符号	说明	单位
σ'_y	循环屈服强度 ^a	MPa
n	拉伸应变硬化指数	—
n'	循环应变硬化指数	—
K	强度系数	MPa
K'	循环强度系数	MPa
σ'_f	疲劳强度系数	MPa
b	疲劳强度指数	—
ϵ'_f	疲劳延性系数	—
c	疲劳延性指数	—
^a 通常采用0.2%偏置。		

5 试验设备

5.1 试验机

5.1.1 一般要求

拉-压疲劳试验机应能够平稳启动,且当试验力过零时加载链无间隙。当使用推荐的波形时,试验机应能够控制应变并测量试验力。试验机应有足够的刚性及对中。完整的试验机加载系统,包括力传感器和夹具,应具有足够的侧向刚度,以避免试样在压缩应力极限时发生屈曲。

注: GB/T 34104 给出了试验机侧向刚度的测定方法。

5.1.2 力传感器

力传感器应适用于拉-压疲劳试验且具有足够的轴向和侧向刚性,其承载能力应能满足试验需要。

从计算机自动采集系统或从其他非自动采集系统的输出设备记录的力值与真实力值之差应在允许的范围之内。力传感器的承载能力应足够覆盖试验时的力值变化范围,且测量准确度应满足 GB/T 16825.1 和 JJG 556 一级准确度的要求。

力传感器应能够进行温度补偿,且温度引起的漂移量应不超过满量程的 0.002% 每摄氏度。此外,应避免力传感器出现温度梯度。

在高温或低温试验下,应对传感器采用适当的隔热或补偿装置以保证其测量准确度在规定范围内。

5.1.3 夹具

夹具应能够将循环力平稳传递至试样纵轴线上。上下夹具间的距离宜尽可能的靠近以避免侧向失稳。设备的几何尺寸应能够良好对中以满足 5.1.4 的要求。因此,应限制夹具组件的数量并尽可能减少机械配合面的数量。

夹具应能保证试样在安装过程中的可重复性。夹具应具有确认试样对中用的表面以及保证在试验过程中能够平稳传递拉-压力的表面。材料的选择应确保在整个试验温度范围内正常工作。

5.1.4 同轴度检查

在刚性装夹系统中出现的不同轴通常由以下一个或几个原因引起(见图 2):

- 夹具的角度偏置;
- 在理想刚性系统中加力装置(或夹具)的侧向偏置;
- 在非刚性系统中加载链的装配偏置或作动器在轴承间的侧向间隙。

在每个系列试验之前或加载链发生变化之后应按照 GB/T 34104 检查试验机的同轴度,试验机的同轴度应不大于 5%。

在试验机调试或试样夹持过程中,应遵循以下原则:

- 确保试样和推拉杆的轴线同轴;
- 确保试样和推拉杆的配合端面相互平行并垂直于轴线;
- 确保当试件标距段发生塑性变形(切线模量趋于零)时,加载链和框架的侧向刚度足以保持轴向不变。

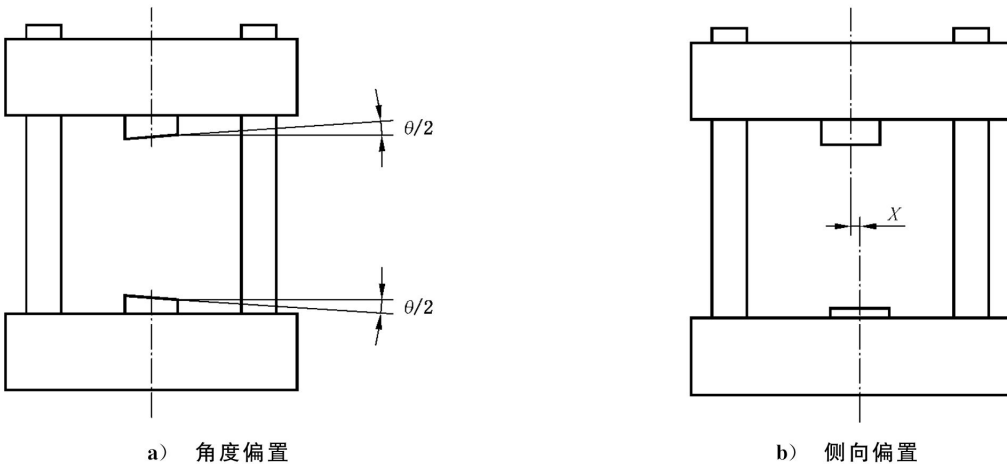
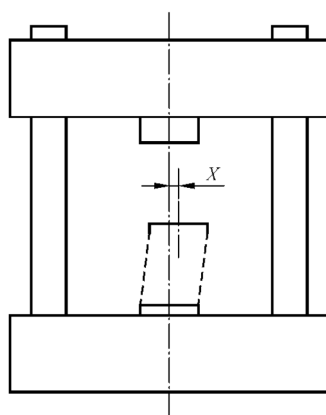


图 2 由于疲劳试验系统中不同轴引起的弯曲



c) 在非刚性系统中加载链的偏置

图 2 由于疲劳试验系统中不同轴引起的弯曲 (续)

5.2 应变的测量

应采用轴向引伸计测量试样上的应变。

引伸计应适合长期测量动态应变并应最大限度地降低信号漂移、滑动和机械滞后。引伸计应能直接测量试样上的轴向应变。

应变测量系统包括引伸计及附属电子元件,引伸计应满足 GB/T 12160 中规定的一级引伸计要求。

引伸计与试样连接处的几何形状和压力应保证引伸计既不发生相对滑动又不会损伤试样。

引伸计应能够避免在高温条件下由于热波动而引起的信号漂移。

5.3 加热设备及温度测量

试样加热升温时应避免温度超过规定的试验温度。

如果采用直接的感应加热,建议将发生器的频率降到足够低以避免加热的“集肤效应”。

加热应使整个试验过程中试样标距部分的温度梯度不超过 3 °C。考虑到系统的误差,试样温度与试验温度的偏差应不超过 ±2.5 °C。

应使用三个热电偶或其他适当的装置检查这些偏差,试样标距两端各一个,正中间一个。

在试验中,可使用与试样表面接触的热电偶测量试样温度。热电偶和试样之间应直接接触,且应在不影响试验结果的情况下实现(例如,应避免热电偶接触点处的裂纹萌生)。通常使用固定热电偶的方法是在适当的位置捆绑、加压或电阻点焊。

应保证至少有一个独立于控制通道的传感器用于测量试验温度。

5.4 试验监控设备

5.4.1 记录系统

目前低周疲劳试验设备普遍采用计算机控制和数据采集系统。现代数字系统中提供的基本软件平台提供精确的测试控制和报告生成。记录系统通常配备有在测试数据的数字或模拟域中提供实时数字显示,以及图形和表格测试结果的生成和存储。

在这样一个典型的数字系统中,应力应变数据点的采样频率应足以保证滞后回线的正确定义,特别是在滞后回线尖端的应变反转区域。但是,不同的数据收集策略将影响每个循环所需的数据点的数量。通常,每个回线至少 50 个数据点就足够,但建议每个回线有 200 个或更多的数据点。

由于有许多模拟系统仍在使用中,以下内容应作为模拟数据记录的最低要求:

- X-Y 记录仪用于记录应力-应变滞后回线;
- 能够记录随时间变化的参量如力、应变及温度的记录器;
- 峰谷值监测器。

5.4.2 循环计数器

循环计数器用于记录应变循环的次数。对于大多数使用的应变率,没有乘法因子的计数器就足够了。

5.5 检查和校准

应定期对试验机及其控制系统和测量系统进行检查。

尤其是每个传感器及其附属电子元件应作为一个系统进行检查:

- 力值测量系统应按照 GB/T 16825.1、GB/T 25917.1 及 JJG 556 进行校准;
- 应变测量系统应按照 GB/T 12160 进行校准;
- 温度测量仪表应按照 JJG 617 进行校准;
- 热电偶应按照 JJF 1637 或 JJG 141 进行校准。

在一组试验开始前建议检查引伸计的标距,力传感器和引伸计的校准状态,并检查热电偶或测温仪的校准文件。

6 试样

6.1 几何尺寸

6.1.1 圆形横截面试样(圆形试样)

试验中试样的标距部分宜代表所研究的材料体积单元,试样的几何形状不应影响试验结果。

试样的几何尺寸应满足以下条件:

- 标距部分内圆柱直径一致;
- 尽量降低发生压缩失稳的风险,从而避免在圆弧过渡部分发生失效;
- 使应变水平均匀分布在整個标距范围内;
- 避免引伸计在测量应变时的信号干扰和滑动。

试样的平行段的长度应大于引伸计的标距,且为了降低在试样标距外发生失效的风险,平行段长度宜不超过 $L_0 + (d/2)$ 。

在平行长度的过渡半径处或标距其他地方不应出现由于加工造成的过切。该特征可用光学比较器以合适的放大倍数(即大约 10 倍~25 倍)进行检查,以确保不存在过切。

考虑到以上要求,根据大量试验室的研究经验以及对各种不同试样的计算结果,推荐使用表 5 给出的圆形试样的几何尺寸(见图 3)。

表 5 试样的尺寸

参数	尺寸
圆柱形标距部分的直径	$5\text{ mm} \leq d \leq 10\text{ mm}$
平行长度	$2d \leq L_p \leq 4d$

表 5 试样的尺寸 (续)

参数	尺寸
过渡圆弧半径(从平行长度部分到夹持端)	$r \geq 2d$ 或 $r \geq 2w$
夹持端直径	$D \geq 2d$
缩减部分长度	$L_r \leq 8d$

单位为毫米

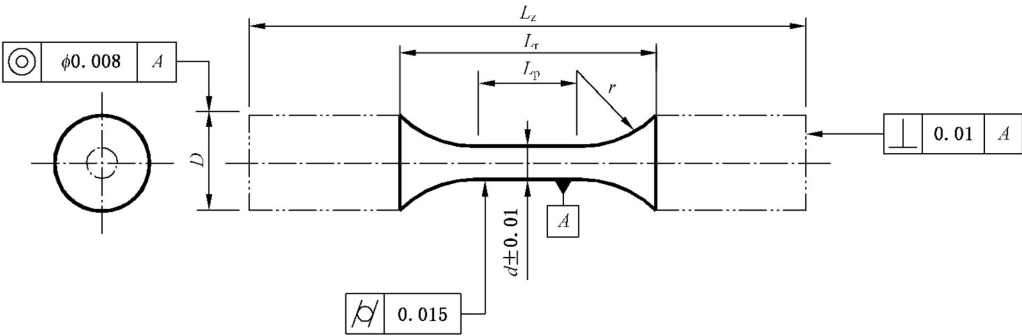


图 3 推荐的圆形试样的几何尺寸

在能够保证均匀的应力应变分布状态的情况下,也可使用其他几何尺寸的横截面和标距长度的试样。

试样的夹持端尺寸应由试验设备决定,推荐采用以下连接方式:

- 光滑圆柱形连接(需液压夹具);
- 台阶连接。

夹具应能定位试样并且轴向对中良好,不应出现过冲。夹具的设计与试样的夹持端配套,图 4 给出了一些实例。

一般而言,不推荐采用紧固调节螺纹的方式达到试样的对中。

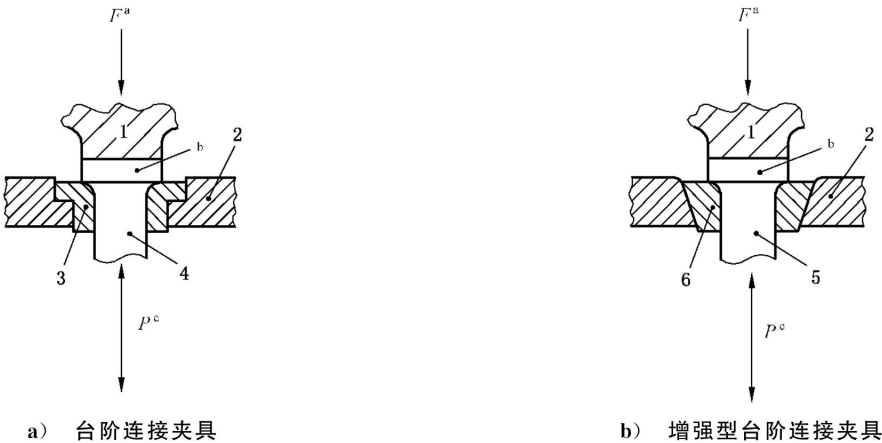
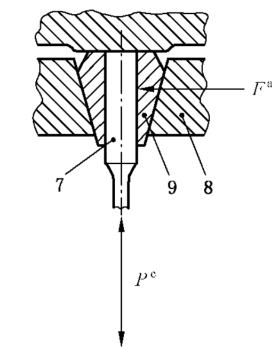


图 4 多种试样装夹装置示意



c) 光滑(圆柱形)连接夹具

标引序号说明：

- | | |
|---------------|---------------|
| 1——顶头； | 6——锥形可分离扣紧圆环； |
| 2——夹持部分； | 7——光滑连接试样； |
| 3——可分离扣紧圆环； | 8——夹持部分； |
| 4——台阶连接试样； | 9——锥形夹头。 |
| 5——增强型台阶连接试样； | |

顶紧力应大于试验力，以免在夹持部位发生过冲。

^a 加紧力。

^b 试样对中用平面。

^c 循环力。

图 4 多种试样装夹装置示意（续）

6.1.2 矩形横截面试样(板状试样)

在之前所讨论的结论也适用于本节试样的测试，但是这些试验需要特殊几何尺寸的试样及装置以避免弯曲。

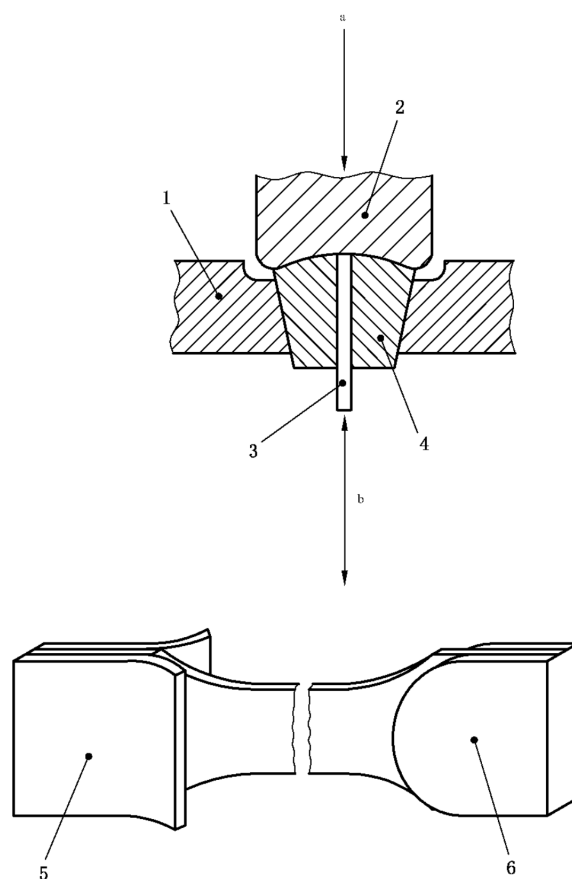
由于检测的实际力值很小，因而试验需要更灵敏的力传感器，并使用平板夹具或液压夹具，但这种夹具难以保证对中。

通常，试样在标距部分的宽度比夹持部分窄，以确保不在夹持部分发生失效。对于有些情况需要在夹持部分加装垫片以避免在夹持部分发生失效(见图 5)。

应使用预试样对试验的对中进行检查，其目的是：

- 检查夹具的平行和对中；
- 检查在轴向载荷下试样的对中。

这项工作所用的预试样应尽可能接近真实试样，在试样的两个表面上安装引伸计。



标引序号说明：

- 1——夹持部分；
- 2——锥形顶头；
- 3——板状试样；
- 4——锥形夹头；
- 5——弯曲衬片防止在夹持部分出现夹痕(可由环氧材料做成)；
- 6——圆形衬片。

^a 夹紧力。

^b 循环力。

图 5 板状试样装夹装置

厚度在 2.5 mm~5 mm 之间的板状试样,由于其厚度合理且具有抵抗屈曲的倾向,因此可在无抗屈曲约束的情况下进行试验。

板状试样的推荐尺寸如图 6 所示。在这种情况下,宜将引伸计安装在试样的宽面上。

单位为毫米

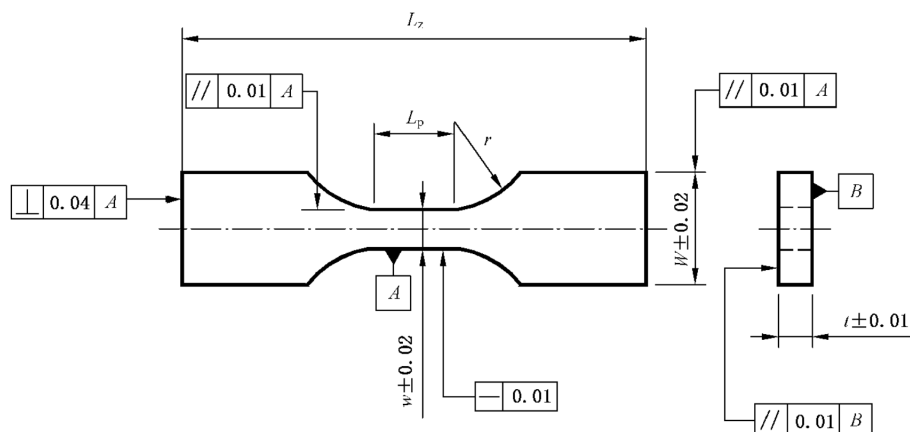


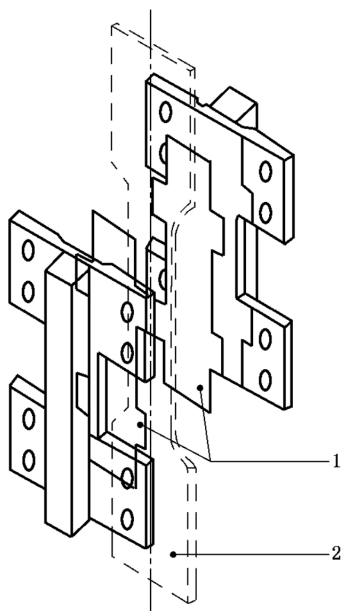
图 6 板状试样的推荐尺寸

对于厚度小于 2.5 mm 的板状试样,使用抗屈曲约束可能是必要的,这可能限制最大测试温度。约束几何结构宜与试样几何结构相匹配,并应允许测量应变。

应采取一些防范措施防止由于试样与抗屈曲装置之间的摩擦引起的力值上升。在试验的任何阶段由摩擦力引起的力值上升不应超过试验力的 2%。采用约 1 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜或氮化硼粉末干燥润滑剂能在一定程度上解决这个问题。不推荐使用烃基润滑剂,因其可能对试验结果产生影响。

由于试样的不同摩擦力也会不同。应在每个试验开始前,通过记录试样在安装防屈曲装置前后在拉伸弹性范围内的力一位移曲线测量摩擦力的大小。

由于防屈曲装置的使用需要在试样的薄边上测量应变,因此宜使用两只相同的引伸计分别放在试样的两薄边上测量应变,并取其平均值作为试验的控制参量。不仅在这种情况下是明智的,而且对于轴向应变控制疲劳测试也是明智的,一般而言,宜期望更大的应变测量精度。防屈曲装置的实例如图 7 所示。



标引序号说明:

- 1——聚四氟乙烯薄膜；
2——试样。

图 7 板状试样的防屈曲装置

6.2 试样的制备

6.2.1 一般要求

低循环疲劳试验旨在表征材料的固有特性,按照以下建议进行试样的制备是非常重要的。如果试验的目的是考察某些特殊因素(如表面热处理、氧化等)的影响可以不遵从以下的建议。在任何情况下,任何偏离均应在试验报告中加以注明。

6.2.2 机加工程序

如果试验材料需要热处理,则宜在加工试样之前进行。机加工可能使试样表面产生残余应力从而影响试验结果。这一应力是由加工阶段产生的热梯度引起的,并与材料的变形或显微组织的改变有关。对于高温试验,残余应力对试验结果的影响是不明显的,这是因为在保温过程中释放了部分甚至全部的残余应力。选用适当的精加工工艺可以减小试样的残余应力。对于硬质材料,应优先考虑磨削。

磨削:与成品尺寸相差 0.1 mm 内采用,进刀量不超过 0.005 mm/次;

抛光:与成品尺寸相差 0.025 mm 内使用粒度逐渐减小的砂纸完成抛光,建议在最终阶段对试样采取纵向抛光。

注 1: 材料显微组织的变化:这一现象是由加工过程中的温度升高以及应变硬化引起的,它也是引起相变、表面再结晶的原因。

其直接影响就是使试验结果无效,因为测试材料已经不是其原始状态了,宜注意防范。

注 2: 污染物介入:某些元素或化合物可能会劣化某种材料的机械性能,例如存在于钢或钛合金中的氯。因此在加工过程中宜避免这些元素的使用(特别是在切削乳化液中)。在试样前期保存的清洁及去油过程也宜注意上述问题。

采用的加工工艺宜有可追溯性,并随后记录在试验报告中。此外,还宜谨慎地指出每个试样的位置、方向,宜使用除棒料或圆棒以外的起始形状作为试验材料。例如,锻造、铸造或增材制造的产品,其中上述变量会影响疲劳响应。GB/T 2975 规定了 ISO 6929 中规定的钢型材、棒材、扁材和管材力学性能试验用试样和试件的标识、位置和制备要求。此外,GB/T 20832 规定了与产品特性相关的试样轴线。

6.2.3 取样及标记

从半成品或部件中取样的试验材料可能会对试验过程中所得结果的解释产生重大影响。因此记录试样取样部位的详细信息是必要的。

应在试验报告上附上清晰的取样图,取样图应包括:

- 每件试样的取样部位;
- 半成品的加工方向(如轧制方向、挤压方向等);
- 每件试样的标记。

在试样加工过程中试样应有唯一的编号。可以用任何标记方法在试样上不会被加工掉的区域进行标记,标记宜不影响试验质量。

6.2.4 试样的表面状态

试样的表面状态会对试验结果产生影响。影响通常与下列因素有关:

- 试样的表面粗糙度;
- 残余应力;
- 材料显微组织的变化;
- 污染物的介入。

遵从以下建议可将上述因素的影响降至最低。

试样的表面状态质量通常用表面粗糙度表征。试样的表面粗糙度对于得到的试验结果的重要性在很大程度上与试验条件有关,试样的表面腐蚀或塑性变形会降低其影响。

试样的平均表面粗糙度宜小于 $0.2\ \mu\text{m}$ (或其他参量的等效数值)。

另一个不同于平均表面粗糙度的重要参量是存在于局部的机械划痕。对于圆形试样加工的最后工序通常是去除所有由车床造成的沿圆周方向的划伤。宜在磨削之后对试样进行纵向抛光。在低倍(约20倍)下检查试样,不应有沿圆周方向的划痕和明显的加工痕迹。

如果在试样表面加工完成后进行热处理,则推荐在热处理后对试样表面进行抛光。如果不能抛光,则宜在真空环境或惰性气体保护条件下进行热处理,以避免试样发生氧化。建议去除试样的残余应力。

热处理应不改变被研究材料的显微组织。热处理及机加工的细节应在试验报告中注明。

6.2.5 尺寸检查

应在精加工完成后对试样的尺寸进行检查,采用的检查方法不应改变试样的表面条件。

6.2.6 存放及运输

试样制备好后,应保存以防止任何损伤(接触刮伤或氧化等)。建议采用单独的盒子或带封头的管保存试样。在某些情况下,应将试样存放在真空瓶或者放有硅胶的干燥器中。

应尽量减少对试样的运输。

在对试样进行标记时应特别注意。推荐在试样的两端标记试样,这样当试样断裂后半件试样也可以被识别出来。

7 试验程序

7.1 实验室环境

低周疲劳和蠕变-疲劳试验是一种非常复杂的试验。试验结果的质量与选取的试验方法及实验室环境都有很大关系。

试验应在以下合适的环境下进行:

- 恒定的室温及相对湿度;
- 最小限度的大气污染(如灰尘、化学蒸汽等);
- 无影响试验机控制和数据采集的外部电信号干扰;
- 最小限度的外部机械振动。

注:在测试某些材料(如铝合金)时,观察并记录相对湿度是极为重要的,因为湿度对疲劳寿命有重大影响。

7.2 试验机控制

试验过程中,伺服控制的应变峰值应不超过设定值的 $\pm 1\%$ 。

在长寿命疲劳(即,名义循环塑性可忽略不计,例如,大约 $10^6 \sim 10^7$ 个周次)的应变控制试验中,为了缩短试验时间,可转换试验控制模式,在更高的频率下进行力控制疲劳试验。在应变控制中开始的疲劳试验可获得稳定的应力应变响应,在这种情况下,循环塑性较小可忽略。在这种情况下,可将试验控制模式切换到力控制模式,并且应谨慎增加试验频率,以免因滞后效应而导致试样温度升高。在转换试验控制模式时,宜随时监测应变并在力控制模式下进行调整,以保证在最大应变和最小应变范围内应变极限偏差在 $\pm 0.5\%$ 以内。在转换试验控制模式时,宜参考 GB/T 3075 以获得更多的信息。

在循环中包含恒定应力(力)的蠕变疲劳试验中,施加力的指示峰值应保持在设定值的 $\pm 1\%$ 以内。

7.3 试样的安装

试样在安装时应尽量避免产生预应变。对于先前对好中的试验系统,建议采用位移控制,将试样的

一端夹在夹头上,移动作动器,使试样的另一端接触另一夹头。然后将试样在夹头的另一端保持较小的压缩预载(力控制)夹紧。接下来,装夹引伸计,当其输出归零后,可进行应变控制转换。特别是在高温测试中,通过采用防粘连化合物或对试样端部进行预氧化可帮助从夹具中取出样品。当力为零时,可能需要将引伸计重新归零。设定好引伸计的标距,并将其机械调零。如需要,建议通过机械调零装置或用手指调整标距长度使其尽可能接近于零(即在大约 $\pm 0.5\%$ 的测试范围内)。一旦获得“粗略”的零位,建议对引伸计重新进行电子置零。在处理易受腐蚀性侵蚀的试样时,宜戴上棉或亚克力防护手套。

7.4 循环波形-应变速率或循环频率

为了确定材料性能的趋势,通常采用不是 $R_e = -1$ 的应变比进行应变控制试验。图 8 显示了在 $R_e = 0$ 时测试期间的应力-应变滞回曲线。如图 8 所示,对于这种张力偏置的平均应变,平均应力的循环松弛趋向于零平均应力值。在这种情况下,建议仔细监测和记录此类应力-应变和平均应力信息,以便后续进行数据分析和确定材料趋势。当 $R_e = \infty$ 时,滞后回线表现出相似的行为,但在相反的应力意义上,当滞后回线在应力应变空间向上移动时,应力松弛趋向于较小的负值。

注:在 $R_e = 0.1$ 的条件下进行试验并不总能防止分叉屈曲,因为试验期间的循环平均应力松弛可能导致滞后环的下部受压,如图 8 中的应力应变响应所示。

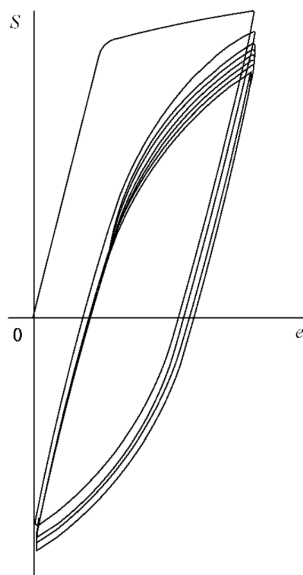


图 8 $R_e = 0$ 时, 0 至最大应变测试的应力-应变滞后回线

控制参量(应变)的波形应在试验过程中保持不变,试验研究目的是研究循环波形对于材料疲劳行为影响的试验除外。试验通常以恒定的总应变率进行,在 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内($0.05\% \text{ s}^{-1} \sim 5\% \text{ s}^{-1}$),这意味着一个三角形的循环形状。通常,在室温环境温度下可在 $0.01 \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$ 范围内使用正弦波,但不建议在高温下进行,因为这会导致应变速率的变化。

蠕变-疲劳循环通常由恒定的总应变率斜坡构成,该斜坡在拉伸和压缩方向上很可能不同,同时应力和/或应变驻留时间从几分钟到几十小时甚至几百小时不等。第 8 章对此做了进一步解释。

7.5 试验步骤

7.5.1 预测量

在试验开始时,建议在室温下在弹性范围内对试样反复施加循环力,以测定材料的弹性模量并确认测量系统(力及应变)工作的正确性。弹性模量的测量值与预期值的偏离宜不超过 $\pm 5\%$ 。

对于同一试验条件,建议通过检测温度从室温升高至试验温度(试验机在力控制模式下力值处于零

点)时引伸计的热应变对材料的平均热膨胀系数进行测量。这一系数的测量值与预期值的偏离宜不超过 $\pm 5\%$ 。

通常引伸计的安装是在室温条件下进行的,当到达试验温度时对其示值调零。在这种情况下,在高温试验中应对应变值的测量进行修正,因为引伸计的标距已经因为热膨胀而发生了改变。因此,在预试验修正时至少应对标距的热膨胀值进行记录。对于自动系统应使用修正后的标距长度用于在线控制及数据采集。

对于某些系统,特别是试验温度超过 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可能在试样处于热状态时安装引伸计,在这种情况下,不可能测量热膨胀系数。此时应通过可靠的方法测量实际的标距。

如果在高温下进行疲劳试验,建议:

- a) 在室温下预压试样,预压量等于金属线膨胀系数与室温与试验温度之差的乘积(即 $\alpha\Delta T$);
- b) 在试验温度下确定标距长度;
- c) 将引伸计归零,并在试验程序内补偿至试验温度下新建立的标距长度。

7.5.2 开始试验

对于明确的试验程序,选择前四分之一循环的方向是必要的。通常选择拉伸应力;对于感应加热的低循环疲劳试验,由于热感应的作用在前四分之一循环的方向是压应力。

在应变控制的试验中,通常的程序是在升温 and 弹性模量检查后将控制方式由力值转为应变。试验机应在没有过冲的情况(即超过要求的应变水平的额外应变)下完成这一转换。过冲会对后续的试验产生影响。

试验开始时的实际应变半幅值与控制应变半幅值的差值应不超过控制应变半幅值的 5% 。为了达到7.2规定的应变水平,应对应变量进行调整,整个调整过程应在前10个循环或失效循环数的 1% (取其小者)内完成。

对于由于疏忽或者其他意外引起的试验中止,在恢复试验之前应确认:

- 停止过程中并未损坏试样(即弯曲);
- 引伸计未发生滑动;
- 意外停止前应力是连续的;
- 模量与意外停止前相同;
- 应变限值与意外停止前相同。

可以通过分析试验数据对以上情况进行确认。上述情况下允许在保证没有过冲的条件下恢复试验。

7.6 试样数量

推荐试样数量至少为8件;得到的应变幅—循环次数曲线横坐标最少宜覆盖三个数量级。

7.7 试验记录

7.7.1 应力-应变滞后回线

对于X-Y记录系统在试验开始阶段,应连续记录由应变控制反馈的原始应力-应变滞后回线。然后,在试验期间应定期记录这一曲线。数据记录频率的选择与预期的试验循环数有关。通常采用的数据记录组包括试验的前10个循环,随后按照对数增长(如20、50、100、200、500等),每十倍的循环采集3个滞后回线。

对于自动数据采集系统,可以通过预先设定好循环数的程序或者根据两个参量(应力和应变)的变化量制定程序完成采集循环数的选取。不论采用哪种记录方式,给定的数据采样速率均应能清晰描述滞后回线(见5.4.1)。

7.7.2 数据采集

如果试验设备允许,记录随时间变化的应力、应变和温度,以及蠕变-疲劳试验中的保载时间,如第8章所述。如无法做到,至少应记录应力、应变及温度的峰值,以便根据7.8确定试样失效。

7.8 试验中止

当达到选定的终止试验条件且试验机配备条件控制停机设备时试验将终止。如果没有这一装置,应采用其他可行的停止试验机的方法,如当力值达不到某一力值门槛(一般而言,这是一个取决于幅值的满量程的分数)时或者使用控制信号当控制信号与反馈信号达到某一差值时终止试验。

值得注意的是,对于某些试验预选停机应力的方法是不恰当的,试验不宜自动停止,例如图8所示的连续循环软化情况。在这种情况下,推荐在确定条件应力前先监测材料的反应。实际上,可能在试验结束后再确定失效的循环数。

如果试验在试样断裂前自动停机,在卸下试样前,应对试验数据进行检查以确定是否达到失效判据。如果发现停机过早,可继续恢复试验(见7.5.2)。如果达到失效判据,应选择力值控制模式并将力降到零,冷却试样后再将其卸下。如果试样已经断裂,通常选择位移控制模式冷却试样后再将其卸下。

对于高温试验,为了限制试样的氧化及便于将来对断面的显微观察,应在试验终止后立即关闭高温炉。如果试验在试样断裂前终止,应尽量避免在加热设备冷却过程中的试样过载。

注:后一种做法尤其适用于电子-机械试验机。

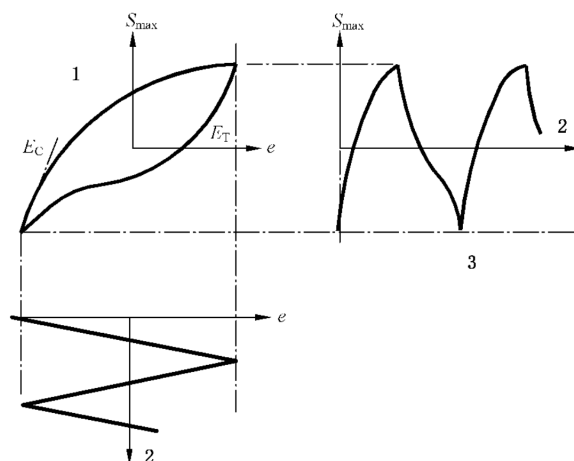
7.9 失效判据

对于失效的定义有很多种。这可能取决于对疲劳试验结果的解释以及试验材料的性质。对于失效判据的考虑通常基于某些现象的产生、发展和加强,而这些可以被监测到的现象预示着试样将会发生严重损坏或瞬时失效。

疲劳寿命 N_f 可由符合下述失效判据的循环数定义:

- 最大拉伸应力相对于试验确定的水平发生某一百分数的变化;
- 在滞后回线上拉伸与压缩弹性模量的比值发生一定程度的改变;通常 $E_T/E_C=0.9$ 是评定失效的标准(见图9);
- 试样完全断裂为两部分。

注:对上面定义的失效试样进行试验后检查将得到很多有用信息。



标引序号说明:

- 1——应力-应变滞后环;
- 2——时间;
- 3——应变控制下的应力-时间响应。

图9 对于确定失效时拉伸弹性模量与压缩弹性模量的定义

建议记录与试验机框架相关的裂纹萌生位置,即试样开裂的象限。此特性将有助于随后确定可能的试验机或夹具的不同轴。

对于一组试验所使用的失效判据应在报告中注明。图 10 给出了应力减小失效的实例,在这种情况下, N_f 被定义为在拉伸应力-循环次数曲线上应力值急剧下降 $x\%$ 时的循环次数。通常 x 的值为 10。然而, x 值的典型范围为 $2\% \sim 30\%$ 。

失效循环的次数通常从上边界应力或上边界力或上边界力的范围进行评估。对于引伸计标距以外断裂的情况,上边界应力/最大拉应力会有 $x\%$ 的增加。

这一失效判据与在试样上出现的一条(或多条)肉眼可见的裂纹有关。一般而言,裂纹面积与试样原始横截面的比值与应力下降的比值大小相当。

对于完全断裂或部分断裂的试样,应确定断裂面或裂纹相对于标距长度的位置,并应在试验结果报告中注明。

为了确认试验的有效性应对试样进行试验后检查。这意味着一方面检查试样发生失效或出现主裂纹的位置,另一方面确认是否存在可能导致初始失效或过早失效的缺陷或异常(如表面缺陷、孔洞、夹杂、引伸计留下的过大的卡痕或者由于对中问题引起的试样弯曲)。

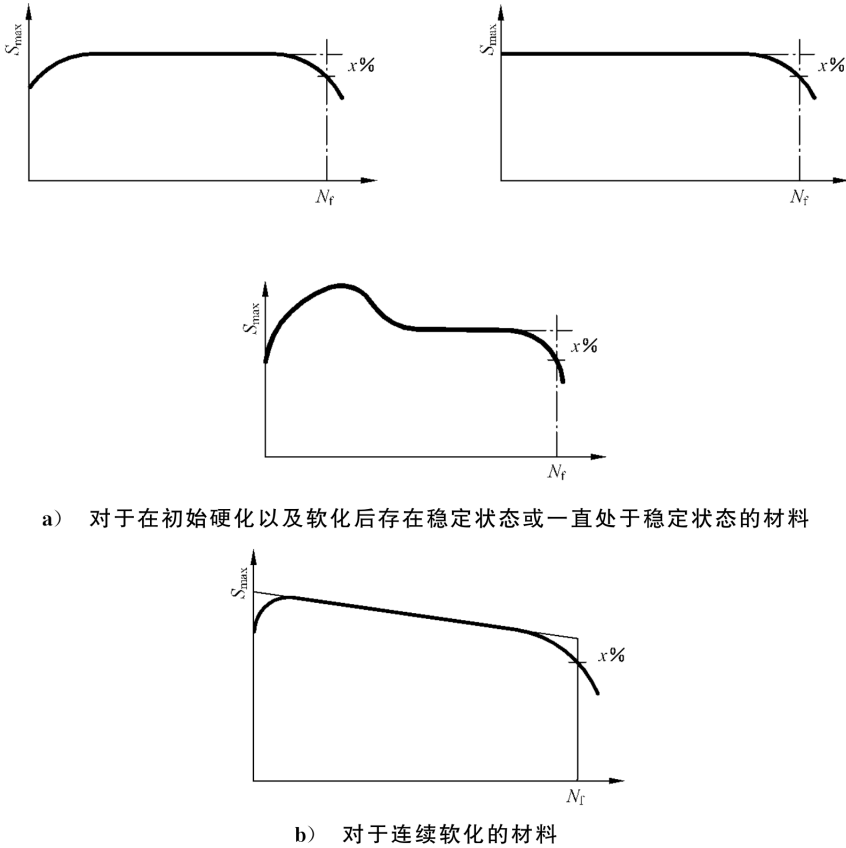


图 10 基于应力的终止试验条件

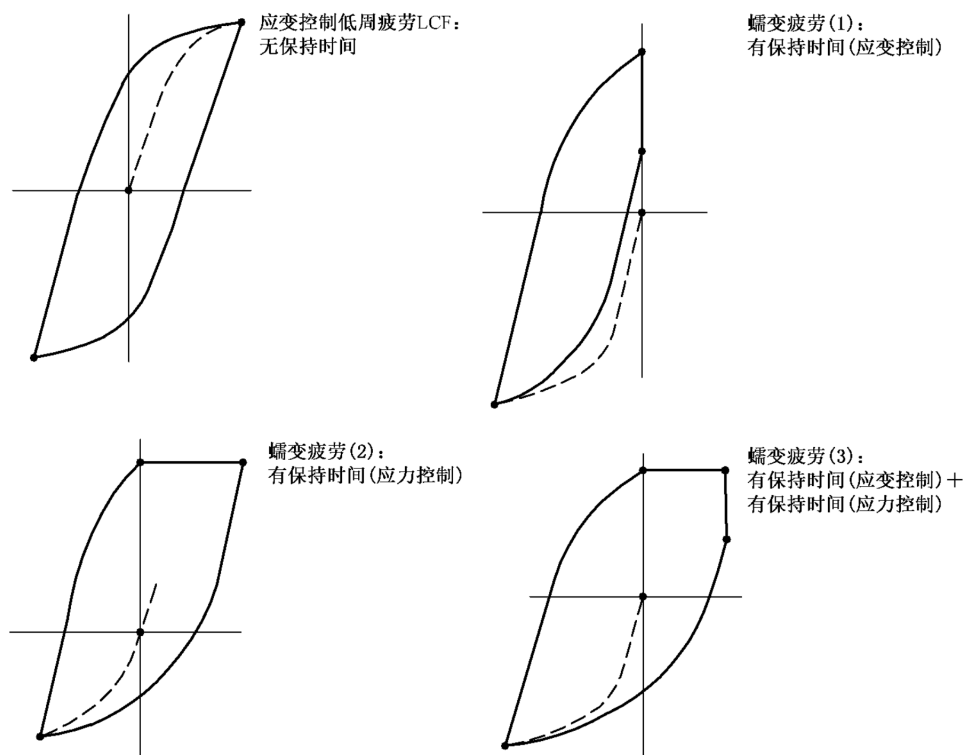
8 高温应变控制蠕变-疲劳试验

本文件提供了一种在均匀温度下循环过程中恒定应力和/或恒定应变下保持一定时间的应变控制的蠕变疲劳试验方法。

在许多实际的结构部件中,蠕变和低周疲劳通常是涉及热循环的使用条件的结果,热循环包括

保持(或停留)期,部件处于某种恒定的应力或应变状态,在此期间可能发生蠕变或单调应力松弛。机械循环与停留期的结合称为蠕变疲劳。图 11 给出了典型低周疲劳和三种蠕变疲劳循环的例子(参照 GB/T 38822)。

进一步的模拟条件包括机械力和温度循环以及适当的保持。这种组合被称为热机械疲劳(TMF),参照 GB/T 33812。



注: 全部滞后环保持在所有应变极限之内以预防发生应变棘轮。

图 11 低周疲劳和蠕变疲劳滞后回线示例

9 结果表达

9.1 数据记录(见 7.7)

应记录 7.7.1 规定的记录频率下的峰值应力、应变范围与循环次数的关系和应力-应变滞后回线,以及下述两种情况发生时的循环次数:

- 试样完全断裂;
- 拉伸应力第一次下降到由 7.8 选定的条件值以下。

9.2 $R_e = -1$ 下的低周疲劳试验结果分析

9.2.1 不同类型应变值的区别

不同类型的应变值如下所示:

e_{\max} 和 e_{\min} 值是实际测量值, Δe_t 是应变范围(见 3.10);

Δe_e 由 $\Delta S/E$ 计算得到;

对于没有保持时间的连续循环试验 Δe_p , 由 $\Delta e_t - \Delta e_e$ 计算得到。

9.2.2 疲劳寿命的测定(见 7.9)

N_f 由 7.9 a)~c) 给出。

9.2.3 应力-应变及应变-疲劳寿命关系

表 6~表 8 列出了由拉伸试验(参考材料数据)及低循环疲劳试验[应力-应变曲线(前 1/4 循环),在 $N_f/2$ 下的循环应力-应变曲线,疲劳寿命 N_f]测定的材料性能。

表 6 拉伸试验——应力-应变值

性能	说明	关系式
E	一组试样测量的 $E_{1/4}$ 的平均值	
n	拉伸应变硬化指数	$\lg\sigma_a - \lg\Delta\epsilon_p/2$ 曲线的斜率
K	强度系数。在 $\lg\sigma_a - \lg\Delta\epsilon_p/2$ 曲线上 $\epsilon_{pa} = 1$ 对应的应力截距	$\sigma_a = K(\Delta\epsilon_p/2)^n$ 曲线的斜率

表 7 循环试验——循环应力-应变值(稳定循环)

性能	说明	关系式
σ'_y	循环屈服强度(偏置 0.2%)	
n'	$\lg\sigma_a - \lg\Delta\epsilon_p/2$ 曲线的斜率	
K'	在 $\lg\sigma_a - \lg\Delta\epsilon_p/2$ 曲线上 $\epsilon_{pa} = 1$ 对应的应力截距	$\sigma_a = K'(\Delta\epsilon_p/2)^{n'}$
组合公式		$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}$

表 8 低循环疲劳试验——疲劳寿命

性能	说明	关系式
σ'_f	在 $\lg\sigma_a - \lg 2N_f$ 曲线上 $2N_f = 1$ 对应的应力截距	$\sigma_a = \sigma'_f(2N_f)^b$
b	$\lg(\Delta\epsilon_e/2) - \lg 2N_f$ 曲线的斜率(指定 $2N_f$ 范围内)	
ϵ'_f	在 $\lg(\Delta\epsilon_p/2) - \lg 2N_f$ 曲线上 $2N_f = 1$ 对应的塑性应变截距	$\Delta\epsilon_p/2 = \epsilon'_f(2N_f)^c$
c	$\lg(\Delta\epsilon_p/2) - \lg 2N_f$ 曲线的斜率(指定 $2N_f$ 范围内)	
总应变幅	$\Delta\epsilon_t/2 = \Delta\epsilon_e/2 + \Delta\epsilon_p/2$ $\Delta\epsilon_t/2 = (\sigma'_f/E)(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c$	

当 $R_e = -1$ 时,疲劳结果通常用于表示材料的循环应力-应变关系和应变-寿命关系。例如,总应变振幅用弹性应变和塑性应变分量表示,如式(1)所示:

$$\Delta\epsilon_t/2 = \Delta\epsilon_e/2 + \Delta\epsilon_p/2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

并认识到循环应力-应变关系,如式(2)所示:

$$\Delta\sigma/2 = K'(\Delta\epsilon_p/2)^{n'} \quad \dots\dots\dots (2)$$

替换后,如式(3)所示:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left[\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right]^{\frac{1}{n'}} \dots\dots\dots (3)$$

对于总应变-寿命关系中的双对数线性部分,后续可以写出 Coffin-Manson 关系,如式(4)所示:

$$\Delta \epsilon_p / 2 = \epsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (4)$$

对于总应变的 Basquin 或弹性应变寿命对数线性部分,可按式(5)写出:

$$\Delta \epsilon_e / 2 = (\sigma'_f / E) (2N_f)^b \dots\dots\dots (5)$$

当组合这些对数线性关系时,如式(6)所示:

$$\Delta \epsilon_t / 2 = (\sigma'_f / E) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (6)$$

或者类似的应变-寿命关系。

在上述本构关系中,应注意的是应变和应力的名称是真应力和真应变,并且这些在约 10% 的总应变值时基本上等于工程应力和工程应变。还应注意,塑性应变和非弹性应变的术语可以互换使用。

9.3 蠕变-疲劳试验结果分析

蠕变疲劳数据的分析在本文件中没有详细讨论,因为没有普遍接受的方法。一般而言,分析方法反映了新材料开发、产品材料性能确认和/或零部件模拟的具体需要。

10 试验报告

10.1 概述

试验报告应包括试验目的、材料信息、试验方法、试验条件、试验结果以及在试验过程中出现的任何异常或中断。

这些信息包括 10.2~10.8 所示内容。

10.2 试验目的

研究的目的。

10.3 材料

材料的报告内容包括:

- 牌号;
- 化学成分;
- 名称;
- 热处理制度;
- 显微组织/硬度;
- 在试验温度下的力学性能。

10.4 试样

试样图包括:

- 取样位置及方向;
- 最终加工状态及表面粗糙度 Ra 。

10.5 试验方法

试验设备的报告内容包括:

- 机架承载能力: \pm ___ kN 校准: ___ kN;
- 作动器类型(液压、电子机械等);
- 作动器的承载能力: \pm ___ kN;
- 控制类型(模拟、数字、混合)。

注: 混合控制器具有模拟的伺服环及数字的操作界面。

力值链的报告内容包括:

- 夹具类型(手动或液压预紧、描述或图片);
- 在试验力下确认对中及弯曲等级的方法;

加热系统的报告内容包括:

- 高温炉类型(电阻、辐射、感应等);
- 在试样标距部分的轴向温度梯度预期值: ___ °C;
- 试验温度及其波动范围: ___ °C \pm ___ °C;
- 热电偶类型;
- 升温时间、保温时间及试验时间。

引伸计的报告内容包括:

- 使用的描述(图表或图片);
- 标距: ___ mm;
- 量程范围: \pm ___ mm;
- 校准程序及结果;
- 最近一次校准数据: _____。

10.6 试验条件

试验条件的报告内容包括:

- 轴向应变范围: _____;
- 应变比 $R_e (= e_{\min} / e_{\max})$: _____;
- 波形: _____;
- 应变速率或频率: _____;
- 前 1/4 循环方向(拉伸或压缩);
- 细说明停留时间和所采用的控制策略。

10.7 试验结果表述

10.7.1 单根试样试验结果表述(见 8.2.2)

对于单根试验:

- 应变量的数据表(最大、最小、幅值),真应力(最大、最小、幅值)以及根据表 9 得到的塑性应变与循环次数的关系;
- 在半对数坐标和线性坐标下拉伸及压缩应力与循环次数的关系曲线;
- 在试验开始阶段、接近中值寿命以及失效阶段的滞后回线。

注: 通常使用半对数坐标。

表 9 在低循环疲劳试验中应变和应力与循环次数的关系

材料名称:_____ 试样编号:_____ 总工程应变半幅值:_____

试验温度:_____ 弹性模量 E :_____ 工程应变速率:_____

循环数	总工程应变 %			工程应力 MPa			工程塑性应变 %
	最大	最小	幅值	最大	最小	幅值	幅值

10.7.2 一组试样试验结果表述

对于一组试样,试验结果的表述包括:

- 一个数据表,如表 10 试验结果的摘要(按照应变半幅值的降序排列);
- 总工程应变半幅值 e_{ta} 与循环次数的关系曲线(双对数坐标);
- 中值疲劳寿命的工程应力半幅值 S_a 与循环次数的关系曲线(双对数坐标);
- 应力半幅值 S_a 和 $S_{a1/4}$ 与 e_{ta} 和 $e_{ta1/4}$ 的关系曲线(双对数坐标),用于确定 K 、 n 、 K' 、 n' 的值;
- 总应变、弹性应变、塑性应变半幅值与循环次数的关系曲线(双对数坐标),用于确定 S'_f 、 b 、 e'_f 、 c 的值。

为了得到参量的关系,用于得到系数的试验数量应增加到合适的范围。

曲线关系的实例如图 B.1~图 B.4 所示。

表 10 对于一组试样试验结果的摘要

应变半幅值	失效的循环次数	在中值寿命的应力半幅值
e_{10}	$N_{f,10}$	S_{10}
e_9	$N_{f,9}$	S_9
e_8	$N_{f,8}$	S_8
e_7	$N_{f,7}$	S_7
e_6	$N_{f,6}$	S_6
e_5	$N_{f,5}$	S_5
e_4	$N_{f,4}$	S_4
e_3	$N_{f,3}$	S_3
e_2	$N_{f,2}$	S_2
e_1	$N_{f,1}$	S_1

10.8 存储于低循环疲劳数据库的数据

通过对低循环疲劳试验结果的提炼建立一个使用方便且界面友好的数据库是行之有效的。

这一数据库包括但不限于以下几点：

- a) 单根试样试验结果摘要表(表 9)；
- b) 一组试样试验结果摘要表(表 10)；
- c) 试验结果分析摘要表(表 11)。

表 9、表 10 和表 11 的生成可以采用电子计算机及电子制表软件，这些软件可以通过网络连接或者磁盘对数据库进行扩充(数据文件通常编译为 ASC II 码)。

表 11 低循环疲劳试验结果分析

日期：_____

数据源：_____

材料(牌号)	
化学成分	
热处理	
备注	
试验条件	
试验目的	
材料名称	
取样位置	
试样类型	
试验温度	
试验机类型	
控制方式	
波形	
频率或应变速率	
失效判据	
试样数量	
循环应力-应变性能(稳定循环)	
S'_y 循环屈服强度(偏置 0.2%)	
n' 循环应变硬化指数	
K' 循环强度系数	
疲劳性能	
σ'_f 疲劳强度系数	
b 疲劳强度指数	
ϵ'_f 疲劳延性系数	
c 疲劳延性指数	

附 录 A
(资料性)
测量不确定度

A.1 总则

A.1.1 评估测量不确定度是非常可取的,但不是本文件的强制性要求。

A.1.2 ISO/IEC 17025 要求所有校准和检测实验室提供不确定度估计值或估算与其测试结果相关的不确定度的程序。客户也可能要求测量不确定度的信息,或者检测实验室本身可能希望更好地了解测试程序的哪些方面对试验结果的影响最大,以便对这些方面进行更密切的监控或改进。

A.1.3 如果有可用信息,宜根据 GUM 估计不确定度。所有使用的术语宜符合 GUM 和 VIM。

A.1.4 测量不确定度定义为“非负参数,根据所使用的信息,表征被测量物的量值的分散性”。

A.1.5 根据 GUM,测量不确定度通常包括许多分量。其中一些可通过一系列测量的数值的统计分布对测量不确定度进行 A 类评估,并可通过标准偏差进行表征。所有分量,可通过测量不确定度的 B 类评定进行评定,也可通过标准偏差进行表征,并根据其他信息从概率密度函数进行评定。

对于给定的一组信息,宜了解测量不确定度与归因于被测对象的规定量值相关。对该量值的修改很可能导致相关不确定度的修改。

A.2 轴向应力(或应变)控制试验的不确定度评估指南

A.2.1 建议识别、排列和列出所有对报告的疲劳寿命 N_f 、结果的不确定度(直接或间接)有贡献的重要来源。注意该清单与试验程序、试样、仪器、实验室环境以及可能的操作人员有唯一的关联。这意味着,每次来源发生变化时,均宜仔细重新考虑该列表。

A.2.2 例如,在轴向应力控制(或应变控制)疲劳试验中,设想在 A.2.1 中识别的与疲劳寿命有关的输入不确定度的重要来源将(按重要性顺序)包括:

- a) 由于在所施加的力的方向与试样轴线之间的不对中而导致试样中的叠加弯曲的不确定度;
- b) 控制施加应力(或应变)的不确定度;
- c) 试验温度的不确定度(在高温试验中);
- d) 与选定的失效定义相关的不确定度。

A.2.3 如果有信息,建议根据基于 GUM 的协议评估不确定度。包括 A.2.2 中确定的所有参数,在进行测试工作之前,实验室和客户之间宜达成一致。疲劳试验中测量不确定度的估算方法示例见参考文献。

A.2.4 评估不确定度可能需要进行特定的测量和/或额外的疲劳试验,还可能涉及到进行蒙特卡罗模拟。在开展工作之前,宜与客户商定此类要求的考虑因素。

A.2.5 报告的不确定性还包括置信水平和说明计算方法的声明。

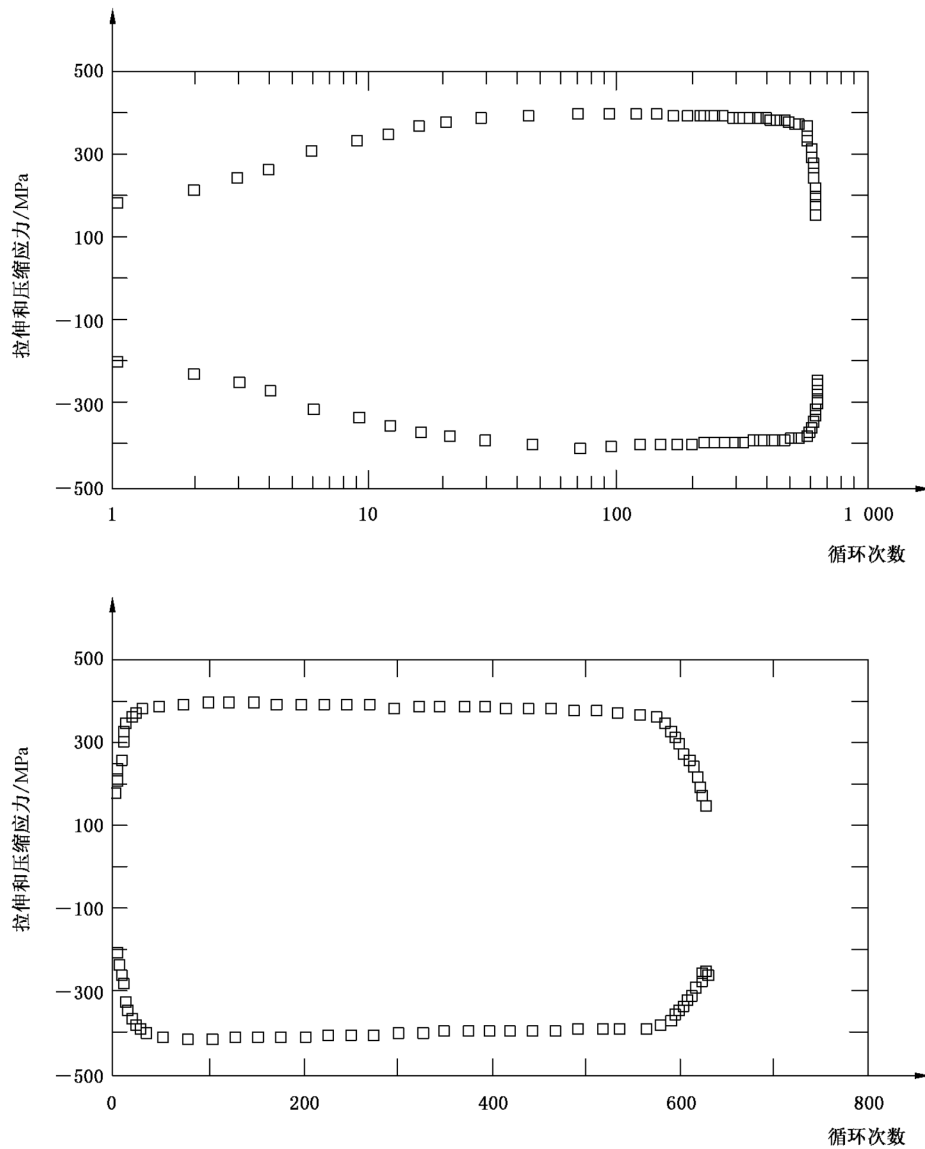
A.2.6 宜认识到有些情况下,由于缺乏用于不确定度计算的信息,可靠的不确定度评估可能无法获得。

附录 B

(资料性)

试验结果的绘图表述实例

图 B.1~图 B.4 给出了试验结果的绘图表述实例。



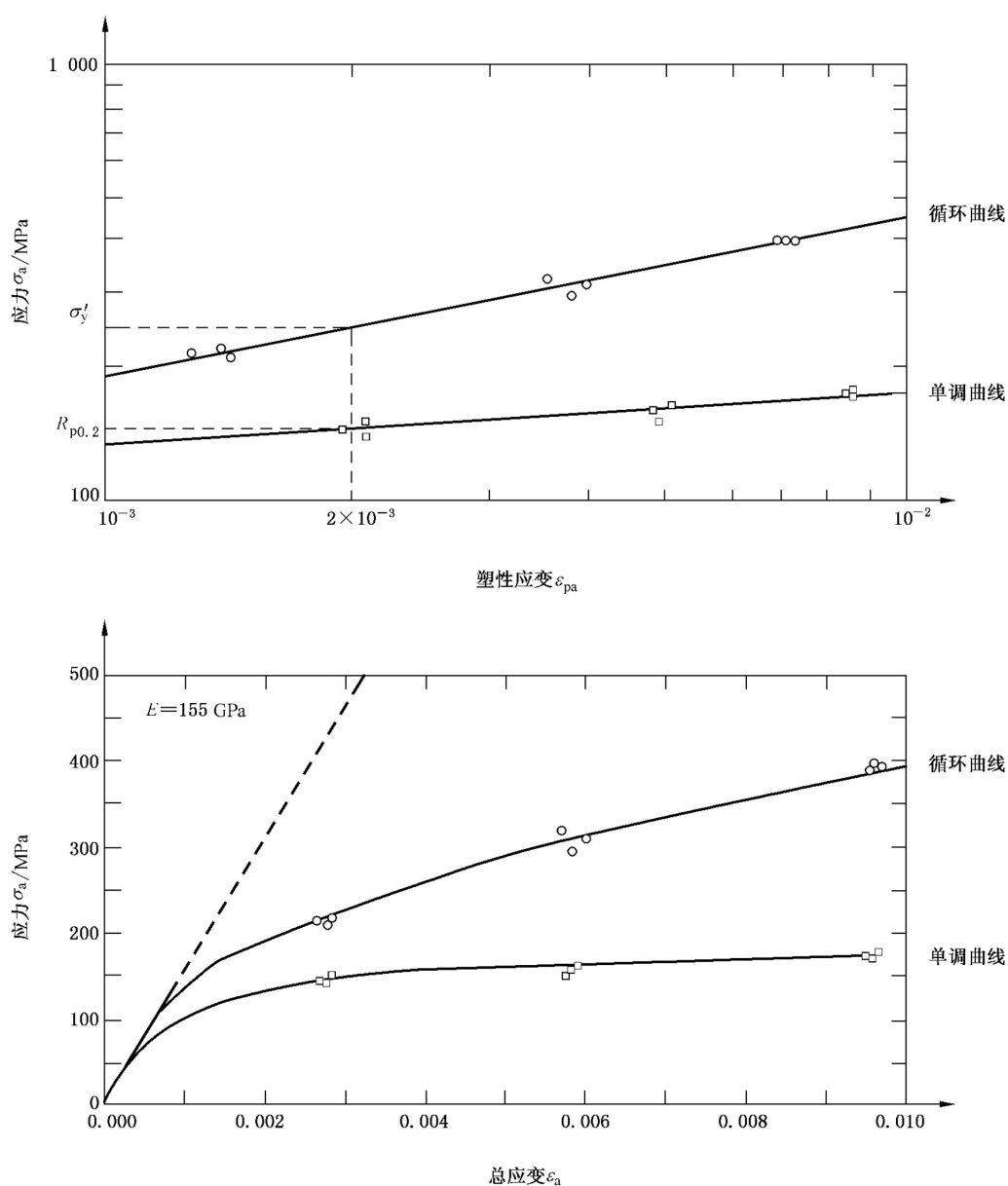
材料:022Cr17Ni12Mo2(316 L)

温度:550 °C

试样编号:5E47

总应变半幅值:0.47%

图 B.1 拉伸和压缩应力与循环次数的关系曲线(半对数坐标和线性坐标)



材料: 022Cr17Ni12Mo2(316 L)

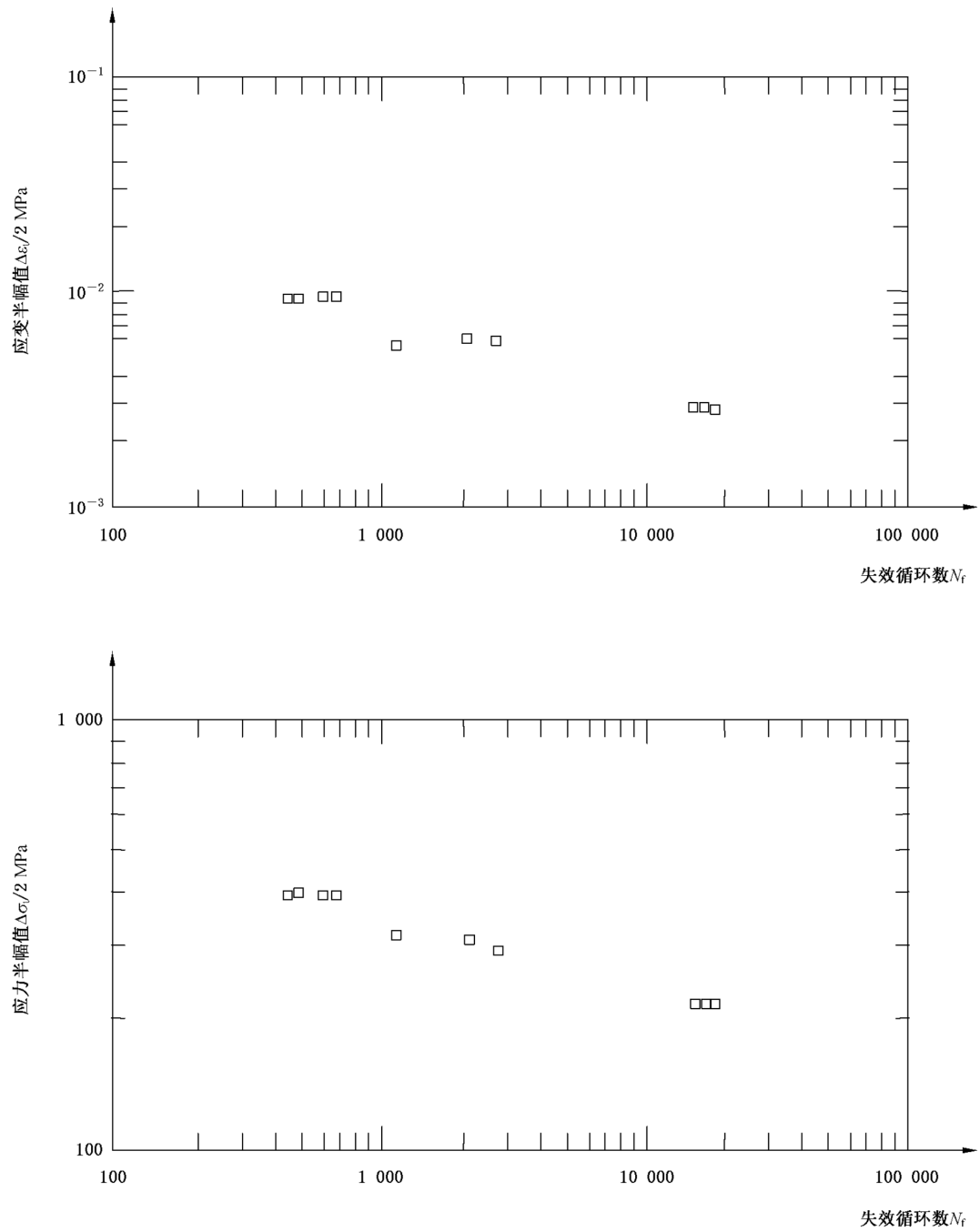
温度: 550 °C

拉伸应力-应变曲线: $\sigma_{a1/4} = K(\epsilon_{pa1/4})^n$ ($K = 316; n = 0.1267$)
 $(1.9 \times 10^{-3} < \epsilon_{pa1/4} < 8.5 \times 10^{-3})$

循环应力-应变曲线: $\sigma_a = K'(\epsilon_{pa})^{n'}$ ($K' = 241.8; n' = 0.3674$)
 $(1.3 \times 10^{-3} < \epsilon_{pa} < 7.2 \times 10^{-3})$

总应力-应变曲线: $\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}$

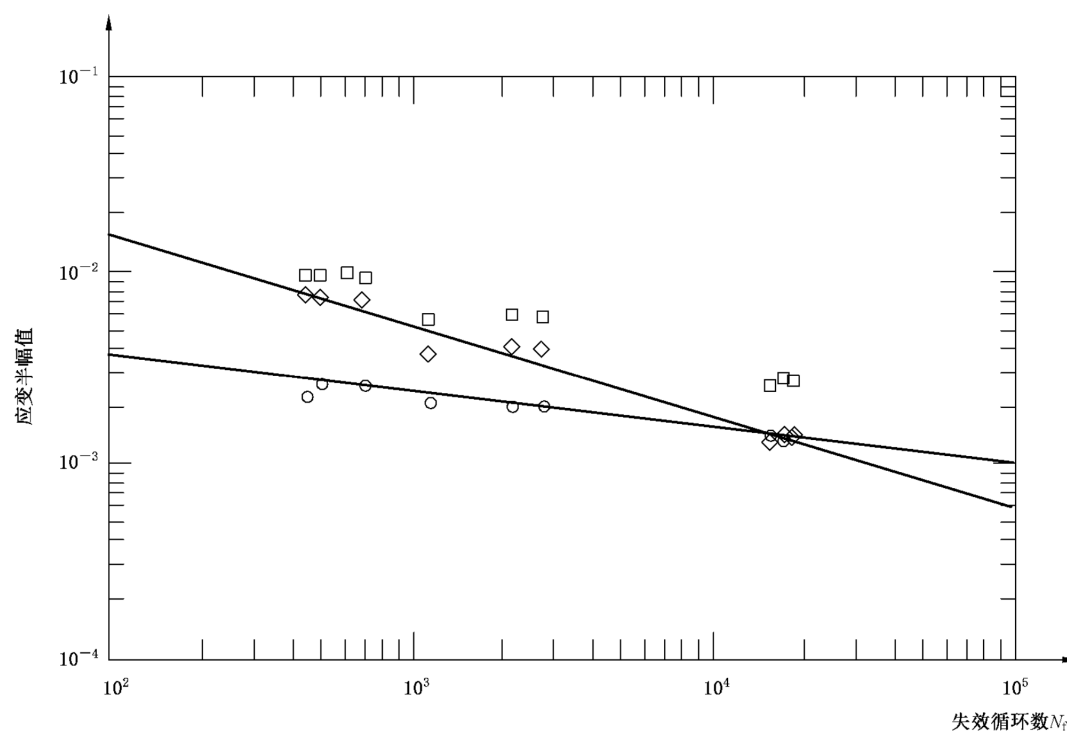
图 B.2 拉伸和循环应力-应变曲线



材料:022Cr17Ni12Mo2(316 L)

温度:550 °C

图 B.3 在 $N_f/2$ 点处应变半幅值($\Delta\epsilon_t$)/2 和应力半幅值($\Delta\sigma$)/2 与 N_f 的关系曲线



标引序号说明：

□ — $\Delta\epsilon_t/2$ ；

◇ — $\Delta\epsilon_p/2$ ；

○ — $\Delta\epsilon_e/2$ 。

材料：022Cr17Ni12Mo2(316 L)

温度：550 °C

图 B.4 总应变、塑性应变、弹性应变半幅值与 N_f 的关系曲线

参 考 文 献

一般引用

- [1] GB/T 33812 金属材料 疲劳试验 应变控制 热机械疲劳试验方法(GB/T 33812—2017,ISO 12111:2011,MOD)
- [2] GB/T 38822 金属材料 蠕变-疲劳试验方法
- [3] ISO 377,Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing
- [4] ISO 1099,Metallic materials—Fatigue testing—Axial force-controlled method
- [5] ISO 3785,Metallic materials—Designation of test specimen axes in relation to product texture
- [6] ISO 4965-1,Metallic materials—Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing—Part 1:

试验系统

- [7] ISO 4965-2,Metallic materials—Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing—Part 2: Dynamic calibration device (DCD) instrumentation
- [8] ISO/IEC 17025,General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- [9] AFNOR A 03-403:1990,Metal products—Low-cycle fatigue test [In French]
- [10] ASTM E 606-12,Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing
- [11] ASTM/STP 465,Manual on Low Cycle Fatigue Testing,Ed.R.M.Wetzel,L.F.Coffin,ASTM,1969
- [12] ASTM/STP 770,Low-Cycle Fatigue and Life Prediction,Ed.C.Amzallag,B.N.Leis,P.Rabbe,ASTM,1982
- [13] ASTM/STP 942,Low-cycle fatigue,Ed.H.D.Solomon,G.R.Halford,L.R.Kaisand,B.N.Leis,ASTM,1988
- [14] BS 7270:2006,Method for constant amplitude strain controlled fatigue testing
- [15] JCGM 102,Guide to the expression of uncertainty in measurement.(GUM 1995 with minor corrections),BIPM
- [16] JCGM 200,International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM),BIPM
- [17] JIS Z 2279:1992,Method of high temperature low cycle fatigue testing for metallic materials [In Japanese]
- [18] Mitchell,M.R.,Fundamentals of modern fatigue analysis for design,ASM Handbook,Fatigue and Fracture,Volume 19,Chapter 18,1997
- [19] Fatigue at high temperature,Ed.R.P.Skelton,Elsevier Science Publishers,1983
- [20] Boller,C.,Seeger,T.,Materials data for cyclic loading,Materials Science Monograph 42,Elsevier Science Publishers,1987
- [21] Fatigue design handbook AE-10,Society of Automotive Engineers,1988
- [22] Thomas,G.B.,Varma,R.K.,Review of the BCR/VAMAS low-cycle fatigue intercomparison programme,Harmonisation of testing practice for high temperature materials,Elsevier Science Publishers,1992
- [23] Verrilli,M.J.,Ellis,J.R.,Swindeman,R.W.,Current activities in standardization of high temperature low-cycle fatigue testing techniques in the United States,Harmonisation of testing practice for high temperature materials,Elsevier Science Publishers,1992

[24] Kitagawa, M., Yamaguchi K., Japanese activities in VAMAS low-cycle fatigue round robin tests, Harmonisation of testing practice for high temperature materials, Elsevier Science Publishers, 1992

[25] Kandil, F. A. et al., (eds.) The UNCERT manual of codes of practice for the determination of uncertainties in mechanical tests on metallic materials. ISBN 0-946754-41-1, Issue 1, National Physical Laboratory, September 2000. Available online cost-free at: <http://www.npl.co.uk>.

试样

圆形试样

[26] Chaboche, J. L., Policella, H., Caractérisation expérimentale des matériaux sous chargement cyclique à haute température (Experimental characterization of materials under cyclic loading at high temperature), Recherche Aéronautique, 1977-5, pp.307-326

[27] Bressers, J., Strain measurement in high temperature fatigue, Proceedings of CEC Workshop at the JRC Petten Institute for Energy (NL), Elsevier Science Publishers, 1985

[28] Ellison, E. G. Lohr, R. D., The extensometer-specimen interface, Proceedings of HTMTC Symposium “Techniques for High Temperature Fatigue Testing”, UKAEA, Springfield, 1983

[29] Sumner, G., Uniaxial Testing Machines and Techniques for Fatigue, HMSO, London, 1982, pp.158-170

[30] Shiffers, H., Experimental determination of errors in LCF strain measurement caused by specimens with ridges, Proceedings of CEC Workshop at the JRC Petten Institute for Energy (NL), Elsevier Science Publishers, 1985

[31] Chaboche, J. L., Calcul d'une éprouvette de traction-compression en viscoplasticité cyclique (Calculations for a tensile-compressive specimen cycled under viscoplastic conditions), Rapport Technique No.37, ONERA, Dec.1981

板状试样

[32] Miller, G. A., Reemsnyder, H. S., Strain-cycle fatigue of sheet and plate steels—Part I : Test method development and data presentation, SAE Paper 830175, Society of Automotive Engineers, 1983

[33] Miller, G. A., Reemsnyder, H. S., Strain-cycle fatigue of sheet and plate steels—Part II : Some practical considerations in applying strain-cycle fatigue concepts, SAE Paper 830173, Society of Automotive Engineers, 1983

[34] Miller, G. A., Reemsnyder, H. S., Strain-cycle fatigue of sheet and plate steels—Part III : Tests of notched specimens, SAE Paper 830173, Society of Automotive Engineers, 1983

[35] Miller, G. A., Interlaboratory study of strain-cycle fatigue of 1, 2 mm thick sheet specimens, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol.13, 5, Sept.1985, pp.344-351

[36] Akihiro Higashi, Kohji Kariya, Norio Kawagoshi, Qiang Chen and Masahiro Oto” Effect of Microstructure on Fatigue Properties of Al Alloys”, Advanced Materials Development and Performance (AM-DP2011), Int.Jol.Modern Physics; Conference Series, Vol.6, 2012, pp.300-305

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法
GB/T 26077—2021

*

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.org.cn

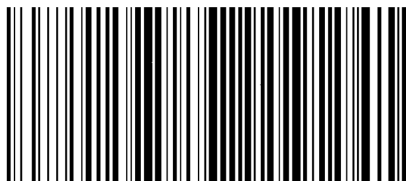
服务热线: 400-168-0010

2021年4月第一版

*

书号: 155066 · 1-67328

版权专有 侵权必究



GB/T 26077-2021



码上扫一扫 正版服务到