

ICS 77.040.10  
H 22



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 38822—2020

---

## 金属材料 蠕变-疲劳试验方法

Metallic materials—Creep-fatigue test method

2020-06-02 发布

2020-12-01 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 .....	I
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 .....	2
5 试验原理 .....	3
6 设备 .....	4
7 试样 .....	6
8 试验程序 .....	10
9 试验报告 .....	13
附录 A (资料性附录) 蠕变-疲劳寿命函数关系式 .....	14
参考文献 .....	15



## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

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(SAC/TC 183)归口。

本标准起草单位：中国科学院上海应用物理研究所、华东理工大学、中国科学院金属研究所、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、冶金工业信息标准研究院、上海海关工业品与原材料检测技术中心、上海交通大学、上海航空材料结构检测股份有限公司。

本标准主要起草人：周伯谋、王润梓、陆燕玲、邱建科、侍克献、董莉、周冶东、吴益文、田根起、张显程、李德辉、董安平、涂善东、侯慧宁。



## 引 言

高温环境下工作的机械构件有可能同时产生蠕变损伤和疲劳损伤,在设计服役期内存在蠕变和疲劳损伤的构件应该考虑两种损伤的交互作用,即蠕变-疲劳交互作用。在某些工业领域(如核电、航空、机械工程),研究材料的长期蠕变-疲劳性能对工程研究和应用十分重要。

为了明确不同实验室试验数据的可靠性和一致性,需对遵从本标准某些关键点的试验数据进行收集。



# 金属材料 蠕变-疲劳试验方法

## 1 范围

本标准规定了金属材料蠕变-疲劳试验方法的术语和定义、符号和说明、试验原理、试验设备、试样、试验步骤、试验记录和试验报告。

本标准适用于光滑圆形截面试样恒定应力幅、恒定应变幅条件下的单轴蠕变-疲劳试验。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 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 22315 金属材料 弹性模量和泊松比试验方法

GB/T 25917.1 单轴疲劳试验系统 第1部分:动态力校准

GB/T 26077 金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法

GB/T 34104 金属材料 试验机加载同轴度的检验

JJF 1637 廉金属热电偶校准规范

JJG 141 工作用贵金属热电偶

JJG 556 轴向加力疲劳试验机

JJG 617 数字温度指示调节仪

## 3 术语和定义

GB/T 26077 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**保载时间 hold time**

$\tau_h$

蠕变-疲劳试验中,试验控制变量(力、应变)在一个循环中保持不变的时间。保载时间通常位于拉伸和/或压缩的力或应变峰值处,但也可位于循环内的其他位置。

### 3.2

**总循环周期 total cyclic period**

$\tau_t$

完成一个试验循环的时间。

注:  $\tau_t$  是保载时间( $\tau_h$ )和非保载时间( $\tau_{nh}$ )(即稳态和动态)之和。

### 3.3

**裂纹形成 crack formation**

裂纹在试样中萌生并扩展的过程。

## 3.4

初始弹性模量 initial modulus of elasticity

$E_0$

在第一个循环周次期间的弹性模量。

## 3.5

第  $N$  周次的弹性模量 modulus of elasticity at cycle  $N$

$E_N$

第  $N$  个循环滞后迴线中,峰值拉伸应力后的卸载模量(见图 1 中的  $E_T$ )和峰值压缩应力后的卸载模量(见图 1 中的  $E_C$ )的平均值。

## 3.6

应力范围 stress range

$\Delta\sigma$

最大应力与最小应力之间的差值。

注:对于蠕变-疲劳试验,最大和最小应力之间的差值称为“峰值应力范围”。对于应变控制下的蠕变-疲劳试验,保载时间前后应力下降的范围称为“松弛应力范围”[见图 1b)]。

## 3.7

非弹性应变范围 inelastic strain range

$\Delta\epsilon_{in}$

循环期间塑性应变范围和保载时间内蠕变应变范围的总和。也是在拉伸和压缩卸载过程中,应变轴交叉点与滞后迴线的外推线性区域之间在应变轴上的距离,见图 1。

## 4 符号和说明

本文件所使用的符号和说明见表 1。

表 1 符号和说明

符号	说明	单位
$d$	圆柱试样标距段直径	mm
$D_g$	夹持端直径	mm
$E$	弹性模量	MPa
$E_0$	初始弹性模量	MPa
$E_N$	第 $N$ 周次的弹性模量	MPa
$E_T$	拉伸模量	MPa
$E_C$	压缩模量	MPa
$L$	平行标距段长度	mm
$L_0$	初始平行标距段长度	mm
$L_1$	刚性装夹系统中上下夹具的垂直距离	mm
$N$	循环周次	—
$N_f$	试样失效的循环周次	—
$X_1$	理想刚性系统中加力装置或夹具的侧向偏差	mm
$X_2$	由夹具的角度偏差所造成的侧向间隙	mm

表 1 (续)

符号	说明	单位
$X_3$	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	mm
$r$	过渡段圆弧半径(从试样平行段到夹持端)	mm
$t$	时间	s
$T$	试验温度	°C
$T_i$	显示的试样温度	°C
$\nu$	循环的频率	Hz
$\epsilon$	应变	—
$\epsilon_{\max}$	循环内的最大应变	—
$\epsilon_{\min}$	循环内的最小应变	—
$\Delta\epsilon_c$	蠕变应变范围(见图 1)	—
$\Delta\epsilon_e$	弹性应变范围	—
$\Delta\epsilon_p$	塑性应变范围(见图 1)	—
$\Delta\epsilon_t$	总应变范围(见图 1)	—
$\Delta\epsilon_{in}$	非弹性应变范围(见图 1)	—
$\sigma$	应力	MPa
$\sigma_{\max}$	循环内的最大应力(见图 1)	MPa
$\sigma_{\min}$	循环内的最小应力(见图 1)	MPa
$\Delta\sigma$	应力范围(见图 1)	MPa
$\Delta\sigma_r$	应力松弛范围(见图 1)	MPa
$\theta$	夹具的角度偏差	(°)

## 5 试验原理

采用足够慢的循环频率[见图 1a)]或采用带保载的波形[见图 1b)、c)],在高温下对试样施加单轴循环载荷的方法,获得材料的蠕变-疲劳性能。需要考虑氧化对蠕变-疲劳性能的影响,也可补充相应的疲劳和蠕变试验,以进一步获得蠕变对疲劳的影响或者疲劳对蠕变的影响。

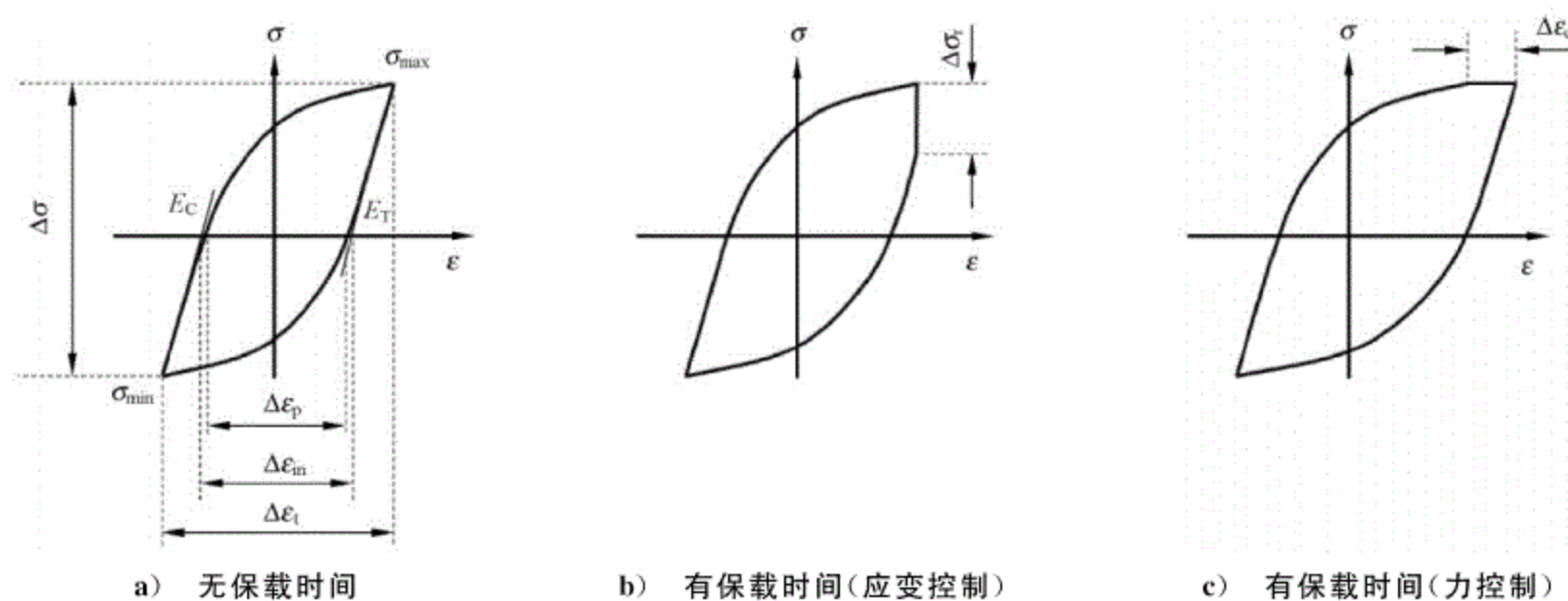


图 1 应力-应变滞后迴线示意图

## 6 设备

### 6.1 一般要求

蠕变-疲劳试验设备一般包括试验机、引伸计、加热和温度测量系统以及循环计数器。

### 6.2 试验机

#### 6.2.1 概述

6.2.1.1 蠕变-疲劳试验机应符合 GB/T 16825.1 和 JJG 556 的要求。试验机可以是液压伺服式或电子式。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。试验机应有足够的侧向刚度及对中。

6.2.1.2 试验机应能够在应变或力控制下执行图 2 所规定的一个或多个循环试验。对于无法实现保载试验的试验机,一般加载/卸载速率不高于  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 。试验机的控制稳定性应保证控制变量的最大值和最小值的波动保持在应变(或应力)范围的 1% 以内。

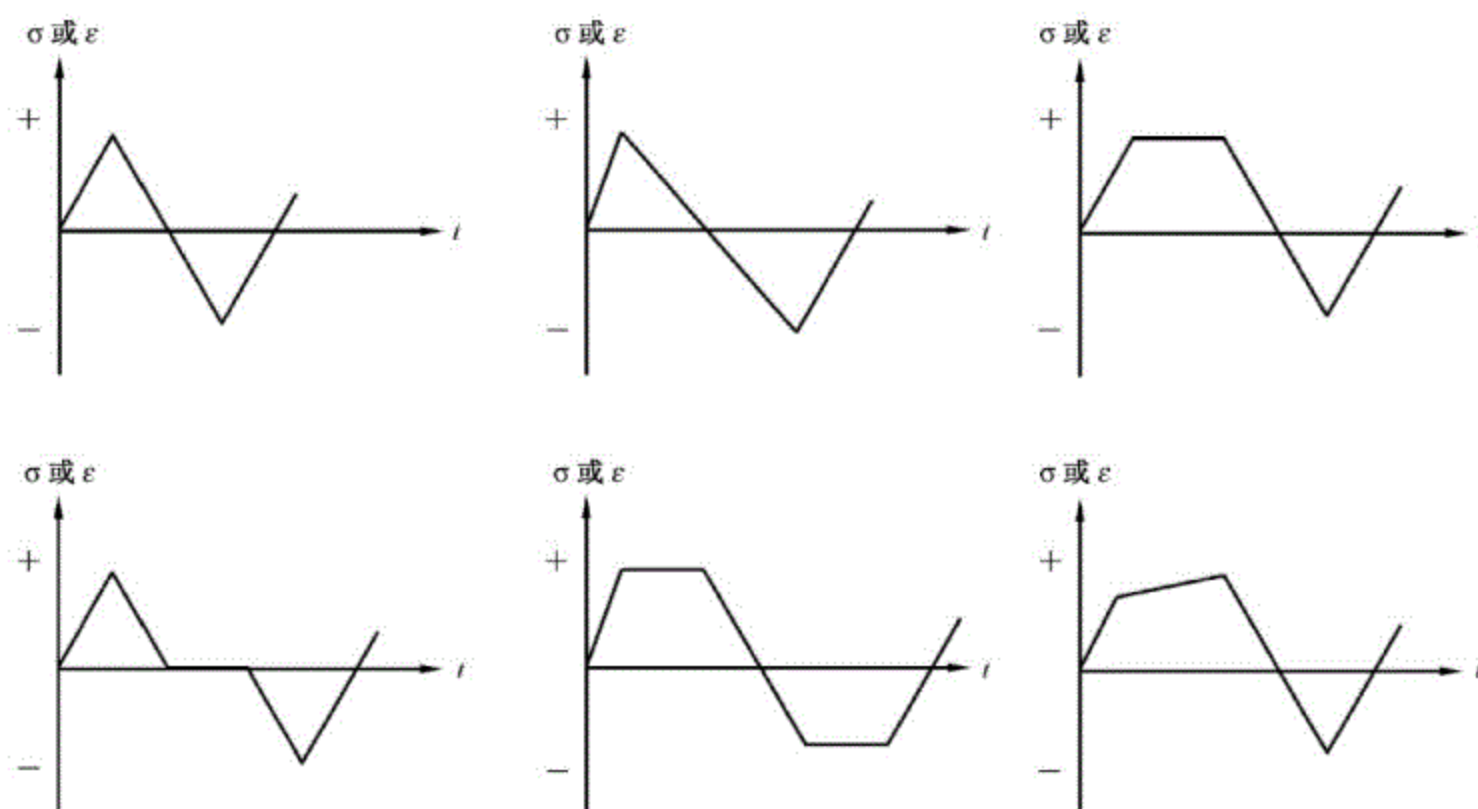


图 2 蠕变-疲劳循环波形示意图

#### 6.2.2 测力系统

6.2.2.1 测力系统应适用于拉-压疲劳试验且具有足够的轴向和侧向刚度,其承载能力应满足试验需要,且测量准确度优于 1%。

6.2.2.2 测力系统应能够进行温度补偿,漂移量不超过满量程的  $0.002\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。在试验过程中,测力系统的温度应保持在制造商规定的温度范围内。

#### 6.2.3 夹具及对中检查

6.2.3.1 夹具应能够将循环力平稳传递至试样轴线上。上下夹具间的距离应尽可能小,以避免侧向失稳。设备的几何尺寸应能够良好对中。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。

6.2.3.2 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,其材料的选择应考虑试验温度的影响,如在高温下应有足够的强度。

6.2.3.3 在刚性装夹系统中出现的不对称弯曲通常由以下一条或几条原因引起(见图3):

- a) 夹具的角度偏差;
- b) 在理想刚性系统中加力装置的侧向偏差;
- c) 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。

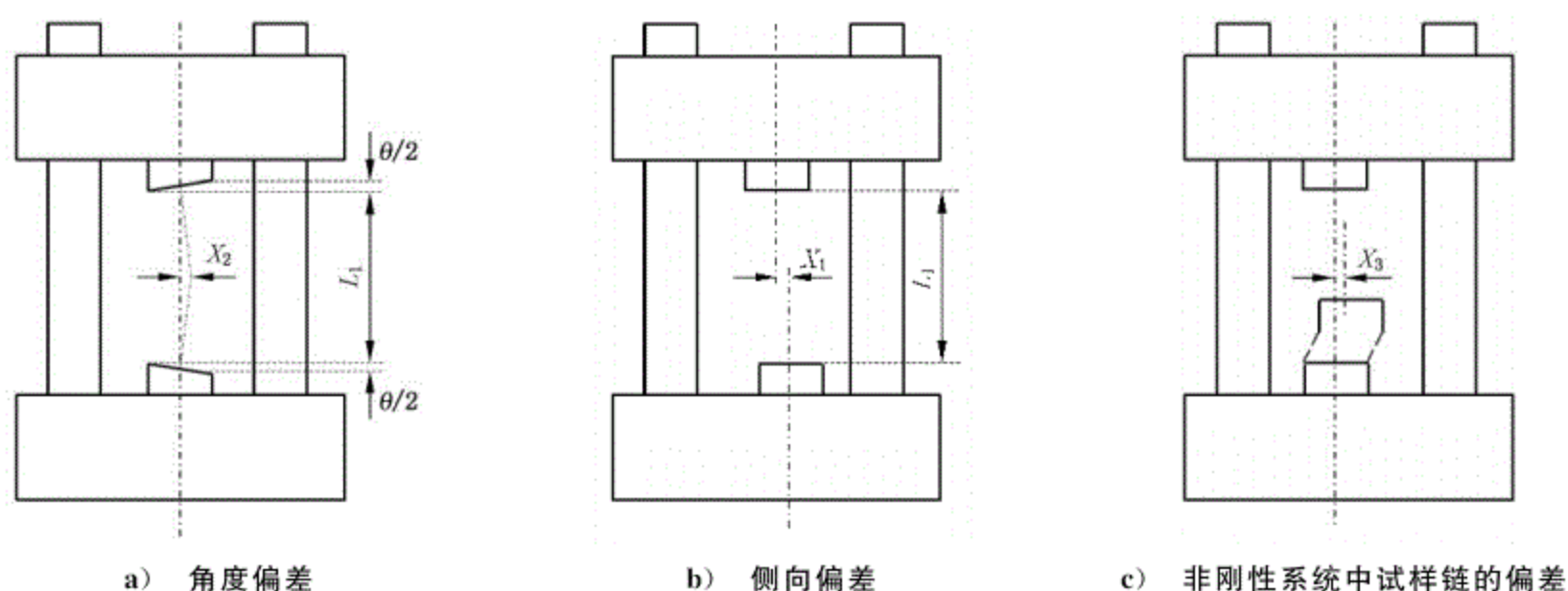


图3 疲劳试验系统中错位引起的不对称弯曲

6.2.3.4 应至少每年对试验系统的对中性进行一次检查。在最大应变点和最小应变点处弯曲应变应小于轴向应变的5%。建议采用GB/T 34104或JJG 556进行对中检查。

### 6.3 引伸计

6.3.1 对于圆柱形试样应采用轴向引伸计测量试样上的应变。

6.3.2 对于沙漏形试样,可采用测量径向变形的引伸计。引伸计尖端应在试样直径最小处接触试样。

6.3.3 平衡支撑引伸计,并对引伸计进行调整,使其施加在试样上的接触力尽可能小,避免试样表面产生刻痕。

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

6.3.5 引伸计应能够避免由于温度波动而引起的信号漂移。

6.3.6 引伸计应满足GB/T 12160中规定的1级引伸计系统级别要求。

### 6.4 加热与温度测量系统

#### 6.4.1 加热系统

可采用的加热方法包括:电阻炉加热、辐射炉加热、电磁感应加热、惰性气体或液体加热。建议优先采用三段独立控温的电阻炉加热。加热装置应使试样能够均匀地加热到规定的温度,在整个试验期间,标距段的温度梯度不大于 $2^{\circ}\text{C}$ 或标称试验温度的1%两者中的较大值。

#### 6.4.2 温度测量系统

6.4.2.1 通常采用热电偶或其他测温仪对试样标距两端及中间各一点进行试样温度的测量。对于缺口试样,需在缺口处固定一支热电偶。如选用非接触式温度测量装置,应事先验证其测温精度在试验温度点不低于热电偶。

6.4.2.2 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处),试样应

与热电偶直接接触。固定热电偶的通常方法包括捆绑、压力或点焊。当使用电阻炉加热时,热电偶焊点应避免直接辐射。

6.4.2.3 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。

注 1: 当测试材料易于氧化时,不宜单独使用光学高温计进行试样温度测量,而宜使用热电偶测温作为辅助。

注 2: 贵金属热电偶择优选用 S 型或 R 型,建议使用温度大于 400 °C。

注 3: 廉金属热电偶建议用于 400 °C 以下试验;如试验温度超过 400 °C,廉金属热电偶使用时间不宜超过 500 h。

## 6.5 循环计数器

循环计数器用于记录控制变量循环的次数。对于不超过 10 000 个周次的试验,应能记录所有周次。对于试验周次超过 10 000 个周次的试验,计数器分辨率应高于失效循环数的 1%。

## 6.6 数据记录

6.6.1 以下设备是记录试验数据的最低要求:

- 用于记录应力-应变滞后回线的 X-Y 记录仪;
- 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。

6.6.2 示波器或者通过图像/模拟信号可再现记录信息的数码存储设备,可代替 X-Y 记录仪,当信号的速率超过记录仪的最大信号采集速率时,上述设备可随时以更慢的速率再现记录的参量。

6.6.3 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替代上述系统。应力-应变数据点的采样速率应足够高,以便正确地再现滞后回线,特别是反向应变的区域。力-位移-时间数据的采样频率应足以完整再现滞后回线和保载时间的曲线,不同的数据采集设备每个循环采集的数据点的数量也会不同,一般来说,每个循环至少需要采集 200 个数据点用于再现滞后回线,另外需要采集约 50 个~200 个附加数据点用于表征保载期间的力、位移和应变等信息。

## 6.7 检查和校准

6.7.1 应定期对试验机及其控制系统和测量系统进行检查和校准,同轴度应达到 5%,符合 GB/T 34104 或 JJG 556 的要求。

6.7.2 每个传感器及其附属电子元件应作为一个系统进行校准,且应符合以下要求:

- 测力系统按照 GB/T 16825.1、GB/T 25917.1 或 JJG 556 进行校准;
- 应变测量系统按照 GB/T 12160 进行校准;
- 温度测量仪表按照 JJG 617 进行校准;
- 热电偶按照 JJG 141 或 JJF 1637 进行校准。

6.7.3 在一组试验开始前应检查引伸计的标距、测力系统和引伸计以及热电偶、测温仪的校准状态及校准证书。

## 7 试样



### 7.1 几何尺寸

#### 7.1.1 概述

本标准采用的试样包括圆柱形试样和沙漏形试样两种,见图 4。

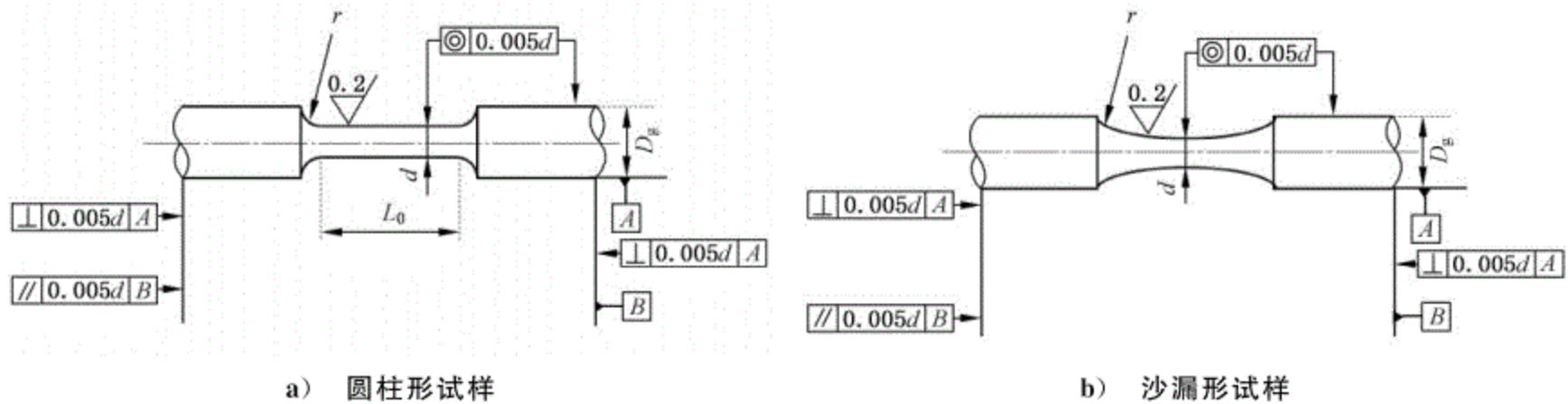


图4 推荐的蠕变-疲劳试样试验部分示意图

### 7.1.2 圆柱形试样

蠕变-疲劳测试宜选用图4a)所示的圆柱形试样进行,推荐使用以下几何尺寸:

- 标距段圆柱直径: $d \geq 5 \text{ mm}$ ;
- 引伸计标距: $L_0 \geq 1.5d$ ;
- 过渡圆弧半径(从试样平行段到夹持端): $r = 4d \pm 2d$ ;
- 夹持端直径: $D_g \geq 2d$ 。

注1:圆柱的平行标距段长度宜大于引伸计标距。但是两者之差不宜大于 $d$ ,以减少断裂发生在引伸计跨距外的概率。

注2:对于涉及压缩载荷分量的循环,建议使用 $L_0 \leq 4d$ ,以避免弯曲。

注3:对于裂纹敏感材料和循环硬化材料,建议最小夹持端直径 $D_g$ 为 $3.5d$ ,以避免夹持端发生断裂。

### 7.1.3 沙漏形试样

沙漏形试样通常用于高应变范围试验,以降低试样屈曲的风险。沙漏形试样采用径向引伸计进行应变测量。沙漏形试样如图4b)所示。沙漏形试样推荐使用以下几何尺寸:

- 标距段圆柱直径: $d \geq 5 \text{ mm}$ ;
- 过渡圆弧半径: $r = 6d \pm 2d$ ;
- 夹持端直径: $D_g \geq 2d$ 。

### 7.1.4 试样的公差

试样的公差应满足以下要求,这些值的表述与轴心或基准面相关:

- 平行度: $// \leq 0.005d$ ;
- 同轴度: $\text{◎} \leq 0.005d$ ;
- 垂直度: $\perp \leq 0.005d$ 。

### 7.1.5 夹持端

试样夹持端尺寸根据试验设备来确定,图5是几种常用的夹持端。夹具应能固定试样且轴向对中良好,不应出现回弹。顶紧力应大于试验力,以免在夹持部位发生过冲。夹具的设计应与试样的夹持端配套。图6给出了一些实例。

注1:对于承受过零载荷的试样,从拉伸到压缩的过程中,螺纹和端部夹具能保证平稳过渡,反之亦然。通常在夹持过程宜对试样进行预加载(例如图6)。对于螺纹端测试的试样,宜使用限制公差螺纹。

注2:一般来说,不宜采用完全依靠调节螺纹的方式达到试样对中。

注3:夹持力宜大于循环载荷,以避免试样在夹具中反弹。

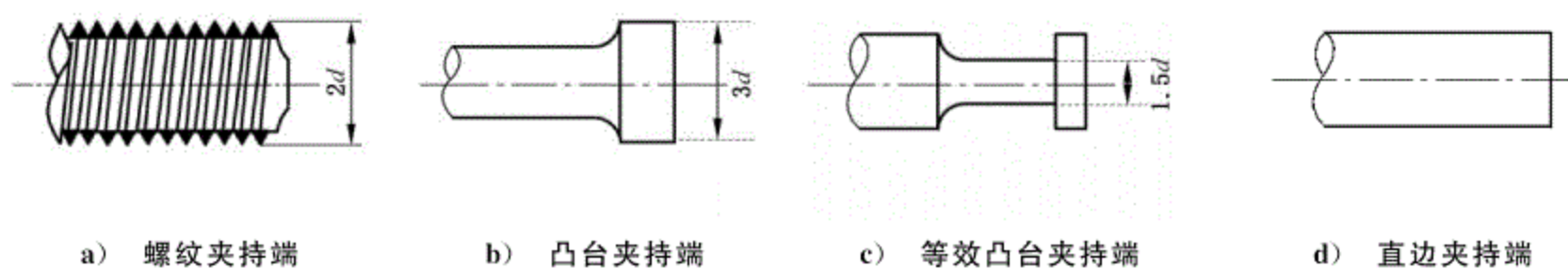
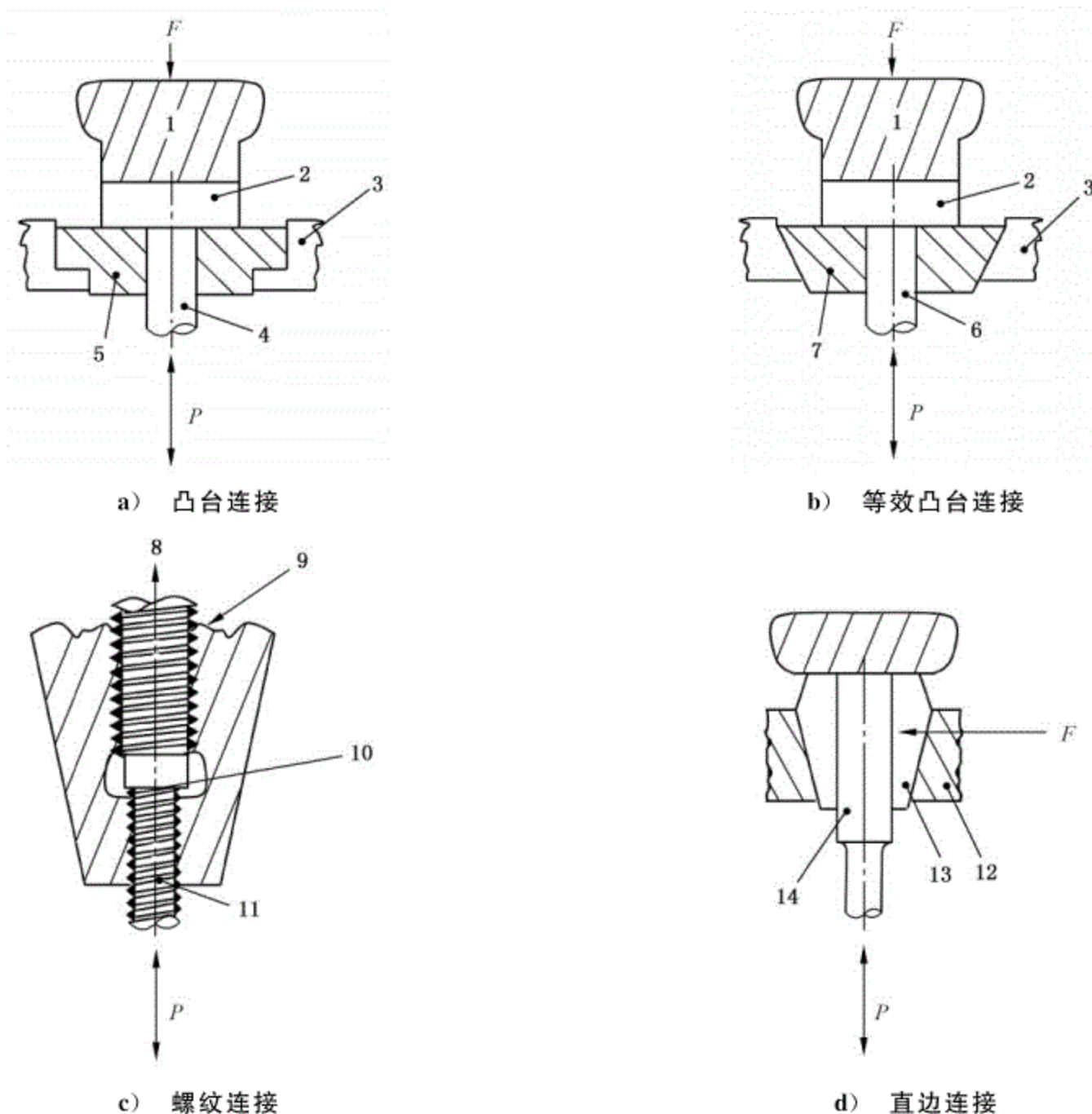


图 5 推荐的蠕变-疲劳试样夹持端示意图



说明:

- 1——顶头;
- 2——试样对中用平面;
- 3——夹持部分;
- 4——台阶连接试样;
- 5——可分离紧扣圆环;
- 6——增强型台阶连接试样;
- 7——锥形可分离紧扣圆环;
- 8——加载链;

- 9 ——试样顶头;
- 10——试样对中用平面;
- 11——螺纹连接试样;
- 12——夹持部分;
- 13——锥形夹头;
- 14——光滑连接试样;
- $F$  ——加紧力;
- $P$  ——循环力。

图 6 推荐的对中良好、避免回弹的试样夹具实例

## 7.2 试样的制备

### 7.2.1 概要

蠕变-疲劳试验旨在表征材料的固有特性,建议按照 7.2.2~7.2.6 进行试样的制备。如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 7.2.2~7.2.6 的建议,但是任何偏离都应在试验报告中加以注明。

### 7.2.2 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。应采用以下两种机加工方法,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 0.25 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: 材料的显微组织的变化: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,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中宜注意上述问题。

### 7.2.3 取样及标记

7.2.3.1 应按照相关产品标准或双方协议的规定,从半成品或成分一致的试验材料上取样,并应记录试样取样部位的详细信息。

7.2.3.2 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。

7.2.3.3 在试样加工过程中试样应有唯一的编号。可用任何标记方法在试样不会被加工掉的区域进行标记,标记不应影响试验质量。

7.2.3.4 应在试样的两端进行标记,以便当试样断裂后半件也可被识别出来。

### 7.2.4 试样的表面状态

试样的表面状态会对试验结果产生影响。遵循以下建议可以降低对试验结果的影响:

- 试样的表面粗糙度:平均表面粗糙度  $Ra$  小于  $0.2 \mu\text{m}$ ,对于圆柱形试样,加工去除所有由车床造成的沿圆周方向的划痕和明显的加工痕迹;如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。
- 残余应力:建议去除试样的残余应力。
- 材料微观组织的变化:热处理不应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。
- 污染物的介入:应避免污染物介入。

### 7.2.5 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状态。

## 7.2.6 存放及运输

制备好后的试样应妥善保存,以防止任何损伤(接触刮伤或氧化)。建议采用单独的盒子或有封装头的管保存试样。在某些情况下,有必要将试样存放在真空瓶或放有硅胶的干燥器中。应尽量减少对试样的运输。

## 8 试验程序

### 8.1 试验环境

试验应在以下合适的环境下进行:

- 相对稳定的室温及相对湿度;
- 最小限度的大气污染(如灰尘,化学蒸气等);
- 没有影响试验机控制和数量采集的外部电信号干扰;
- 最小限度的外部机械振动。

### 8.2 试验准备

#### 8.2.1 试验机调试

试验机的控制精度应使在整个试验过程中应力(或应变)值的峰值误差在1%以内。

#### 8.2.2 试样的安装

试样在安装时尽量避免预应力和预应变,同时不应破坏系统的对中性。

#### 8.2.3 引伸计安装

安装接触式引伸计应注意接触压力,过高的接触压力可导致试样在引伸计位置开裂,过低的接触力则会导致引伸计滑动。

#### 8.2.4 循环波形

常见的蠕变-疲劳循环波形示例如图2所示,需要输入的参数通常包括最大应力和最小应力或应力比和平均应力或应力范围和平均应力,最大应变和最小应变或应变比和平均应变或应变范围和平均应变,保载时间、加载速率或总循环周期等。也可使用其他波形。试验所用的波形及其参数应记录于试验报告中。

#### 8.2.5 预测量

8.2.5.1 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,用以确认测量系统(力及应变)工作的正确性。

8.2.5.2 为判别在力、位移和测量系统中可能存在的问题,应在试验开始之前进行以下测量:

- a) 应在室温和试验温度下测量弹性模量。在每个温度下测量值的偏差不应超过预期值的10%。建议按照GB/T 22315确定弹性模量。
- b) 应在实测温度到达规定试验温度并稳定(试验机处在力控模式下的力值零点处)之后确定平均热膨胀系数。热膨胀系数可通过用热应变除以从室温到试验温度的温度变化来计算。热膨胀系数的偏差不应超过预期值的10%。

注:热膨胀系数的获取方法有多种,可查找相关标准、文献资料或依据双方的技术协议,也可开展热膨胀系数试验。

8.2.5.3 通常引伸计的安装是在室温条件下进行的,当达到试验温度时对其示值调零。由于引伸计的标距已经因为热膨胀发生了变化,在高温试验中应对应变值的测量进行修正。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。

8.2.5.4 对于某些系统,特别是试验温度超过 1 000 °C 时,可能在试样处于热状态时安装引伸计,在这种情况下应通过可靠的方法测量实际的标距。

### 8.2.6 试样加热

安装加热设备。在加热期间,试样温度不应超过规定温度所允许的上限。在整个加热过程中,试样受力不应超过材料屈服强度的 10%。应在试验温度至少保温 30 min 才可开始试验。

## 8.3 加载试验

8.3.1 在试样没有施加力的情况下,应将引伸计清零。

8.3.2 除非测试的目的是评估加载顺序的影响,否则第一个循环的首个四分之一的方向应是拉伸。

8.3.3 试验过程中,控制参量的相邻循环间循环峰值波动不超过 0.5%,并且在整个过程中峰值波动不超过 2%。

8.3.4 在试验中断的情况下,只有当能够确定试样没有经历由于中断引起的任何额外变形时,试验才可以重新启动。如试验重新启动,应记录于试验报告中。在试验完成后,可通过分析设备记录的试验数据,并可结合断口分析最终确定试验结果的有效性。

8.3.5 试验应在能够对环境温度和湿度进行控制的实验室中进行。在整个试验过程中,除非由于热弹性效应,显示的试样温度与试验温度的偏差( $T_i - T$ )不应大于  $\pm 2$  °C,平行段的温度变化不应大于  $\pm 2$  °C 或试验温度 1% 两者中的较大值。

注:建议保护试验机周围的区域免受气流影响。这在保载时间期间记录数据时特别重要,因为通风引起的局部温度变化可能导致控制和响应变量的显著变化。

## 8.4 试验记录

### 8.4.1 试验记录的内容

在试验过程中,应在循环内的关键转折点,即在力和应变的最大值与最小值处以及在保载时间的开始和结束时连续记录力、变形、温度。

### 8.4.2 应力-应变滞后迴线

8.4.2.1 如试验周期较短,应记录各个循环控制变量最大最小值以及保载开始和结束时处的应变、应力信息,若试验周期较长,则可按照合适的频率采集上述信息,但所采集的信息应能完整反映材料的应力-周次或应变-周次的响应行为。

8.4.2.2 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)。

8.4.2.3 对于自动数据采集系统,可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 6.6)。

8.4.2.4 在试验开始时,应连续记录初始的应力-应变滞后迴线。而在试验过程中,可定期记录。如疲劳数据可自动获取,记录频次应随疲劳周次呈对数递增(即 1、2、5、10、20、50 等)。可通过预定义的间隔或两个参数(应力和应变)中每一个参数的级数来获取滞后迴线。在任一情况下,采样频率应能明确界定滞后迴线(见图 1)。

### 8.4.3 数据采集

如试验设备允许,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、应变和温度的峰值,以便根据 8.5 确定试样失效。

## 8.5 断裂判据

8.5.1 试验结束通常定义为相对于试验期间的稳定状态,最大拉伸应力或拉伸和压缩弹性模量比降低一定的百分比(如图 7 中的  $X\%$ )。

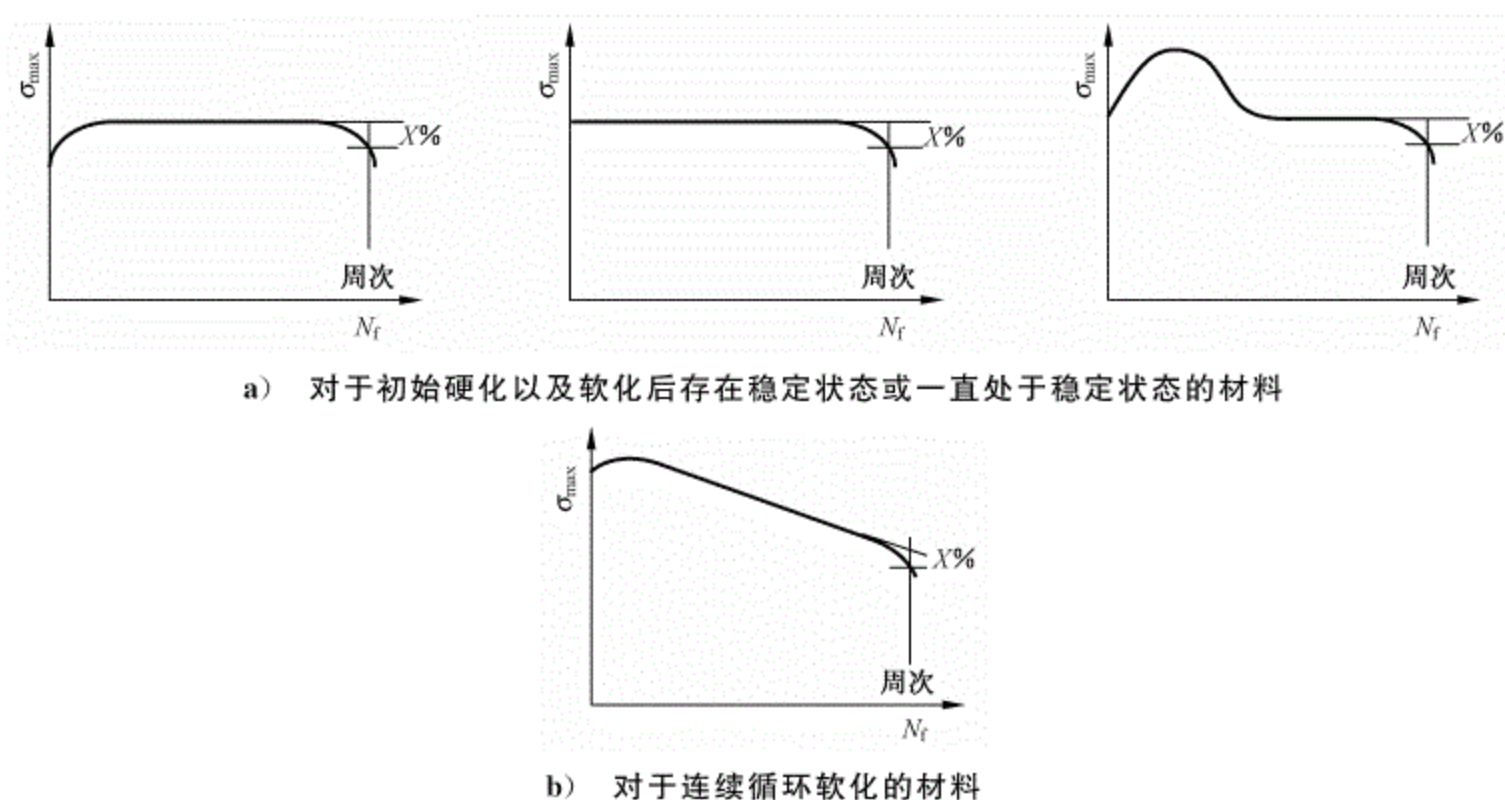


图 7 基于材料的峰值应力降低的裂纹形成和终止试验条件

8.5.2 选择合适的裂纹形成标准,能有效地减小单个试验系列内循环寿命分散性,使得不同试验间蠕变-疲劳数据具有可比较性。裂纹形成的循环数是达到特定裂纹尺寸(或裂纹面积)的周次。可用以下方法来确定:

- 最大拉伸应力相对于试验期间的水平的特定百分比降低;
- 在滞后回线的拉伸和压缩弹性模量比的特定百分比降低;
- 相对于最大压缩应力的最大拉伸应力的特定百分比降低。

上述三种方法都适用于在应变控制下进行的试验,只有方法 b) 适用于应力控制下进行的试验。

## 8.6 试验终止

8.6.1 试验完成后,应立即关闭加热系统,以便在试验后的检查之前减少试样和裂纹表面的氧化程度。如试验在试样断裂之前终止,应尽量避免在加热设备冷却过程中的试样过载。

8.6.2 在试样彻底断裂前结束试验,可避免引伸计和断口的损伤。

## 8.7 试验结束后的检查

应确定裂纹的位置,并记录在试验报告中。裂纹位置按下列描述记录:

- 在引伸计跨距之间;
- 在引伸计与试样接触点或在热电偶位置处;
- 在标距段内,引伸计的量规长度之外;
- 过渡圆弧段内;



- e) 试样夹持段。

## 9 试验报告

### 9.1 试验报告应包括的内容：

- a) 本标准编号；
- b) 材料名称、牌号；
- c) 试样图纸、取样位置及方向；
- d) 试样关键尺寸的测量值，如标距段直径；
- e) 引伸计标距；
- f) 试验温度；
- g) 试验波形的完整描述，包括形状、各段加载速率、保载时间、控制参量的最大最小值等或其他能完整给出试验波形的表述；
- h) 断裂判据及试验结束准则；
- i) 本试验获得的初始弹性模量；
- j) 记录每个循环转向点，即循环峰值、保载时间的起始和终止，对应位置的应力、应变、温度；
- k) 半寿命周次处的完整信息，包括最大和最小应变，在保载时间开始和结束时的应变，最大和最小应力，在保载时间开始和结束时的应力，弹性模量( $E_N$ 、 $E_T$  和  $E_C$ )，弹性应变幅、塑性应变幅、总应变幅或弹性应变范围、非弹性应变范围和总应变范围，循环内的最大应力和最小应力或应力范围，完整定义的滞后回线和保载期间应力、应变、时间、温度的响应以及上述信息所对应的周次数；
- l) 试样循环断裂的周次数；
- m) 试验时间，即总循环周期( $\tau_f$ )和试样失效的循环( $N_f$ )周次数的乘积；
- n) 断裂位置；
- o) 表明试验结果无效的证据；
- p) 试验过程中任何偏离本标准的情况以及可能导致的对试验结果的影响。

### 9.2 以下信息可以进一步理解材料的蠕变-疲劳行为或者用于追溯和分析试验结果，建议记录于试验报告中：

- a) 材料在室温及高温下的基本力学性能，如弹性模量、屈服强度、抗拉强度及热膨胀系数等；
- b) 试样制备方法；
- c) 试样尺寸检定证书或合格证书；
- d) 设备校准证书编号及校准日期；设备型号，量程以及作动器类型(电子或液压)；
- e) 夹具类型；
- f) 高温炉类型(电阻、辐射、感应等)；
- g) 热电偶类型；
- h) 附录 A 中的蠕变-疲劳寿命函数关系式；
- i) 机械制图的螺纹。

附 录 A  
(资料性附录)  
蠕变-疲劳寿命函数关系式

### A.1 概述

本附录给出了两个可用于等温蠕变-疲劳数据的经验公式。此附录给出使用半寿命的滞后迴线的控制参数和容易实现的测量量的关系。当所有试验数据的滞后响应表现出可测量的非弹性应变,且在相关数据集中的时变机制没有显著变化时,这些关系将导致良好的相关性。试验波形会影响损伤机制(即,对蠕变和/或环境损伤的影响)。此附录给出的关系式只适用于疲劳过程中损伤机制不发生变化的情况。

### A.2 频率修正的应变寿命

利用循环频率进行修正的寿命公式见式(A.1):

$$\Delta\epsilon_{in} = C(N_f\nu^{k-1})^{-\beta} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$C, \beta, k$ ——由回归分析确定的常数。为了验证回归分析,需在直角坐标系中绘制试验数据及其相关性,如利用  $\Delta\epsilon_{in}\nu^{\beta(k-1)}$  对  $N_f$  作图。当  $k=1$  时,这种关系即为与时间无关的应变寿命关系(即,疲劳寿命与频率无关)。

### A.3 频率修正的拉伸滞迴能量

频率修正的拉伸滞迴能量与平均应力有关,特别适用于高强度低塑性的材料,比如铸态镍基高温合金,见式(A.2):

$$\sigma_{max}\Delta\epsilon_{in} = C_1(N_f\nu^{k_1-1})^{-\beta_1} \dots\dots\dots (A.2)$$


式中:

$C_1, k_1, \beta_1$ ——回归常数。为了验证回归分析,需在直角坐标系中绘制试验数据及其相关性。

### A.4 有效频率

可使用有效频率获取波形影响。实际频率  $\nu$  定义为一个周次总时间的倒数。然而,一个周次的各个部分造成的损伤可能不一样。例如,对于塑性材料,压缩过程可部分愈合拉伸保载期间产生的蠕变损伤,从而减小频率对寿命的影响。

参 考 文 献

- [1] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法
  - [2] GB/T 2039—2012 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法
  - [3] GB/T 3075—2008 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法
  - [4] GB/T 6379.2—2004 测量方法与结果的准确度(正确度与精密度) 第2部分:确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法
  - [5] GB/T 6398—2017 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法
  - [6] GB/T 15248—2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法
  -  [7] JJG 762—2018 引伸计
-