



中华人民共和国国家标准

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 12106:2003, MOD)

2011-01-10 发布

2011-10-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

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	2
5 设备	4
6 试样	7
7 试验程序	13
8 数据处理	16
9 试验报告	17
附录 A (资料性附录) 对中检查方法实例	21
附录 B (资料性附录) 试验结果的绘图表述实例	22

前 言

本标准修改采用国际标准 ISO 12106:2003《金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法》(英文版)。

本标准根据 ISO 12106:2003 重新起草,根据我国的实际情况,本标准在采用国际标准时进行了修改和补充。这些技术性差异用垂直单线标识在它们所涉及的条款的页边空白处。

本标准结构和技术内容与 ISO 12106:2003 基本一致,根据我国情况在以下几方面进行了修改:

- 删去了国际标准的前言;
- “本国际标准”一词改为“本标准”;
- 用小数点“.”代替作为小数点的“,”;
- 规范性引用文件中采用国家标准代替相应国际标准并新增加 6 项国家标准和检定规程;
- 增加部分试验术语的文字定义及解释;
- 更改对中检查的间隔周期;
- 表面粗糙度用 R_a 代替 R_z ;
- 采用 E^* 做为数据处理的推荐弹性模量。

本标准的附录 A 和附录 B 是资料性附录。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:钢铁研究总院、冶金工业信息标准研究院。

本标准起草人:刘涛、高怡斐、董莉。

引 言

机械结构的设计应考虑疲劳载荷条件的影响。在某些工业领域(如核电、航空、机械工程),研究材料在反复应变控制条件下(指低循环疲劳)出现循环塑性时的行为是必要的。

为了明确不同试验室试验数据的可靠性和一致性,应对遵从本国家标准某些关键点的试验数据进行收集。

本国家标准包括金属材料疲劳性能试验结果的产生及解释。

金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法

1 范围

本标准规定了金属材料轴向应变控制疲劳试验的定义、符号、试验设备、试验程序、数据处理和试验报告。

本标准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。

本标准也可用于指导在其他条件下进行的疲劳试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 12160 单轴试验用引伸计的标定(GB/T 12160—2002, ISO 9513:1999, 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 轴向加力疲劳试验机动态力校准

JJG 141 工作用贵金属热电偶检定规程

JJG 351 工作用廉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

本标准采用下列术语和定义。

3.1

真应力 true stress

σ

瞬时力除以标距内的瞬时横截面积。

$\sigma = F/A$ 或 $\sigma = S(1+e)$, 式中 S 为工程应力 F/A_0 , e 为工程应变 $\Delta L/L_0$ 。

注:当真应变变量小于 10% 时,真应力近似等于工程应力。

3.2

标距 gauge length

引伸计测量点之间的距离。

3.3

真应变 true strain

ϵ

标距瞬时增量除以标距瞬时长度的积分值。

$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L}$ 或 $\epsilon = \ln(1+e)$, 式中 e 为工程应变 $\Delta L/L_0$, L 为标距的瞬时长度。

注:当真应变变量小于 10% 时,真应变近似等于工程应变。

3.4

循环 cycle

应变-时间函数上周期重复的最小单元。

3.5

最大值 maximum

变量在一个循环内的最大代数值。

3.6

最小值 minimum

变量在一个循环内的最小代数值。

3.7

平均值 mean

变量最大值与最小值代数和的一半。

3.8

范围 range

变量最大值与最小值的代数差。

3.9

幅值 amplitude

变量范围的一半。

3.10

疲劳寿命 fatigue life

N_f

达到失效的循环数 N 。

注：在 7.8 中有对于失效判据定义的实例，所使用的失效判据应在报告中注明。

3.11

滞后回线 hysteresis loop

在一个循环内应力-应变的封闭曲线。

4 符号和说明

4.1~4.3 给出了本标准使用的符号和相应的说明。

4.1 试样

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	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_t	试样的总长	mm
圆柱形	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
板形	B	截面宽度	mm
	t	厚度	mm
	W	夹持端宽度	mm

4.2 疲劳试验

4.2.1 符号

- 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);
- E^* ——达到稳定循环或半寿命循环时 E_T 与 E_C 的平均值;
- 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);
- ϵ ——真应变;
- Δ ——参量的变化范围;
- $R_{p0.2}$ ——0.2%规定塑性延伸强度;
- Ra ——表面粗糙度(μm);
- R_σ ——应力比($R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$);
- R_ϵ ——应变比($R_\epsilon = \epsilon_{\min}/\epsilon_{\max}$);
- $\dot{\epsilon}$ ——应变速率(s^{-1})。

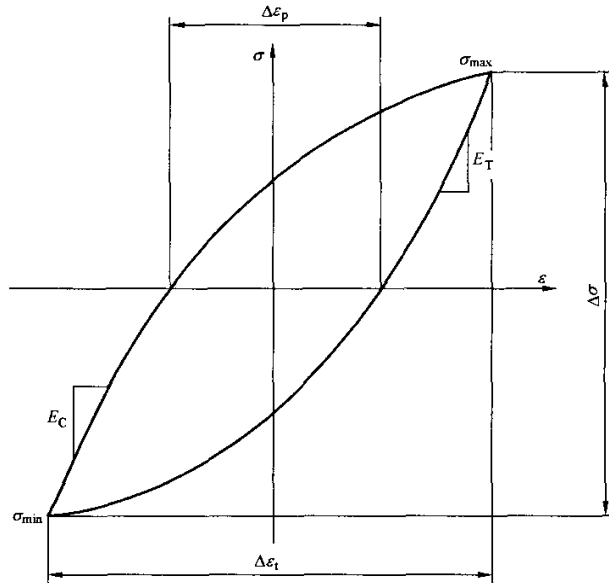


图 1 应力-应变滞后回线

4.2.2 下标注

- t——总的;
- p——塑性的;
- e——弹性的;
- a——幅值;
- m——平均值;
- 1/4——与前 1/4 循环相关的;
- min——最小值;
- max——最大值。

4.3 结果的表述

见表 2。

表 2 结果表述的符号及名称

符 号	名 称	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 设备

5.1 试验机

5.1.1 概述

拉-压疲劳试验机应能够平稳启动,且当试验力过零时试样不能发生过冲。当横梁处于工作位置时试验机应有足够的侧向刚性及对中。

整个机械加载系统(包括力传感器、夹具和试样)应具有足够的侧向刚性,当按照指定的波形进行试验时试验机应能够进行应变控制且能够测量力值。试验机可以是液压伺服式或电子机械式。

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,且测量准确度优于 1%。

力传感器应能够进行温度补偿漂移量不超过满量程的 0.002%/°C。

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。上下夹具间的距离应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。其材料的选取应考虑试验温度范围的影响。

5.1.4 对镜检查

在刚性装夹系统中出现的不对中弯曲通常有以下一条或几条原因引起(见图 2):夹具的角度偏差、在理想刚性系统中加力装置(或夹具)的侧向偏差、在非刚性系统中试样链的装配偏差或作动器在轴承间的侧向间隙。

应至少每半年对试验系统对中进行一次检查。在最大应变点处和最小应变点处弯曲应变应小于轴向应变的 5%。图 3 所示为推荐的对中检查应变测量装置。除此之外还有其他能够达到测量对中目的测量技术,详见附录 A。

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变量并最大限度的降低信号漂移、滑动和机械滞后。它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,应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大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到系统的误差,试样温度与试验温度的偏差应不大于 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通常采用热电偶或其他测温仪器对试样标距两端及中间各一点进行试样温度的测量。

在不影响试验结果的前提下(例如应避免裂纹的萌生出现在热电偶与试样的连接点处)试样应与热电偶直接接触。固定热电偶的通常方法为捆绑、压力或点焊。

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。

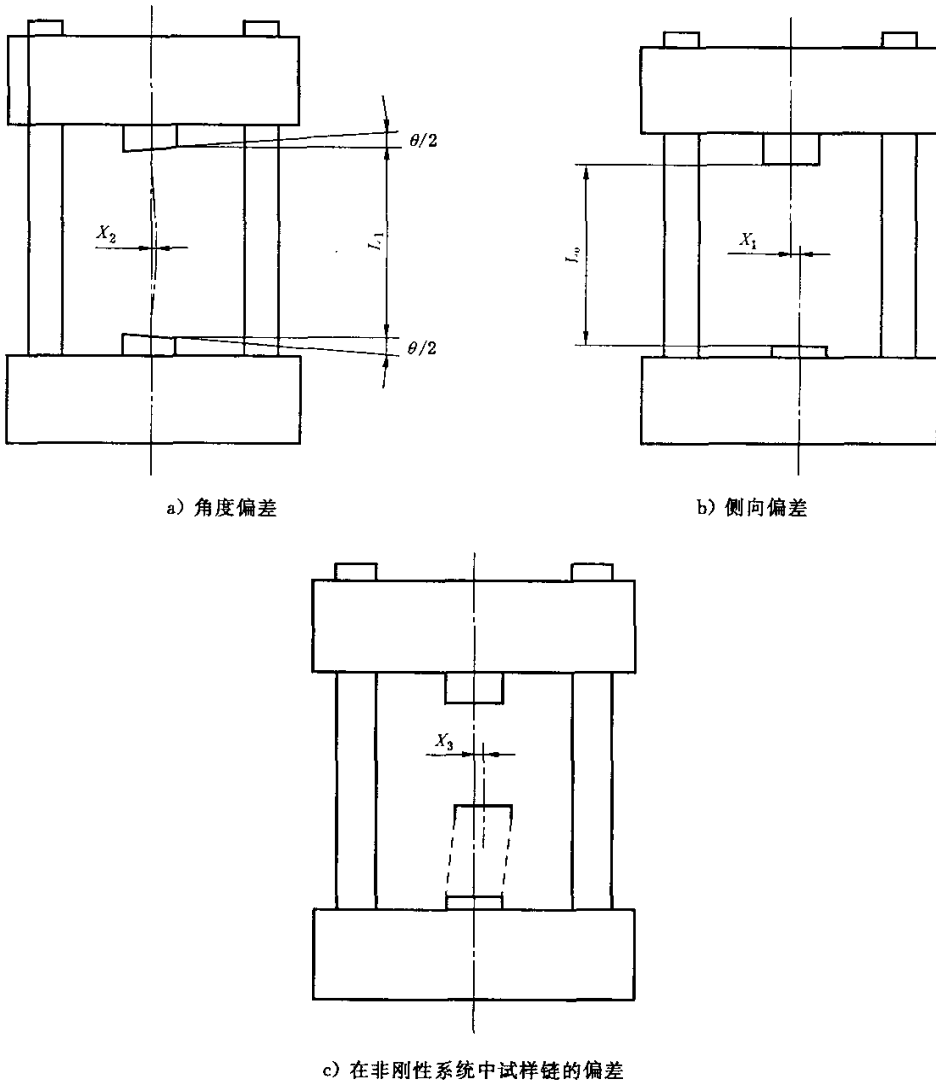
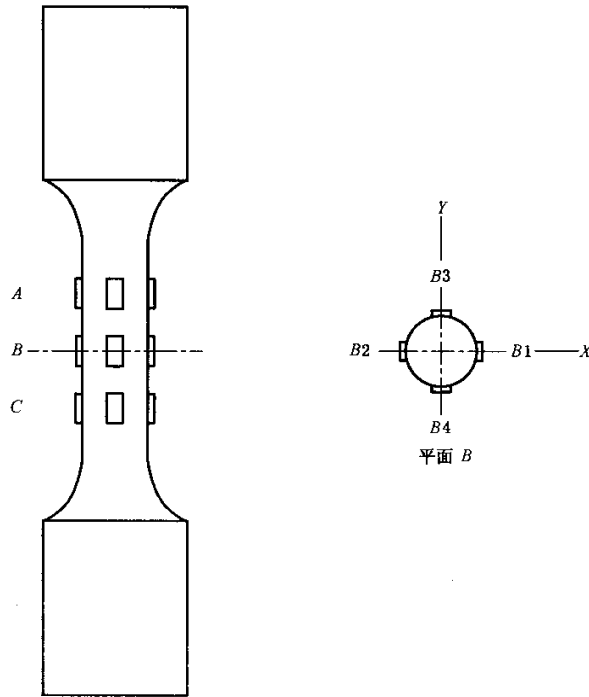


图 2 由于疲劳试验系统中不对中引起的机械弯曲



$$\text{弯曲 } X-X: \frac{\epsilon_{A2} - \epsilon_{A1}}{\epsilon_{A2} + \epsilon_{A1}} \times 100\% = A_{X-X}$$

$$\text{弯曲 } Y-Y: \frac{\epsilon_{A3} - \epsilon_{A4}}{\epsilon_{A3} + \epsilon_{A4}} \times 100\% = A_{Y-Y}$$

$$\text{平面 A 的弯曲: } \sqrt{(A_{X-X})^2 + (A_{Y-Y})^2} < 5\%$$

应对平面 B 及平面 C 做相同的计算。

所有平面的弯曲均应不大于 5%。

图 3 对中检查方案

5.4 试验监控设备

5.4.1 记录系统

以下设备是记录试验数据的最低要求：

- 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。

示波器或者通过图像/模拟信号可以再现记录信息的数码存储设备可以代替 X-Y 记录仪，当信号的速率超过记录仪的最大速率时就会用到它们，因为它们可以随后以更慢的速率再现记录的参量。

通过数字信号进行数据采集和处理任务的计算机系统也可代替上述系统。应力-应变数据点的采样速率应足够快以便正确的再现滞后回线，特别是反向应变的区域。不同的数据采集设备每个循环采集数据点的数量也会不同，一般来说，需要每个循环至少采集 200 个数据点。

5.4.2 循环计数器

循环计数器用于记录应变循环的次数。

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。

每个传感器及其附属电子元件应作为一个系统来检查：

——力值测量系统按照 GB/T 16825.1、GB/T 25917 及 JJG 556 进行校准。

——应变值测量系统按照 GB/T 12160 进行校准。

——温度值测量仪表按照 JJG 617 进行校准。

——热电偶按照 JJG 141 或 JJG 351 进行校准。

在一组试验开始前应检查引伸计的标距，力传感器和引伸计的校准状态，还应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 圆棒及厚度在 5 mm 以上的板状试样

在低循环疲劳试验中，试样的工作部分表征了被测材料的疲劳特性。

试样的几何尺寸应满足以下条件：

——标距部分内统一的圆柱直径；

——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应不超过 $L_0 + (d/2)$ 。

考虑到以上要求，根据大量实验室的研究经验以及对各种不同试样的计算结果，推荐使用以下几何尺寸（见图 4）：

——标距部分圆柱直径：

$$d \geq 5 \text{ mm}$$

——标距长度：

$$L_0 \geq 2d$$

——过渡圆弧半径（从试样平行工作部分到夹持端）：

$$r \geq 2d$$

——夹持端直径：

$$D \geq 2d$$

——截面减小区域长度：

$$L_r < 8d$$

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。

以下三项公差指标非常重要：

——平行度： $// \leq 0.005d$ ；

——同轴度： $\odot \leq 0.005d$ ；

——垂直度： $\perp \leq 0.005d$ ；

（这些值的表述与轴心或基准面相关）

试样的夹持端尺寸由试验设备决定，推荐的连接方式如下所示：

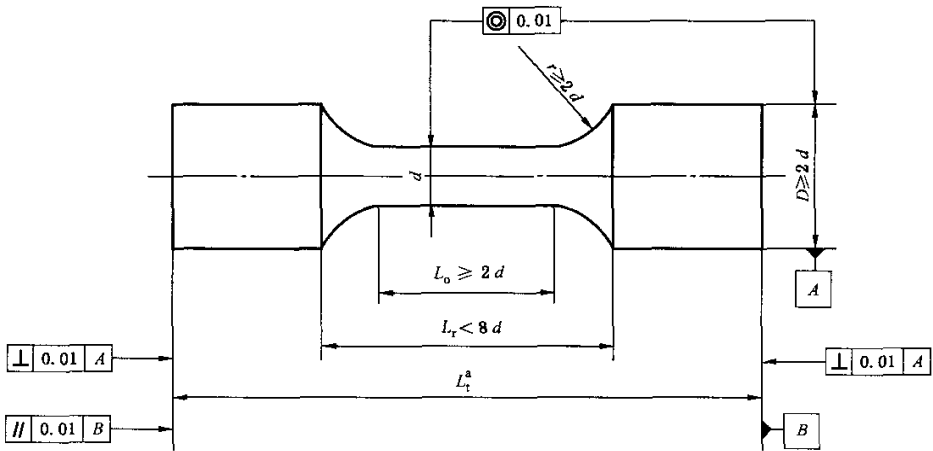
——螺纹连接；

——光滑圆柱形连接（需液压夹具）；

——台阶连接。

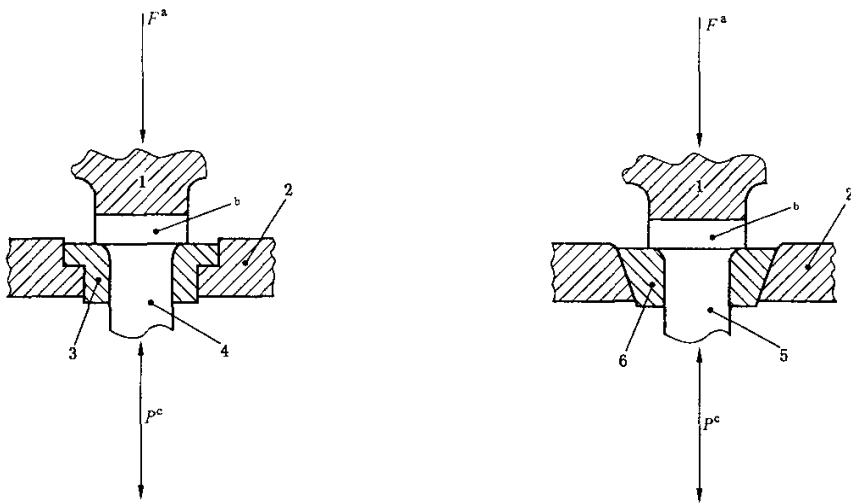
夹具应能定位试样并且轴向对中良好，不允许出现过冲。夹具的设计应与试样的夹持端配套，图 5 给出了一些实例。

一般来说，不推荐采用紧固调节螺纹的方式达到试样的对中。



^a 与夹持系统相关。

图 4 推荐的圆柱形试样的几何尺寸



a) 台阶连接夹具

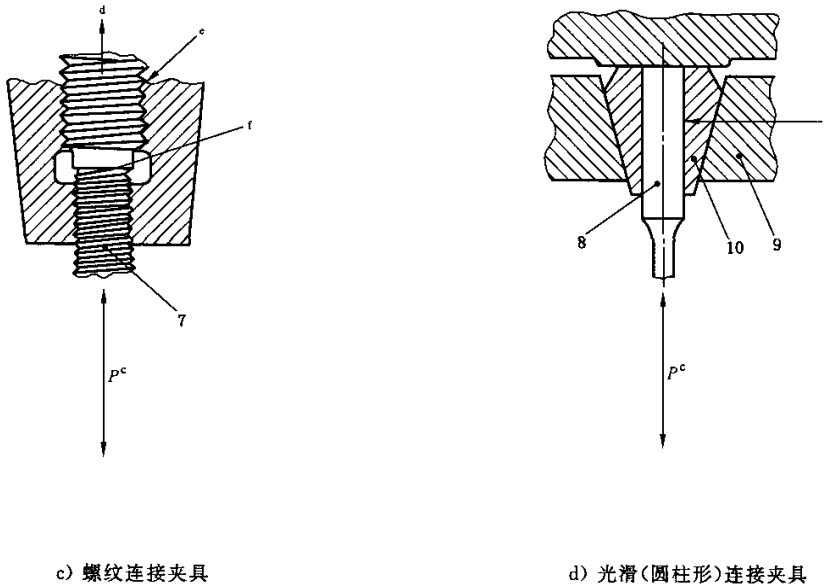
b) 增强型台阶连接夹具

- | | |
|---------------|---------------|
| 1——顶头； | 6——锥形可分离扣紧圆环； |
| 2——夹持部分； | 7——螺纹连接试样； |
| 3——可分离扣紧圆环； | 8——光滑连接试样； |
| 4——台阶连接试样； | 9——夹持部分； |
| 5——增强型台阶连接试样； | 10——锥形夹头。 |

顶紧力应大于试验力，以免在夹持部位发生过冲。

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| ^a 加紧力。 | ^d 加载链。 |
| ^b 试样对中用平面。 | ^e 试样顶头。 |
| ^c 循环力。 | ^f 试样对中用平面。 |

图 5 多种试样装夹装置示意



c) 螺纹连接夹具

d) 光滑(圆柱形)连接夹具

图 5 (续)

6.1.2 厚度在 5 mm 以下的板状试样

6.1.2.1 概要

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。

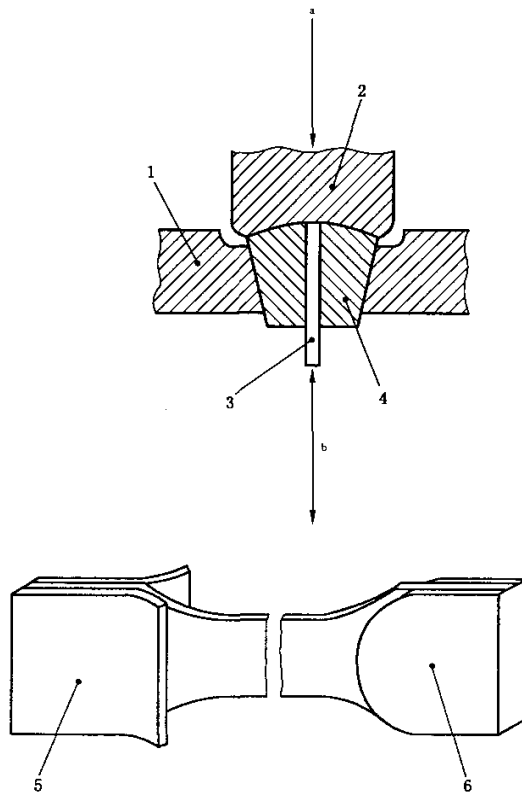
由于检测的实际力值很小,试验需要比通常更灵敏的力传感器,而且应使用平板夹具或液压夹具。而对于这种夹具来说保证对中是很困难的。

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来避免在夹持部分发生失效(见图 6)。

可以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。



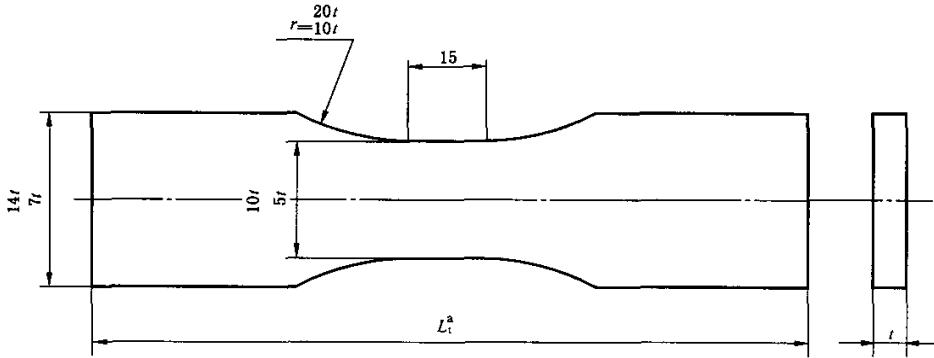
- 1—夹持部分；
 - 2—锥形顶头；
 - 3—板状试样；
 - 4—锥形夹头；
 - 5—弯曲垫片防止在夹持部分出现夹痕(可由环氧材料做成)；
 - 6—圆形垫片。
- ^a 加紧力。
- ^b 循环力。

图 6 平板试样装夹装置

6.1.2.2 厚度在 2.5 mm~5 mm 之间

在不采用防屈曲装置的情况下也可以按照以下步骤进行试验。

平板试样的推荐尺寸如图 7 所示。在这种情况下,将引伸计安装在试样的宽面上比安装在试样窄面上更好。



^a 与装夹系统相关。

图 7 平板试样的推荐尺寸

6.1.2.3 厚度小于 2.5 mm

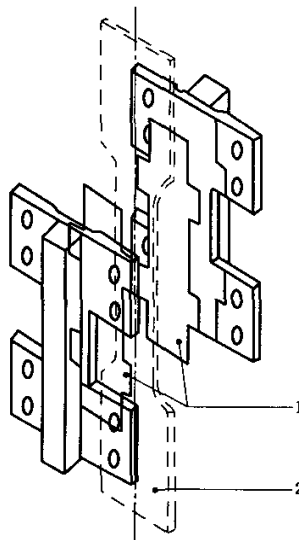
需要采用防屈曲装置。其几何尺寸应与试样配套并允许在试样的窄面上测量应变。

需要采取一些防范措施防止由于试样与抑制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能超过试验力的 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就能在一定程度上解决这个问题。不推荐使用烃基润滑剂因为它有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-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,因此应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。

防屈曲装置的实例如图 8 所示。



1—聚四氟乙烯薄膜;

2—试样。

图 8 平板试样的防屈曲装置

6.2 试样的制备

6.2.1 概要

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)的影响可以不遵从某些与此相悖的建议。在任何情况下,任何偏离应在试验报告中加以注明。

6.2.2 机加工程序

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,它还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,与刀具加工(车或铣)相比应优先考虑磨削:

- 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它的原始状态了,应注意防范。

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氟。因此在加工过程中应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应注意上述问题。

6.2.3 取样及标记

从半成品或成分一致的试验材料上取样位置或方向会对得到的试验结果产生重要影响。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不会被加工掉的区域进行标记,标记应不影响试验质量。

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。影响通常与如下一条或几条因素有关:

- 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。

遵从以下建议可以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。

建议试样的平均表面粗糙度小于 0.2 μm (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。对于圆柱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。建议在磨削之后对试样进行纵向抛光。在低倍(约 20 倍)下检查试样应没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再进行热处理,应在热处理后对试样表面进行抛光。如果不能抛光,则热处理宜在真空环境或惰性气体保护条件下进行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,采用的检查方法应不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,有必要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。应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 试验室环境

低循环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试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);
- 没有能够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。

7.2 试验机控制

试验机的控制精度应使在整个试验过程中应变值的峰值误差在1%以内。

7.3 试样的安装

试样在安装时应尽量避免预应变。

7.4 循环波形-应变速率或循环频率

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)。对于连续循环试验通常使用三角波。

注:对于高温试验,应避免使用正弦波,因为其应变速率是不断变化的。

对于低循环疲劳试验的频率范围通常在0.01 Hz~1 Hz之间。对于总应变速率来说,其变化范围在 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间($0.05\% \text{ s}^{-1} \sim 5\% \text{ s}^{-1}$)。

7.5 试验

7.5.1 预测量

建议在试验开始时在室温下在弹性范围内对试样反复施加循环力,用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应不超过±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)时引伸计的热应变来测量材料的平均热膨胀系数。这一系数的测量值与预期值的偏离应不超过±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,最低限度在预试验修正时应对标距的热膨胀值进行记录。对于自动系统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 ℃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。

7.5.2 弹性模量 $E_{1/4}$ 的测定

在试验温度下试样不发生非弹性应变时,弹性模量 $E_{1/4}$ 的测量与7.5.1的方法相同。

7.5.3 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。我们通常选择拉伸应力;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和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下完成这一转换。过冲会对接下来的试验产生影响。

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规定的应变水平需对应变量进行调整,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:

- 在停止过程中并未损坏试样;
- 引伸计未发生滑动。

可以通过分析试验数据对以上两种情况进行确认。未发生上述两种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,得到的疲劳应变-循环曲线图在循环次数上最少应覆盖3个数量级。

7.7 试验记录

7.7.1 应力-应变滞后迴线

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-应变滞后迴线。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,接下来按照对数增长(如20、50、100、200、500等)。

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)的变化量制定程序来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应能够清晰描述滞后迴线(见5.4.1)。

7.7.2 数据采集

如果试验设备允许,应力、应变及温度的记录应与时间相关。如不能做到这一点,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 失效判据

对于失效的定义有很多种,试样断为两段只是其中的一种情况。失效判据的选择依赖于对疲劳试验结果的解释以及被测材料的自然特征。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。

失效循环次数 N_f 可以由符合下述失效判据的循环数定义:

- a) 试样完全断裂为两部分;
- b) 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;
- c) 在滞后迴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 $E_T/E_C=0.5$ 是评定失效的标准(见图9);
- d) 最大拉伸应力相对于最大压缩应力发生某一百分数的变化。

通常使用上述失效判据a)或b)。然而,以上任意一种条件均可作为失效的判定依据。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,失效的循环次数 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。推荐 x 的值为25。

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。一般来说,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。

在任何情况下,应记录失效区域相对于原始标距的位置关系并在试验报告中注明。

为了确认试验的有效性应对试样进行预试验检查。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(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)的缺陷或异常。

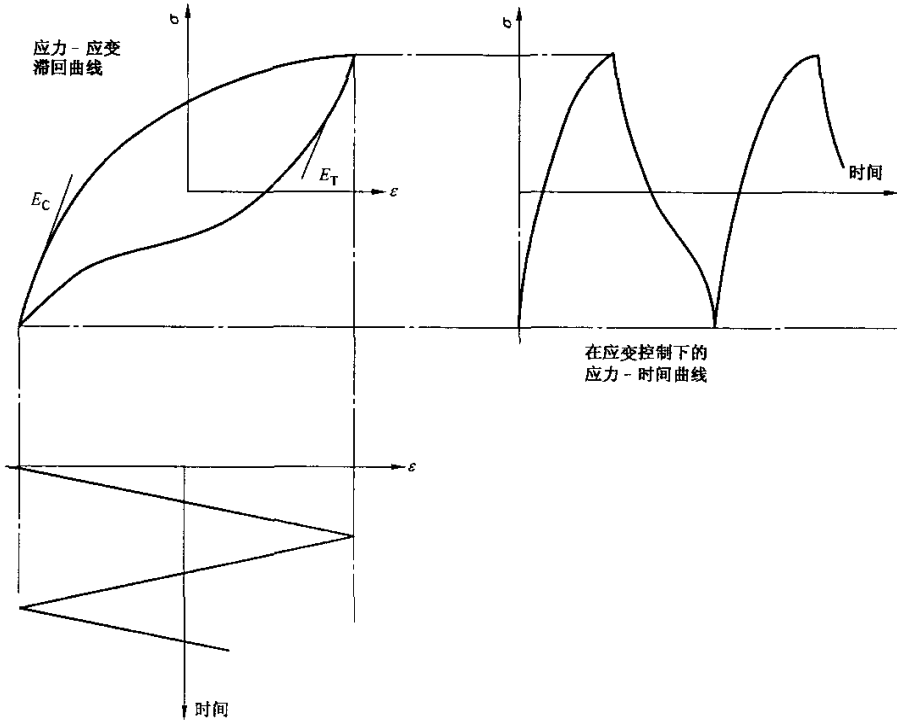
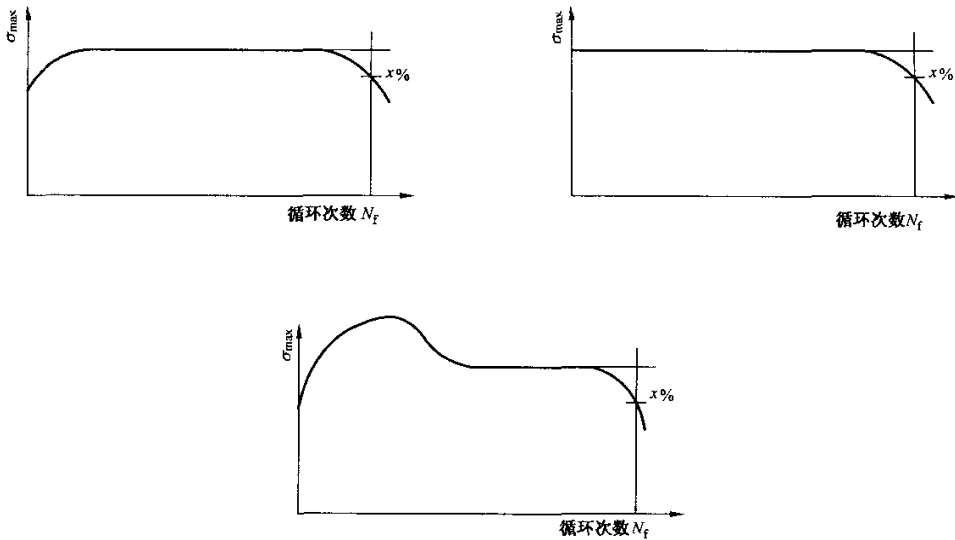
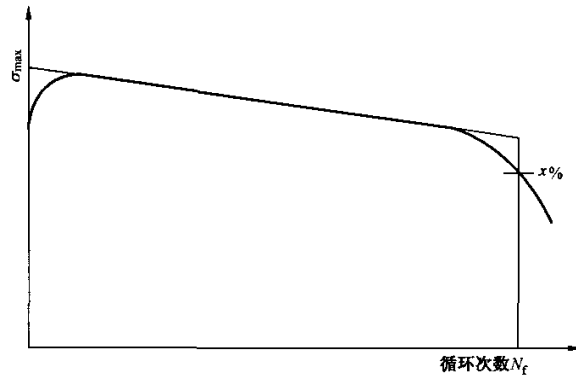


图 9 对于确定失效时拉伸弹性模量与压缩弹性模量的定义



a) 对于在初始硬化以及软化后存在稳定状态或一直处于稳定状态的材料

图 10 基于应力的终止试验条件



b) 对于连续软化的材料

图 10 (续)

7.9 终止试验

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，可以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（一般来说，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，试验不应自动停止，例如如图 10 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，还可以继续恢复试验。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应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。

8 数据处理

8.1 必要的试验数据

由 8.2.1 及 8.2.2 定义的试验数据是用于试验分析的必要试验数据。

8.2 基本数据

8.2.1 弹性模量 E 的测定

推荐采用材料在稳定循环或半寿命循环时的循环弹性模量 $E^* = \frac{E_T + E_C}{2}$ 来进行后续疲劳参数的计算，如果采用循环弹性模量得到的计算结果不能正确处理时，也可以采用在试验温度下材料在弹性范围内施加循环力测定的 $E_{1/4}$ 的平均值（见 7.5.2）进行计算。

8.2.2 数据记录（见 7.7）

记录峰值应力、应变范围与循环次数的关系和应力-应变滞后曲线，记录间隔为每个数量级记录 3 个滞后曲线（如 1、2、5、10、20、50 等），代表失效的特征点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。

8.3 试验结果分析

8.3.1 不同类型应变值的区别

不同类型的应变值如下所示：

ϵ_{\max} 和 ϵ_{\min} 值是实际测量的；

试验测量的 ϵ_{\max} 和 ϵ_{\min} 值也可以根据公式 $\epsilon \approx \ln(1+e)$ 计算得到，式中 e 为工程应变；

$\Delta\epsilon_e$ 是估计值；

$\Delta\epsilon_e$ 由 $\Delta\sigma/E$ 计算得到 (E 为循环弹性模量 E^* 或测量的一组试样的 $E_{1/4}$ 的平均值)；

对于没有保持时间的连续循环试验 $\Delta\epsilon_p$ 由 $\Delta\epsilon_e - \Delta\epsilon_e$ 计算得到。

8.3.2 疲劳寿命的测定(见 7.8)

失效的循环数 N_f 由 7.8a)~7.8d) 给出。

8.3.3 应力-应变及应变-疲劳寿命关系

表 3~表 5 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 3 拉伸试验的应力-应变值(前 1/4 循环)

性能	说明	关系式
$E_{1/4}$	由给定试样测定的弹性模量	
E	一组试样测量的 $E_{1/4}$ 的平均值	
$R_{p0.2}$	屈服强度(0.2%规定塑性延伸强度)	
n	拉伸应变硬化指数	$\lg\sigma_s - \lg\epsilon_{ps}$ 曲线的斜率
K	强度系数。在 $\lg\sigma_s - \lg\epsilon_{ps}$ 曲线上 $\epsilon_{ps} = 1$ 对应的应力截距	$\sigma_s = K(\epsilon_{ps})^n$

表 4 循环试验的循环应力-应变值(稳定循环)

性能	说明	关系式
E^*	稳定循环或半寿命循环时 E_T 与 E_C 的平均值	
σ'_y	循环屈服强度(偏置 0.2%)	
n'	$\lg\sigma_s - \lg\epsilon_{ps}$ 曲线的斜率	
K'	在 $\lg\sigma_s - \lg\epsilon_{ps}$ 曲线上 $\epsilon_{ps} = 1$ 对应的应力截距	$\sigma_s = K'(\epsilon_{ps})^{n'}$
—	循环应力-应变值的组合公式	$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_s}{E} + \left(\frac{\sigma_s}{K'}\right)^{1/n'}$

表 5 低循环疲劳试验的疲劳寿命

性能	说明	关系式
σ'_f	在 $\lg\sigma_s - \lg 2N_f$ 曲线上 $2N_f = 1$ 对应的应力截距	$\sigma_s = \sigma'_f / E (2N_f)^b$
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	$\epsilon_{p/2} = \epsilon'_f (2N_f)^c$
c	$\lg(\Delta\epsilon_p/2) - \lg 2N_f$ 曲线的斜率(指定 $2N_f$ 范围内)	
$\Delta\epsilon_e$	总应变幅	$\epsilon_e/2 = \Delta\epsilon_e/2 + \Delta\epsilon_p/2$ $\epsilon_e/2 = (\sigma'_f/E) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$

9 试验报告

9.1 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。

这些信息应包括 9.2 到 9.8 所示内容。

9.2 试验目的

研究的目的。

9.3 材料

- 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。

9.4 试样

试样图应包括：

- 取样位置及方向；
- 最终加工状态及表面粗糙度 R_a 。

9.5 试验方法

试验设备：

- 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：

- 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：

- 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：____℃；
- 试验温度及其波动范围：____℃ \pm ____℃；
- 热电偶类型；
- 升温时间、保温时间及试验时间。

引伸计：

- 引伸计使用的描述(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：_____。

9.6 试验条件

- 轴向应变范围：_____；
- 应变比 $R_e (= \epsilon_{min} / \epsilon_{max})$ ：_____；
- 波形：_____；
- 应变速率或频率：_____；
- 前 1/4 循环方向(拉伸或压缩)。

9.7 试验结果表述

9.7.1 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 6 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 6 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: _____ 总应变半幅值: _____
 试验温度: _____ 弹性模量 $E^*(E_{1/4})$: _____ 应变速率: _____

循环数	总应变/%			应力/MPa			塑性应变/%
	最大	最小	幅值	最大	最小	幅值	幅值

9.7.2 一组试样试验结果表述

对于一组试样:

- 一个数据表,如表 7 试验结果的摘要(按照应变半幅值的降序排列);
- 中值疲劳寿命的应力半幅值 σ_c 与循环次数的关系曲线(双对数坐标);
- 应力半幅值 σ_n 和 $\sigma_{n/4}$ 与 ϵ_n 和 $\epsilon_{n/4}$ 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 $\sigma'_i, b, \epsilon'_i, c$ 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 7 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
ϵ_{10}	N_{10}	σ_{10}
ϵ_9	N_{9}	σ_9
ϵ_8	N_{8}	σ_8
ϵ_7	N_{7}	σ_7
ϵ_6	N_{6}	σ_6
ϵ_5	N_{5}	σ_5
ϵ_4	N_{4}	σ_4
ϵ_3	N_{3}	σ_3
ϵ_2	N_{2}	σ_2
ϵ_1	N_{1}	σ_1

9.8 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。

这一数据库应包括但不限于以下几点：

- a) 单根试样试验结果摘要表(表 6)；
- b) 一组试样试验结果摘要表(表 7)；
- c) 试验结果分析摘要表(表 8)。

表 6、表 7 和表 8 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 8 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)	
σ'_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	
e_f 疲劳延性系数	
c 疲劳延性指数	

附 录 A
(资料性附录)
对中检查方法实例

对中检查应采用标准的校准试样,用于对中检查的试样其几何尺寸可以小于试验用试样(如图3所示)。建议对中试样材料采用经过热处理硬化的钢等,其弹性应变应大于0.4%或弹性应力范围超过正式试验最大应变对应的应力值。

为了检查由于角度偏差、侧向偏差和/或试样链偏差引起的不对中,应将电阻应变片按照图3所示的位置安好。将试样的一端夹持,当温度达到平衡后,将电桥信号置零。再将试样的另一端夹持。

对试样施加拉力直到应变量达到0.4%或者正式试验的最大应变量(如果这一值不超过0.4%)。按照图3所列公式计算弯曲应变。只要三个测量平面上有一个平面的弯曲应变超过5%,就应对试验机架、作动器、夹具和/或力传感器进行调整,然后重复以上步骤,直至所有工作平面的弯曲应变均不超过5%。

对压应力重复上述操作,直到对中指标达到特定要求(如5%)。

如果检查结果不理想,则:

- 校验测量结果的复现性若干次;
- 确认这一结果是由试验机引起的而不是试样引起的;
- 检查加载链(夹具、传感器、试验机)的几何精度。

附录 B
(资料性附录)
试验结果的绘图表述实例

材料:316 L
温度:550 ℃
试样编号:5E47
总应变半幅值:0.47%

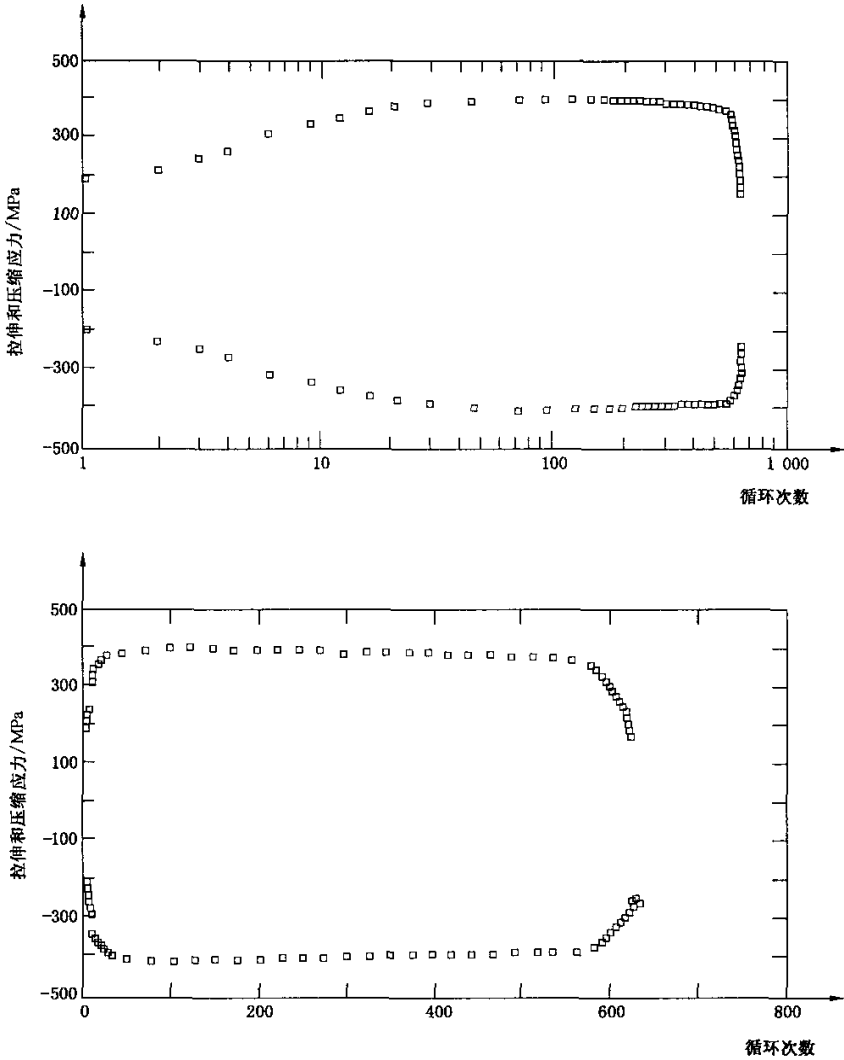
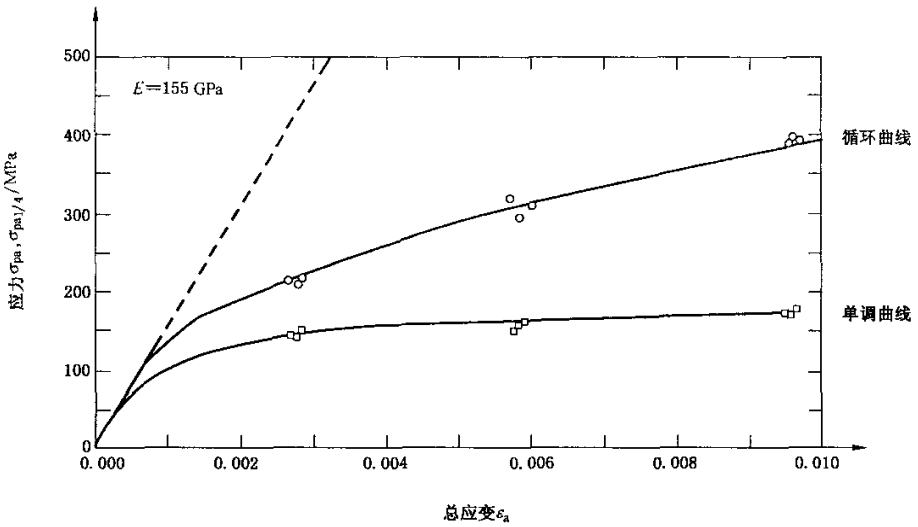
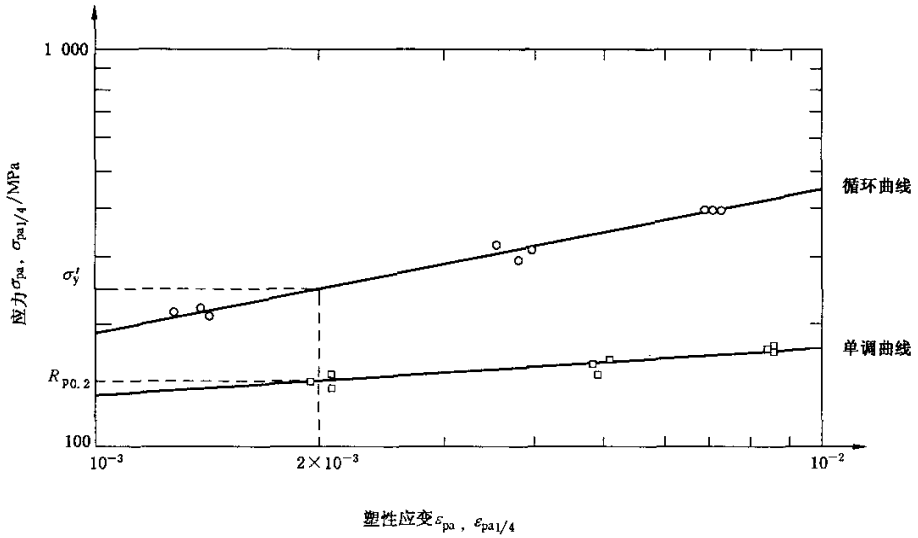


图 B.1 拉伸和压缩应力与循环次数的关系曲线(半对数坐标和线性坐标)

材料:316 L
温度:550 ℃



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:316 L
温度:550 °C

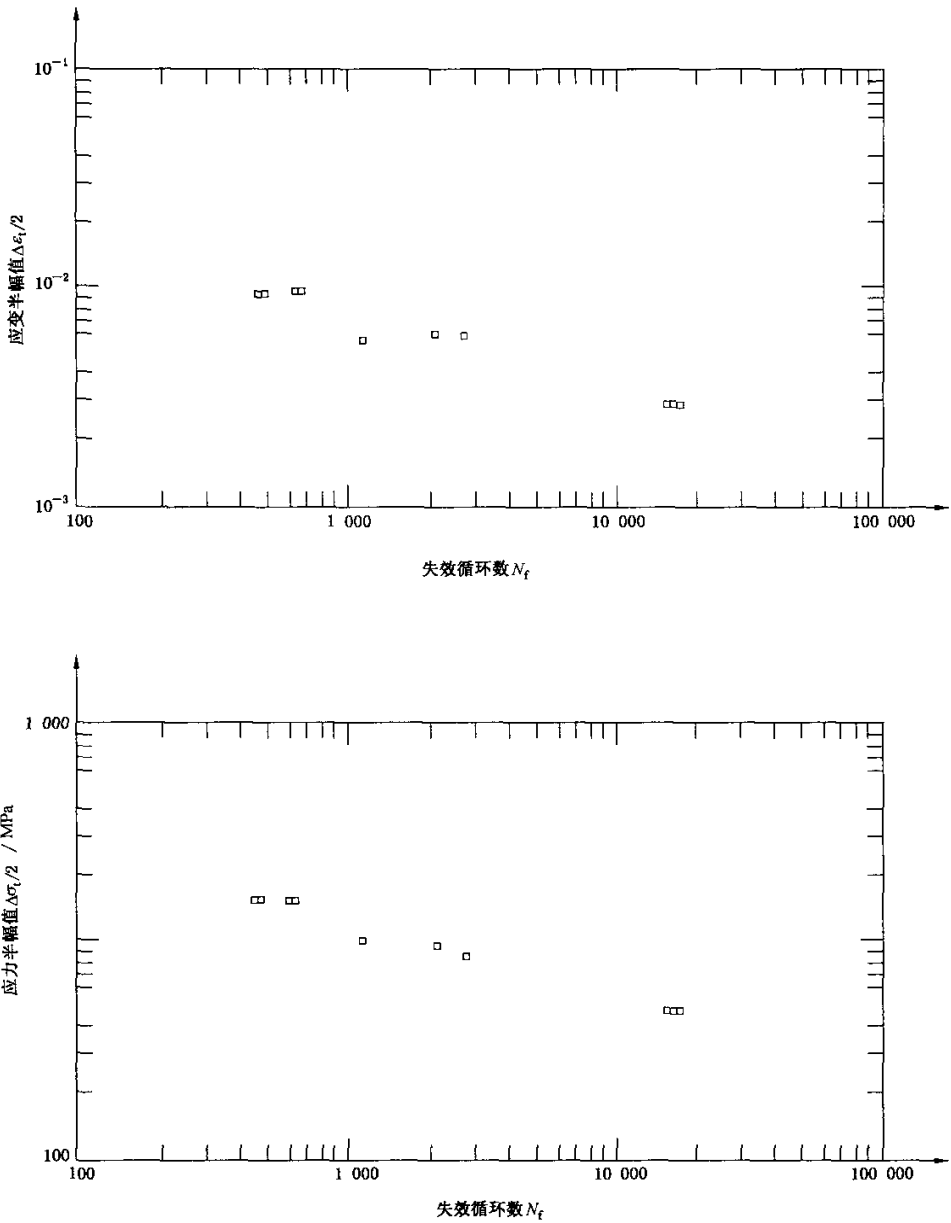


图 B.3 在 $N_f/2$ 点处应变半幅值 $(\Delta\epsilon_t)/2$ 和应力半幅值 $(\Delta\sigma)/2$ 与失效循环数 N_f 的关系曲线

材料:316 L
 温度:550 ℃

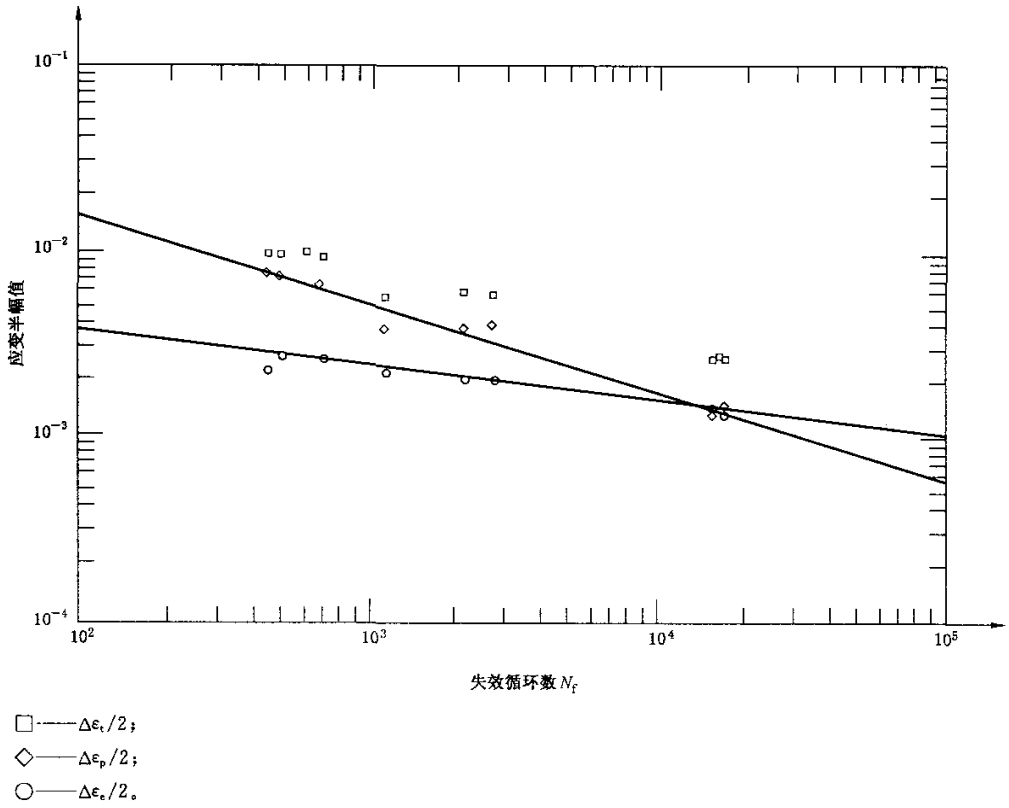


图 B.4 总应变、塑性应变、弹性应变半幅值与失效循环数 N_f 的关系曲线