



中华人民共和国国家标准

GB/T 2039—2024

代替 GB/T 2039—2012

金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法

Metallic materials—Uniaxial creep testing method in tension

(ISO 204: 2023, Metallic materials—Uniaxial creep testing in tension—
Method of test, MOD)

2024-05-28 发布

2024-12-01 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	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号及说明	6
5 试验原理	8
6 试验设备	8
7 试样	12
8 试验程序	15
9 试验结果的处理	18
10 试验有效性	18
11 试验结果	18
12 试验报告	18
附录 A (资料性) 关于热电偶漂移的信息	20
附录 B (资料性) 热电偶校准方法	23
附录 C (规范性) V形和钝环形缺口试样的蠕变试验	24
附录 D (资料性) 结果的表示和图解法外推	27
附录 E (资料性) 依据不确定评定指南(GUM)来估计不确定度的方法	35
参考文献	40

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 2039—2012《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》，与 GB/T 2039—2012 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 更改了范围：连续蠕变试验、间断蠕变试验、只测量断裂时间的蠕变断裂（持久）试验以及验证给定应力下的通过性试验（见第 1 章，2012 年版的第 1 章）；
- 增加和更改了部分术语、定义及其符号（见第 3 章，2012 年版的第 3 章）；
- 图 1 更改为“应力-延伸曲线示意图”（见图 1，2012 年版的图 1）；
- 更改了表 1 中的部分符号和说明（见第 4 章，2012 年版的第 4 章）；
- 更改了“延伸和伸长测量装置”内容（见 6.2，2012 年版的 6.2）；
- 增加了对热电偶冷端温度的要求及间接的温度测量方法要求（见 6.3.2.1）；
- 将原资料性附录 A 中关于不同类型热电偶的使用时间和时间的要求更改为正文（见 6.3.3，2012 年版的附录 A）；
- 更改了参考长度 L_r 的测定（见 7.5，2012 年版的 7.5）；
- 增加了组合试验（见 8.3.3）；
- 增加了关于应力集中系数 K_t 的计算公式（见附录 C）。

本文件修改采用 ISO 204:2023《金属材料 单轴拉伸蠕变试验 试验方法》。

本文件与 ISO 204:2023 相比做了下述结构调整：

- 附录 D 对应 ISO 204:2023 的附录 E；
- 附录 E 对应 ISO 204:2023 的附录 D。

本文件与 ISO 204:2023 的技术差异及其原因如下：

- 用规范性引用的 GB/T 228.2、GB/T 12160 和 GB/T 16825.2 分别替换了 ISO 6892-2、ISO 9513 和 ISO 7500-2，增加了对 GB/T 4989、GB/T 8170、GB/T 10623、JJF 1637、JJG 141、JJG 276 和 JJG 617 的规范性引用，删除了对 ISO 6892-1 的规范性引用，以适应我国的技术条件；
- 在 6.1 中增加了对试验机同轴度的要求以及试验机的校准周期要求，确保试验结果的准确性；
- 由于应变测量装置的稳定性受试验周期和环境条件影响较大，故在 6.2 中对应变测量装置中引伸计的校准周期由 3 年修改为 1 年；
- 由于加热炉的均温带直接影响蠕变试验结果，故增加了 6.3.5 加热炉均温带的校准。

本文件做了下列编辑性改动：

- 更改标准名称为“金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法”。

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：钢铁研究总院有限公司、中机试验装备股份有限公司、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、深圳三思纵横科技股份有限公司、深圳万测试验设备有限公司、华东理工大学、浙江省特种设备科学研究院、国标（北京）检验认证有限公司、冶金工业信息标准研究院、钢研纳克检测技术股份有限公司。

本文件主要起草人：高怡斐、马双伟、魏力民、张显程、刘杰、黄星、杜斌、李璞、董莉、卢奇、饶立文、

GB/T 2039—2024

谈建平、傅军平、侯慧宁、程义。

本文件所代替文件的历次版本发布情况为：

——1980年首次发布为 GB/T 2039—1980；

——1997年第一次修订，与 GB/T 6395—1986 合并发布为 GB/T 2039—1997，2012年第二次修订；

——本次为第三次修订。

引 言

蠕变是材料在承受载荷时缓慢变形的现象。

附录包括使用热电偶及其校准进行的温度测量、带有圆周 V 形和钝形缺口的蠕变试样、测量不确定度的评估和蠕变断裂寿命的外推方法。

本文件包含了欧洲蠕变协作委员会(ECCC)制定的许多建议。

金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法

1 范围

本文件规定了以下方法：

- a) 连续监测延伸的连续蠕变试验；
- b) 定期测量伸长率的间断蠕变试验；
- c) 通常只测量断裂时间的蠕变断裂(持久)试验；
- d) 给定应力下超过预定时间的验证试验,不记录延伸率或伸长率。

注：蠕变试验能进行至试样断裂,也能在断裂前停止。

本文件适用于光滑试样和缺口试样的蠕变(持久)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 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试验方法(GB/T 228.2—2015,ISO 6892-2:2011,MOD)

GB/T 4989 热电偶用补偿导线

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语(GB/T 10623—2008,ISO 23718:2007,MOD)

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 16825.2 静力单轴试验机的检验 第2部分:拉力蠕变试验机施加力的校验(GB/T 16825.2—2018,ISO 7500-2:2006, IDT)

GB/T 16839.1 热电偶 第1部分:电动势规范和允差(GB/T 16839.1—2018,IEC 60584-1:2013, IDT)

JJF 1637 廉金属热电偶校准规范

JJG 141 工作用贵金属热电偶

JJG 276 高温蠕变、持久强度试验机检定规程

JJG 617 数字温度指示调节仪检定规程

3 术语和定义

GB/T 10623 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

参考长度 reference length

L_r

用于计算延伸率或伸长率的基准长度。

注 1：本文件规定了几种不同的标距长度和参考长度。这些长度反映了不同实验室的实际使用习惯。在某些情况下，用刻线或凸台的形式在试样上直接标记这些长度，而在其他情况下，测定蠕变伸长的标记长度可能是依据计算得出的一个虚拟长度。

注 2：计算方法见 7.5。

3.2

原始标距 original gauge length

L_0

试验前在室温下测得的试样上标记之间的长度。

注：通常， $L_0 \geq 5D$ 。

3.3

引伸计标距 extensometer gauge length

L_e

引伸计测点之间的距离。

3.4

平行长度 parallel length

L_c

试样平行截面缩减部分的长度。

3.5

断后标距 final gauge length after fracture

L_u

在室温下将断裂试样仔细对齐并保证其轴线在同一直线上时试样上标记之间的长度。

3.6

原始截面面积 original cross-sectional area

S_0

试验开始前，室温下测定的试样平行段的横截面积。

3.7

断裂后最小横截面积 minimum cross-sectional area after fracture

S_u

试样断裂后，在室温下将试样断裂部分仔细对齐，使其轴线处于同一直线上时测定的平行段内的最小横截面积。

3.8

初始应力 initial stress

R_0

施加在试样上的试验力除以试样的原始横截面积 S_0 。

3.9

延伸 extension

ΔL_{et}

在试验温度下，时间 t 时引伸计标距 L_e 的增加量。

注 1：延伸用于不间断蠕变试验，使用引伸计对试样长度的增量进行连续测量。

注 2：更多信息见 6.2。

3.10

伸长 elongation

ΔL_{ot}

时间 t 时原始标距 L_0 的增加量。

注 1：伸长率主要用于间断蠕变试验，手动测量试样长度的增加量。

注 2：更多信息见 6.2。

3.11

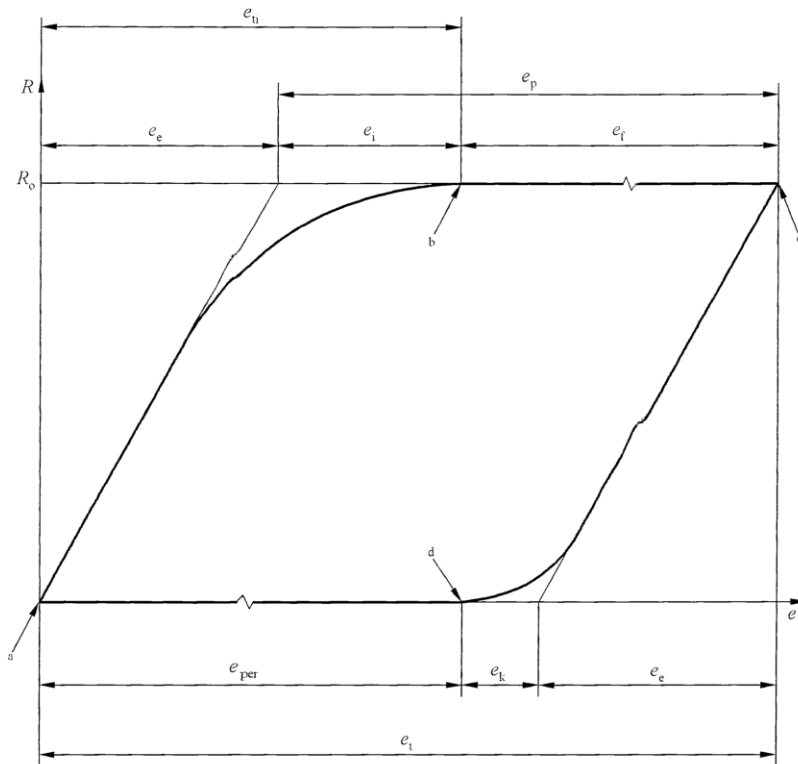
延伸率 percentage extension

e

试验温度下，延伸量相对于参考长度 L_r 的百分比，如公式(1)所示：

$$e = \frac{\Delta L_{et}}{L_r} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

注：见图 1。



标引符号说明：

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| R —— 应力； | e_f —— 蠕变延伸率； |
| R_0 —— 初始应力； | e_{per} —— 残余延伸率； |
| e_{ti} —— 初始总延伸率； | e_k —— 滞弹性延伸率； |
| e_e —— 弹性延伸率(初始应力卸载后)； | e —— 延伸率； |
| e_p —— 塑性延伸率； | e_t —— 总延伸率。 |
| e_i —— 初始塑性延伸率； | |
| ^a 开始加载。 | |
| ^b 加载结束。 | |
| ^c 开始卸载。 | |
| ^d 卸载结束。 | |

图 1 应力-延伸曲线示意图

3.12

伸长率 percentage elongation

A

伸长量相对于参考长度 L_r 的百分比,如公式(2)所示:

$$A = \frac{\Delta L_{at}}{L_r} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

3.13

弹性延伸率 percentage elastic extension

e_e

试验温度下,延伸量相对于参考长度 L_r 的百分比,与初始应力 R_0 成正比。

注 1: 该值能根据加载期间的应力/延伸率值计算。见 8.4.2。

注 2: 见图 1。

3.14

初始总延伸率 percentage initial total extension

e_{ti}

试验温度下,初始应力 R_0 加载结束时,延伸量与参考长度 L_r 的比值。

注: 见图 1。

3.15

初始塑性延伸率 percentage initial plastic extension

e_i

试验温度下,初始应力 R_0 加载结束时的延伸量与参考长度 L_r 的比值,并确定为初始总延伸率 e_{ti} 与弹性延伸率 e_e 之间的差异,如公式(3)所示:

$$e_i = e_{ti} - e_e \dots\dots\dots(3)$$

注 1: 见图 1。

注 2: 该值表示加载阶段的塑性延伸。

3.16

总延伸率 percentage total extension

e_t

试验温度下和试验应力下, t 时刻的延伸量与参考长度 L_r 的比值。

注: 见图 1。

3.17

塑性延伸率 percentage plastic extension

e_p

试验温度下, t 时刻的延伸量与参考长度 L_r 的比值,确定为总延伸率 e_t 与弹性延伸率 e_e 之间的差值,表示为参考长度 L_r 的百分比,如公式(4)所示:

$$e_p = e_t - e_e \dots\dots\dots(4)$$

注: 见图 1。

3.18

最终总延伸率 percentage total ultimate extension

e_u

试验温度下,断裂后的总延伸,以参考长度 L_r 的百分比表示。

3.19

蠕变延伸率 percentage creep extension

e_r

试验温度下,加载结束后,塑性延伸率 e_p 与初始塑性延伸率 e_i 的差值,以参考长度 L_r 的百分比表

示。如公式(5)所示:

$$e_f = e_p - e_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

注 1: 见图 1。

注 2: 后缀 f 源于“creep”在法语中的表示“fluage”。

3.20

滞弹性延伸率 percentage anelastic extension

e_k

试验温度下,卸载结束后,负延伸量与参考长度 L_r 的百分比。

注: 见图 1 和 8.4。

3.21

残余延伸率 percentage permanent extension

e_{per}

试验温度下,卸载结束后,总延伸率 e_t 与弹性延伸率 e_e 和滞弹性延伸率 e_k 的差,以参考长度 L_r 的百分比表示,如公式(6)所示:

$$e_{per} = e_t - (e_e + e_k) \quad \dots\dots\dots (6)$$

注 1: $e_k \approx 0$ 的情况下, $e_{per} \approx e_p$ 。

注 2: 见图 1。

3.22

残余伸长率 percentage permanent elongation

A_{per}

室温下卸除试验力后,伸长量与参考长度 L_r 的百分比。

3.23

蠕变断裂后伸长率 percentage elongation after creep fracture

A_u

断裂后的残余伸长, $L_u - L_o$, 与参考长度 L_r 的百分比,如公式(7)所示。

$$A_u = \frac{L_u - L_o}{L_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (7)$$

注: A_u 可以用规定温度 T 作为上标,单位为摄氏度(°C),初始应力 R_o 作为下标,单位为兆帕(MPa);见表 1 中的示例。

3.24

蠕变断裂后断面收缩率 percentage reduction of area after creep fracture

Z_u

试样断裂后测得的最大横截面积变化($S_o - S_u$),与原始截面面积 S_o 的百分比,如公式(8)所示:

$$Z_u = \frac{S_o - S_u}{S_o} \times 100 \quad \dots\dots\dots (8)$$

注: Z_u 可以用特定温度 T 作为上标,单位为摄氏度(°C),初始应力 R_o 作为下标,单位为兆帕(MPa);见表 1 中的示例。

3.25

蠕变延伸时间 creep extension time

t_{fx}

在规定温度 T 和初始应力 R_o 下,试样应变量达到规定比例的蠕变延伸 x 所需的时间。

例如: $t_{f0.2}$ 。

3.26

塑性延伸时间 plastic extension time

t_{px}

在规定温度 T 和初始应力 R_0 下, 试样应变变量达到规定比例的塑性延伸 x 所需的时间。

注: t_{p1} 的示例($t_{p1} = 100\ 000\ h$ 对应于 $R_0 = 120\ MPa$ 时的 $e_p = 1\%$)。

3.27

蠕变断裂时间 creep rupture time

t_u

试样在规定温度 T 和初始应力 R_0 下的断裂时间。

注: 符号 t_u 可以用上角标表示规定温度 T , 单位为摄氏度, 下角标表示初始应力 R_0 , 单位为兆帕; 见表 1 中的示例。

3.28

单头试验机 single test piece machine

可以进行单个试样试验的试验机。

3.29

多头试验机 multiple test piece machine

在相同温度下可以同时进行多于一个试样试验的试验机。

4 符号及说明

本文件使用的符号及说明见表 1。

表 1 符号及说明

符号	单位	名称
A	%	伸长率
A_{per}	%	残余伸长率 示例如下: $A_{per50/5\ 000}^{375}$: 在规定温度 375 °C 下, 初始应力为 50 MPa, 5 000 h 后的残余伸长率
A_u	%	蠕变断裂后伸长率: $A_u = \frac{L_u - L_0}{L_r}$ 示例如下: A_{u50}^{375} : 在规定温度 375 °C 下, 初始应力为 50 MPa, 蠕变断裂后的伸长率
a	mm	方形或矩形横截面试样的厚度[见图 2b)]
b	mm	方形或矩形横截面试样平行长度的横截面宽度
D	mm	圆形横截面试样的标距部分直径
D_n	mm	过渡段直径
d	mm	在缺口/无缺口复合试样无缺口部分的标距段内的直径
d_n	mm	圆形缺口试样的缺口底径 对于缺口/无缺口复合试样, $d = d_n$
e	%	延伸率

表 1 符号及说明 (续)

符号	单位	名称
e_e	%	弹性延伸率
e_f	%	蠕变延伸率见公式(5) 示例如下: $e_{f50/5\ 000}^{375}$:在规定的温度 375 °C 下,5 000 h 后初始应力为 50 MPa 的蠕变延伸率
e_{fu}	%	蠕变断裂时的蠕变延伸率
e_i	%	初始塑性延伸率
e_k	%	滞弹性延伸率
e_p	%	塑性延伸率
e_{per}	%	残余延伸率
e_{pu}	%	蠕变断裂时的塑性延伸率
e_t	%	总延伸率
e_{ti}	%	初始总延伸率
e_u	%	最终总延伸率
L_c	mm	平行长度
L_e	mm	引伸计标距
ΔL_{et}	mm	时间 t 时刻引伸计标距 L_e 的增加量
L_n	mm	包含缺口的平行长度
L_o	mm	原始标距
ΔL_{ot}	mm	时间 t 时刻原始标距 L_o 的增加量
L_r	mm	参考长度
L_u	mm	断后标距
n	—	蠕变应力指数
R_o	MPa	初始应力
r_n	mm	缺口底部半径
r	mm	过渡半径
S_o	mm ²	原始截面面积
S_u	mm ²	断裂后最小横截面积
T	°C	规定温度
T_c	°C	校正后的测量温度
t	h	加载结束后经历的时间
t_{fx}	h	蠕变延伸时间
t_{px}	h	塑性延伸时间

表 1 符号及说明(续)

符号	单位	名称
t_u	h	蠕变断裂时间 示例如下： t_{u50}^{375} : 在规定温度 375 °C 下, 初始应力为 50 MPa, 蠕变断裂时间
t_{un}	h	缺口试样的蠕变断裂时间
x	%	规定的蠕变或塑性延伸率
Z_u	%	蠕变断裂后断面收缩率: $Z_u = \frac{S_o - S_u}{S_o} \times 100$ 示例如下： Z_{u50}^{375} : 在规定温度 375 °C 下, 初始应力为 50 MPa, 蠕变断裂后的断面收缩率
<p>注: 使用的主要下角标符号(r、o 和 u)如下:</p> <p>——r 对应于参考状态;</p> <p>——o 对应于原始状态;</p> <p>——u 对应于最终状态(断裂后)。</p>		

5 试验原理

将试样加热至规定温度, 沿试样轴线方向施加恒定拉伸力或恒定拉伸应力(见注)并保持一定时间获得以下结果:

- 规定蠕变延伸(连续试验);
- 通过试验获得适当间隔的残余伸长值(不连续试验);
- 蠕变断裂时间(连续或不连续试验)。

注: “恒定应力”或“真应力”是指在整个试验过程中任一时刻施加在试样上的试验力与试样横截面积之比保持恒定。通常恒定应力和恒定试验力的试验所获得的结果不同。

6 试验设备

6.1 试验机

试验机应能提供施加轴向试验力并使试样上产生的弯矩和扭矩最小。试验前应对试验机进行外观检查以确保试验机的加力杆、夹具、万向节和连接装置都处于良好状态。

试验力应均匀平稳无震动地施加在试样上。

试验机应远离外界的震动和冲击。试验机应具有试样断裂时将震动降到最小的缓冲装置。

试验机至少应符合 GB/T 16825.2 中 1 级试验机的要求。

为了保证试验机和夹具能够对试样准确地施加试验力, 应定期校准试验机的力值和加载同轴度, 试验机的加载同轴度应不超过 10%。试验设备两次校准/检定的时间间隔依据设备类型、试验条件、维护水平和使用频次而定, 除非另有规定, 校准/检定周期不超过 12 个月, 如果预期试验时间超过校准周期, 应在试验开始前对载荷传感器重新校准。

试验机的校准/检定参考 JJG 276。若能够证明试验设备在更长的时间内能够满足相关规定的要

求,则可延长两次校准/检定之间的时间。

注:参考 GB/T 34104 进行加载同轴度的校准。

6.2 延伸和伸长测量装置

6.2.1 延伸测量装置

对于连续试验,应使用引伸计或者能够满足相同准确度要求的其他设备测量试样的延伸,引伸计系统应满足 GB/T 12160 中 1 级或优于 1 级准确度的要求。可以采用直接安装在试样上的引伸计,也可以采用非接触式的引伸计(例如光学或激光引伸计)。

引伸计校准的范围应包含预期的蠕变应变量。

引伸计应每年校准一次,除非试验时间超过 1 年。如果预期试验时间超过校准周期,应在蠕变试验开始前对引伸计重新校准。

引伸计的标距不应小于 10 mm。

引伸计应能测量试样单侧或双侧的延伸,双侧引伸计作为优先选择。

在报告中应注明所使用的引伸计类型(例如单侧、双侧、轴向、径向)。当使用双侧引伸计测量试样延伸时,应报告平均延伸。

当引伸计安装在试样的夹持末端来测量蠕变延伸时,末端的外形和尺寸应保证能够在试样的参考长度内完全准确地测定延伸。依据参考长度 L_r 测量蠕变延伸率。

引伸计的标距宜尽可能地接近参考长度。为了提高测量准确度,标距宜尽可能地大。

当使用镍基合金材料的引伸计时宜注意避免虚假的负蠕变。

对于采用短标距试样的小应变试验,例如应变不大于 1%,需要仔细选用足够分辨力的测量装置。

注 1:参考文献[13][14]中给出了用于蠕变测试和认证的传感器的长期稳定性信息。

注 2:如仅测量蠕变断裂后的残余伸长或规定时间的残余伸长,则无需使用引伸计。

6.2.2 伸长测量装置

对于不连续试验,试样卸载后冷却到室温,采用合适的工具测量标距长度的残余伸长。测量工具的精度应达到 $0.01\Delta L$ 或 0.01 mm,取其大者。完成测量后,试样可以再次升温 and 加载。

6.3 加热装置和温度测量装置的校准

6.3.1 加热装置温度的允许偏差

采用加热装置加热试样至规定温度(T)。规定温度(T)与校正后的测量温度(T_c)的允许偏差和试样长度方向上允许的最大温度偏差应符合表 2 规定。

表 2 T_c 与 T 的允许偏差和试样长度方向上允许的最大温度偏差

单位为摄氏度

规定温度 T	T_c 与 T 的允许偏差	试样长度方向上允许的最大温度偏差
$T \leq 600$	± 3	3
$600 < T \leq 800$	± 4	4
$800 < T \leq 1000$	± 5	5
$1000 < T \leq 1100$	± 6	6

对于规定温度超过 1 100 °C 的试验,应由相关方协商确定温度的允许偏差。

校正后的测量温度(T_c)是在试样的平行段表面测得,应考虑所有来源的误差,包括漂移(见附录 A),并对系统误差进行了修正。

允许采用加热炉各个加热区间温度的间接测量方式来代替直接测量试样表面温度,这种方式应证实能满足上述偏差的要求。

如果使用引伸计,则应考虑某种方法保护炉外的引伸计部分不会由于炉外空气温度的波动而对长度测量产生太大影响。

读取引伸计测量数值时,试验机环境温度波动不应超过 ± 3 °C。

对于不连续试验,标距测量时的环境温度波动不应超过 ± 2 °C。如果超过这个范围,应考虑环境温度变化带来的影响。

6.3.2 温度测量

6.3.2.1 通则

温度显示装置的分辨力至少应为 0.5 °C,测温装置的准确度应优于或等于 1 °C。

对于热电偶,在没有带冷端补偿的测量仪器的情况下,冷端温度(通常为 0 °C)应测量到 0.5 °C 以内。

实验室冷端温度应保持稳定,并应用适当的补偿来确定热电偶测量的温度。

注:有关热电偶漂移的信息见附录 A,热电偶校准方法见附录 B。

对于间接的温度测量方法,如高温计、热像仪或热电阻技术,应证明温度测量的国际单位制系统具有可追溯性,并且可以实现上述精度和分辨率。

6.3.2.2 温度测量装置的校准

温度测量装置(包括补偿导线、接点、冷端、显示器或记录仪、数据线等)应按照可追溯至温度国际单位的校准方法进行校准。

如可行,应在相关温度范围内对测温装置仪表按照 JJG 617 每年校准一次,校准结果应在校准报告中给出。

6.3.2.3 单头试验机

对于单头试验机,试样的平行长度小于或等于 50 mm 的应至少使用 2 支热电偶。对于平行长度超过 50 mm 的试样,应至少使用 3 支热电偶。任何情况下应将热电偶固定在试样平行长度的两端,如果使用 3 支热电偶,应在试样平行长度的中段固定 1 支热电偶。

如果证实加热炉能够使试样上的温度波动不超过 6.3.1 的规定,那么热电偶的数量可减少为 1 支。

6.3.2.4 多头试验机

对于多头试验机,建议每个试样上至少固定 1 支热电偶。如果只用一支热电偶,应固定在试样平行长度的中间位置。如果仅在炉内安装 3 支控温热电偶,应有充分的数据证明每个试样的温度满足 6.3.1 的要求。

对于间接测温装置,要求有规律地测量每个加热区间内热电偶与给定区间内一定数量试样上的温度差值数据。对于温度差的非系统部分,800 °C 以下不超过 ± 2 °C、800 °C 以上不超过 ± 3 °C。

6.3.2.5 缺口试样

缺口试样的温度测量应满足 6.3.2.3 或 6.3.2.4 的要求。建议在缺口底部固定一支热电偶。对于缺

口试样的试验细节在附录 C 中给出。

6.3.3 热电偶

热电偶的测量端与试样表面应保持良好的热接触,并应屏蔽以避免热源的直接辐射。炉内电偶丝其余部分应有热防护和电绝缘。

应采取预防措施,尽量减少热电偶的污染和物理损坏。绝缘子和/或绝缘层应保持清洁状态,以尽量减少污染并防止导电。

有关不同类型热电偶的信息参见 GB/T 16839.1。

对于大于或等于 400 °C 的温度,建议优先使用 S 型或 R 型贵金属热电偶。

K 型廉金属热电偶只能在低于 400 °C 的温度下使用,或在高于 400 °C 的温度下使用少于 1 000 h 的时间,在不切掉暴露过的电偶丝和重新校准的情况下,不应重复使用。

N 型廉金属热电偶可用于低于 600 °C 的温度,或在高于 600 °C 的温度下使用少于 3 000 h 的时间,不应重复使用。温度高于 760 °C 时,不准许使用 N 型廉金属热电偶。

如果在校准周期内偏差超过以下值,则应进行更频繁的校准或对热电偶指示的温度进行修正。见附录 A 和参考文献[16]、[17]、[18]、[19]、[20]。应记录偏差量,并按要求提供。

- $T \leq 600 \text{ °C}$, $\pm 1 \text{ °C}$;
- $600 \text{ °C} < T \leq 800 \text{ °C}$, $\pm 1.5 \text{ °C}$;
- $800 \text{ °C} < T \leq 1\ 100 \text{ °C}$, $\pm 2 \text{ °C}$ 。

注 1: 热电偶偏差取决于使用的热电偶类型和温度下的暴露时间;见附录 A。

注 2: 见参考文献[8]。

注 3: 此条款不适用于间接温度测量。

注 4: 用其他类型的能证明其适用性的热电偶。

6.3.4 热电偶的校准/检定

热电偶应满足 GB/T 16839.1 要求,热电偶用补偿导线应满足 GB/T 4989 要求。热电偶应按照 JJF 1637 和 JJG 141 进行校准。

对于试验时间较短(通常不超过 500 h)的重复使用的贵金属热电偶的校准期应不超过 13 个月。对于试验时间超过 12 个月的贵金属热电偶应按以下要求校准/检定:

- 规定温度小于或等于 600 °C 的每 4 年校准/检定一次;
- 规定温度大于 600 °C 而小于或等于 800 °C 的每 2 年校准/检定一次;
- 规定温度大于 800 °C 的每 1 年校准/检定一次。

注: 有关热电偶校准的更多信息,见附录 B。

在每次试验后未重新校准的情况下,不准许重复使用廉金属热电偶,除非经验表明,漂移引起的误差不超过 6.3.3 中关于有问题的试验条件的限制,在这种情况下,可以不超过 500 h 的使用间隔对其进行校准。

如果试验时间超过校准/检定周期的应在试验完成后立即校准/检定。

应证明所用热电偶的误差是在试验温度下确定的,或者在包含试验温度的范围内是典型的。只要进行了适当的校正,就可使用显示误差超过 1 °C 的热电偶。

如果热电偶重新焊接,则应在使用前再次校准/检定。

廉金属热电偶可以切除掉暴露的电偶丝,使用前应重新校准。

6.3.5 加热炉均温带的校准

加热装置的均温带应按照 JJG 276 进行校准。

7 试样

7.1 形状和尺寸

7.1.1 光滑试样的形状和尺寸

通常应使用圆形横截面的试样,见图 2。

一般情况下,试样加工成圆形比例试样($L_r = k\sqrt{S_0}$)(见图 2)。 k 值应大于或等于 5.65 并在试验报告中记录 k 的取值,例如 $L_r \geq 5D$ 。

特殊情况下,还可选择矩形、方形或其他形状横截面的试样。对于这些特殊试样,也适用圆形横截面棒状试样的相关规定。

通常情况下,对于圆形试样 L_r 应不大于 1.1 倍的 L_c ,对于方形或矩形横截面试样 L_r 应不大于 1.15 倍的 L_c 。

平行段应用过渡弧与试样夹持端连接,夹持端的形状应和试验机的夹持端相适应。对于圆形横截面试样过渡半径 r 应在 $0.25D \sim 1D$ 之间,对于方形或矩形横截面试样,过渡半径 r 应在 $0.25b \sim 1b$ 之间。

注:在特殊情况尤其是对于脆性材料,过渡半径可能大于 $1D$ 。

除非试样尺寸不够,原始横截面积(S_0)应不小于 7 mm^2 。

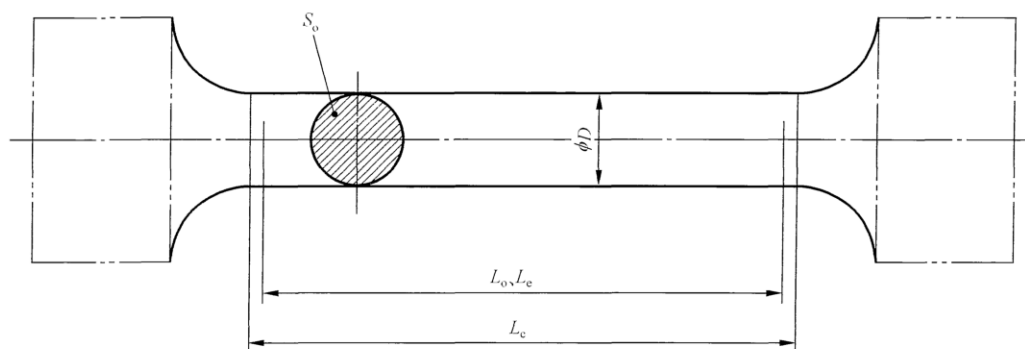
当采用在平行段的凸台上安装引伸计时,凸台的过渡半径可小于 $0.25d$ 。凸台过渡弧的选择宜尽量减小应力集中并且应检验确保圆弧没有过切。对于有凸台试样,凸台和夹持端之间的试样直径可能比原始标距内直径大 10%,这是为了确保试样断裂发生在试样标距之内。

试样夹持端与试样平行段的同轴度误差为:

- 对于圆形横截面试样, $0.005D$ 或 0.03 mm , 取二者较大者;
- 对于方形或矩形横截面试样, $0.005b$ 或 0.03 mm , 取二者较大者。

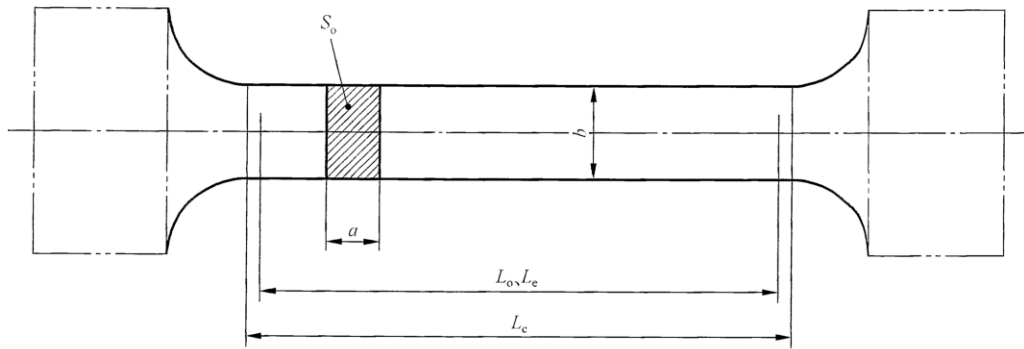
当氧化成为重要影响因素时,可选择较大原始横截面积(S_0)的试样。

原始参考长度的测量应准确至 $\pm 1\%$ 。断后参考长度的测量应准确至 $\pm 1\%$ 。

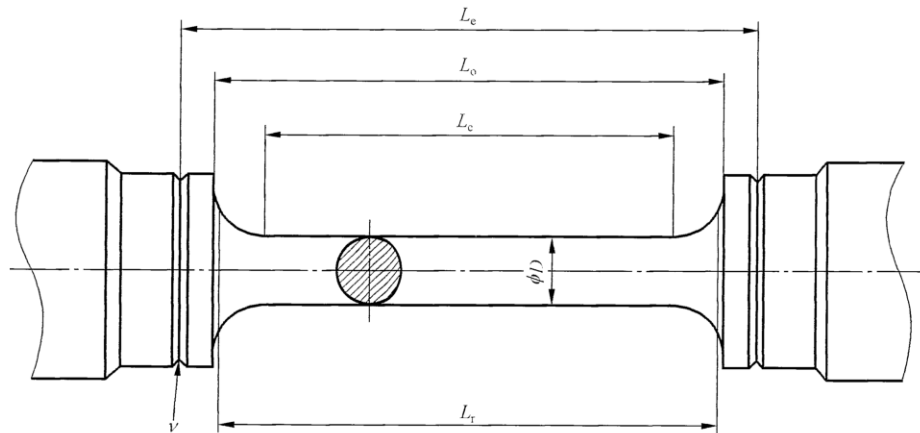


a) 标距在平行长度以内的台肩试样(圆形横截面)

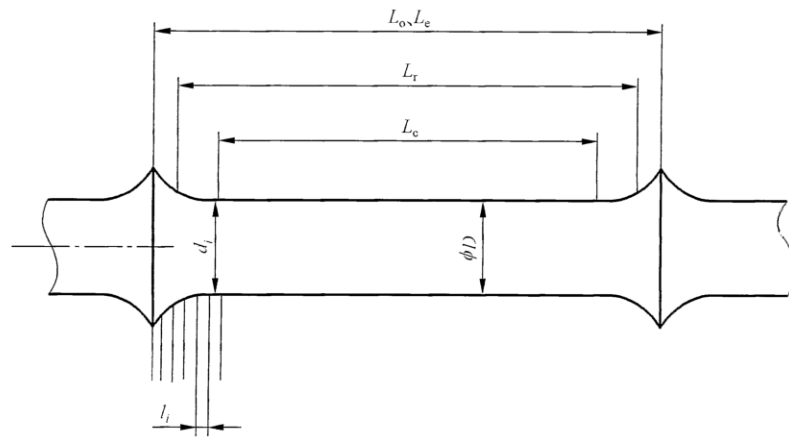
图 2 试样示例



b) 标距在平行长度以内的台肩试样(矩形横截面)



c) 标距在平行长度以外的台肩试样



d) 凸台试样

标引符号说明:

v ——V形凸台(角度在 55° 到 90° 之间,深度 0.15mm)。

注 1: L_r 按照适用的公式(11)或公式(12)来测定。

注 2: 夹持段的形状仅供参考。

图 2 试样示例(续)

7.1.2 缺口试样的形状和尺寸

对于缺口试样,缺口的位置和几何尺寸应由相关方协商确定,依据附录 C。

7.2 试样制备

试样应通过机加工的方法使得试样表面缺陷或残余变形降到最小。

圆形横截面试样的形状公差见表 3, 方形或矩形横截面试样的形状公差见表 4。

表 3 圆形横截面试样的形状公差

单位为毫米

标距部分直径 D	形状公差 ^a
$3 < D \leq 6$	0.02
$6 < D \leq 10$	0.03
$10 < D \leq 18$	0.04
$18 < D \leq 30$	0.05

^a 在整个平行长度上, 横向上测量试样直径的最大偏差。

表 4 方形或矩形横截面试样的形状公差

单位为毫米

试样平行长度的横截面宽度 b	形状公差 ^a
$3 < b \leq 6$	0.02
$6 < b \leq 10$	0.03
$10 < b \leq 18$	0.04
$18 < b \leq 30$	0.05

^a 在整个平行长度上, 横向上测量试样宽度的最大偏差。

建议最小原始横截面积处于平行长度或参考长度的中间 2/3 以内, 取二者较小值。

注: 为了避免断裂位置过于靠近标距长度的末端, 明智的做法是利用一半的形状公差, 使试件朝标距长度中心逐渐变细。

对于附录 C 中的缺口试样, 应检查缺口尺寸是否满足相关产品标准中对尺寸偏差的要求。

7.3 原始横截面积的测定

原始横截面积(S_0)是通过测定试样平行长度内的横截面尺寸计算而得到的。每个尺寸的测量应准确到 $\pm 0.1\%$ 或 0.01 mm, 取二者较大值。

应在标距长度方向上的 3 个位置测定试样的横截面积, 取最小横截面积来计算试样上按规定应力所施加的试验力。

7.4 原始标距 L_0 的标记

使用打点、标线以及其他方法标记原始标距的两端, 应注意不能使用导致试样提前断裂的缺口来标记原始标距。

经标记的原始标距应准确至 $\pm 1\%$ 。

注：有些情况下，为了帮助标记标距，会在试样表面画一条平行于试样纵轴的线，来标记原始标距。当使用带小凸台的试样时[见图 2c)和图 2d)]，标距 L_0 能选择不做标记。

7.5 参考长度 L_r 的测定

在本文件中，各种延伸率/伸长率值(见 3.11~3.22)表示为参考长度 L_r 的百分比。参考长度的值取决于试样几何形状和所用引伸计的类型。需要区分两类：

第 1 类：平行长度 L_c 以内的原始标距 L_0 和/或引伸计标距 L_e 。

如图 2a)和图 2b)所示，其中试样的直径在原始标距和引伸计标距内是恒定的(例如，由于原始标距标记的各自位置或仅连接到试样平行长度上的引伸计)。用于计算伸长率的参考长度 L_r 由公式(9)给出：

$$L_r = L_0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

类似的用于计算延伸率的参考长度 L_r 由公式(10)给出：

$$L_r = L_e \quad \dots\dots\dots(10)$$

第 2 类：平行长度 L_c 之外的原始标距 L_0 和/或引伸计标距 L_e 。

当引伸计安装在平行段的凸台或试样的肩部时，参考长度应按以下公式计算：

如图 2c)和图 2d)所示，其中具有直径变化的试样截面(如试件的肩部或用于引伸计应用的凸台)成为原始标距和引伸计标距的一部分。宜采用公式(11)计算延伸/伸长百分比的参考长度 L_r ，以考虑凸起引起的应变贡献[见图 2d)]。

$$L_r = L_c + 2 \sum_i \left[\left(\frac{D}{d_i} \right)^{2n} l_i \right] \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中：

n —— 试验温度下试验材料的应力指数(当 n 未知时，取 $n=5$)；

d_i —— 在各长度增量 l_i 的中心横截面上的试样直径；

l_i —— 过渡部分的长度增量(经验表明，取 $l_i=0.1$ mm 较合适)。

对于矩形或空心横截面，宜使用公式(12)：

$$L_r = L_c + 2 \sum_i \left[\left(\frac{S_0}{S_i} \right)^n l_i \right] \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中：

S_0 —— 平行长度内原始截面面积；

S_i —— 各长度增量 l_i 的试样横截面积。

对于设计的每类试样都应计算 L_r 。如果提供的试样尺寸在 7.1 和 7.2 规定的尺寸公差范围内，则不必对每个试样都重新计算。相反，当由于对不同材料试验或在大范围初始应力和试验温度内进行试验而导致应力指数 n 发生变化时，需要重新计算。

如果计算的参考长度和引伸计标距 L_e 或原始标距 L_0 的差值小于 0.5%，则 L_r 可选择为等于 L_0 或 L_e 。

8 试验程序

8.1 试样的加热

试样应加热至规定温度 T 。试样、夹持装置和引伸计都应达到热平衡。

除非产品标准另有规定，试样应在试验力施加前至少保温 1 h。对于连续试验，试样保温时间不应超过 24 h。对于不连续试验，试样保温时间不应超过 3 h，卸载后试样保温时间不应超过 1 h。

升温过程中,任何时间试样温度不应超过规定温度(T)所允许的偏差。如果超出,应在报告中注明。

对于安装引伸计的蠕变试验,可在升温过程中施加一定的初负荷(小于试验力的10%)来保持试样加载链的同轴(例如在 $t=0$ 之前)。

8.2 施加试验力

试验力应以产生最小的弯矩和扭矩的方式在试样的轴向上施加。

试验力至少应准确到 $\pm 1\%$ 。试验力的施加过程应无振动并尽可能地快速。

特别注意软金属和面心立方(FCC)材料的加力过程,因为这些材料可能会在非常低的负荷下或室温下发生蠕变。

当初始应力对应的载荷全部施加在试样上时作为蠕变试验开始($t=0$)并记录蠕变伸长(见图1)。

8.3 试验中断

8.3.1 有计划的中断

为了获得足够多伸长数据可多次周期性地中断试验。

8.3.2 多试样串联试验

其中一支试样断裂后,应将其从试样链中取出(允许更换新试样)并按8.1和8.2的规定继续试验。

8.3.3 组合试验

试验应首先进行连续应变测量,直到完成初始蠕变。如果需要,可将试样移至另一台机器,作为中断试验继续进行。见8.4.2和附录D。

8.3.4 意外中断

对于每次试验意外中断的原因例如:加热中断或停电,应在试验条件恢复后,记录在试验报告中。应确保不因试样收缩而导致试样上试验力的超载。建议在中断期间保持试样上的初始负荷。

注:在中断期间保持初始施加的力,以最大限度地减少对伸长测量的干扰。如有必要,在电源中断期间降低负载,并在恢复电源和达到测试温度时重新加载测试。谨慎的做法是保持至少10%的力,以确保加载链对中。

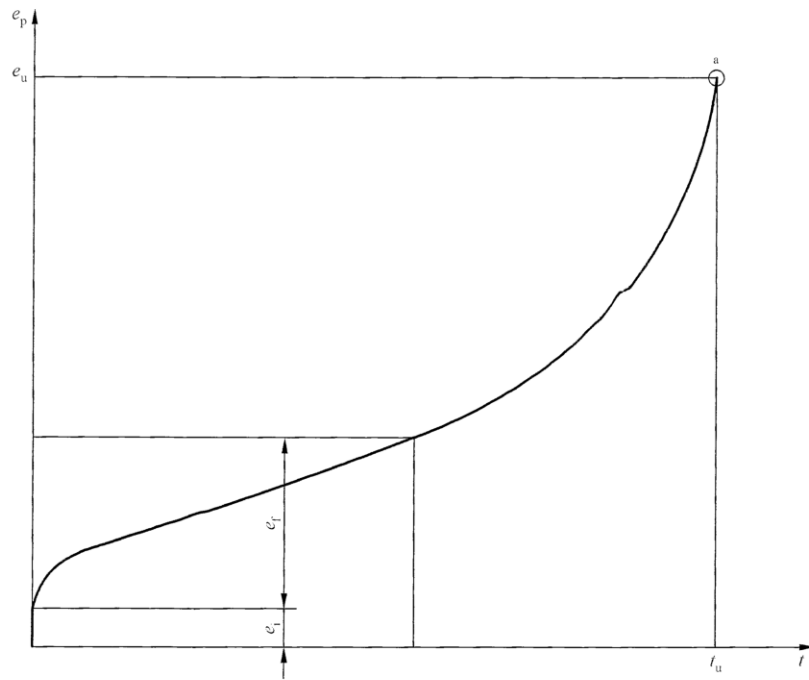
8.4 温度和伸长的记录

8.4.1 温度

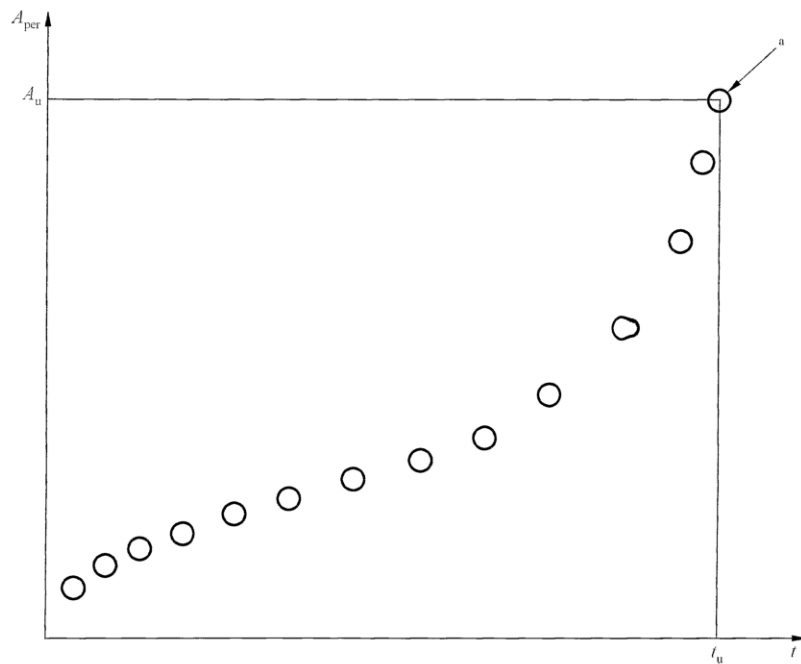
在整个试验过程中充分记录试样的温度来证实温度条件满足6.3.1的要求是非常重要的。

8.4.2 伸长和延伸

整个试验过程中应连续记录或记录足够多的伸长数据来绘制蠕变-时间曲线(见图3)。



a) 延伸-时间曲线



b) 伸长-时间曲线

^a 断裂。

图 3 蠕变-时间曲线

当只测定规定时间的蠕变延伸时,不必绘制蠕变-时间曲线。只测量初始和最终的延伸量。

对于不连续试验,周期性间断的次数应保证在蠕变-时间曲线(见图 3)上采用内插法测定的残余伸长率有足够的精度。

示例:对于长时间试验可按以下次序间隔时间来记录不连续蠕变应变量:100 h、250 h、1 000 h、2 500 h、5 000 h、10 000 h以后直至 40 000 h 每 10 000 h 记录一次。低于 3 000 h 的试验应增加 50 h 的测量间隔,对于低于 1 000 h 的试

验应增加 25 h 的测量间隔。

对于连续试验,应测定初始塑性延伸率 e_i 。

为了确定初始塑性延伸,应减去弹性延伸。应通过加载过程中的逐步加载测量程序来确定弹性延伸,或者可根据 GB/T 228.2 从高温拉伸试验中得出。如果塑性延伸率低于 1%,则弹性延伸率可替代地在加载后立即通过部分卸载程序来确定。

对于不连续试验,可依据 GB/T 228.2 采用与蠕变试验相同的加载速率以及试验温度为蠕变温度的高温拉伸试验来测定初始塑性延伸率 e_i 。

8.4.3 伸长(或延伸)-时间曲线

依据所记录的伸长或延伸和时间数据绘制伸长(或延伸)-时间曲线(见图 3)。

9 试验结果的处理

根据第 3 章给出的定义处理相关试验结果。

10 试验有效性

除非试验结果满足产品标准规定或客户要求,如果试样断裂位置发生在平行长度(L_e)或引伸计标距(L_e)以外则认为断后伸长结果无效。

11 试验结果

11.1 结果的表示

试验结果的表示应按以下规定和 GB/T 8170 进行修约:

——规定温度(T):	1 °C;
——圆形横截面试样的标距部分直径(D):	0.01 mm;
——长径比(L_r/D):	1 位小数;
——参考长度(L_r):	0.1 mm;
——初始应力(R_o):	3 位有效数字;
——时间(t_{ix} 、 t_{px}):	3 位有效数字;
——时间(t_u 、 t_{un}):	1%或最接近的整小时(取较小值);
——延伸率(e_e 、 e_i 、 e_{ti} 、 e_f 、 e_{fu} 、 e_k 、 e_p 、 e_{per} 、 e_{pu}):	3 位有效数字;
——残余伸长率(A_{per}):	3 位有效数字;
——蠕变断裂后伸长率(A_u):	2 位有效数字;
——蠕变断裂后断面收缩率(Z_u):	2 位有效数字。

11.2 不确定度

由于不确定度是依据试验材料本身特性以及试验条件得出,所以不可能得出一个准确的结果。附录 E 给出了某些材料不确定度的评估范例。

12 试验报告

12.1 产品标准中没有覆盖的材料信息应按照 12.2 或 12.2 和 12.3 的要求报告。试验结果的表示和外

推图表见附录 D。

12.2 试验报告应包括以下信息：

- 本文件编号；
- 试验类型(连续或不连续试验)；
- 材料和试样标识；
- 试样的类型和尺寸(包括比例系数 k)，包括使用的参考长度；
- 规定温度以及如果超出偏差范围的显示温度；
- 施加的初始应力；
- 施加的恒试验力或恒应力；
- 试验结果；
- 断裂位置(当断在平行段中间 2/3 以外时)；
- 初始塑性伸长(或延伸)率；
- 试验意外中断和恢复情况；
- 任何影响试验结果的情况，例如偏离了规定允许偏差。

12.3 在试验委托时也可包括以下信息：

- 试验机类型(单头试验机、多头试验机等)；
- 加力时间；
- 依据足够数据绘制的伸长(延伸)-时间曲线；
- 加力产生的弹性伸长(延伸)率(见 8.4.2)；
- 卸载和卸载时间产生的弹性和滞弹性伸长率(见 8.4.2)；
- 记录任何超出 6.3.1 中规定的温度允许范围的显示温度值；
- 引伸计类型；
- 试验期间热电偶的漂移值；
- D.6 中建议的有关试样材料的附加信息。

12.4 本文件定义的试验条件和限定不应受测量结果的不确定度影响而调整(见附录 E)。

12.5 不应将试验结果与估测的测量不确定度组合起来评定产品是否符合相关产品标准(见附录 E)。

附录 A

(资料性)

关于热电偶漂移的信息

A.1 概述

热电偶产生的电动势会随着长期高温暴露而变化,这种现象通常称为“漂移”。

如果已知特定类型热电偶在规定蠕变试验温度下的漂移特性,则随着时间的推移,该信息可用于调整蠕变试验设备上的加热炉温度,以确保试验保持在表 2 给出的限值内。需指出的是,漂移是影响不确定度的几大因素之一。

A.2 漂移的后果

许多蠕变实验室使用铂电阻温度计控制蠕变炉的温度,同时用热电偶监测试样的温度。一般来说,铂电阻温度计不易漂移,因此蠕变试验温度保持在标准规定的公差范围内。

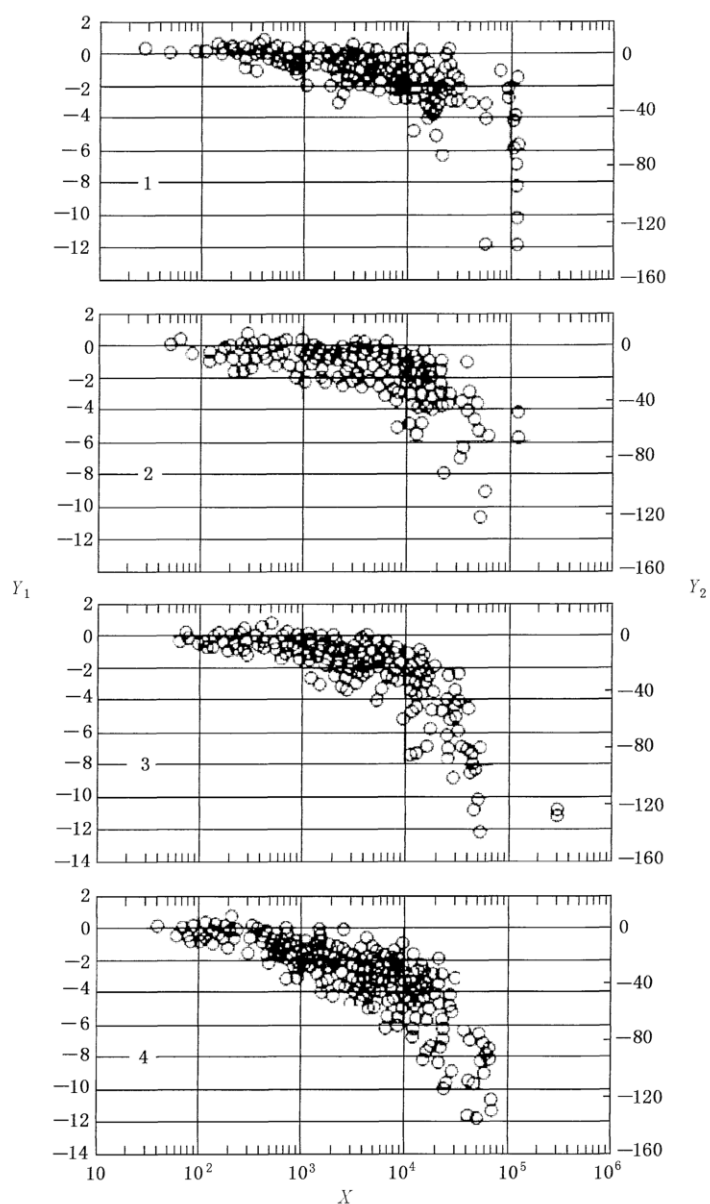
在现阶段进行的大多数蠕变试验中,炉温由附在试样上的热电偶控制。因此,如果控制热电偶的电动势由于漂移而下降,温度控制器的电子设备感测到电动势的减小,并自动增加加热炉的功率,以便将指示的电动势恢复到设定值。因此,如果热电偶输出向下漂移,蠕变试验的真实温度实际上会有系统地升高。根据漂移的大小,试验可能偏离试验标准中规定的试验偏差。

试验温度持续升高的结果是测量的蠕变寿命将比在恒温条件下进行的试验更短,蠕变速率也更高,因此,用于安全关键部件设计的此类蠕变数据是偏保守的。

A.3 漂移数据

在 20 世纪 60 年代至 70 年代,蠕变实验室开始意识到热电偶漂移可能导致试验不符合标准中规定的温度公差,因此在蠕变试验完成后重新校准热电偶成为惯例。在 20 世纪 60 年代的欧洲,人们认识到 K 型(铬/铝)热电偶容易产生重大漂移,在很大程度上不利于在长期蠕变试验中使用。

英国报告了 R 型热电偶在 400 °C~850 °C 的温度范围内的蠕变试验后校准数据。尽管数据显示有大的分散性,但在 600 °C 时,向下的漂移趋势约为 $-3\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ 。此外,在日本,记录了 R 型和 S 型热电偶的类似数据。日本国家金属研究所(NRIM)/日本国立材料研究所(NIMS)蠕变数据表(CDS)项目仍在进行中,并更新了 PR 型热电偶(铂铑 13%铂)的数据变化。在 2005 年的 ECCC 会议上,提供了在 500 °C~900 °C 之间的 R 型热电偶蠕变后的数据。图 A.1 显示了一个示例图,可以看出,现在可用于超过 100 000 h 的寿命有几个结果。报告了高达 12 °C 的漂移值。



标引符号说明：

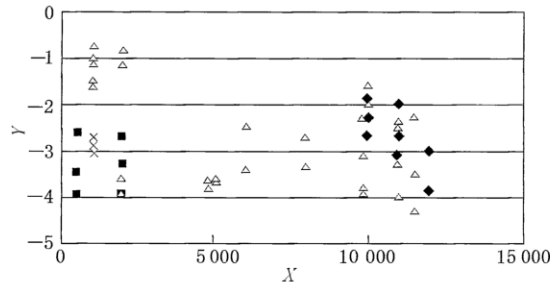
X——蠕变试验持续时间，单位为小时(h)；

Y₁——漂移校准，单位为摄氏度(°C)；

Y₂——漂移校准，单位为微伏(μV)。

图 A.1 蠕变试验后测得的 PR 型热电偶漂移数据

此外，在英国国家物理实验室(NPL)进行蠕变试验，R 型热电偶重新校准后，发布了漂移数据的一些有限数据，见图 A.2。



标引符号说明:

◆——750 °C;

■——800 °C;

△——850 °C;

×——900 °C;

X——蠕变试验持续时间,单位为小时(h);

Y——漂移校准,单位为摄氏度(°C)。

图 A.2 蠕变试验后测量的 R 型热电偶漂移数据

N 型热电偶目前广泛用于设备监测和蠕变试验,但迄今为止,尚未在蠕变试验所用的温度范围内发布系统的漂移数据。为了解决这一缺陷,高温机械测试委员会对装有护套的 N 型热电偶进行了一些漂移测量,分别在法国电力公司(EDF)(初始温度为 650 °C)和英国国家物理实验室(NPL)(初始温度为 750 °C)进行试验。

在已运行约 25 000 h 的法国电力公司(EDF)机构下进行的等温测量的初步结果表明出现约 2 °C 的漂移,其值不明显低于 K 型热电偶的测量值。

蠕变试验中使用的热电偶性能信息也在其他文献中出现。

A.4 结束语

一般来说,蠕变试验温度越高,漂移越大。很明显,除非对漂移留有公差,否则许多蠕变试验将不符合表 2 中规定的公差。

附录 B

(资料性)

热电偶校准方法

对于热电偶的校准,推荐两种方法。两种方法的目的是为了保证在校准温度下热电偶显示的电动势尽可能地与 GB/T 16839.1 在该温度下的参考表保持一致(必要时对所有系统误差进行修正)。两种方法都使用标准热电偶,这可直接溯源到国家标准。新的热电偶宜满足 GB/T 16839.1 中的 1 级要求或相同级别。测温装置的校准宜分开进行或在热电偶校准期间进行。

第一种方法是基于热电偶的原位校准,即热电偶的校准是在实际使用的炉子或热电偶插入至校准炉中至相同的深度且沿热电偶丝的温度梯度也相同。原位校准确定的误差用于修正指定热电偶温度。如果误差超过与插入深度相关的不确定度关联的误差极限,则热电偶废弃。在热电偶校准过程中宜观察并尽量减小由于不同的埋入深度造成的参考热电偶的漂移。

第二种方法是在校准炉中将热电偶埋入与试验炉相近的深度。在校准时,如果误差超出实验室的允差(必须包括插入深度的影响)时,宜剪去热电偶末端并重新焊接和/或退火后,再重新校准。如果再次校准后,仍然超出校准允差,则热电偶废弃。

附录 C

(规范性)

V形和钝环形缺口试样的蠕变试验

C.1 总则

在拉伸蠕变试验中采用的环形缺口试样可用于：

- a) 在较大应力集中的条件下反映材料性能的特征，例如：诸如螺纹根部，零部件截面的急剧变化；
- b) 多轴应力条件下的材料性能。

在 C.2 中讨论的采用 V 形缺口的试样可用于(a)模型，而在 C.3 中讨论的钝或者半环形缺口的试样用于(b)模型。

C.2 V形缺口试样

在拉伸和蠕变试验中测定 V 形缺口试样的试验时间，来反映诸如零件螺纹部分的材料特性。通常，采用的是同一试样上的较大直径处加工出与试样平行段相同横截面积的缺口的复合试样（见图 C.1）。此类试样主要用于测定材料是否“缺口强化”也就是首先断在试样的平行段，或者“缺口弱化”也就是试样断在缺口部分。显然，使用复合试样不能测定具体的缺口敏感性系数，如果要测定缺口敏感性系数必须在相同的净截面应力条件下对光滑和缺口试样分别试验。

对于表 C.1 规定以外的试样尺寸应制成 D_n 与 d_n 之比在 1.33~1.34 之间， d_n 与 r_n 之比在 38~46，缺口底部半径 r_n 的允许偏差为 ±12.5%。

表 C.1 弹性应力集中系数 $K_t = 4.5 \pm 0.5$ 环形缺口试样尺寸

单位为毫米

缺口底径 d_n 允许偏差 ±0.02	过渡段直径 D_n 允许偏差 ±0.1	缺口底部半径 r_n	缺口底部半径 r_n 允许偏差
$3 < d_n \leq 6$	$4 < D_n \leq 8$	$0.07 < r_n \leq 0.14$	±0.02
$6 < d_n \leq 10$	$8 < D_n \leq 13.3$	$0.14 < r_n \leq 0.24$	±0.03
$10 < d_n \leq 18$	$13.3 < D_n \leq 23.9$	$0.24 < r_n \leq 0.43$	±0.05
$18 < d_n \leq 30$	$23.9 < D_n \leq 40$	$0.43 < r_n \leq 0.72$	±0.09

有关应力集中系数的其他信息，参阅参考文献[33]和[34]。

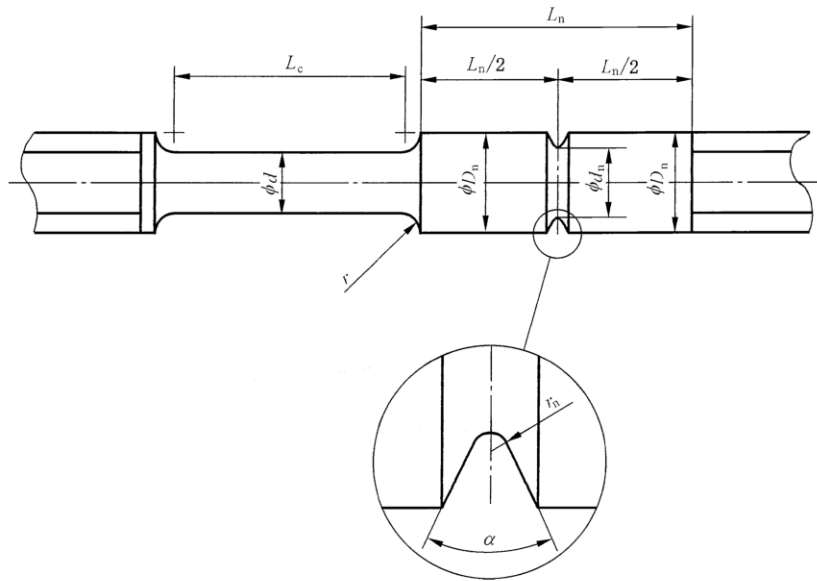
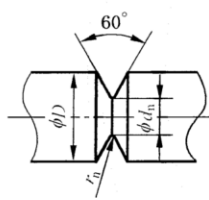


图 C.1 缺口和无缺口复合试样

原先各国标准对缺口几何尺寸有不同规定,本文件建议使用图 C.2 中 E 类型缺口尺寸。以适用于缺口强化与缺口弱化的性能评定。



类型	DIN	BS	E
D/d_n	1.25	1.41	$\sqrt{1.25 \times 1.41} = 1.33$
D_n/r_n	50	35	$\sqrt{50 \times 35} = 42$

图 C.2 DIN、BS 和 E 类型的试样几何尺寸

弹性应力集中系数采用公式(C.1)计算:

$$K_t = 1 + \left[\frac{1}{2} \times \frac{\frac{r_n}{d_n}}{\frac{D_n}{d_n} - 1} + 2 \times \frac{r_n}{d_n} \times \left(1 + 2 \times \frac{r_n}{d_n} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (C.1)$$

圆形截面的缺口试样示意图见图 C.3。

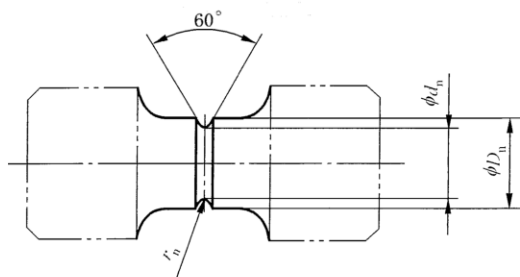


图 C.3 圆形截面的缺口试样示意图

C.3 钝环形缺口

钝环形缺口的拉伸蠕变试样是在多轴应力下评价材料行为的简易低成本方法,此外这种应力状态也与工业制成零部件的服役条件相类似。关于应力集中系数的其他信息可在参考文献中找到。这种缺口试样最早由布里奇曼(Bridgman)于1952年提出。20世纪90年代初,高温力学试验委员会(HTMTC)的一个工作组制定了《缺口棒试样蠕变断裂试验规程》(简称《试验规程》)。该文件随后根据欧盟资助的一个项目进行了修订。

更新的《试验规程》涵盖了蠕变应变测量,可使用轴向或径向引伸计进行测量。关于缺口蠕变试样的径向应变测量和径向引伸计的校准,也发表了更多信息。

工业生产中需要研究材料在三轴拉伸应力条件下材料的蠕变性能时钝环形试样可以提供比V形缺口试样更宽的范围以及给出在这些情况下蠕变变形是如何累积的。缺口拉伸试验是最直接的方法来实现这个目的,尤其是通过改变缺口轮廓来获得较宽的应力水平的范围。三种经典的缺口轮廓见图C.4。

使用这种缺口生成的数据的解释很复杂,韦伯斯特(Webster)等对此进行了详细讨论。

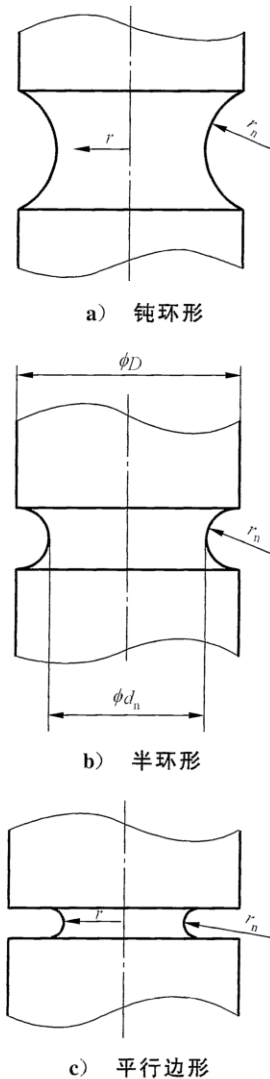


图 C.4 三种可能的布里奇曼缺口

附录 D

(资料性)

结果的表示和图解法外推

D.1 总则

本附录总结了重要信息,这些信息可以帮助用户根据其需求选择合适的测试类型(即不间断、中断或组合),并应用欧洲蠕变协作委员会(ECCC)制定的既定方法。

D.2 强度值的符号及其计算

D.2.1 应变

在大多数情况下,滞弹性延伸率 e_k 是可以忽略不计的,塑性延伸率 e_p 与残余延伸率 e_{per} 之间没有差异。

D.2.2 蠕变断裂强度(持久强度)

蠕变断裂强度是指在规定温度 T ,在试样上施加应力 R 。对应的恒定拉伸力,经过一定的试验时间(蠕变断裂时间 t_u)所引起断裂的应力。

对于蠕变断裂强度用符号 R_u 表示,并以蠕变断裂时间 t_u/h 作为第二角标,试验温度 $T/^\circ\text{C}$ 为三角标的符号来表示。

示例:对于蠕变断裂时间 $t_u=100\,000\text{ h}$ 、试验温度 $T=550\text{ }^\circ\text{C}$ ($550\text{ }^\circ\text{C}$ 下 $100\,000\text{ h}$ 蠕变断裂强度)所测定的蠕变断裂强度用以下简短符号表示:

$$R_{u\,100\,000/550}$$

D.2.3 规定塑性应变强度

规定塑性应变强度是指在规定温度 T ,在试样上施加应力 R 。对应的恒定拉伸力,经过一定的试验时间(达到规定塑性延伸时间 t_{pr})所能产生预计塑性应变的应力。

对于规定塑性应变强度用符号 R_p 表示,并以最大塑性应变变量 $x/\%$ 作为第二角标,达到应变量的时间为三角标,试验温度 $T/^\circ\text{C}$ 为第四角标的符号 R_p 来表示。

示例:对于最大塑性应变变量为 0.2% ,达到应变时间为 $1\,000\text{ h}$,试验温度 $T=650\text{ }^\circ\text{C}$ 的规定塑性应变强度用以下简短符号表示:

$$R_{p\,0.2\,1\,000/650}$$

D.3 在单头或多头试验机上的蠕变试验

光滑(无缺口)试样的蠕变试验可以在不间断模式下进行,通常在单头蠕变试验机中进行,或在中断模式下,通常在多头蠕变试验机中进行。

在伸长率测量的中断模式下,将试样从试验机中取出并冷却。随后,将试样重新安装、加热并再次加载。

或者,蠕变试验可以在多头试验机上做,每个试样都有连续的延伸测量。

为了获得关于初级蠕变的足够信息,可以在具有连续延伸测量和高分辨率的单头试验机中测试试样,直到达到一定应变,然后将试样重新放置到多头试验机,以测试中断模式下的断裂。

初级蠕变信息是必要的,因为缺口处的局部应力会由于塑性变形而导致应力重新分布。在高温下的蠕变变形有助于应力的重新分布。为了重新计算部件中的应力再分配,建议使用考虑第一阶段和第

二阶段的蠕变方程。

不间断模式下蠕变试验的试验结果通常显示在对数百分比塑性延伸率-时间曲线[见图 D.1a)]和/或对数百分比蠕变延伸率-时间曲线[见图 D.1b)]中。

间断模式下蠕变试验的试验结果通常显示在对数百分比残余伸长率-时间曲线[见图 D.1c)]中。

组合测试技术的试验结果如图 D.1d)所示。

蠕变断裂时间的塑性延伸率 e_{pu} 可通过在蠕变断裂时间 t_u 长度增加的不间断蠕变试验中的连续测量来确定。相应的 e_{fu} 值可通过蠕变断裂时间下的蠕变延伸率来确定。

注：在评估初级蠕变完成之前，试样不会从单头蠕变试样机移动到多头蠕变试样机。

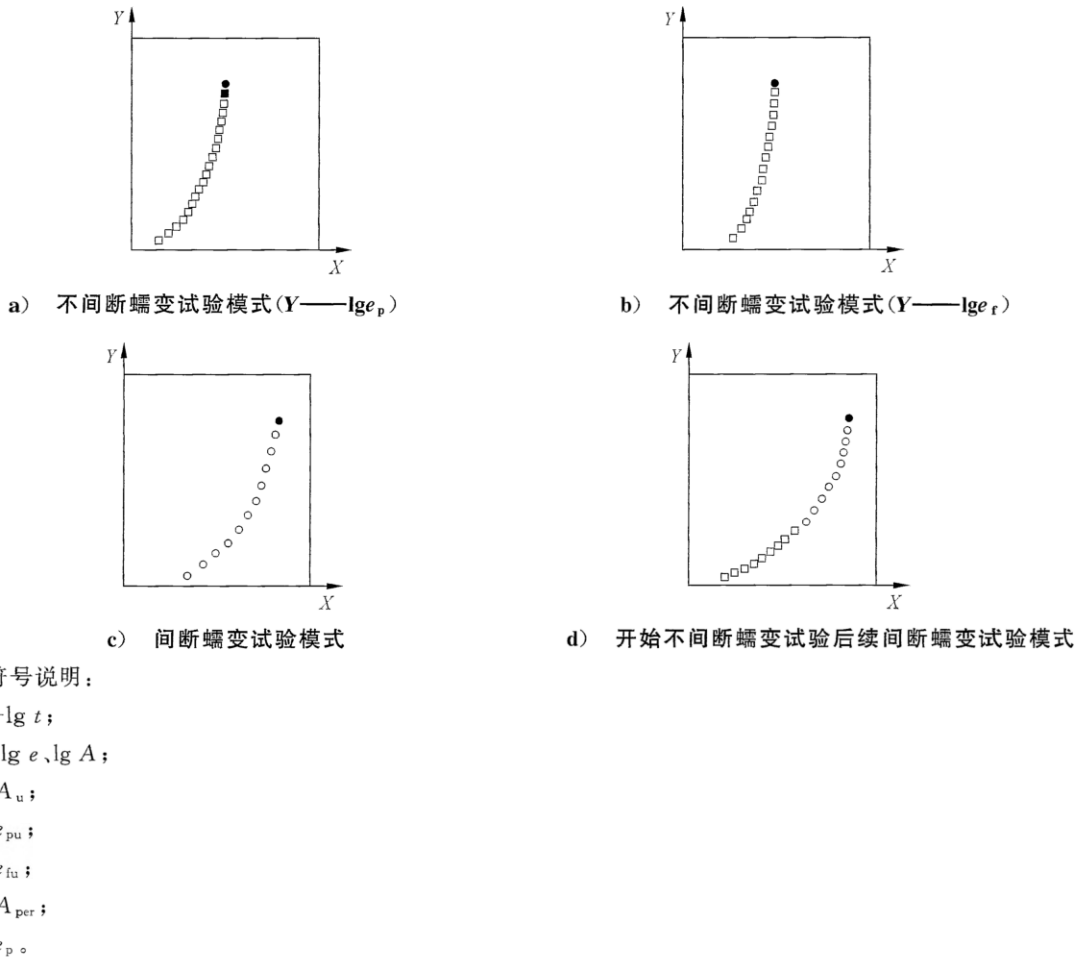
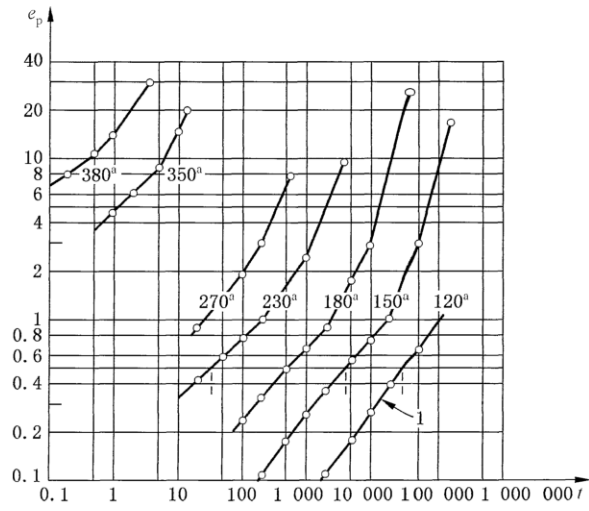


图 D.1 蠕变曲线示例

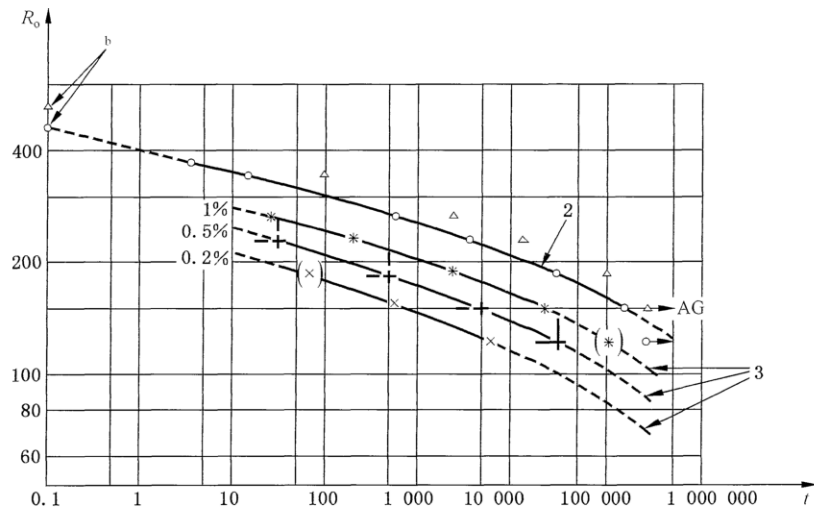
D.4 评价

D.4.1 总则

对于在一个试验温度下单个材料的试验结果应置于一系列的图表中评价(见图 D.2 和图 D.3)。在这些图中外推曲线用虚线表示，外推点用圆括号表示。在 D.5 给出外推数据的注意事项。

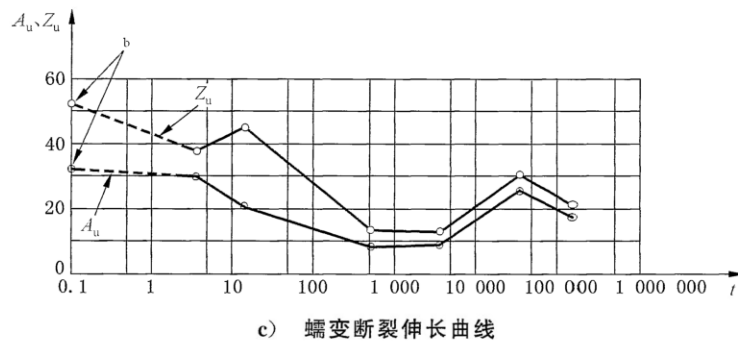


a) 蠕变曲线



b) 蠕变断裂和规定塑性应变强度曲线

图 D.2 恒定温度和恒定试验力的结果表达示例图



标引序号和符号说明：

- | | |
|----------------|----------------|
| 1——蠕变曲线； | △——缺口试样(已断)； |
| 2——蠕变断裂曲线； | ○——试验进行中； |
| 3——规定塑性应变强度曲线； | △→AG——试验停止,未断； |
| ○——光滑试样(已断)； | --——外推曲线。 |

()中的数据点是外推数据。

横坐标轴： t (小时)。

纵坐标轴： e_p (%)； R_o (MPa)； A_u 、 Z_u (%)。

^a 初始应力。

^b 高温拉伸试验性能。

图 D.2 恒定温度和恒定试验力的结果表达示例图 (续)

D.4.2 对数坐标蠕变曲线

在双对数坐标图上绘制塑性延伸率 e_p 或残余伸长率 A_{per} 与时间 t 对应的蠕变曲线[见图 D.2a)]。

蠕变曲线也可用光滑曲线或一系列与试验数据有关的直线绘制。可从图中得到规定塑性延伸时间 t_{pr} 。

D.4.3 蠕变断裂曲线

应变时间对应的应变量,例如 $t_{p0.2}$,与试验初始应力 R_o 。在双对数坐标上绘制蠕变应变曲线,见图 D.2b)。该曲线应是光滑曲线,从图中可以得到规定应变强度 $R_{pr,t,T}$ 。

蠕变断裂时间 t_u 与初始应力 R_o 。绘制蠕变断裂曲线,曲线中应做平滑处理。

从图中可以得到蠕变断裂强度 $R_{u,t,T}$ 。

高温拉伸试验得到的断裂强度以及达到各个应变的应力值也可示于图中某个时间点,如 $t=0.1$ h。在这种情况下,图中必须有适当的指示。

此外,缺口试样的断裂时间和初始应力 R_o 。也可作为提示在图中绘制。通过这种方法可以对材料性能进行附加评价。

D.4.4 蠕变断裂伸长曲线

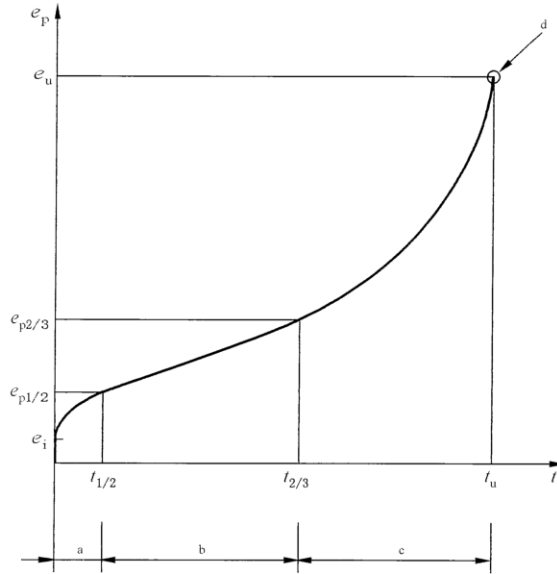
蠕变断裂伸长曲线是绘制蠕变后伸长率 A_u 和断面收缩率 Z_u 与断裂时间 t_u 的图[见图 D.2c)]。

通过高温拉伸试验获得的断后伸长率和断面收缩率可与图中特定时间例如 $t=0.1$ h 对应。这个方法可以验证图形的正确与否。

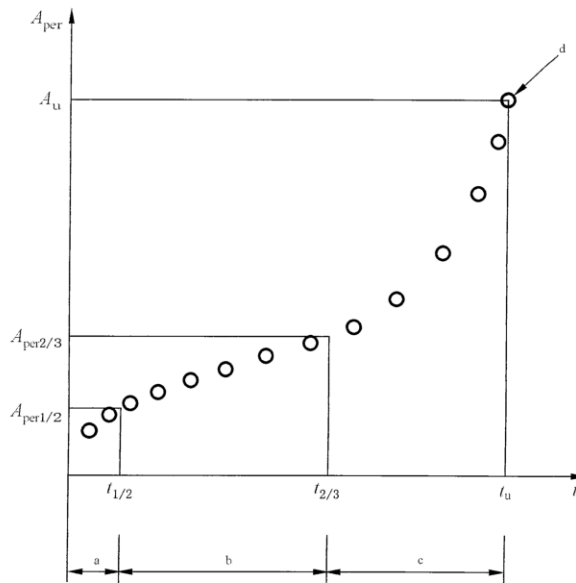
D.4.5 线性坐标蠕变曲线

为了描述蠕变曲线,在横纵线性坐标图上绘制塑性延伸率 e_p 与时间 t 对应曲线图[见图 D.3a)]。对于残余伸长率 A_{per} ,见图 D.3b)。蠕变曲线也可用光滑曲线或一系列与试验数据有关的直线绘制。

从曲线的斜率可得出与时间增量 Δt 相关的蠕变速率 $\Delta e_p / \Delta t$ [见图 D. 3a)], 也可以得到总的最小蠕变速率 $\Delta e_p / \Delta t_{\min}$ 。对于残余伸长率 A_{per} , 可以测定 $\Delta A_{\text{per}} / \Delta t$ 蠕变速率, 如图 D.3b) 所示。过渡时间 $t_{1/2}$ 和 $t_{2/3}$, 标志着从蠕变第一阶段到蠕变第二阶段的过渡($t_{1/2}$)和从蠕变第二阶段到蠕变第三阶段的过渡($t_{2/3}$), 可从该曲线中得出。不是从所有线性坐标下的蠕变曲线都能分辨出蠕变的第 1、2、3 阶段的。



a) 线性坐标下的延伸-时间曲线



b) 线性坐标下的伸长-时间曲线

- a 第一阶段。
- b 第二阶段。
- c 第三阶段。
- d 断裂。

图 D.3 线性坐标的蠕变示意图

D.5 外推方法

D.5.1 总则

在蠕变数据处理过程中往往需要确定最长试验时间的 $q_e = t_{1e}/t_1$ [见图 D.4a)] 倍所对应的蠕变断裂强度或规定应变强度值。系数 q_e 称为外推时间比, 通常不超过 3。

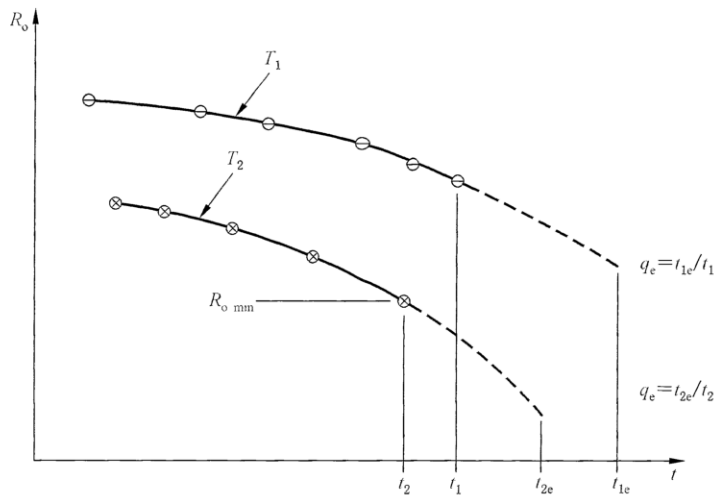
对于相同材料建议标明外推时间比 q_e 并且指出外推蠕变强度是否低于最小初始应力水平 $R_{0\min}$ 。当外推蠕变强度低于最小初始应力水平 $R_{0\min}$ 时, 外推结果的不确定度通常较大。

在外推过程中宜考虑微结构或蠕变断裂变形值的变化, 他们与时间和/或试验温度有关。外推过程需作说明。

D.5.2 图解法外推和蠕变断裂图

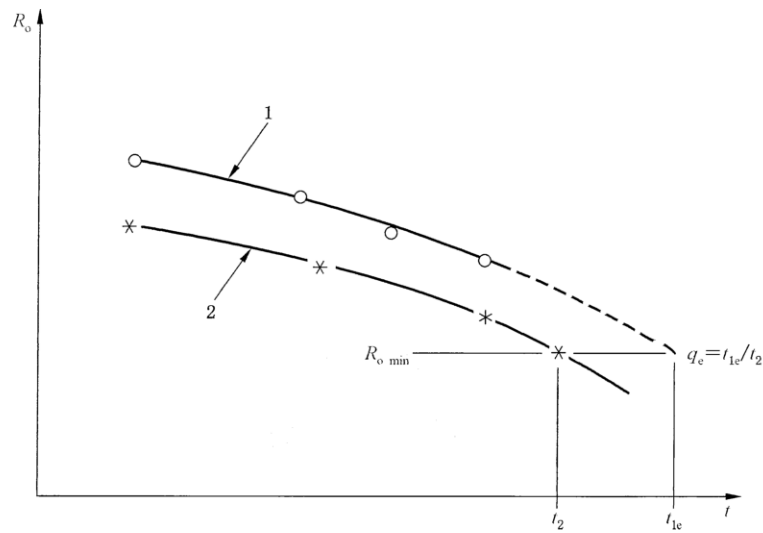
通常采用蠕变断裂曲线和/或蠕变应力曲线的延长的图解法来外推结果。相同试验温度下的邻近曲线随时间的转变 [见图 D.4b)] 或不同试验温度, 择优选较高试验温度的不同曲线 [见图 D.4c)], 都是有助于外推的有用提示。从蠕变应变曲线的延长线可以获得相同的信息。从 ECCC 文件中可以得到更多的建议。

如果已经借助相邻曲线进行了图解法外推, 应采用较小的外推时间与试验时间的比值 q_e [见图 D.4b) 和图 D.4c)]。

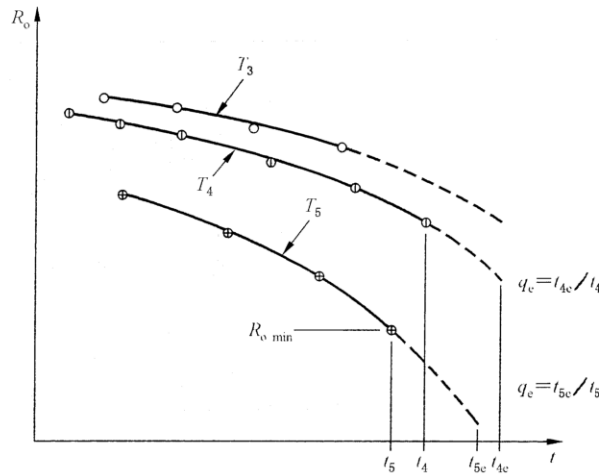


a) 蠕变断裂曲线 $T_1 < T_2$

图 D.4 蠕变应变(断裂)图解法外推示例



b) 蠕变断裂和蠕变应变曲线, $T = \text{常数}$



c) 蠕变断裂曲线, $T_3 < T_4 < T_5$

标引序号说明:

- 1——蠕变断裂曲线;
- 2——蠕变断裂-蠕变应变曲线。

注: 图中下角标 e 表示外推。

图 D.4 蠕变应变(断裂)图解法外推示例 (续)

D.5.3 时间-温度参数外推法

通常, 将应力 R_0 的对数与时间-温度参数绘图。时间-温度参数由试验温度、蠕变断裂时间或达到规定应变的时间导出。数据点由所谓“主曲线”拟合。

建议依据时间和试验温度所获得的试验结果来得到最佳的时间-温度参数。此外, 较长试验时间的结果对曲线的拟合起着重要作用。需注意的是分散小的数据不能保证外推结果的准确性。

可以从主曲线上相关的蠕变断裂强度或应变时间的结果外推至给定的试验温度下的蠕变断裂强度或应变时间。为了提高外推结果的准确性, 外推结果宜绘制在蠕变(断裂)图中同时与测量结果相比较。

D.5.4 其他外推法

其他基于参数或代数主曲线的新的高级评估方法见 ECCC 文件。

D.6 试验报告及附加信息

试验报告建议包含以下附加信息：

- 关于试样材料的信息；
- 制造厂；
- 铸件数量、铸件重量；
- 生产过程；
- 铸造板坯坏料重量、零件重量；
- 测量装置规格，半成品；特性测量，半成品型式；
- 试样在铸造板坯/零件的位置(取样位置参见 GB/T 2975)；
- 化学成分，热处理制度；
- 室温拉伸试验结果；
- 冲击试验结果(夏比、艾氏等)；
- 高温拉伸试验结果；
- 硬度；
- 微观结构；
- 适用时：外推过程及外推时间比。

附录 E

(资料性)

依据不确定评定指南(GUM)来估计不确定度的方法

E.1 总则

测量不确定度的分析对于识别测量结果的不一致性的主要来源是有用的。基于本文件和本文件早期版本的产品标准和材料特性数据库对测量不确定度有固有贡献。而不恰当地根据测量不确定度进行调整而判断产品不合格是很有风险的。因此,根据下面的步骤推导不确定度仅是参考,除非客户有特别要求。

E.2 目的

本附录给出了利用已知蠕变性能的材料根据本文件评估测量不确定度的例子。应该指出利用本方法是不可可能给出标准的不确定度值的,因为不确定度的分量既有与材料相关的也有与材料不相关的。因此,在能够进行测量不确定度的计算之前,有必要对该种材料与温度和应力的关系有一定的了解。

欧洲有证蠕变参考物质 CRM 425 应用于测量不确定度的评定,来评估满足本文件的符合性。

E.3 不确定度的说明

E.3.1 背景

使用认证测试实验室的客户有时会要求对测试结果准确性的不确定度进行总体估计。这符合国际标准化组织(ISO)和欧洲标准化委员会(CEN和ECISS)宣布的政策,即所有与测试技术有关的新标准都应包含“不确定度声明”或基于相关标准中规定的公差计算测试方法准确性的方法。同样,大多数质量保证系统要求对测量的不确定度进行估计。

此外,国际标准化组织标准委员会还提出了两个重要文件。ISO 5725 系列和 ISO/IEC Guide 98-3。这些文件主要使用 1993 年 VIM 中给出的术语和词汇。

1995 年,BIPM、IEC、IFCC、ISO、IUPAC、IUPAP 和 OIML 等权威标准机构联合发布了《测量不确定度表示指南》(以下简称“GUM”)。2008 年,GUM 作为 ISO/IEC Guide 98-3 重新发布,并进行了轻微修改。这是一份基于严格统计方法的综合性文件,用于汇总各种来源的不确定度。它的复杂性为许多组织提供了生产 GUM 简化版本的动力,例如美国国家标准与技术研究所(NIST)、英国的认证服务(UKAS)和英国的测量和试验协会(BMTA)。这些不同的文件都给出了如何基于“不确定度方案”概念估计测量不确定度的指导。更多信息可以参考《初学者指南》和《测试中的不确定度估计》获得。此处采用的拉伸不确定度估算方法类似于蠕变试验不确定度的估算方法,该方法与蠕变认证参考材料 CRM BCR 425 相关。作为欧盟资助的不确定度项目的一部分,现在也发布了全面的不确定度声明,并发布了一份涵盖蠕变不确定度的附加文件,作为 CEN 认可的技术研讨会协议,CWA 15261-3,该协议将很快以 ISO/TR 15264 的形式提供。

以下分析是基于 GUM 的概念提出的一种评定蠕变不确定度的简便方法,如图 E.1 所示。一次测量的总的 uncertainty 是用适当方法求和所有 uncertainty 分量。很有必要对所有分量进行量化,在最初的评估阶段,要决定哪些分量是可以忽略的。对于材料领域的大多数实际测量时,可以忽略的分量可以定义为小于最大 uncertainty 分量五分之一。GUM 概括了两种评定 uncertainty 分量的方法:A 类和 B 类。A 类通过重复测量足够多次测得,例如多于九次,传统的数学分析可以用于标准偏差的测定。

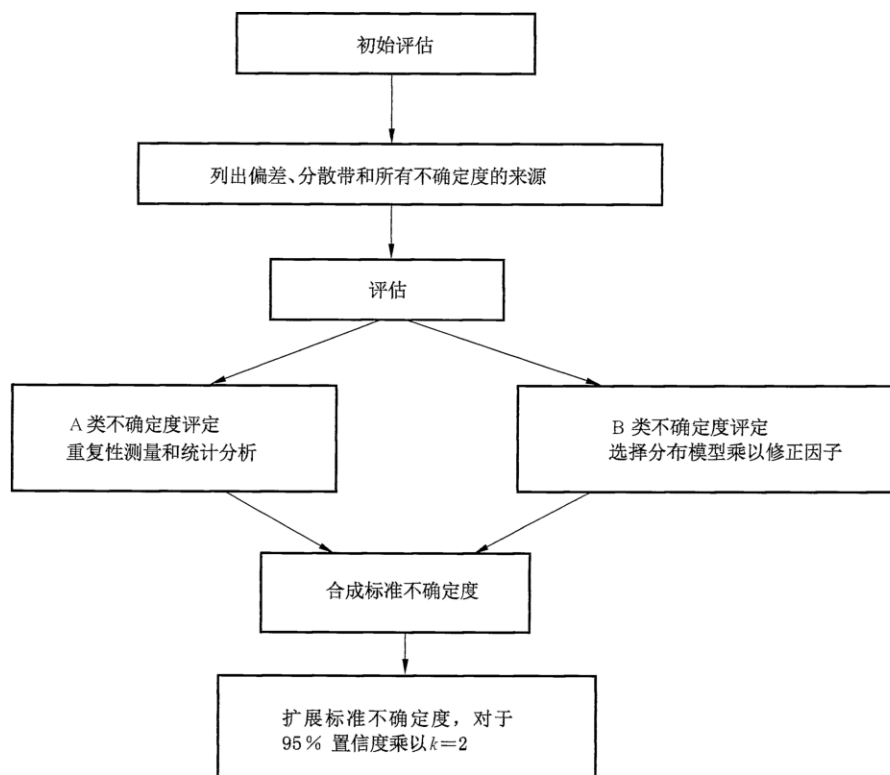
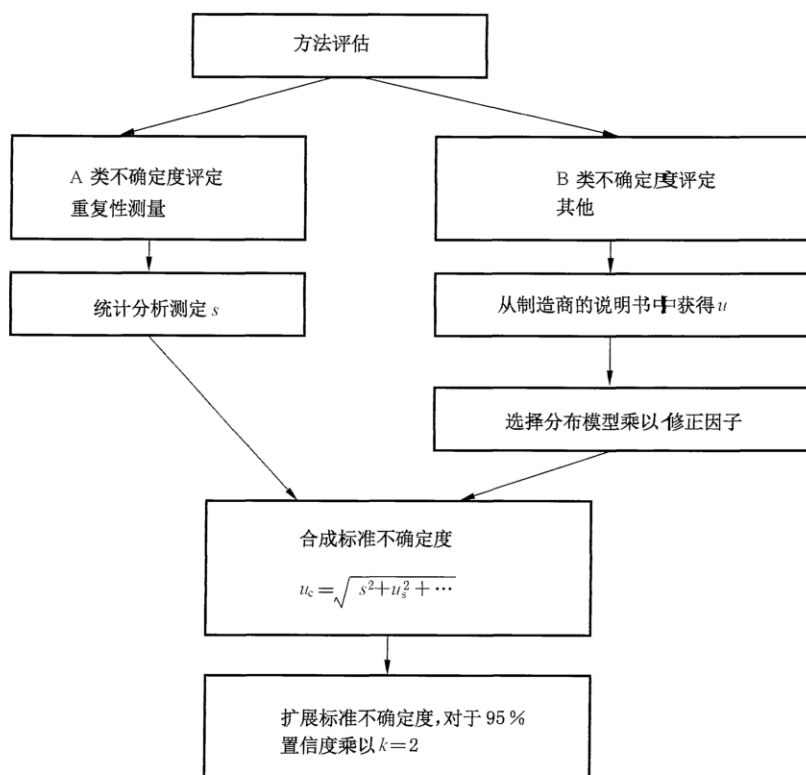


图 E.1 测量不确定度的评估步骤

B类不确定度评估方法不同于A类，例如利用标准中规定的允许差、测量数据、厂商的说明书、校准证书以及大多数情况下对于不同分量之间关系的简单模型和分量的类似分布模型。例如对于标准中规定的允许差 $\pm a$ ，如果缺乏其他了解，可以适当地利用矩形分布模型来考虑，其标准不确定度为 $u_s = a/\sqrt{3}$ 。如果用三角分布考虑更合适，其标准不确定度变成 $u_s = a/\sqrt{6}$ 。下一步通常是计算合成不确定度。扩展不确定度 U_E 是将合成不确定度乘以包含因子 k ，对于95%置信度水平的 $k=2$ 、 $U_E = 2u_c$ 。该程序如图E.2所示。



标引符号说明：

- s —— 统计分析的标准偏差；
- u —— 不确定度；
- u_c —— 合成不确定度；
- u_s —— 标准不确定度；
- k —— 包含因子。

图 E.2 依据 GUM 测量不确定度的详细评估步骤

E.3.2 蠕变试验不确定度的说明

对于大多数金属材料,在有限的应力范围内,最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 与施加的应力 σ 和温度 T 有关,可以通过公式(E.1)计算得到。

$$\dot{\epsilon}_{\min} = A\sigma^n \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

- A —— 材料常数；
- n —— 诺顿蠕变定律中的应力指数；
- Q —— 蠕变激活能；
- R —— 通用气体常数。

注：就附录 E 而言,使用了上述符号,其定义与表 1 中列出的符号不同。

由于对于大多数材料,在第一近似值下,蠕变断裂时间 t_u 与最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 的倒数成正比,因此可以看出, t_u 和 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 的误差是由于公式(E.1)的两个独立分量中 σ 和 T 的误差造成的。试验标准中规定了 σ 和 T 的公差;然而,参数 n 和 Q 取决于材料。因此,不可能引用适用于根据本文件测试的所有材料的总体不确定度值。

使用公式(E.1),在其他地方已经表明,对于固溶镍基合金 Nimonic 75(CRM BCR 425),蠕变激活

能 $Q=345 \text{ kJ/mol}$, 应力指数 $n=6$, 以及本文件中允许的温度和应力公差, 在 95% 置信水平下的扩展测量不确定度 $U_E=20.2\%$ 。

同样, 格拉纳彻(Granacher)和霍尔兹沃思(Holdsworth)编制了不确定度评估方案, 针对不连续和连续蠕变得到 0.2% 和 1% 的塑性应变对应的时间, 由应变测量系统的准确度得到了不确定度。

研究的材料主要包括两类铁素体钢: 500 °C 下的 2 1/4Cr-1Mo 和 550 °C 下的 1Cr-1Mo-0.5Ni-0.25 V, 一类马氏体钢 600 °C 下的 12Cr-1Mo-0.3V 和一类奥氏体钢 600 °C 下的 17Cr-13Ni-2Mo-0.2N, 试验时间在 30 000 h 以内。测量不确定度将允许差按矩形分布来处理并用 95% 的置信区间来表达, 见表 E.1。

表 E.1 $t_{p0.2}$ 和 t_{p1} 的不确定度范围

不连续试验/%	连续试验/%
27~38	27~32

注意还有其他因素影响蠕变性能的测量, 例如试样弯曲、试样的夹持方法等。然而由于没有足够的数用于评价这些影响, 目前在评定不确定度时考虑它们的影响是不可能的。还需注意到这仅仅是对测量技术不确定度的估测, 不能成为对由于材料的不均匀性导致试验结果内禀分散性是否接受的依据。

这里给出的不确定度可以认为是判断一个实验室进行试验是否满足本文件的上限。

E.4 一种蠕变试验的参考材料

E.4.1 总则

近几年, 在力学性能试验领域使用有证参考物质的好处已被大家所接受。一种用于蠕变试验的参考物质见表 E.2。

表 E.2 CRM BCR 425 蠕变参考物质的有证值

性能 ^a	有证值 ^b	不确定度 ^c
4.00 h 下的蠕变速率	$71.8 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$	$5 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$
t_{p2}	278 h	16 h
t_{p4}	557 h	30 h

^a 试验条件: $T=600 \text{ °C}$, $R_o=160 \text{ MPa}$ 。
^b 该值为 9 个实验室, 每个实验室分别进行了 5 次独立测量的算术平均值。
^c 该不确定度为^b中定义的平均值 95% 置信度下的不确定度。

E.4.2 利用 CRM 425 评估不确定度

利用 CRM 425 进行不确定度评估的结果详见表 E.3。对于 Nimonic 75(CRM BCR)(425), 根据本文件在 600 °C 下进行的试验具有 $\pm 3 \text{ °C}$ 的温度允许偏差, 应力测量允许差 ($\pm 1\%$), 根据 GUM 计算的预期总不确定度约为 20.2% (见 E.3.2)。如果使用平方根方法将测试产生的允许差添加到认证值的不确定度中, 则可以计算单个测试的数据可能位于的总误差带, 如表 E.3 所示。

表 E.3 利用 CRM 425 蠕变参考物质来评价蠕变试验可接受的范围

参数	有证值	95%置信度下的 不确定度	试验允许差 ^a	合成不确定度 ~21 %	
				值	范围
400 h 下的 蠕变速率 (10^{-6} h^{-1})	72	5	± 14.5	± 15.3	56.7~87.3
t_{p2}/h	278	16	± 56.2	± 58.4	219.6~336.4
t_{p4}/h	557	30	± 112.5	± 116.4	440.6~673.4

^a 规定温度允许偏差 $\Delta T = \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、规定应力允许偏差 $\Delta R = 1\%$ 、应力指数 $n = 6$ 和蠕变激活能 $Q = 345 \text{ kJ/mol}$ 。

E.5 镍基单晶在 1 100 $^\circ\text{C}$ 下蠕变试验的不确定度

先进的燃气轮机需要在超高温下操作。燃气轮机中使用的材料的蠕变特性需要在高温下进行评估和验证。这意味着建立一种适用于 1 000 $^\circ\text{C}$ 以上温度的蠕变测试方法非常重要。

为了建立高温合金在 1 000 $^\circ\text{C}$ 以上温度下蠕变断裂性能的测试方法,新材料中心(NMC)的高温蠕变和蠕变断裂测试标准化委员会启动了圆罗宾试验计划(RRT)。9 个研究机构和公司参加了该计划方案。测试的样品为镍基单晶高温合金(材料牌号:TMS-82+;见表 E.4),由美国国家材料研究院高温材料 21 项目开发。TMS-82+ 在 137 MPa 和 1 100 $^\circ\text{C}$ 的试验条件下,在 5 个实验室进行了 3 次重复蠕变断裂试验(见表 E.5)。之前报告的这些试验条件下的断裂时间为 340 h。根据 GUM 对 1 100 $^\circ\text{C}$ 蠕变试验结果的不确定度进行了评估。表征单晶高温合金在 1 000 $^\circ\text{C}$ 以上温度下的蠕变和蠕变断裂性能的指南来源于其他参考文献报道的 RRT。

表 E.4 镍基单晶高温合金 TMS-82+ 的化学成分(质量分数)

材料	Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Re	Ni
TMS-82+	7.8	4.9	1.9	8.7	5.3	0.5	6.0	0.1	2.4	基体

固溶处理:1 300 $^\circ\text{C}$,1 h \rightarrow 1 320 $^\circ\text{C}$,5 h 氩气风扇冷却。

两步时效处理:1 100 $^\circ\text{C}$,4 h 氩气风扇冷却;870 $^\circ\text{C}$,20 h 氩气风扇冷却。

表 E.5 TMS-82+ 镍基单晶合金在 1 100 $^\circ\text{C}$ 和 137 MPa 下 5 个实验室的蠕变断裂数据

性能	数据范围	平均值	总的不确定度
蠕变断裂时间/h	238.6~460.8	333.9	± 59
伸长率/%	6.3~13.4	10.3	± 5.2
断面收缩率/%	24.7~38.9	33.7	± 8.2

对于通常 95%置信度下,包含因子为 2 的不确定度。

参 考 文 献

- [1] GB/T 2975 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备
- [2] GB/T 34104 金属材料 试验机加载同轴度的检验
- [3] ISO 286-2 Geometrical product specifications (GPS)—ISO code system for tolerances on linear sizes—Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts
- [4] ISO 5725 (all parts) Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results
- [5] ISO/IEC Guide 98-3 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
- [6] ISO/IEC Guide 99 International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM)
- [7] ISO/IEC 17025 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- [8] ASTM E633 Standard Guide for Use of Thermocouples in Creep and Stress-Rupture Testing to 1 800 °F (1 000 °C) in Air
- [9] CWA 15261-3; 2005 Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials—The evaluation of uncertainties in creep testing
- [10] Loveday M.S., Dyson B.F.. Constant Stress Creep Testing; When is it Necessary? Proc. 4th Int. Conf. on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures. Ed. B Wilshire and R W Evans, 1990, pp. 941-950.
- [11] Loveday M.S.. Creep testing standards and the influence of Bending. Materials at High Temperatures, 2008 December, 25 (4) pp. 277-286.
- [12] Loveday M.S., Gibbons T.B.. Measurement of Creep Strain: a) The Influence of Order-Disorder Transformations in Ni-Cr-base Alloys and b) A Code of Practice for the Use of Ni-base Alloy Extensometers. Materials at High Temperatures, 2007, 24 (2) pp. 113-118.
- [13] Ferrero C. ANOVA Statistical Procedure to Verify Transducers Metrological Characteristic Long Term Stability, IMG C Technical Report, Torino, Italy, 2005.
- [14] Ferrero C.. The interlaboratory comparison to recognize the equivalence in accreditation. In: Advances in Experimental Mechanics. McGraw-Hill, 2004, pp. 572.
- [15] European Creep Collaborative Committee Data Validation Assessment Procedures, Edition 2, ECCC-WG1 Recommendation Volume 3 (Issue 3), Acceptability Criteria for Creep, Creep Rupture, Stress Rupture and Stress Relaxation Data, Pub. ERA Technology Ltd, Leatherhead, Surrey, England, 1996.
- [16] Desvaux M.P.E.. The practical realisation of temperature measurement standards in high temperature mechanical testing. In: Measurement of high temperature mechanical properties of materials, (Loveday M.S., Day M.F., Dyson B.F., eds.), HMSO London, 1982.
- [17] Brookes C., Chandler T.R.D., Chu B., Nicrosil-nisil; a new high stability thermocouple for the industrial user. Measurement and Control, 1985, 18 pp. 245-248.
- [18] Rusby R.L., Carter D.F., Beswick A.. An evaluation of sheathed Nicrosil/Nisil thermocouples up to 1 300 °C. Materials at High Temperatures, 1992, 10 (3) pp. 193-300.
- [19] Coggiola G., Crovini L., Mangano A.. Behaviour of KP, KN, Nicrosil and Nisil

thermoelectric wires between 0 °C and 750 °C. *High Temp. High Press.* 1988, 20 pp. 419-432.

[20] Loveday M. S.. A short note concerning the 'drift' of thermocouples during creep testing. *The FESI Bulletin*, Vol.7 No.1, Spring 2013, pp. 26-30, <https://www.fesi.org.uk/fesipublishing/bulletin/>

[21] Granacher J., Oehl M., Preussler T.. Comparison of interrupted and uninterrupted creep rupture tests. *Steel Res.* 1992, 63 pp. 39-45.

[22] Granacher J., Scholz J.. Über die langzeitige Temperaturgenauigkeit von Zeitstandprüfanlagen. *Materialprüf.* 1973, 15 pp. 116-123.

[23] Desvaux M. P. E.. The practical realization of temperature measurement standards in high temperature mechanical testing. Chapter 7, 1982, pp. 91-112. *Measurement of high temperature mechanical properties of materials*. Ed: M S Loveday, M F Day & B F Dyson. HMSO, London. ISBN 0 11 4800499.

[24] Hacon J., Murray J. D.. Developments in equipment and techniques for creep-rupture testing. *Metallurgia*, May 1968, pp. 221-227.

[25] Itoh H., Egashira M., Miyazaki H., Monma Y., Yokoi S.. Drift of PR Thermocouples in Longterm Creep Testing. *Tetsu To Hagane.* 1986, 72 pp. 1944-1951.

[26] Miyazaki H., Kimura K.. Degradation of Type PR and R Thermocouples during Long Term Creep Test. pp. 314-325, *Proc ECCC Creep Conference*, London Sept 2005, in *Creep & Fracture in High Temperature Components; Design & Life Assessment Issue* edited by I. A. Shibli, S. R. Holdsworth, G. Merckling Pub: DEStech Publications, Lancaster, Pennsylvania, USA. ISBN 1 932078-49-5.

[27] Monma Y., Itoh H., Egashira M., Baba E., Miyazaki H., Tanaka C.. Origin of Drift in PR Thermocouples after Long-term Creep Testing. *Tetsu To Hagane.* 1989, 75 pp. 665-672.

[28] Yokoi S., Itoh H., Murata T., Egashira M., Miyazaki H.. Calibration drift of Pt13 thermocouples during long time creep testing. *Trans ISIJ.* 1980, 20 (6) p. 243.

[29] Granacher J.. IfW, TH Darmstadt, Report on Creep, Creep Rupture and Stress Rupture Testing Standards and Practices, Appendix 1 to Vol. 3, prepared for ECCC-WG 1, 5524/WG1/105 [Issue 1] 23.08.1994.

[30] Granacher J.. IfW, TH Darmstadt, Temperature measurement and thermocouple calibration system for type S thermocouples for creep rupture testing in the high temperature test division of IfW and new proposal for footnote 7 of Vol. 3, 01.04.1996.

[31] Scholz A., Schein M., Mueller F.. Drift Measurement Results—Comparison of available data. IfW, Technische Universität Darmstadt, 2016.

[32] Petersen C.. *Forsch.-Ing. Wes.* 1951, 17 (1) pp. 16-20.

[33] Kloos K. H., Diehl H.. Einfluss der Kerbgeometrie auf das Zeitstandverhalten des Stahls 21CrMoV5 7 in unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen, *Arch. Eisenhüttenwes.* 50, 1979, Nr. 6, pp. 255-260.

[34] Filippini M.. Stress gradient calculations at notches. *Int. J. Fatigue.* 2000, 22 pp. 397-409.

[35] Scholz A., Schwienheer M., Morris P. F.. European Notched Test Piece for Creep Rupture Testing. *Proc. of Tagung Werkstoffprüfung 2003*, Bad Neuenahr, 2003, pp. 308-314.

[36] Bridgman P. W.. *Studies in large plastic flow and fracture*. McGraw Hill, New York, 1952.

[37] Webster G. A., Aplin P. F., Cane B. J., Dyson B. F., Loveday M. S.. A Code of Practice for Notched Bar Creep Rupture Testing: Procedures and Interpretation of Data for Design—Chapter 15, pp. 295-330. In: *Harmonisation of Testing Practice for High Temperature Material* (Eds.

Loveday, M.S. and Gibbons, T.B.), Elsevier Applied Science, 1992.

[38] Webster G.A., Holdsworth S.R., Loveday M.S., Perrin I.J., Purper H.. A Code of Practice for Conducting Notched Bar Creep Rupture Tests and for Interpretation of the Data, ESIS P10-02, ISBN 1616-2129, 2001.

[39] Al-Abed B., Timmins R., Webster G.A., Loveday M.S.. Validation of a Code of Practice for Notched Bar Creep Rupture Testing: Procedures and Interpretation of Data for Design. Materials at High Temperatures. 1999, 16 (3) pp.143-158.

[40] Webster G.A., Holdsworth S.R., Loveday M.S., Nikbin K., Perrin I.J., Purper H. et al., A Code of Practice for Conducting Notched Bar Creep Tests and for Interpreting the Data. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2004, 27 (4) pp.319-342.

[41] Loveday M. S.. Considerations on the Measurement of Creep Strain in Bridgman Notches. Materials at High Temperatures. 2004, 21 (3) pp.169-174.

[42] Kerr D.C., Nikbin K.M., Webster G.A., Walters D.J.. Creep Strain Determination Across the Root of a Notch. In: 'Local Strain and Temperature Measurements in Non-Uniform Fields at Elevated Temperatures. (Eds. J. Ziebs, J. Bressers, H. Frenz, D. R. Hayhurst, H. Klingelhoff and S. Forrest), pp. 263-273, Proc Symp. held in Berlin, 14-15 March 1996. Pub: Woodhead, Cambridge, UK, 1996.

[43] Loveday M. S., Rodger G.. Calibration and Traceability of Notch Creep Strain Measurements. Materials at High Temperatures. 2004, 21 (3) pp.161-167.

[44] Spindler M. W., ed. European Creep Collaborative Committee, ECCC Recommendations, Volume 1, Issue 7, Creep Data Validation and Assessment Procedures Overview, ECCC-Documents, 5/5/14, 2014, <https://www.eccc-creep.com/eccc-recommendations-volumes>

[45] Spindler M. W., ed. European Creep Collaborative Committee, ECCC Recommendations, Volume 5, Part 1a. Issue 6, Generic Recommendations and Guidance for the assessment of full size creep rupture data sets, ECCC-Documents 7/5/14, 2014 <https://www.eccc-creep.com/eccc-recommendations-volumes>

[46] Wilshire B., Scharning P.J., Hurst R.. A new approach to creep data assessment. Mater. Sci. Eng. A. 2009, 510-511 pp.3-6.

[47] Linn S., Scholz A., Michelfeit S., Schwienheer M., Oechsner M., Klenk A.. Evaluation of Extrapolation Methods for Creep and Creep Rupture Data, ECCC Creep & Fracture 2014, 3rd International ECCC Conf., 5-7 May, 2014, Rome, Italy, Proceedings CD-ROM, contribution No.4.

[48] The Certification of Nimonic 75 alloy as Creep Reference Material CRM 425. D Gould & M S Loveday, 1990, EUR 13076. Commission of the European Community. <https://crm.jrc.ec.europa.eu/p/40455/By-material-matrix/BCR-425-NIMONIC-75-FOR-CREEP-TESTING/BCR-425>

[49] Taylor B.N., Kuyatt C.E.. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note 1297, 1993.

[50] M 3003, The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations. Pub. UKAS, Third Edition, 2012.

[51] BMTA. Estimating Uncertainties in Testing. Pub. British Measurement and Testing Association, PO Box 101, Middlesex, TW11 0NQ, 1994.

[52] Bell S.. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. Measurement Good Practice Guide No. 11, issue 2, ISSN 1386-6550, Pub: National Physical Laboratory, Teddington, TW11 0LW. March 2001, <https://www.npl.co.uk/resources/gpgs/all-gpgs>

- [53] Birch K.. Estimating Uncertainties in Testing. Measurement Good Practice Guide No. 36, Pub: British Measurement and Testing Association/National Physical Laboratory, Teddington, TW11 0LW, UK, ISSN 1368-6550, March 2001.
- [54] Loveday M.S.. Room Temperature Tensile Testing: A Method for Estimating Uncertainty of Measurement. CMMT (MN) 048. National Physical Laboratory, UK, 1999.
- [55] Loveday M.S.. Creep Testing: Reference Materials and Uncertainty of Measurement. In: The Donald McLean Symposium "Structural Materials: Engineering Applications Through Scientific Insight". (Eds. Hondros, E.D. and McLean, M.), Pub. Inst. of Materials, London, 1996, pp.277-293.
- [56] Kandil F. A., Lord J. D., Bullough C. K., Georgsson P., Legendre L., Money G. et al.. The UNCERT Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, CD-ROM, available from NPL, ISBN 0-0946754-41-1, 2000.
- [57] Acceptability Criteria for Creep, Creep Rupture, Stress Rupture and Stress Relaxation Data, (Eds. Granacher J., Holdsworth S. R.), European Collaboration Creep Committee—Working Group 1, Volume 3, Pub. ERA Technology, 1994.
- [58] Gould D., Loveday M. S.. A Reference Material for Creep Testing, Chapter 6, Harmonisation of Testing Practice for High Temperature Materials, (Eds. Loveday, M. S. and Gibbons, T. B.), Chapman and Hall, London (formerly published by Elsevier Applied Science), 1992, pp.85-109.
- [59] Hino T., Kobayashi T., Koizumi Y., Harada H., Yamagata T.. In: Development of a New Single Crystal Superalloy for Industrial Gas Turbines, Superalloys 2000. (Pollock T. M. et al., eds.). TMS, 2000, pp.729-36.
- [60] Yamazaki M., Yagi K., Tanaka R.. Creep rupture properties of single crystal nickel-base superalloy at 1 100 °C, A report on a Round Robin test in Japan, Uncert 2003 Conference Oxford, 2003, pp.1-4.
- [61] Yamazaki M., Yagi K., Tanaka R.. Uncertainties in creep testing of single crystal nickel-base superalloy at 1 100 °C, Uncert-AM conference Session III. MPA Stuttgart, 2003.
-